

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

---

**Л.К. Бурулько, Ю.Н. Дементьев**

# **ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

## **Электроприводы промышленных механизмов и устройств**

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

Издательство  
Томского политехнического университета  
2012

УДК 62-83(075.8)  
ББК 31.29я73  
К12

**Бурулько Л.К.**

К12        Электрооборудование промышленности. Электроприводы промышленных механизмов и устройств: учебное пособие / Л.К. Бурулько, Ю.Н. Дементьев; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 180 с.

В учебном пособии рассмотрены основные системы регулируемых электроприводов, являющихся основой исполнительной части современных рабочих машин и технологических комплексов предприятий учреждения и организаций.

Пособие подготовлено на кафедре электропривода и электрооборудования, соответствует программе дисциплины «Электрооборудование промышленности» и предназначено для студентов ИДО, обучающихся по специальностям направления 140400 «Электроэнергетика и электротехника».

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

*Рецензенты*

Доктор технических наук, профессор ТУСУР

*В.А. Бейнарович*

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

*Н.А. Михневич*

ГОУ ВПО НИ ТПУ, 2012

© Бурулько Л.К., Дементьев Ю.Н. 2011

© Оформление. Издательство Томского  
политехнического университета, 2012

## ВВЕДЕНИЕ

Создание нового и модернизация действующего технологического оборудования промышленных предприятий идет по пути внедрения в электрооборудование промышленности вентильных преобразователей и регулируемых электроприводов, а также использование компьютерных и информационных средств автоматизации.

Автоматизация современных технологических объектов сопровождается применением большого числа электромеханических систем, с помощью которых решаются задачи повышения качества продукции и эффективности технологического оборудования. Во многих случаях такие системы управления следует рассматривать как взаимосвязанные системы, так как в составе технологического оборудования могут быть десятки электроприводов, объединяемых по цепям управления, питания и нагрузки. Эти взаимосвязи реализуются через систему функциональных устройств технологического объекта. Помимо традиционных применений регулируемые электроприводы совместно с технологическими устройствами выступают в виде средств регулирования технологических переменных: уровня, давления, влажности, температуры, дозирования, производительности и др.

Можно выделить следующие общие тенденции развития электроприводов, имеющие устойчивый характер:

1. Постоянно расширяющееся применение регулируемых электроприводов в промышленном оборудовании, транспорте, авиакосмической технике, медицине, бытовой технике с целью достижения новых качественных результатов в технологии.

2. Замена нерегулируемых электроприводов регулируемыми в энергоемком оборудовании, таком как насосы, компрессоры, вентиляторы и др., с целью энергосбережения.

3. Распространение блочно - модульных принципов построения электроприводов, информационных средств, средств управления и систем управления в целом.

4. Динамичная компьютеризация электроприводов, механизмов, агрегатов и комплексов и новая идеология проектирования систем.

5. Дальнейшее развитие методов каскадного (подчиненного) управления, получившего широкое распространение в электроприводах и органично переносимого на управления технологическими переменными и

интегральными показателями качества обработки, переработки и производства вещества.

б. Активное развитие и внедрение систем диагностики, обслуживания, визуализации технологических процессов и процессов управления.

Любой современный технологический комплекс – это автоматизированный технологический комплекс (АТК). В соответствии с технологическим процессом работа АТК определяется задающей программой. Осуществляются контроль и регулирование электромагнитных, механических, технологических переменных, показателей качества готовой продукции (переработанного вещества); автоматическая оптимизация обобщенных показателей качества работы АТК; контроль состояния электротехнического, механического и технологического оборудования.

При проектировании современных АТК, в составе которых может быть несколько десятков взаимосвязанных электромеханических систем, управление в значительной степени связаны с выбором вариантов конструктивных решений технологических агрегатов, исполнительных механизмов, управляемых электроприводов, компьютерных средств управления, информационных устройств.

Для того чтобы получить необходимую структуру и параметры АТК, как динамического объекта, необходимо хорошо знать возможности его основных компонентов и тенденции их развития. В число основных компонентов АТК входят:

*Преобразователи электроэнергии*, которые выполняются, главным образом, как полупроводниковые преобразователи в виде управляемых и управляемых выпрямителей, автономных инверторов напряжения и тока, инверторов, ведомых сетью, преобразователей частоты с непосредственной связью, фильтрокомпенсирующих устройств. Виды преобразователей и их комбинации определяются типом электродвигателя и задачами управления, мощностью, диапазоном регулирования, необходимостью рекуперации энергии в сеть, влиянием преобразователей на питающую сеть.

*Электромеханические преобразователи (ЭМП)*. Развитие ЭМП происходит в направлениях: конструирование машин с учетом их совместной работы с управляемыми полупроводниковыми преобразователями; применение новых магнитных материалов; совершенствование или исключение контактных узлов; использование интенсивных методов охлаждения машин; развитие работ по высокотемпературной сверхпроводимости.

*Механические преобразователи.* Тенденции развития механических преобразователей связаны с упрощением механических компонентов технологического оборудования и усложнению электротехнических компонентов. При проектировании нового технологического оборудования стремятся к использованию «коротких» механических передач и безредукторных электроприводов.

*Информационные устройства.* Это устройства преобразования, хранения, распределения и выдачи информации, которые входят в состав модулей программируемых контроллеров. Тенденции развития этих устройств связаны с получением информации, а именно:

1. Расширяющееся применение разнообразных датчиков для контроля электромагнитных, механических и технологических переменных, качества изделий.

2. Стремление к использованию методов прямого измерения контролируемых переменных и к установке датчиков в непосредственной близости от исполнительных органов рабочей машины.

3. Применение датчиков для контроля состояния электротехнического, механического и технологического оборудования. Использование информации для диагностики и оповещения операторов через компьютерные системы управления о состоянии оборудования.

В современном оборудовании контролю подвергаются: температура в коммутационных аппаратах, узлах электродвигателей, управляемых преобразователях, опорах механизмов; уровни вибраций во всех функционально значимых механических узлах системы; зазоры в механических передачах; усилия и упругие моменты в механизмах; износ технологического оборудования.

*Компьютерные системы управления* электроприводами, механизмами, технологическими агрегатами и комплексами выполняются по единой идеологии с гибким варьированием аппаратных и программных средств. В общем случае в состав систем входят: программируемые контроллеры, модули интеллектуальной периферии, системы визуализации и обслуживания, средства коммутаций, программаторы, персональные компьютеры.

## Глава 1 ОСНОВНЫЕ СИСТЕМЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Под *электроприводом* понимается «*электромеханическая система*, состоящая в общем случае из взаимодействующих преобразователей электроэнергии, электромеханических и механических преобразователей, управляющих и информационных устройств и устройств сопряжения с внешними электрическими, механическими, управляющими и информационными системами, предназначенная для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления этим движением в целях осуществления технологического процесса».

*Регулируемый электропривод* – это электропривод, в котором, скорость движения исполнительного органа изменяется в соответствии с требованиями технологического процесса. Регулируемый электропривод (РЭП) – комплекс из двигателя и преобразовательно-регулирующего устройства.

Основные требования, предъявляемые к регулируемому электроприводу – это:

- регулирование скорости в необходимом диапазоне;
- ускорение-замедление с заданным темпом при переходе от любого начального состояния привода к заданному состоянию;
- необходимость ограничения момента, мощности, токов;
- минимизация потерь энергии в электроприводе;
- электромагнитная совместимость с системой электроснабжения.

*Регулируемые электроприводы*, как правило, являются и *автоматизированными*; многие операции в них выполняются средствами управления без участия оператора. Принимая во внимание, что основными средствами управления в электроприводах являются программируемые микроконтроллеры и (или) промышленные компьютеры, уместно определять современный автоматизированный электропривод как *компьютеризированный*. Это определение подходит для интегрированных систем многодвигательных электроприводов, объединяемых с компьютерными средствами автоматизации и разветвленными информационными сетями в составе технологических агрегатов и комплексов.

## 1.1. Типовое технологическое оборудование промышленных предприятий

Под *типовым технологическим* оборудованием (машинами и комплексами) понимают такое оборудование, которое имеет существенные и особые функциональные признаки в технологическом процессе. Типизация технологических комплексов возможна только применительно к процессу производства конкретного изделия и носит всегда отраслевой характер. Типизация же машин и механизмов производится в соответствии с функциональными особенностями выполнения ими части технологического процесса и не имеет отраслевой направленности. Имеется много машин и механизмов, выполняющих одинаковые или аналогичные операции в технологических процессах разных отраслей промышленности. Такие машины и механизмы можно объединить в типовые функциональные группы, например резательного, подъемно-транспортного и другого оборудования.

Определим основные общетехнические понятия:

*Рабочая машина* — устройство, выполняющее механические движения с целью преобразования материала (вещества).

Рабочие машины разделяются:

- на *технологические*, преобразующие форму, свойства, положение материала (обрабатываемого вещества),
- на *транспортные*, преобразующие положение материала (перемещаемого вещества).

Понятие рабочей машины является одним из частных случаев понятия машины. К другим относятся следующие понятия:

- *энергетическая* машина — устройство, преобразующее любой вид энергии в механическую энергию и наоборот (электродвигатели, электрогенераторы и др.);

- *информационная* машина — устройство, преобразующее информацию (шифровальные машины, ЭВМ и др.); утрачивает значение в настоящее время.

Рабочая машина включает в себя несколько (систем) механизмов.

*Механизм* — система тел, предназначенная для преобразования движения одного или нескольких тел в требуемые движения других твердых тел. Обычно в механизме имеется входное звено, приходящее в движение от воздействия двигателя (в частности электродвигателя) и выходное звено, соединенное с исполнительным органом рабочей машины. Если в преобра-

зовании движения участвуют жидкие или газообразные тела, то механизм называется гидравлическим или пневматическим.

*Исполнительный орган рабочей машины* – часть рабочей машины, непосредственно осуществляющая преобразование формы, свойства, положения материала в технологическом процессе.

*Технологический агрегат* – устройство, объединяющее технологическую машину, которая выполняет механические движения с целью преобразования формы, свойства и положения материала, с устройствами, обеспечивающими тепловые, химические и другие (не механические) воздействия на материал в процессе производства продукции. Такое объединение или присоединение называется *агрегатированием*. В частном случае под агрегатом понимают объединение двигателя с насосом (насосный агрегат) или двигателя с компрессором (компрессорный агрегат) и др.

*Технологический комплекс* – совокупность рабочих машин и технологических агрегатов, составляющих одно целое при выполнении технологического процесса. Примерами технологических комплексов являются прокатный стан, бумагоделательная машина, кордная линия, представляющие собой систему машин и технологических агрегатов для осуществления соответственно прокатки металла, изготовления бумаги в рулонах, корда для покрышек.

*Технологический процесс* – совокупность последовательных действий и методов обработки, изготовления, изменения состояния, свойств, формы сырья, материала или полуфабриката, осуществляемых в процессе производства продукции.

*Производство* – процесс создания материальных благ.

В практике сложилось так, что отдельные механизмы, выполняющие в производстве операции перемещения, подъема (транспортеры, подъемники, манипуляторы, кантователи и др.) стали называть *производственными механизмами*. К ним относят и простые рабочие машины, содержащие два-четыре механизма (краны, лифты, экскаваторы и др.).

Совершенствование простых рабочих машин в ходе технического прогресса превращало их в простые технологические комплексы, но термин машина сохранился. Например, бумаго- или картоно-делательными машинами называют простые машины и крупные комплексы, содержащие большое число технологических агрегатов.

Механизмы, машины, агрегаты и комплексы называются часто общим термином *промышленные установки* или *промышленное оборудование*



(технологическое и транспортное оборудование). Используется также понятие электроустановки.

*Электроустановками* называют совокупность машин, аппаратов, линий и вспомогательного оборудования (вместе с сооружениями и помещениями, в которых они установлены), предназначенных для производства, преобразования, трансформации, передачи, распределения электрической энергии.

Многие машины, агрегаты и механизмы имеют специфичное название с учетом отраслевого применения. Например, намоточные устройства в металлургии называются моталками, а в целлюлозно-бумажной промышленности – накатами. Технологические функции этих устройств одинаковы.

Общепромышленные механизмы являются основными механизмами множества конкретных разновидностей производственных установок, а именно:

- подъемные краны, экскаваторы, пассажирские и грузовые подъемники различной конструкции;
- промышленные манипуляторы и роботы;
- канатные кольцевые и маятниковые дороги и эскалаторы, различные конвейеры, осуществляющие транспортировку людей и грузов;
- насосы, земснаряды, вентиляторы, воздуходувки, компрессоры и т.п.

Общепромышленные механизмы являются основным средством механизации и автоматизации различных производственных процессов. Поэтому уровень промышленного производства и производительность труда в значительной степени зависят от оснащенности производства общепромышленными механизмами и от их технического совершенства.

Несмотря на существенные конструктивные особенности различных общепромышленных механизмов, их рассмотрение можно свести к ограниченному числу механизмов, однотипных по принципу действия, основному назначению и выполняемым функциям. Все эти механизмы являются типовыми, ибо предъявляют к электроприводу и его системе управления ряд характерных общих требований при любом конструктивном исполнении. Такой подход позволяет представить классификацию общепромышленных механизмов в виде схемы представленной на рис. 1.1.

Функции и задачи, решаемые общепромышленными механизмами, обуславливают большое разнообразие их электроприводов. Приводы различаются как в отношении диапазона мощностей (от долей киловатта до

нескольких тысяч киловатт), так и в отношении их сложности (от нерегулируемого асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором до сложных замкнутых регулируемых систем).

Однако общность и простота технологии позволяют выделить круг специальных вопросов электропривода и автоматизации, общих для отдельных, выделенных при классификации, групп производственных механизмов.

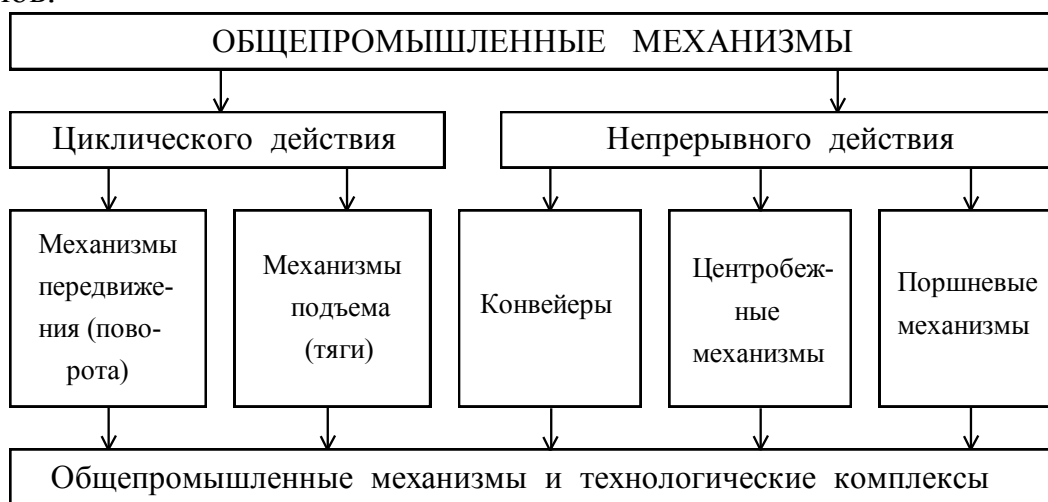


Рис. 1.1. Классификация типовых общепромышленных механизмов

## 1.2. Электропривод производственных механизмов

Современный электропривод – это сложный комплекс электромеханических устройств и средств автоматического управления, базирующихся на новейших достижениях в области электромашиностроения, силовых полупроводниковых приборов, микропроцессорной и компьютерной техники. Как и прежде электропривод остается силовой основой автоматизации производственных процессов и основным потребителем электрической энергии.

В соответствии с **ГОСТ Р 50369-92** электропривод есть электромеханическая система, состоящая в общем случае из взаимодействующих преобразователей электроэнергии, электромеханических и механических преобразователей, управляющих и информационных устройств и устройств сопряжения с внешними электрическими, механическими, управляющими и информационными системами, предназначенная для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления этим движением в целях осуществления технологического процесса. В соответствии с

приведенным определением на рис.1.2 представлена обобщенная структура электропривода, в состав которой входит:

- *преобразователь электрической энергии* - электротехническое устройство, преобразующее электрическую энергию с одними значениями параметров и/или показателей качества в электрическую энергию с другими значениями параметров и/или показателей качества;

- *электродвигатель* - электромеханический преобразователь, предназначенный для преобразования электрической энергии в механическую энергию. В некоторых режимах работы электропривода электродвигатель осуществляет обратное преобразование энергии;

- *механическая передача* - механический преобразователь, предназначенный для передачи механической энергии от электродвигателя к исполнительному органу машины и согласованию вида и скоростей их движения;

- *управляющее устройство* - устройство, предназначенное для формирования управляющих воздействий в электроприводе;

- *информационное устройство* - устройство, предназначенное для получения, преобразования, хранения, распределения и выдачи информации о переменных электропривода, технологического процесса и сопредельных систем для использования в системах управления электропривода и внешних информационных системах [7].

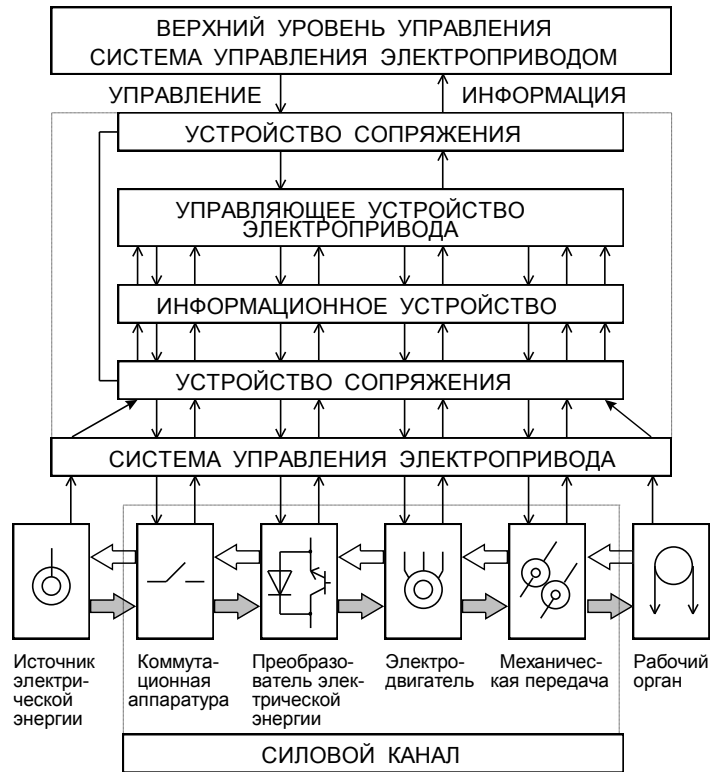


Рис. 1.2. Обобщенная структура электропривода

### 1.3. Характерные черты современного электропривода

Основные варианты электроприводов, получающих питание от источников переменного и постоянного тока можно представить в виде [1] рис. 1.3.

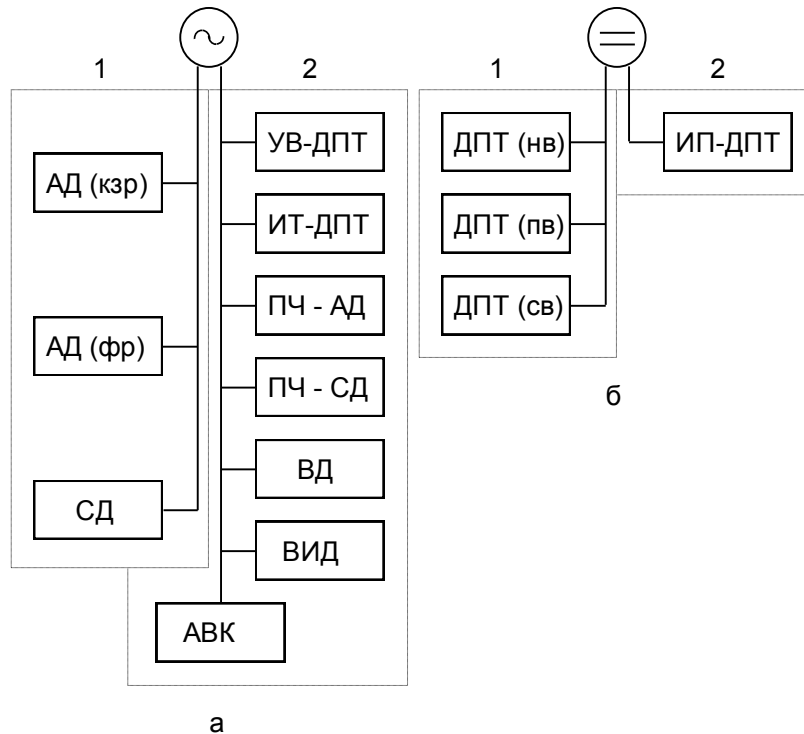


Рис. 1.3. Основные варианты электроприводов, получающих питание от источников переменного (а) и постоянного (б) тока:

1 – Электроприводы с разомкнутой системой управления (электроприводы с релейно-контакторным управлением и электроприводы с силовыми контактами);

2 – Электроприводы с замкнутой системой; АД – асинхронный двигатель (кз.р, короткозамкнутый, ф.р – фазный ротор); СД - синхронный двигатель; ДПТ – двигатель постоянного тока (НВ, ПВ, СВ – независимое, последовательное и смешанное возбуждение); ВД – вентильный двигатель; УВ – управляемый выпрямитель (тиристорный преобразователь); ПЧ – преобразователь частоты; ИТ – источник тока; ИП – импульсный преобразователь; АВК – асинхронный вентильный каскад; ВИД – вентильно-индукторный привод.

На смену регулируемому электроприводу постоянного тока (главным образом это тиристорный электропривод, функциональная схема которого приведена на рис.1.4, и электропривод по системе генератор-двигатель, функциональная схема которого приведена на рис. 1.5) пришли бесколлекторные электродвигатели переменного тока, управляемые широтно-импульсными преобразователями и микропроцессорами.

Регулируемый электропривод переменного тока не только сравнялся по своим характеристикам с приводом постоянного тока, но и превзошел его. В качестве исполнительных электродвигателей в приводах переменного тока получили применение асинхронные двигатели (АД) с короткоза-

мкнутым ротором и вентиляльные, т.е. электронно-коммутируемые двигатели.

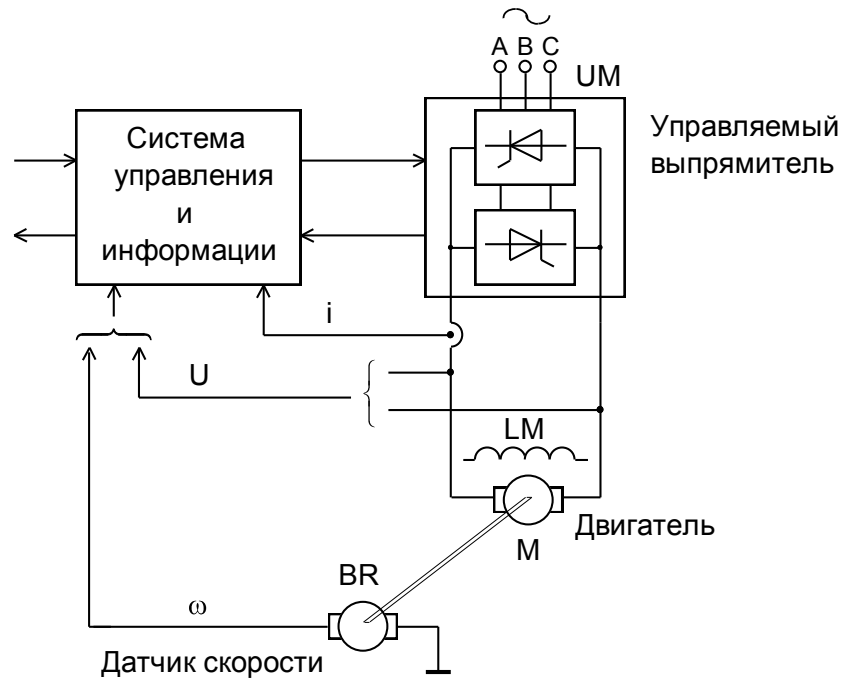


Рис. 1.4. Функциональная схема тиристорного электропривода постоянного тока

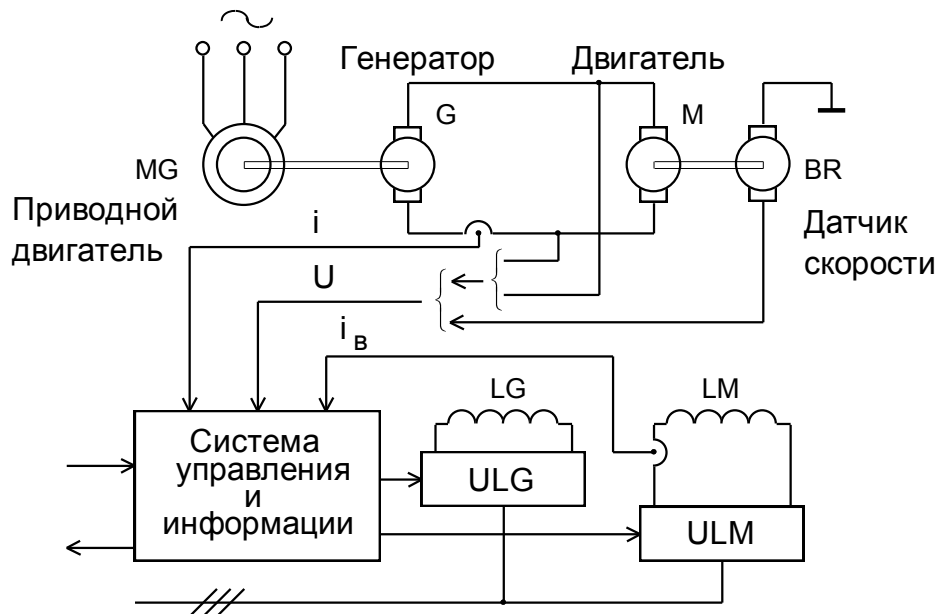


Рис. 1.5. Функциональная схема электропривода постоянного тока по системе генератор-двигатель:

*L* - обмотка возбуждения; *UL* - преобразователь питания обмотки возбуждения

В качестве исполнительных бесколлекторных двигателей постоянного тока (БДПТ) преимущественное применение получили синхронные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов или с электромагнитным возбуждением при больших мощностях. Этот тип привода наиболее перспективен для станкостроения и робототехники, однако, является самым дорогим.

Простой, надежный и дешевый асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, который мог применяться практически только в системах нерегулируемого электропривода, стал основным типом электрической машины в классе массового регулируемого электропривода.

Однако, создание электроприводов с АД с короткозамкнутым ротором с широким диапазоном регулирования скорости (до 1:10000) и высоким быстродействием, например, для металлорежущих станков и промышленных роботов, требует применения сложных структур частотно-векторного управления (рис. 1.6).

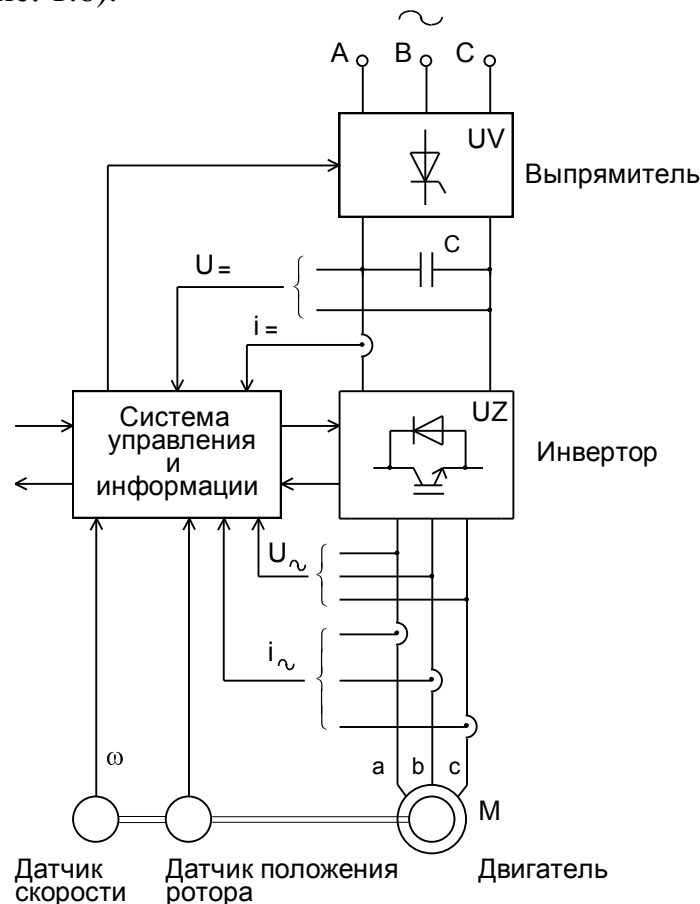


Рис.1.6. Функциональная схема электропривода переменного тока с частотно-векторным управлением

Для большинства массовых применений приводов, где требуется относительно небольшой диапазон регулирования скорости (до 1:100) и относительно низкое быстродействие, целесообразно использовать классические структуры *скалярного управления* и как замкнутые, так и разомкнутые системы регулирования. Примером дешевого массового асинхронного электропривода (диапазон регулирования до 1:10 или 1:20), область применения которого – это приводы насосов, вентиляторов, компрессоров, конвейеров и других похожих механизмов, для которых основным требованием является общая низкая стоимость, может служить частотно-регулируемый электропривод, выполненный по функциональной схеме рис. 1.7.

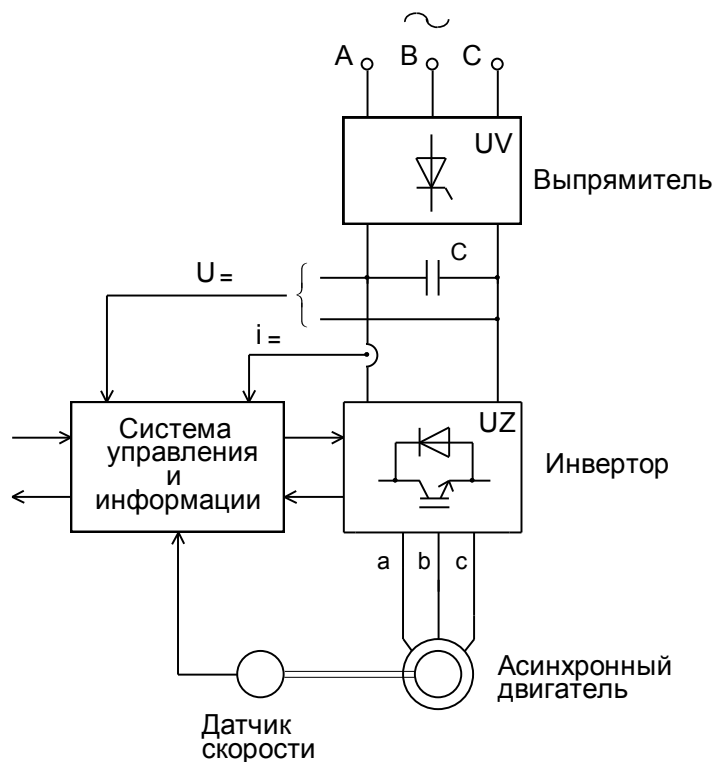


Рис. 1.7. Функциональная схема массового частотно - регулируемого асинхронного электропривода

В классе нерегулируемых электроприводов асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором по-прежнему остается единственным массовым типом электропривода, но и он будет в дальнейшем совершенствоваться, приобретая встроенные устройства (бесконтактные пускатели) для «мягкого» пуска и останова привода, для обеспечения энергосбережения путем снижения напряжения на недогруженном двигателе, для защиты и диагностирования состояния привода (рис. 1.8).



Современный этап развития электропривода характеризуется переходом от нерегулируемого электропривода к регулируемому в технологических установках, в которых до настоящего времени абсолютно доминировал простейший нерегулируемый электропривод.

Это приводы насосов и компрессоров, вентиляторов и воздуходувок, транспортеров. Переход к регулируемому электроприводу, наряду с улучшением технологических характеристик приводных механизмов, может обеспечить снижение потребляемой энергии в среднем на 20 - 30%, что в масштабах России позволит экономить более 10% производимой электрической энергии. Это обстоятельство определяет устойчивую тенденцию к переходу от нерегулируемого асинхронного электропривода с релейно-контакторным управлением к регулируемому.

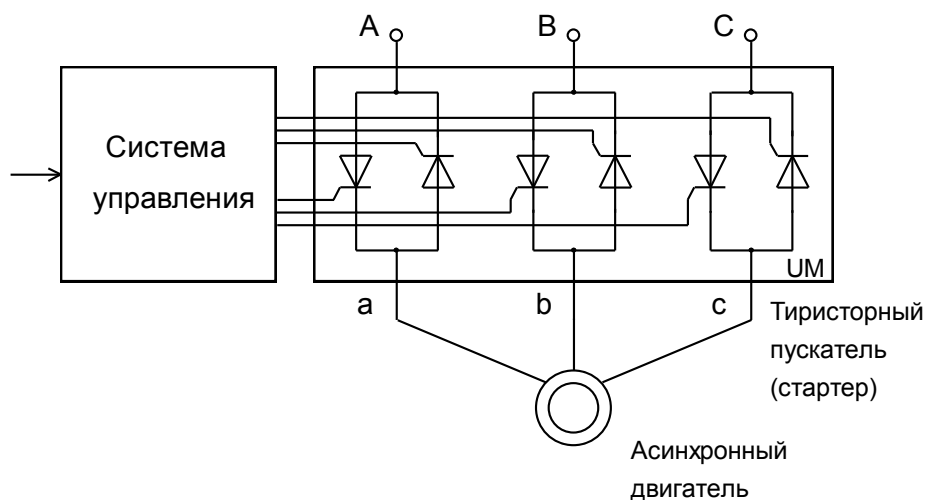


Рис. 1.8. Асинхронный нерегулируемый электропривод с тиристорным пускателем

Это прежде всего простейшие системы частотно-регулируемого электропривода (рис. 7), выполненного по разомкнутой системе регулирования, и классическая система регулируемого асинхронного электропривода с тиристорным регулятором напряжения (ТРН) в цепи статора и обратной отрицательной связью по скорости (рис. 1.9).

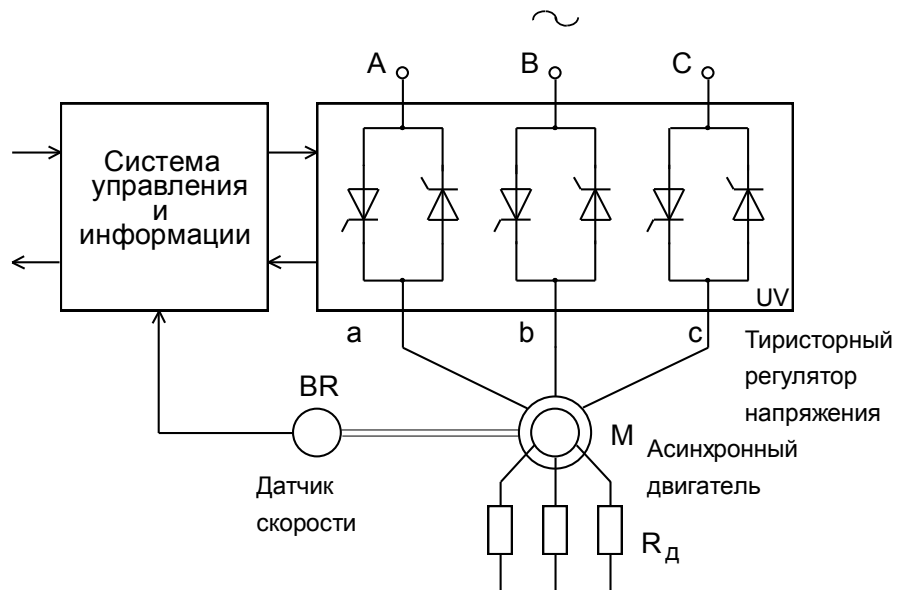


Рис. 1.9. Функциональная схема асинхронного электропривода с тиристорным регулятором напряжения в цепи статора

ТРН применяются для управления и регулирования скорости вращения АД как с короткозамкнутым, так и фазным ротором. Современные ТРН имеют микропроцессорные системы управления, защиты и диагностирования, цифровые дисплеи и кнопочные пульты ввода задания и параметров - установки тока, момента, время разгона и торможения и т.д.

Кроме того, необходимо отметить, что высокая доля стоимости потребляемой электрической энергии в себестоимости продукции будет диктовать необходимость решения проблемы энергосбережения и в первую очередь в системах электропривода, потребляющего более 60% всей вырабатываемой электроэнергии. Это заставит внимательнее относиться к выбору мощности электродвигателя и выбору наиболее рациональных законов управления электропривода и технических средств для их реализации.

#### 1.4. Основные используемые в промышленности системы регулируемого электропривода

В настоящее время в промышленности и в сельском хозяйстве используют следующие системы регулируемых электроприводов, а именно:

- Система «Генератор – двигатель»
- Системы импульсных электроприводов
- Система «Управляемый выпрямитель – двигатель»
- Система «Преобразователь частоты – асинхронный двигатель»;
- Система каскадных электроприводов;

- Асинхронные электропривода двойного питания.

### 1.4.1. Система «Генератор – двигатель»

При рассмотрении свойств электромеханического преобразователя постоянного тока с независимым возбуждением установлено, что наиболее широкие и благоприятные возможности управления процессами электромеханического преобразования энергии обеспечиваются изменением приложенного к якорной цепи двигателя напряжения  $U_{я}$ . Для того чтобы изменять подведенное к якорю напряжение, используют различного вида управляемые преобразователи. До сравнительно недавнего времени для этой цели преимущественно применялись электромашинные преобразователи - генераторы постоянного тока, а основной системой регулируемого электропривода была система Г-Д.

Система генератор-двигатель постоянного тока устарела и морально, и технически, не используется в новых разработках с 80-х годов XX века, однако продолжает эксплуатироваться в установках большой мощности, например, в электроприводах клеток прокатных станов и экскаваторах.

Схема силовых цепей системы генератор-двигатель приведена на рис.1.10.

В системе генератор - двигатель, двигатель  $M$  получает питание по цепи обмотки якоря от отдельного генератора  $G$ . Генератор  $G$  вращается синхронным или асинхронным двигателем  $MG$ .

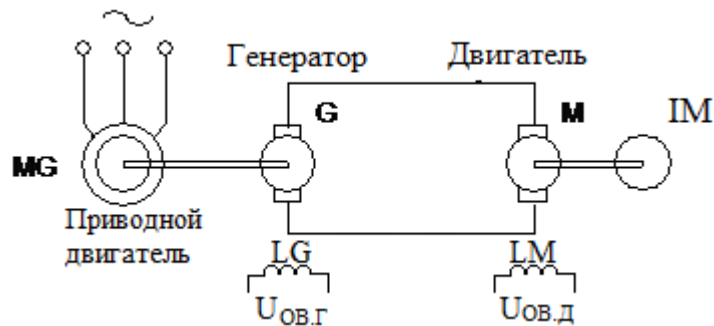


Рис.1.10. Схема силовых цепей системы генератор-двигатель

В случае применения синхронного двигателя в качестве приводного двигателя (гонника) он, как правило, работает с опережающим значением  $\cos\varphi$ , что позволяет компенсировать реактивную мощность предприятия.

Управление процессами пуска, реверса и торможения в системе генератор-двигатель перенесено из силовой якорной цепи в маломощные цепи

обмоток возбуждения электрических машин. Регулируя напряжение, подводимое к обмотке возбуждения генератора  $LG$ , можно изменять его ЭДС:

$$E_{\Gamma} = c_{\Gamma} \cdot \Phi_{\Gamma} \cdot \omega_{\Gamma} \quad (1)$$

где  $c_{\Gamma}$  – конструктивный коэффициент генератора постоянного тока.

При необходимости управления полем двигателя  $M$  его обмотка возбуждения  $LM$  может быть также снабжена индивидуальным управляемым возбудителем. На рисунке для выявления свойств собственно системы Г-Д обмотка возбуждения двигателя  $LM$  показана включенной на номинальное напряжение возбуждения  $U_{\text{овд}}$  и принимается, что поток двигателя  $\Phi_{\text{д}} = \Phi_{\text{ном}} = \text{const}$ . Из (1) следует, что при постоянной скорости вращения генератора  $G$  его ЭДС будет определяться потоком возбуждения  $\Phi_{\Gamma}$ , который регулируется путем изменения, подводимого к обмотке возбуждения генератора напряжения  $U_{\text{ов.Г}}$ .

Уравнения электромеханической и механической характеристики электропривода с двигателем постоянного тока независимого возбуждения, работающего в системе генератор-двигатель, определяются выражениями:

$$\omega = \frac{E_{\Gamma}}{k \cdot \Phi_{\text{д}}} - I \frac{R_{\text{дв}} + R_{\Gamma}}{k \cdot \Phi_{\text{д}}}, \quad (2)$$

$$\omega = \frac{E_{\Gamma}}{k \cdot \Phi_{\text{д}}} - M \frac{R_{\text{дв}} + R_{\Gamma}}{k \cdot \Phi_{\text{д}}}, \quad (3)$$

где  $k$  – конструктивный коэффициент двигателя постоянного тока

Анализ уравнения (2), описывающего электромеханические характеристики электропривода показывает, что характеристики системы генератор-двигатель при изменении потока возбуждения генератора  $\Phi_{\Gamma}$  или его ЭДС  $E_{\Gamma}$  представляют взаимно параллельные прямые линии, жесткость которых остается постоянной и определяется суммарным сопротивлением обмоток якоря генератора и двигателя. Эти характеристики располагаются в так называемой первой зоне – I регулирования скорости при переменном напряжении обмотки возбуждения генератора. При изменении полярности напряжения обмотки возбуждения генератора, как следует из (1), меняется полярность его ЭДС и как следствие направление вращения электродвигателя  $M$ . Семейство электромеханических характеристик системы генератор-двигатель приведено на рис. 1.11.

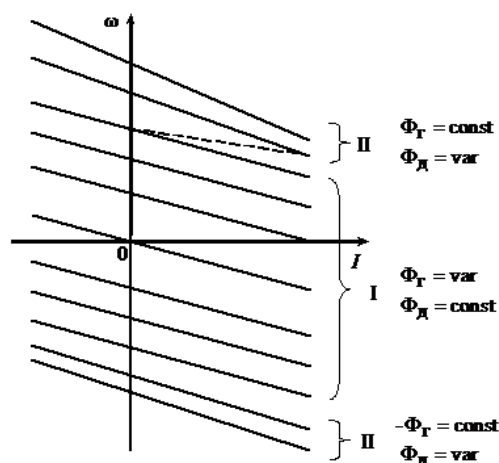


Рис. 1.11.. Семейство электромеханических характеристик системы генератор-двигатель

Электромеханические и механические характеристики электропривода, выполненного по системе генератор-двигатель, располагаются в четырех квадрантах. При переходе электродвигателя в режим рекуперативного торможения, то есть при угловой скорости большей скорости идеального холостого хода  $\omega_0$  генератор  $G$  начинает работать электродвигателем, вращая гонник  $M1$ , который в свою очередь становится генератором, работающим параллельно с сетью.

Система генератор-двигатель может работать и во второй зоне II регулирования скорости. Электромеханические характеристики при работе электропривода во второй зоне при переменном потоке возбуждения двигателя  $M$  ( $\Phi_{\text{д}} = \text{var}$ ,  $\Phi_{\text{г}} = \text{const}$ ) приведены на рис. 11, как для положительного, так и для отрицательного направления вращения двигателя. На рис. 1.11 показана пунктиром естественная электромеханическая характеристика двигателя.

В отличие от релейно-контакторных схем управления двигателями постоянного тока в системе генератор-двигатель отсутствуют громоздкие пусковые реостаты, а также потери в них при пусках, реверсах, торможения, а также при регулировании скорости. Диапазон регулирования скорости обычно не превышает 1:30.

Основной недостаток систем генератор-двигатель – два вращающихся агрегата в преобразователе. Общая мощность электрических машин превышает в три раза мощность исполнительного двигателя.

## 1.4.2. Импульсный электропривод

Вследствие отмеченных недостатков преобразователей энергии с вращающимися агрегатами на всех этапах развития электропривода много внимания уделялось замене электромашинных преобразователей энергии статическими вентильными преобразователями.

Задача построения статических преобразователей электрической энергии получила успешное решение только при создании мощных полупроводниковых приборов – тиристоров и транзисторов. Использование тиристорных и транзисторных усилителей мощности позволяет создать силовые части электроприводов, имеющих ряд достоинств, основным из которых является малая постоянная времени, а следовательно, такие привода обладают высоким быстродействием.

Мощные полупроводниковые приборы, используемые в силовых преобразовательных устройствах, работают только в ключевых режимах, для которых существуют два устойчивых состояния:

- открытое состояние – максимальная электрическая проводимость;
- закрытое состояние – минимальная электропроводность.

Вольтамперные характеристики наиболее распространенных полупроводниковых приборов транзисторов и тиристоров приведены на рис. 1.12 [39].

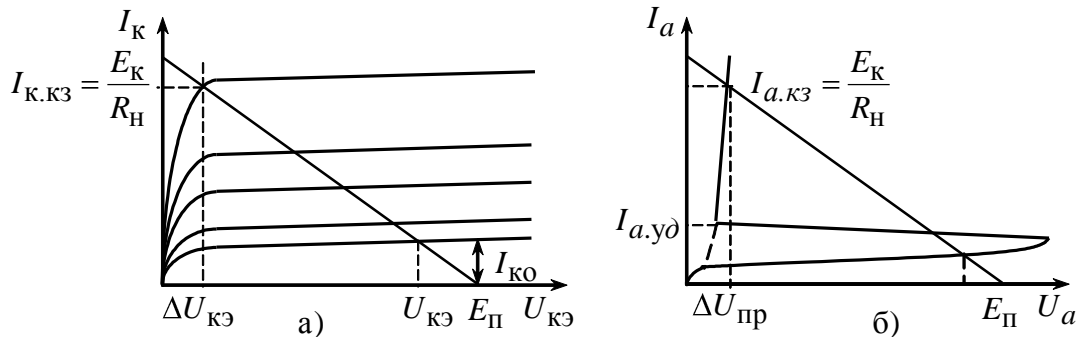


Рис. 1.12. Вольтамперные характеристики полупроводниковых приборов, работающих в ключевом режиме;  
а) транзисторов, б) тиристоров

При работе в ключевом режиме потери активной мощности  $P = U \cdot I$  в полупроводниковых приборах малы, так как один из сомножителей этого произведения (ток  $I$  или напряжение  $U$ ) имеет минимально возможное значение. Это обеспечивает высокий КПД преобразователей электрической энергии.

В процессе переключения из закрытого состояния полупроводникового прибора в открытое и наоборот напряжение и ток изменяются по линии нагрузки постоянного тока. Произведение тока и напряжения значительно возрастают. Поэтому важно, чтобы эти переключения протекали за минимально возможное время. Это условие удалось реализовать в настоящее время в двух типах полупроводниковых приборов с внутренней положительной обратной связью, ускоряющей процессы переключения полупроводников – IGBT-транзисторах или биполярных транзисторах с изолированным затвором и тиристорах.

#### 1.4.2.1. Импульсный способ регулирования координат ДПТ

Импульсный способ регулирования электроприводов обеспечивает периодическое импульсное изменение параметров: сопротивления или подводимого напряжения. В частности, для ДПТ возможно импульсное регулирование сопротивления в цепи якоря, в цепи возбуждения (импульсное изменение тока возбуждения или магнитного потока), либо подводимого напряжения [7,28,38].

##### *Импульсное регулирование сопротивления в цепи якоря*

Схема импульсного регулирования сопротивления в цепи якоря ДПТ приведена на рис. 1.13. Происходит периодически коммутация (включение - отключение) по определенному закону ключа  $K$ .

Используются два способа управления ключом  $K$ :

- а) широтно-импульсное регулирование;
- б) частотно-импульсное регулирование.

При широтно-импульсном регулировании период коммутации ключа  $T_K = t_{\text{замк}} + t_{\text{раз}}$  остается постоянным, а изменяется соотношение  $t_3$  к  $T_K$ , которое называется скважностью  $\gamma$ .

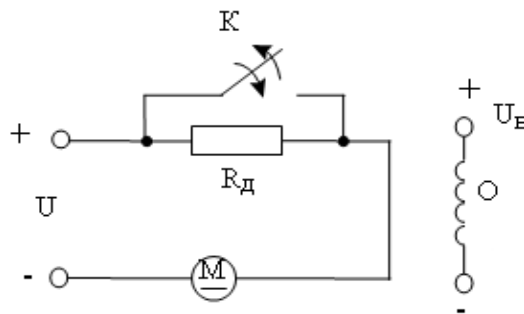


Рис. 1.13. Схема импульсного регулирования сопротивления

$$\gamma = \frac{t_3}{T_K} = \frac{t_3}{(t_3 + t_p)}. \quad (4)$$

При частотно-импульсном управлении  $t_3 = \text{const}$ , изменяется период коммутации ключа  $T_K$ , а, следовательно, и скважность  $\gamma$ . Таким образом,  $\gamma$  - скважность является показателем импульсного способа регулирования. При замкнутом ключе  $K$   $\gamma = 1$  – двигатель работает на естественной характеристике (рис. 1.14) (прямая  $\gamma = 1$ ), при разомкнутом  $\gamma = 0$  резистор  $R_d$  полностью введен – на искусственной реостатной характеристике (прямая 2). При промежуточных значениях  $0 < \gamma < 1$  механические характеристики – прямые 3-4.

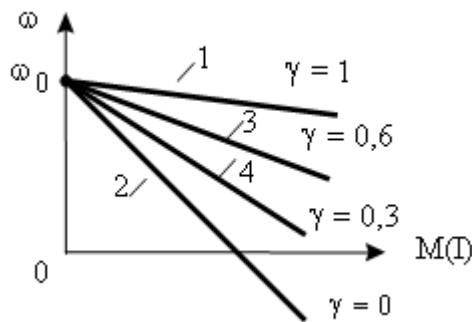


Рис. 1.14. Механические (электромеханические) характеристики

Уравнение механической характеристики при импульсном регулировании имеет следующий вид:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{M}{(k\Phi)^2} [R_d(1 - \gamma) + R_a], \quad (5)$$

#### Импульсное регулирование магнитного потока

При импульсном регулировании магнитного потока ДПТ независимого возбуждения  $R_{доб}$  и ключ  $K$  включены в цепь обмотки возбуждения (рис. 1.15).

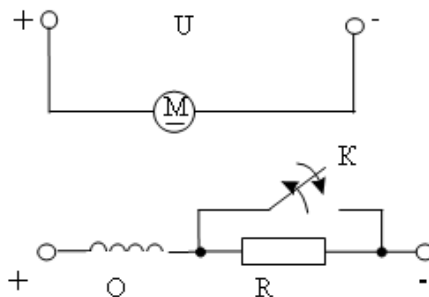




Рис. 1.15. Схема импульсного регулирования магнитного потока

Скважность  $\gamma$  регулируется в пределах  $0 < \gamma < 1$ . При  $\gamma = 1$   $R_d$  зашунтирован ключом К, что соответствует естественной механической характеристике 1 рис. 15. При  $\gamma = 0$   $R_d$  постоянно введено в цепь ОВ,  $I_e$  и  $\Phi$  уменьшаются, а скорость  $\omega_{03}$  повышается – (искусственная характеристика, прямая 2, рис. 1.16.).

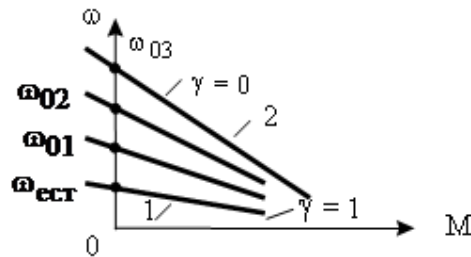


Рис. 1.16. Механические характеристики при импульсном регулировании магнитного потока

#### Импульсное регулирование напряжения $U$ на якоре

При импульсном регулировании  $U$  на якоре по схеме (рис. 1.17) под механической характеристикой силовой части привода понимают зависимость установившейся средней угловой скорости электродвигателя от его среднего момента при неизменном значении  $\gamma$ .

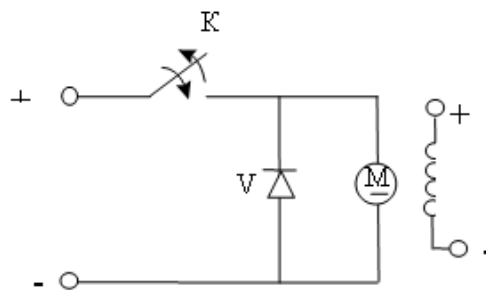


Рис. 1.17. Схема импульсного регулирования напряжения на якоре

Если предположить, что ключ К является идеальным ключевым элементом, а внутреннее сопротивление источника питания равно нулю, то при постоянной частоте коммутации  $f_{\text{шим}} = 1/T_{\text{шим}} = \text{const}$ , то работу схемы можно описать следующей системой уравнений [7]:

$$L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + i_{\text{я}} R_{\text{я}} = \begin{cases} U_{\text{п}} & \text{при } 0 \leq t \leq t_1; \\ 0 & \text{при } t_1 \leq t \leq t_2. \end{cases} \quad (6)$$

Этим уравнениям в общем случае отвечают решения

$$i_{я1}(t) = i_{я}(t) |_{0 \leq t \leq t_1} = \frac{U_{\Pi} - e_{я}}{R_{я}} (1 - e^{-t/T_{\ominus}}) + i_{я10} e^{-t/T_{\ominus}}; \quad (7)$$

$$i_{я2}(t) = i_{я}(t) |_{t_1 \leq t \leq t_2} = -\frac{e_{я}}{R_{я}} (1 - e^{-t/T_{\ominus}}) + i_{я20} e^{-t/T_{\ominus}}, \quad (8)$$

где  $i_{я10}$  и  $i_{я20} = i_{я.макс}$  – значения токов  $i_{я1}(t)$  и  $i_{я2}(t)$ , отнесенные соответственно к моментам времени  $t = 0$  и  $t = t_1$  (см. рис. 1.18);  $T_{\ominus} = L_{я} / R_{я}$  – электрическая постоянная времени схемы.

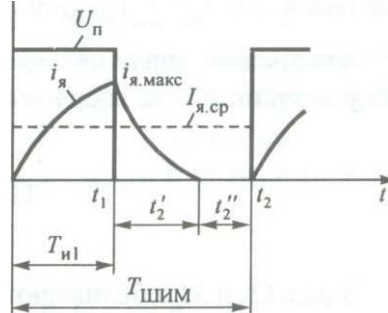


Рис. 1.18. Временные диаграммы тока и напряжения в режиме прерывистых токов

Семейство механических характеристик представлено на рис. 1.19.

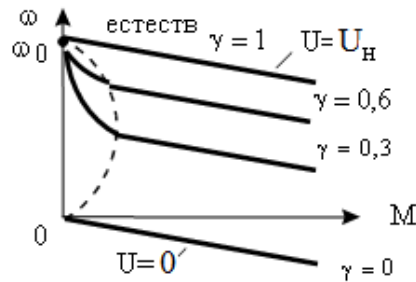


Рис.1.19. Механические характеристики импульсного электропривода

При замкнутом постоянно ключе  $K$  ( $\gamma = 1$ ) ток в якоре протекает под действием  $U$  сети (естественная механическая характеристика), при разомкнутом  $K$  – под действием ЭДС, замыкаясь через диод  $V$ , при этом ток имеет пульсирующий характер. Регулируя скважность  $\gamma$ , получают искусственные характеристики, при  $\gamma = 0$  – напряжение  $U$  не подается (схема динамического торможения) и механическая характеристика проходит через начало координат.

При малых нагрузках возможен режим прерывистого тока, который возникает при следующих граничных значениях скорости и тока:

$$\omega_{\text{Гр}} = \omega_0 \gamma \left( 1 - \frac{1-\gamma}{2T_{\text{я}}} \cdot T_{\text{к}} \right), \quad (9)$$

$$I_{\text{Гр}} = I_{\text{кз}} \frac{\gamma(1-\gamma)}{2T_{\text{я}}} T_{\text{к}}. \quad (10)$$

где  $T_{\text{э}} = T_{\text{я}} = L_{\text{я}} / R_{\text{я}}$  – электромеханическая постоянная времени цепи якоря.

Лишь в области прерывистых токов механические характеристики не прямолинейны, в рабочем диапазоне нагрузок уравнение механической характеристики имеет вид:

$$\omega = \frac{\gamma U}{K\Phi} - \frac{MR_{\text{я}}}{(K\Phi)^2}. \quad (11)$$

#### 1.4.2.2. Схемы тиристорных ключей для импульсного регулирования

Для импульсного регулирования используются различные схемы тиристорных ключей. Принцип работы тиристорных ключей для импульсного регулирования сопротивления  $R$  рассмотрим по схеме [7] (рис. 1.20).

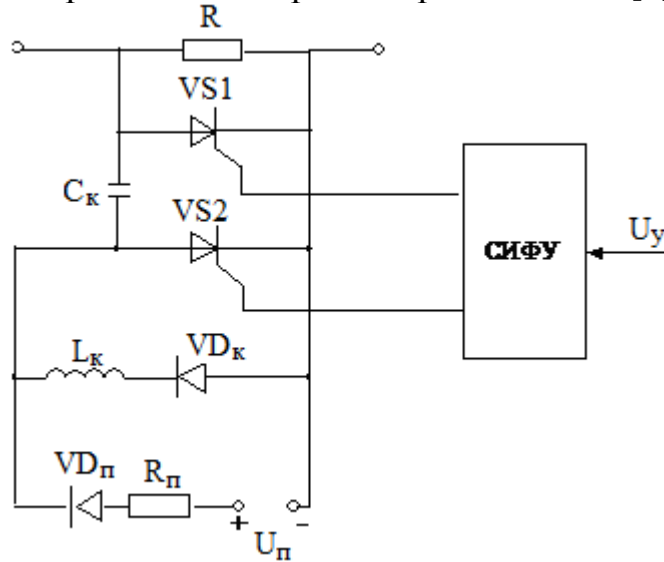


Рис. 1.20. Схема тиристорного ключа

Тиристор  $VS1$  исполняет роль ключа. Открываясь,  $VS1$  шунтирует  $R$ , закрываясь, вводит в цепь  $R$ . Для закрытия  $VS1$  помимо снятия импульса с управляющего электрода от СИФУ необходимо обеспечить более высокий потенциал катода по сравнению с потенциалом анода. Это достигается включением дополнительного тиристора  $VS2$  и коммутирующих элементов

$C_k$  и  $L_k$ , диода  $VD_k$ , маломощного источника постоянного тока  $U_{\Pi}$  и диода  $VD_{\Pi}$ .

Если в исходном положении тиристор  $VS1$  открыт, а  $VS2$  закрыт и конденсатор  $C_k$  заряжен со знаком  $+$  на нижней обкладке, то для закрытия  $VS1$  нужно снять импульс управления с  $VS1$  и подать его на  $VS2$ , который откроется. Тогда к катоду  $VS1$  будет приложен плюс напряжения  $C_k$ , а к аноду – минус и  $VS1$  закроется.

Конденсатор  $C_k$  будет заряжаться через открытый тиристор  $VS2$  с плюсом на верхней обкладке.

Если снять импульс управления с  $VS2$ , то он к концу перезаряда  $C_k$  закроется. Тогда при подаче импульса на  $VS1$  он вновь откроется, шунтируя  $R$ , и вновь начнется перезаряд конденсатора по цепи  $C_k - VS1 - VD_k - L_k$ , пока потенциал нижней обкладки  $C_k$  не станет положительным. Для первоначального заряда  $C_k$  служит источник  $U_{\Pi}$ ,  $VD_{\Pi}$  и  $R_{\Pi}$ .

Для импульсного регулирования напряжения на обмотке якоря применяется схема тиристорного ключа, представленная на рис. 1.21. Предварительный заряд конденсатора  $C_k$  производится от  $U_c$  (+ на верхней обкладке).

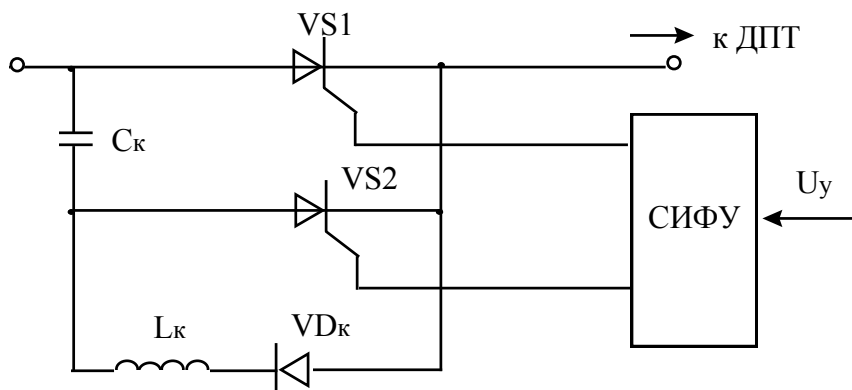


Рис. 1.21. Схема тиристорного ключа для импульсного регулирования

При подаче управляющего импульса на  $VS1$  он откроется и на двигатель подается напряжение. Одновременно через  $VS1$ ,  $VD_k$ ,  $L_k$  начинается перезаряд конденсатора  $C_k$  с  $+$  на верхней обкладке, поэтому при подаче импульса на  $VS2$ ,  $VS1$  закроется. Изменяя с помощью СИФУ скважность управляющих импульсов  $VS1$ , согласованно с подачей импульса  $VS2$  обеспечивается импульсное регулирование напряжения.

### 1.4.3. Система «Управляемый выпрямитель – двигатель»

В автоматизированных электроприводах с широким диапазоном регулирования скорости система тиристорный преобразователь (управляемый выпрямитель) – двигатель постоянного тока является в настоящее время преобладающей. На рис. 1.22 приведены схемы электропривода с тиристорными преобразователями, собранными по трехфазной нулевой схеме выпрямления [7,38].

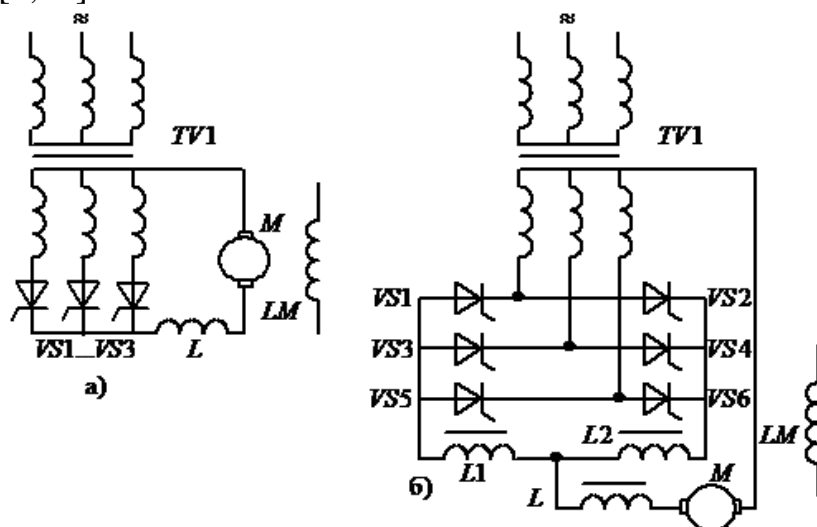
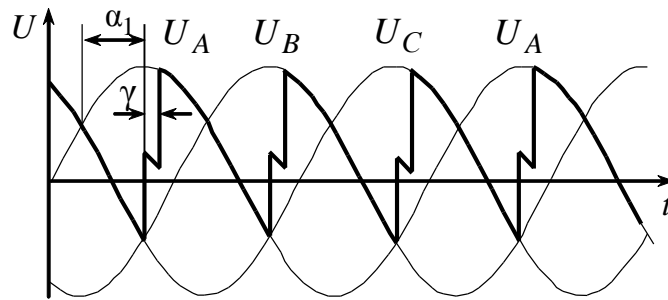


Рис. 1.22. Схемы электропривода с тиристорными преобразователями  
а) трехфазный нулевой нереверсивный преобразователь;  
б) трехфазный нулевой реверсивный преобразователь.

Двигатель постоянного тока (ДПТ) в такой системе получает питание от тиристорного преобразователя (ТП), который преобразует напряжение сети переменного тока  $U_C$  в выпрямленное напряжение  $U_{\text{я}}$ , приложенное к цепи якоря двигателя. Для сглаживания пульсаций тока в цепь якоря вводят сглаживающий реактор  $L$ .

Применяемые в преобразователях тиристоры – полууправляемые полупроводниковые приборы. Они включаются по цепи управляемого электрода положительным импульсом управления, а выключаются тогда, когда анодный ток тиристора  $I_a$  спадает ниже тока удержания  $I_{a,\text{уд}}$  (рис. 1.22, б). Управляющие импульсы подаются на тиристоры поочередно в моменты времени, зависящие от напряжения управления тиристорным преобразователем. Изменяя напряжение управления можно менять угол  $\alpha$  открытия тиристоров и, следовательно, регулировать действующее выпрямленное напряжение на нагрузке. Диаграммы напряжений на выходе нереверсивного нулевого тиристорного преобразователя приведены на рис. 1.23.

Тиристорный преобразователь работает в выпрямительном режиме при угле управления  $0 < \alpha < 90$  эл.град. В пределах угла перекрытия  $\gamma$  два тиристора нулевой схемы выпрямления будут открыты одновременно и подключены к одной нагрузке – якорю двигателя. Мгновенное значение выпрямленного напряжения при этом снижается на полуразность мгновенных значений фазных напряжений [38].



венных значений фазных напряжений [38].

Рис.1.23. Диаграммы напряжений на выходе тиристорного преобразователя с нулевой точкой в выпрямительном режиме

Как следует из рис. 22 тиристоры открыты и при отрицательных фазных напряжениях вторичной обмотки трансформатора  $TV1$ . Это возможно только в том случае, когда в цепи выпрямленного тока большая индуктивность и ток в цепи обмотки якоря поддерживается за счет ЭДС самоиндукции. При малой индуктивности якорной цепи двигателя тиристоры при отрицательных напряжениях на вторичной обмотке трансформатора  $TV1$  закрываются, а ток в якорной цепи прерывается. Для уменьшения зоны прерывистого тока в якорную цепь электродвигателя включают дополнительную индуктивность  $L$ .

При активной нагрузке на валу двигателя тиристорный преобразователь может перейти в инверторный режим работы. Перевод выпрямителя из режима выпрямления тока в инверторный режим работы происходит при увеличении угла управления  $\alpha$  свыше  $90$  эл.град. В инверторном режиме работы преобразователя с трехфазной нулевой схемой выпрямления электрическая машина постоянного тока становится генератором. Тиристоры открываются при отрицательных значениях напряжения вторичной обмотки трансформатора  $TV1$ . При работе тиристорного преобразователя, как в выпрямительном, так и в инверторном режимах ток через тиристоры протекает только в одном направлении.

Диаграммы напряжений на выходе нереверсивного нулевого тиристорного преобразователя при его работе в инверторном режиме приведены на рис. 1.24.

Среднее напряжение тиристорного преобразователя в режиме непрерывного тока может быть найдено из уравнения:

$$U_{\text{тп}} = E_{\text{тп0}} \cdot \cos \alpha - I \cdot R_{\text{п}}, \quad (12)$$

где  $E_{\text{тп0}}$  – ЭДС тиристорного преобразователя, величина которой зависит от схемы выпрямления;  $R_{\text{п}}$  – эквивалентное активное сопротивление тиристорного преобразователя

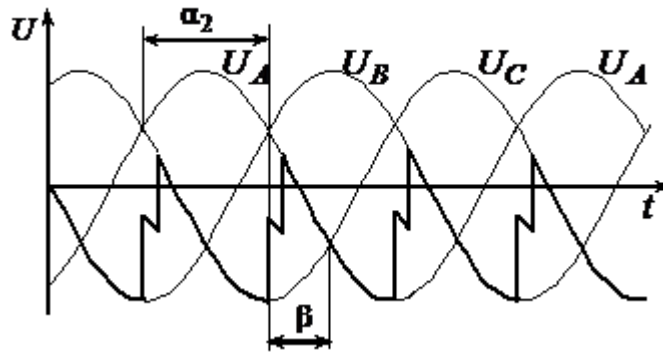


Рис. 1.24. Диаграммы напряжений на выходе тиристорного преобразователя при его работе в инверторном режиме

Электромеханическая и механическая характеристики электропривода тиристорный преобразователь-двигатель, в режиме непрерывного тока определяются выражениями:

$$\omega = \frac{E_{\text{тп}} \cdot \cos \alpha}{k \cdot \Phi_{\text{д}}} - I \frac{R_{\text{дв}} + R_{\text{п}}}{k \cdot \Phi_{\text{д}}}, \quad (13)$$

$$\omega = \frac{E_{\text{тп}} \cdot \cos \alpha}{k \cdot \Phi_{\text{д}}} - M \frac{R_{\text{дв}} + R_{\text{п}}}{\Phi_{\text{д}}^2}. \quad (14)$$

Электромеханические характеристики нереверсивного электропривода, выполненного по схеме тиристорный преобразователь двигатель, приведены на рис. 1.25. при изменении угла управления  $\alpha$  от  $0$  до  $180^\circ$ .

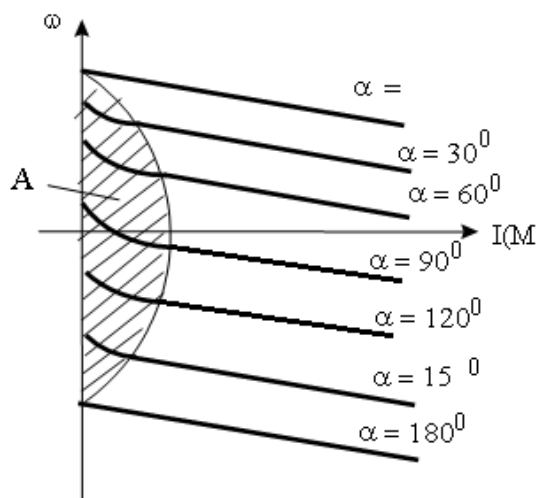


Рис. 1.26. Электромеханические (механические) характеристики неперевсивного тиристорного электропривода

Характеристики расположены в первом и четвертом квадрантах правой декартовой системы координат, когда ток через двигатель протекает только в одном направлении. В четвертом квадранте электропривод работает за счет спускающегося груза при активной нагрузке на валу электродвигателя и инверторном режиме работы тиристорного преобразователя.

На рис. 1.26 ограничена и выделена зона А прерывистого тока. В зоне прерывистого тока тиристорный преобразователь как бы обладает дополнительным внутренним сопротивлением, которое в значительной степени уменьшает жесткость электромеханических характеристик.

Для того чтобы тиристорный электропривод стал реверсивным, работающим в четырех квадрантах, необходимо использовать две группы тириستоров, включив их встречно параллельно.

Схема реверсивного электропривода с нулевым тиристорным преобразователем напряжения приведена на рис. 1.24,б.

Группы тиристоров работают в совместном согласованном режиме, причем тиристоры  $VS1, VS3, VS5$ , образуют одну группу, работающую в выпрямительном режиме, а тиристоры  $VS2, VS4, VS6$  – другую группу, работающую в противоположном режиме, инверторном, причем

$$\alpha_1 + \alpha_2 = \pi, \quad (15)$$

где  $\alpha_1$  – угол управления группы тиристоров, работающих в выпрямительном режиме;  $\alpha_2$  – угол управления группы тиристоров, работающих в инверторном режиме.



Для другого направления вращения режимы работ групп тиристоров меняются, но условие (15) продолжает выполняться.

Мгновенные значения ЭДС в выпрямительной и инверторной группе не равны между собой. Для уменьшения уравнивающих токов, протекающих между группами тиристоров, в электропривод введены реакторы  $L1$  и  $L2$ .

Электромеханические характеристики реверсивного электропривода тиристорный преобразователь-двигатель с совместным согласованным управлением группами тиристоров приведены рис. 1.27.

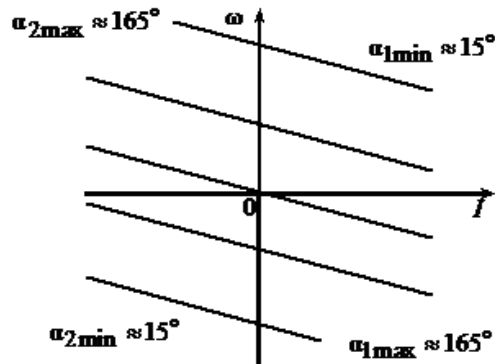


Рис. 1.27. Электромеханические характеристики реверсивного электропривода тиристорный преобразователь-двигатель с совместным согласованным управлением группами тиристоров

На практике применяются и другие схемы тиристорных преобразователей, например, с бестрансформаторной мостовой схемой выпрямления рис 1.28. В этом случае тиристорные преобразователи получают питание через воздушные реакторы  $L1...L3$  [7].

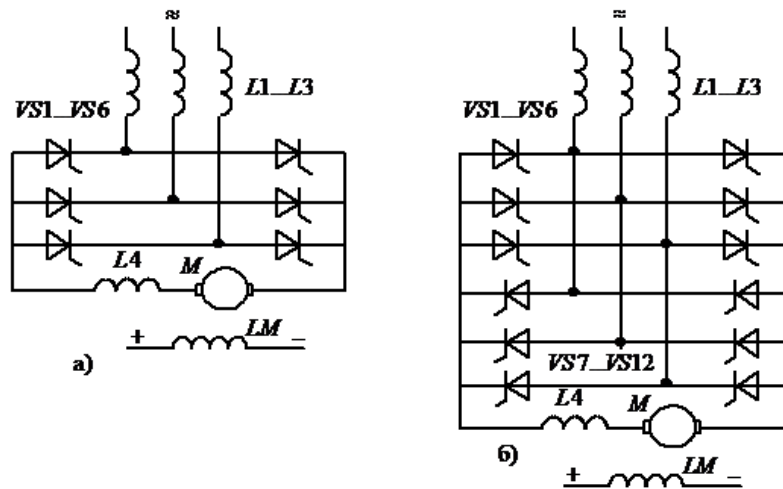


Рис. 1.28. Схемы электроприводов с тиристорными преобразователями.

а) трехфазный мостовой нереверсивный преобразователь;

б) трехфазный мостовой реверсивный преобразователь

Сетевые реакторы  $L1...L3$  уменьшают возможные искажения в питающей сети, создаваемые тиристорными преобразователями, и ограничивают скорость нарастания тока через открывающиеся тиристоры (эффект  $dI/dt$ ), а также ограничивают ток короткого замыкания в преобразователе на время срабатывания механических автоматов (на схеме не показаны).

Нереверсивный вариант схемы, содержащий только одну группу тиристоров  $VS1...VS6$ , приведен на рис. 1.28,а. Реверсивный вариант схемы с двумя мостовыми тиристорными преобразователями  $VS1...VS6$  и  $VS7...VS12$ , включенными встречно параллельно приведен на рис. 26,б. В данной схеме работает всегда только одна группа тиристоров, например  $VS1...VS6$ , другая группа –  $VS7...VS12$  закрыта или наоборот. При подаче отпирающих импульсов на обе группы тиристоров произойдет короткое замыкание. Такое управление группами тиристоров называется раздельным управлением. Выбор для работы той или иной группы тиристоров зависит от необходимого направления вращения двигателя. За переключением групп тиристоров следит логическое переключающее устройство, которое разрешает включение последующей группы только после выключения предыдущей, по истечении некоторого времени, связанного с полным закрытием тиристоров, в группе, выходящей из работы.

Электромеханические характеристики нереверсивного электропривода с мостовым выпрямителем аналогичны характеристикам, приведенным на рис. 1.26, однако в случае применения мостового преобразователя зона прерывистых токов уменьшается.

Электромеханические характеристики реверсивного электропривода с мостовым выпрямителем и раздельным управлением группами тиристоров приведены на рис.1.29.

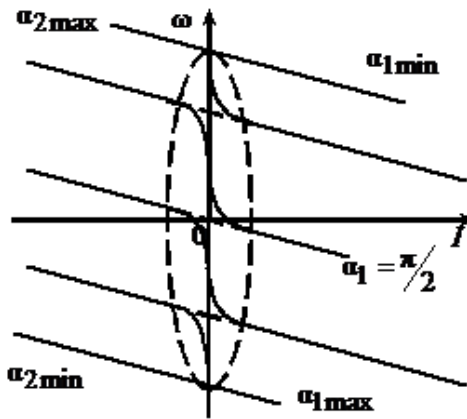


Рис. 1.29. Электромеханические характеристики реверсивного электропривода с мостовым выпрямителем и раздельным управлением группами тиристоров

Системы тиристорный преобразователь-двигатель позволили:

- расширить диапазон регулирования скорости в замкнутых системах до  $D = 1:10000$ ;
- обеспечить плавное регулирование скорости  $\varphi_{пл} \rightarrow 1$ ;
- получить необходимую жесткость механических характеристик  $k_{\beta} \rightarrow \infty$ ;
- обеспечить высокий КПД  $\rightarrow 0,95$ .

Одним из основных недостатков электропривода с тиристорными преобразователями является низкий коэффициент мощности. Можно приближенно считать, что

$$\cos \varphi \approx \cos \alpha.$$

Таким образом, если электропривод будет продолжительное время работать с низкими скоростями, то он будет работать и с низким коэффициентом мощности.

Мощные тиристорные преобразователи вносят искажения в форму напряжения питающей сети.

Несмотря на отмеченные недостатки системы тиристорный преобразователь-двигатель получили наибольшее распространение в конце XX века среди автоматизированных электроприводов с большим диапазоном регулирования скорости. В настоящее время они преобладают в промышленных установках.

#### 1.4.4. Система «Преобразователь частоты – асинхронный двигатель»

Система «Преобразователь частоты – асинхронный двигатель» относится к классу регулируемых электроприводов переменного тока. Энергетическая силовая часть таких электроприводов, содержит полупроводниковый преобразователь (преобразователь частоты (ПЧ)), электрический двигатель (ЭД) и исполнительный орган (ИО) (рис. 1.30).

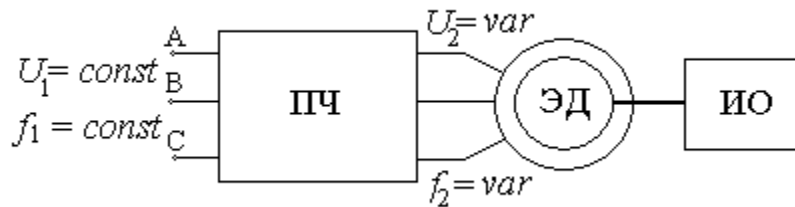


Рис. 1.30. Силовая часть электропривода переменного тока

Электрический двигатель преобразует электрическую энергию в механическую энергию и приводит в движение исполнительный орган технологического механизма. В современном частотно регулируемом электроприводе в качестве исполнительных элементов (электрических двигателей) широко используют асинхронные или синхронные электрические двигатели.

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

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

Наиболее эффективные способы регулирования скорости короткозамкнутого асинхронного двигателя связаны с изменением скорости вращения электромагнитного поля статора

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p} \quad (16)$$

Из (16) следуют два основных способа регулирования скорости вращения электромагнитного поля:

- изменением числа пар полюсов  $p$ ;
- изменением частоты  $f_1$  напряжения статора двигателя.

Способ регулирования скорости асинхронного двигателя изменением числа пар полюсов позволяет получить несколько фиксированных значений рабочих скоростей. Так, например, асинхронные двигатели серии 4А–6А выпускаются двух-, трех- и четырехскоростные. Применяются для крановых электроприводов. Как правило, плавное регулирование скорости для таких электрических машин не применяется, то есть многоскоростные асинхронные двигатели не используются для систем регулируемого электропривода [6].

Способы частотного регулирования скорости электроприводов переменного тока с короткозамкнутыми асинхронными двигателями в настоящее время находят применение в различных отраслях техники. Преобразование переменного напряжения питающей сети в переменное напряжение с регулируемой частотой, напряжением и током осуществляют преобразователи частоты. В настоящее время преобразователи частоты выполняются на базе силовых полупроводниковых ключей – тиристоров и транзисторов. Быстрый рост преобразователей частоты стал возможен с появлением биполярных транзисторов с изолированным затвором, рассчитанных на токи до нескольких тысяч ампер, напряжения до нескольких киловольт и частоту коммутации 20 кГц и выше.

По типу связи с питающей сетью преобразователи частоты делятся на два класса, а именно:

- преобразователи частоты с непосредственной связью;
- преобразователи частоты со звеном постоянного тока.

По способу регулирования выходного напряжения и частоты преобразователи частоты на полупроводниковых элементах подразделяют:

- на преобразователи частоты с автономным инвертором напряжения и управляемым выпрямителем;
- на преобразователи частоты с автономным инвертором напряжения и широтно-импульсной модуляцией;
- на преобразователи частоты с автономным инвертором напряжения и векторной широтно-импульсной модуляцией;
- на преобразователи частоты с автономным инвертором, управляемым током.

Преобразователи частоты со звеном постоянного тока, в свою очередь, подразделяются:

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

В своей структуре преобразователи содержат управляемый или неуправляемый выпрямитель, силовой фильтр и инвертор, преобразующий постоянное напряжение (ток) в переменное напряжение (ток) заданной частоты.

Мощные полупроводниковые приборы, используемые в силовых преобразовательных устройствах, работают только в ключевых режимах, для которых существуют два устойчивых состояния:

- открытое состояние – максимальная электрическая проводимость;
- закрытое состояние – минимальная электропроводность.

При работе в ключевом режиме потери активной мощности  $P = U \cdot I$  в полупроводниковых приборах малы, так как один из сомножителей этого произведения (ток  $I$  или напряжение  $U$ ) имеет минимально возможное значение. Это обеспечивает высокий КПД преобразователей электрической энергии.

В процессе переключения из закрытого состояния полупроводникового прибора в открытое и наоборот напряжение и ток изменяются по линии нагрузки постоянного тока. Произведение тока и напряжения значительно возрастают. Поэтому важно, чтобы эти переключения протекали за минимально возможное время. Это условие удалось реализовать в настоящее время в двух типах полупроводниковых приборов с внутренней положительной обратной связью, ускоряющей процессы переключения полупроводников, – IGBT-транзисторах или *биполярных транзисторах с изолированным затвором и тиристорах*.

#### 1.4.4.1. Структура частотного преобразователя

Большинство современных преобразователей частоты построено по схеме двойного преобразования. Они состоят из следующих основных частей: звена постоянного тока (неуправляемого выпрямителя), силового импульсного инвертора и системы управления (рис. 1.31).

Звено постоянного тока состоит из неуправляемого выпрямителя и фильтра. Переменное напряжение питающей сети преобразуется в нем в напряжение постоянного тока.

Силовой трехфазный импульсный инвертор состоит из шести транзисторных ключей. Каждая обмотка электродвигателя подключается через соответствующий ключ к положительному и отрицательному выводам вы-

прямителя. Инвертор осуществляет преобразование выпрямленного напряжения в трехфазное переменное напряжение нужной частоты и амплитуды, которое прикладывается к обмоткам статора электродвигателя.

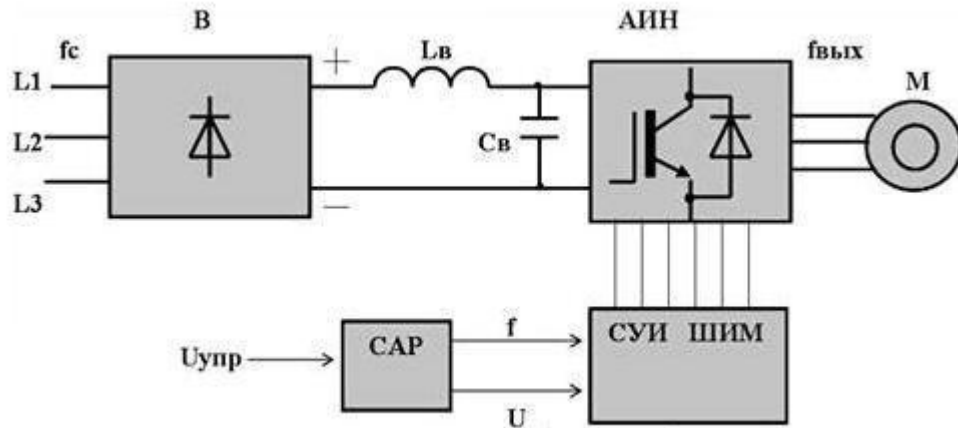


Рис. 1.31. Функциональная схема частотного преобразователя

В выходных каскадах инвертора в качестве ключей используются силовые IGBT-транзисторы. По сравнению с тиристорами они имеют более высокую частоту переключения, что позволяет вырабатывать выходной сигнал синусоидальной формы с минимальными искажениями.

#### Принцип работы преобразователя частоты

Преобразователь частоты состоит из неуправляемого диодного силового выпрямителя В, автономного инвертора АИН, системы управления ШИМ, системы автоматического регулирования, дросселя  $L_b$  и конденсатора фильтра  $C_f$ . Регулирование выходной частоты  $f_{\text{вых}}$  и напряжения  $U_{\text{вых}}$  осуществляется в инверторе за счет высокочастотного широтно-импульсного управления (рис.1.31).

Широтно-импульсное управление характеризуется периодом модуляции, внутри которого обмотка статора электродвигателя подключается поочередно к положительному и отрицательному полюсам выпрямителя. Длительность этих состояний внутри периода ШИМ модулируется по синусоидальному закону. При высоких (обычно 2...15 кГц) тактовых частотах ШИМ, в обмотках электродвигателя, вследствие их фильтрующих свойств, текут синусоидальные токи.

Таким образом, форма кривой выходного напряжения представляет собой высокочастотную двухполярную последовательность прямоугольных импульсов (рис. 1.33).

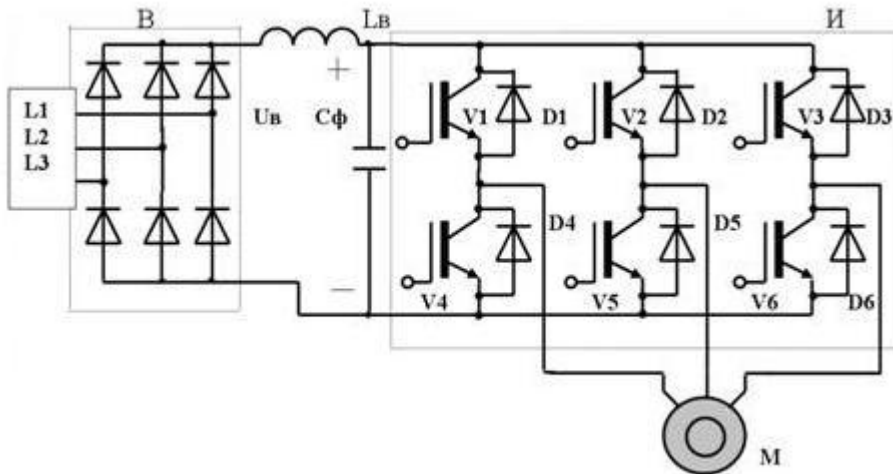


Рис. 1.32. Асинхронный электропривод с автономным инвертором напряжения, выполненном на IGBT-транзисторах

Частота импульсов определяется частотой ШИМ, длительность (ширина) импульсов в течение периода выходной частоты АИН промоделирована по синусоидальному закону.

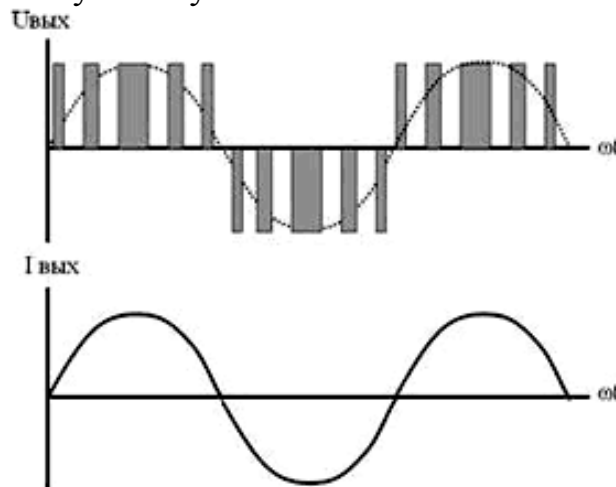


Рис. 1.33. Форма выходного тока и напряжения преобразователя частоты

Форма кривой выходного тока (тока в обмотках асинхронного электродвигателя) практически синусоидальна. Регулирование выходного напряжения инвертора можно осуществить двумя способами: амплитудным (АР) за счет изменения входного напряжения  $U_B$  и широтно-импульсным (ШИМ) за счет изменения программы переключения вентилях  $V1-V6$  при  $U_B = \text{const}$ . Второй способ получил распространение в современных преобразователях частоты благодаря развитию современной



элементной базы (микропроцессоры, IGBT-транзисторы). При широтно-импульсной модуляции форма токов в обмотках статора асинхронного двигателя получается близкой к синусоидальной благодаря фильтрующим свойствам самих обмоток.

Такое управление позволяет получить высокий КПД преобразователя и эквивалентно аналоговому управлению с помощью частоты и амплитуды напряжения.

Современные инверторы выполняются на основе полностью управляемых силовых полупроводниковых приборов – запираемых ГТО – тиристоров, либо биполярных IGBT-транзисторов с изолированным затвором. На рис. 1.32 представлена 3-х фазная мостовая схема автономного инвертора на IGBT-транзисторах. Она состоит из входного емкостного фильтра  $C_\phi$  и шести IGBT-транзисторов  $V1-V6$  включенными встречно-параллельно диодами обратного тока  $D1-D6$ .

За счет переключения вентилях  $V1-V6$  по алгоритму, заданному системой управления, постоянное входной напряжение  $U_B$  преобразуется в переменное прямоугольно-импульсное выходное напряжение. Через управляемые ключи  $V1-V6$  протекает активная составляющая тока асинхронного электродвигателя, через диоды  $D1-D6$  – реактивная составляющая тока.

#### 1.4.4.2. Асинхронный электропривод с частотным регулированием угловой скорости

Изменение частоты питающего напряжения асинхронного двигателя влияет как на его синхронную скорость  $\omega_0$ , соответственно на  $\omega = (1 - s)\omega_0$  скорость вращения ротора, так и на его реактивные сопротивления, которые меняются пропорционально изменению частоты [38]:

$$X_{1\sigma j} = X_{1\sigma H} \cdot f_{1j} / f_{1H}; \quad X_{2\sigma j} = X'_{2\sigma H} \cdot f_{1j} / f_{1H}; \quad X_m = X_{mH} \cdot f_{1j} / f_{1H} \quad (17)$$

где  $f_{1H}$  – номинальное значение частоты напряжения статора асинхронного двигателя;  $X_{1\sigma H}$ ;  $X'_{2\sigma H}$  – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора и индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенное к обмотке статора при номинальной частоте питающей сети  $f_{1H}$ .

Для того, чтобы магнитный поток  $\Phi \approx U_{1H} / 4.44k_{106} W_1 f_1 = \text{const}$ , необходимо одновременно с частотой  $f_{1j}$  изменять и переменное напряжение  $U_{1j}$  обмоток статора асинхронного двигателя.

Частотное регулирование обычно применяют в тех случаях, когда требуется изменять частоту вращения и электромагнитный момент в широких пределах. Для этого проанализируем уравнение баланса мощностей, так как закон изменения напряжения зависит от характера момента нагрузки  $M_C$ . Известно, что мощность на валу двигателя

$$P_2 = P - \Delta P_2 = \omega_0 \cdot (1 - s) \cdot M, \quad (18)$$

где  $P$  – электромагнитная мощность, передаваемая от статора к ротору;  $\Delta P_2$  – мощность потерь в роторе.

Из (18) следует, что при любом способе регулирования скорости асинхронного двигателя важно согласовать механические характеристики двигателя с механическими характеристиками нагрузки. Основным критерий в этом случае – это сохранить перегрузочную способность  $\lambda$  при регулировании напряжения и частоты  $\lambda = M_K / M_C = \text{const}$ .

По характеру зависимости момента механизма от его скорости –  $M_C = f(\omega)$  можно выделить следующие механические характеристики производственных механизмов:

- не зависящая от угловой скорости механическая характеристика

$$M_C = \text{const}; P_C = k \cdot \omega; \quad (19)$$

- нелинейно-спадающая механическая характеристика или работа с постоянной мощностью

$$M_C = k \cdot \omega^{-1}; P_C = \text{const}; \quad (20)$$

- нелинейно-возрастающая механическая характеристика или вентиляторная нагрузка

$$M_C = k \cdot \omega^2; P_C = k \cdot \omega^3. \quad (21)$$

В частотно-регулируемых электроприводах переменного тока зависимости (19)–(21) можно сформировать и для электромагнитных моментов двигателей. Например, при постоянном моменте нагрузки ( $M_C = \text{const}$ ) управление напряжением и частотой тока статора асинхронного двигателя должно осуществляться по закону

$$U_{1j} / f_{1j} = \text{const} \quad (22)$$

При нелинейно-спадающей нагрузке  $M_c = k \cdot \omega^{-1}$  –закон управления напряжением и частотой принимает вид

$$U_{1j}^2 / f_{1j} = \text{const} . \quad (23)$$

Наконец, при «вентиляторной» нагрузке  $M_c = k \cdot \omega^2$  напряжение и частота должны изменяться в соответствии с зависимостью

$$U_{1j} / f_{1j}^2 = \text{const} . \quad (24)$$

Законы управления (22)–(24), связывающие напряжение, частоту и характер нагрузки, описываются формулой М.П. Костенко:

$$U_{1j} = U_{1H} \frac{f_{1j}}{f_{1H}} \sqrt{M_c / M_H} , \quad (25)$$

где  $U_{1H}$  – номинальное напряжение питающей сети, В;  $U_{1j}$  – напряжение на выходе преобразователя частоты;  $M_c$  – статический момент на валу асинхронного двигателя при данной частоте  $f_{1j}$ .

Из (25) следует, что, например, для привода, работающего с постоянной мощностью, увеличение скорости в четыре раза приводит к уменьшению статического момента  $M_c$  также в четыре раза. При этом потери в стали и на намагничивание уменьшаются, а перегрузочная способность двигателя остается примерно постоянной:

$$M_K / M_c = \text{const} , \quad (26)$$

где  $M_K$  – критический момент двигателя, Н · м.

Таким образом, для того, чтобы наиболее эффективно реализовать принципы частотного управления асинхронным двигателем, необходимо в соответствии с видом нагрузки на валу двигателя управлять напряжением, подводимым к статору, взаимосвязано с изменением частоты тока статора. Перечисленные режимы управления достаточны для большинства механизмов.

#### *Анализ основных законов частотного регулирования*

Анализ процессов, протекающих при частотном (скалярном) управлении в электродвигателе, и основные соотношения для токов и параметров осуществляют с использованием схемы замещения, так как все законы частотного управления базируются на математическом описании асинхронной машины в установившемся режиме работы.

Закон управления М.П. Костенко справедлив только в первом аналитическом приближении, когда активным сопротивлением статора  $R_1$  мож-

но пренебречь. В действительности, при малых значениях частоты ( $f_1 \leq 0,5 \cdot f_{1н}$ ) падение напряжения на сопротивлении  $R_1$  существенно снижает величину напряжения, прикладываемого к контуру намагничивания, и критический момент асинхронного двигателя уменьшается.

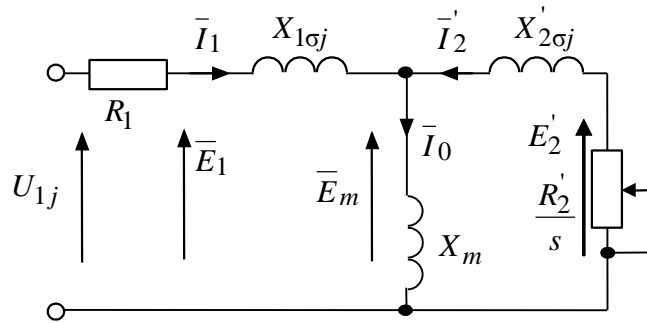


Рис.1.34. Схема замещения АД с короткозамкнутым ротором в установившемся режиме при частотном управлении

В асинхронных частотно-регулируемых электроприводах со скалярным управлением, кроме законов регулирования класса  $U_{1j}/f_{1j}$ , получили применение и другие законы регулирования.

В соответствии со схемой замещения (рис. 1.34) можно записать следующие уравнения:

$$U_{1j} = E_1 + R_1 \cdot I_1; \quad (27)$$

$$U_{1j} = E_m + R_1 + j \cdot X_{1\sigma j} I_1; \quad (28)$$

$$U_{1j} = E_2' + R_1 + j \cdot X_{1\sigma j} I_1 + j \cdot X_{2\sigma j}' \cdot I_2'. \quad (29)$$

Таким образом, компенсируя падения напряжения на сопротивлениях  $R_1$ ,  $R_1 + j \cdot X_{1\sigma j}$ , и  $X_{2\sigma j}'$ , можно получить частотные законы регулирования

скорости классов  $\frac{E_{1j}}{f_{1j}}$ ,  $\frac{E_{mj}}{f_{1j}}$ ,  $\frac{E_{2j}'}{f_{1j}}$ .

В соответствии с уравнениями математической модели асинхронного двигателя в неподвижной системе координат:

- условие  $\frac{E_{1j}}{f_{1j}} = \text{const}$  в статике является условием стабилизации потока сцепления статора  $\Psi_s$ ;
- регулирование класса  $\frac{E_{mj}}{f_{1j}}$  – это регулирование с постоянным пото-

косцеплением в воздушном зазоре  $\Psi_m$ ,

• регулирование класса  $\frac{E'_{2j}}{f_{1j}}$  – регулирование с постоянным потокосцеплением ротора  $\Psi_R$ .

Если при изменении нагрузки на валу двигателя поддерживать соответствующие значения ЭДС  $E_1, E_m$  или  $E'_2$  постоянными, то механические характеристики асинхронного двигателя получат вид, пока показанный на рис. 1.35.

Анализ, приведенных на рис. 1.35, механических характеристик показывает, что для стабилизации скорости при изменении нагрузки на валу двигателя предпочтение следует отдавать методу регулирования  $E'_2 = \text{const}$ .

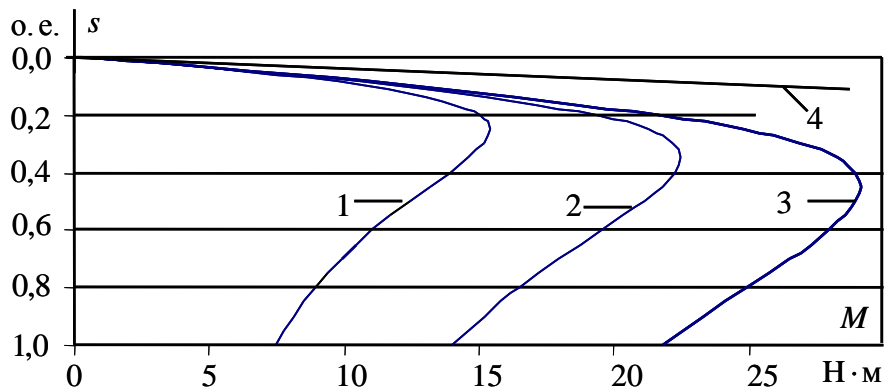


Рис. 1.35. Механические характеристики асинхронного двигателя при различных законах регулирования:

$$1 - \frac{U_1}{f_1} = \text{const}; \quad 2 - \frac{E_1}{f_1} = \text{const}; \quad 3 - \frac{E_m}{f_1} = \text{const}; \quad 4 - \frac{E'_2}{f_1} = \text{const}$$

Однако такое регулирование предполагает повышение напряжения  $U_{1j}$  по сравнению с номинальным  $U_{1н}$  при всех значениях нагрузки. Это в большинстве случаев приводит к насыщению магнитной цепи асинхронного двигателя и его перегреву. Поэтому на практике наибольшее распространение получили такие способы частотного регулирования скорости, как  $E_{1j}/f_{1j} = \text{const}$ ;  $E_{1j}/f_{1j}^2 = \text{const}$ ;  $E_{1j}/\sqrt{f_{1j}} = \text{const}$ . При регулировании

скорости в классе законов  $E_{1j}/f_{1j}$  необходимо повышать фазное напряжение  $U_{1j} = E_{1j} + I_1 \cdot R_1$  только на величину падения напряжения  $I_1 \cdot R_1$  на активном сопротивлении обмотки статора, а способ регулирования скорости асинхронного двигателя получил название – частотное регулирование с  $IR$ -компенсацией.

Реализация управления компенсирующего падения напряжения на активном сопротивлении статора возможна как по отклонению, так и по возмущению, со скалярной или векторной  $IR$ -компенсацией.

#### 1.4.4.3. Электромеханические и механические характеристики АД при частотном управлении

Электромеханическая и механическая характеристики разомкнутой системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель определяются по следующим выражениям для схемы замещения рис. 1.34.

Электромеханическая характеристика, определяющая зависимость приведенного тока ротора от скольжения,  $I_2'(s)$ .

$$I_2' = \frac{U_{1j}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{\text{кн}}^2 \cdot f_{1*}^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\text{мн}} \cdot f_{1*}}\right)^2}} \quad (30)$$

где  $U_{1j}$  – фазное напряжение обмоток статора асинхронного двигателя;

$f_{1*} = f_{1j}/f_{1н}$  – относительное значение частоты питающего напряжения.

Электромеханические характеристики  $I_2' = f(\omega)$ , построенные по (30) для трех законов регулирования класса  $U_{1j}/f_{1j}$ , приведены на рис. 1.36, где  $\omega = \omega_0(1 - s)$ .

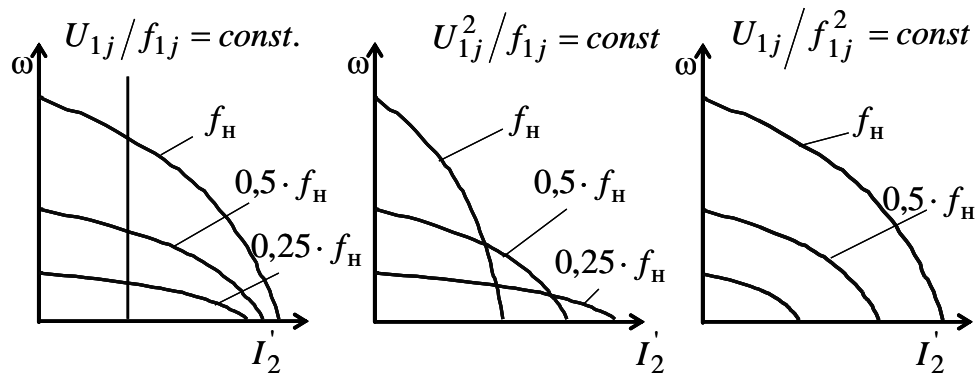


Рис. 1.36. Электромеханические характеристики  $I_2' = f(\omega)$  для трех законов регулирования класса  $U_{1j}/f_{1j}$

Для короткозамкнутого асинхронного двигателя одной из основных является электромеханическая характеристика  $I_1 = f(\omega)$ , отражающая зависимость тока статора  $I_1$  от скорости  $\omega$  (скольжения  $s$ ). Ток статора  $I_1$  определяется путем сложения вектора тока намагничивания  $\overline{I_0}$  и вектора тока ротора  $\overline{I_2'}$ . Обычно это производится с помощью круговой диаграммы.

Полагая ток намагничивания асинхронного двигателя  $I_0$  реактивным, ток статора  $I_1$  через приведенный ток ротора  $I_2'$  можно найти по формуле [6]:

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2' \cdot \sin \varphi_2} \quad (31)$$

где

$$\sin \varphi_2 = \frac{x_{\text{кн}} \cdot f_{1*}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + x_{\text{кн}}^2 \cdot f_{1*}^2}} \quad (32)$$

Механическая характеристика асинхронного двигателя при переменных значениях величины и частоты напряжения питания определяется следующим выражением:

$$M = \frac{3 \cdot U_{1j}^2 \cdot R_2'}{\omega_{0j} \cdot s \left[ X_{\text{кн}}^2 \cdot f_{1*}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\text{мн}} \cdot f_{1*}}\right)^2 \right]}, \quad (33)$$

Механическая характеристика асинхронного двигателя имеет критический момент и критическое скольжение, которые определяются обычным способом, положив  $dM/ds = 0$ . Тогда критический момент

$$M_{kj} = \frac{3 \cdot U_{1j}^2}{2 \cdot \omega_{0j} \left[ R_1 \pm \sqrt{(R_1^2 + X_{кн}^2 \cdot f_{1*}^2) \left( 1 + \frac{R_1^2}{X_{\muн}^2 \cdot f_{1*}^2} \right)} \right]} \quad (34)$$

где  $\omega_{0j} = \frac{\pi \cdot f_{1j}}{p}$  – синхронная угловая скорость;  $U_{1j}$  – фазное напряжение обмоток статора асинхронного двигателя.

Критическое скольжение

$$s_{kj} = \pm R_2' \sqrt{\frac{1 + \frac{R_1^2}{X_{\muн}^2 \cdot f_{1*}^2}}{R_1^2 + X_{кн}^2 \cdot f_{1*}^2}}. \quad (35)$$

Знак (+) означает, что критический момент и скольжение относятся к двигательному режиму, знак (–) – к генераторному режиму рекуперативного торможения.

#### 1.4.5. Каскадный электропривод

*Каскадный электропривод* – регулируемый электропривод, содержащий асинхронный электродвигатель с фазным ротором, питаемый одновременно от двух источников энергии: непосредственно от сети (питается статор) и от дополнительного регулируемого источника, обеспечивающего плавное изменение угловой скорости (питает фазный ротор). По виду дополнительного источника энергии каскадный электропривод подразделяются на вентильные и электромашинные. Применяются для привода механизмов с относительно небольшим диапазоном регулирования угловой скорости (например, воздуходувок).

*Каскад вентильный* – каскадный электропривод, у которого дополнительный регулируемый источник энергии, питающий фазный ротор асинхронного электродвигателя, выполнен на основе вентильного преобразователя. Благодаря высокому КПД хорошему быстродействию при работе с системами автоматического регулирования, высокой надёжности и простоте обслуживания находит всё более широкое применение для регулируемого привода мощных механизмов (нагнетателей, воздуходувок).



*Каскад электромашинный* – каскадный электропривод, у которого дополнительный регулируемый источник энергии, питающий фазный ротор асинхронного электродвигателя, выполнен на основе коллекторных электрических машин. Вытесняется более экономичным и надёжным каскадом вентильным.

Каскадные схемы включения асинхронных двигателей позволяют полезно реализовать энергию скольжения при регулировании скорости в отличие от схем, где она рассеивалась в сопротивления роторной цепи.

#### 1.4.5.1. Функциональные схемы каскадного асинхронного электропривода

Каскадными называют такие схемы включения АД, которые, обеспечивая регулирование скорости, позволяют одновременно полезно использовать энергию скольжения.

По способу использования энергии скольжения различают две принципиально важные схемы.

*Первая схема* каскадного электропривода, в которой энергия скольжения возвращается в сеть, называется *электрическим каскадом*. Функциональная схема такого электропривода приведена на рис 1.37.

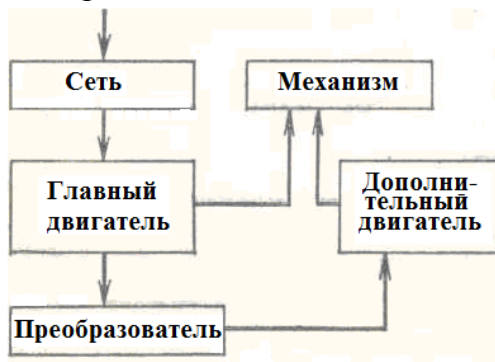
В электрических каскадах, содержащих *главный двигатель* (асинхронный двигатель), *преобразователь* и *рабочий механизм*, поток энергии скольжения преобразователем возвращается в сеть. ЭДС и ток ротора асинхронного двигателя имеют частоту, пропорциональную скольжению, т. е. изменяются с изменением угловой скорости двигателя,

Для возвращения же энергии в сеть необходимо, чтобы частота ЭДС была равна частоте сети, следовательно, в роторной цепи двигателя требуется преобразователь частоты, связанный с сетью [37].



Рис. 1.37. Функциональная схема электрического каскада

*Вторая схема* электромеханического каскада возвращает энергию скольжения на вал асинхронного двигателя. Функциональная схема такого электропривода приведена на рис 1.38.



*Рис. 1.38. Функциональная схема электромеханического каскада*

Возвратить энергию скольжения на вал главного двигателя в такой схеме можно только с помощью дополнительного двигателя. Если в качестве дополнительного двигателя используют двигатель постоянного тока, то энергию переменного тока в цепи ротора необходимо преобразовать в энергию постоянного тока, которая будет реализована этим двигателем.

В каскадах с непосредственной реализацией энергии переменного тока в роторной цепи используют коллекторный двигатель переменного тока (или коллекторный преобразователь частоты). Тогда энергия скольжения с помощью двигателя переменного тока сразу преобразуется в механическую энергию и возвращается на вал главного двигателя.

В электромашинном каскаде можно с помощью преобразовательного агрегата также возвращать энергию в сеть. Отличительная особенность каскадных включений заключается в том, что преобразовательное устройство выполняется, исходя из величины мощности скольжения. В отличие от других систем регулируемого электропривода.

#### **1.4.5.2. Принцип работы каскадных электроприводов**

Регулирование скорости асинхронного двигателя, работающего в каскадной схеме, основано на введении в цепь ротора двигателя добавочной электродвижущей силы (ЭДС). При этом вводимая электродвижущая сила должна быть соответствующим образом ориентирована относительно основной ЭДС машины и иметь во всех режимах работы ту же частоту, что и основная ЭДС. В противном случае эти ЭДС не смогут вступить во взаимодействие.

Схема замещения асинхронного двигателя при введении в цепь ротора добавочной ЭДС  $E_d$  изображена на рис. 1.39.

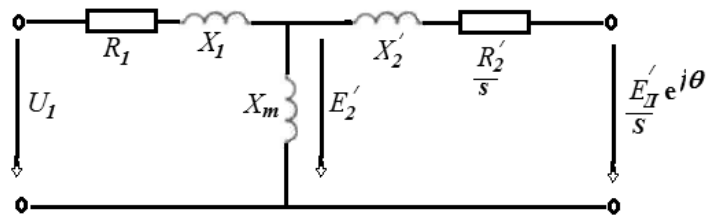
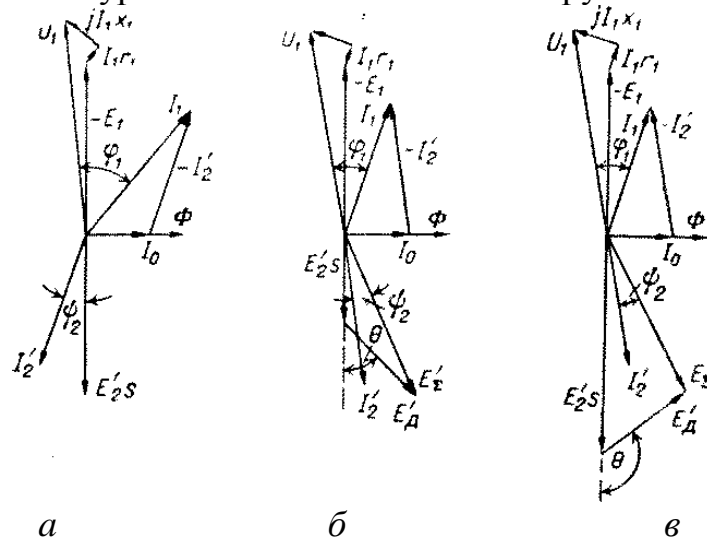


Рис. 1.39. Схема замещения асинхронного электродвигателя с добавочной ЭДС в цепи ротора

В общем случае добавочная ЭДС не совпадает по фазе с основной ЭДС машины, что учитывается углом сдвига  $\theta$ . Схема замещения не учитывает влияния потерь в стали двигателя, что, однако, дает малую погрешность в расчетах, поскольку обусловленное этими потерями активное сопротивление намагничивающего контура значительно меньше его индуктивного сопротивления.

Для качественной оценки влияния добавочной ЭДС на характеристики двигателя обратимся к векторным диаграммам (рис. 1.40). При построении этих диаграмм использованы приведенные значения ЭДС ротора двигателя  $E_2's$  и добавочной ЭДС  $E_d'$ .

При  $\theta < 90^\circ$  введение добавочной ЭДС вызывает возрастание результирующей э. д. с.  $E_2'$  в роторной цепи машины (рис. 1.40, б), что ведет к росту тока и момента, развиваемого двигателем. Создаются условия для увеличения скорости двигателя, которое будет происходить до тех пор, пока момент двигателя не уравновесится моментом нагрузки.



*Рис. 1.40. Векторные диаграммы асинхронного электродвигателя при различных значениях добавочной ЭДС:*

*a* – при  $E'_d = 0$ ; *б* – при  $E'_d > 0$  и  $\theta < 90^\circ$ ; *в* – при  $E'_d < 0$  и  $\theta > 90^\circ$

При малых углах  $\theta$  и  $E'_d > E'_{2s}$  равновесие моментов двигателя и нагрузки наступает при отрицательном скольжении, т. е. при скорости выше синхронной.

В случае, когда  $\theta > 90^\circ$ , добавочная ЭДС уменьшает результирующую ЭДС этой цепи (рис. 1.40, *в*). Ток ротора и момент, развиваемый двигателем, уменьшаются. Двигатель тормозится, причем это торможение при достаточной величине добавочной ЭДС может быть осуществлено до полной остановки привода.

Из рассмотренных векторных диаграмм также следует, что при значениях угла  $\theta$ , отличных от 0 и  $180^\circ$ , добавочная ЭДС в цепи ротора, оказывает влияние и на коэффициент мощности двигателя. В этих условиях результирующая ЭДС опережает по фазе ЭДС  $E'_2$ . Приняв в первом приближении параметры роторной цепи неизменными. Тогда получим, что ток ротора сдвинут по фазе на тот же угол  $\varphi_2$ , но уже по отношению к результирующей ЭДС  $E_\Sigma$ . По отношению к основной ЭДС машины ток ротора становится опережающим, в результате чего при углах  $\theta$ , близких к  $90^\circ$ , будет существенно уменьшаться реактивная составляющая тока статора.

Таким образом, регулирование скорости двигателя обеспечивается в основном составляющей добавочной ЭДС, которая совпадает по фазе с основной ЭДС машины, или находится с ней в противофазе. Составляющая добавочной ЭДС, опережающая основную ЭДС на угол  $\theta = 90^\circ$ , обеспечивает улучшение коэффициента мощности двигателя.

При исследовании каскадных электроприводов делают допущение:

- внутреннее сопротивление источника добавочной ЭДС, вводимой в цепь ротора, равно нулю;
- мгновенное значение ЭДС  $E'_d$  во времени изменяется по синусоидальному закону.

Из схемы замещения рис. 1.39. для тока ротора двигателя запишем следующее соотношение

$$\dot{i}'_2 = \frac{\dot{E}'_\Sigma}{Z'_2} = \frac{E'_2 + \frac{E'_d}{s} \cos \theta + j \frac{E'_d}{s} \sin \theta}{\frac{R'_2}{s} + jX'_2}. \quad (36)$$

Преобразуем полученное выражение и выделим активную составляющую тока ротора, т. е.

$$i'_{2a} = \frac{E'_2 \cdot R'_2 \cdot s + E'_d \cdot R'_2 \cos \theta + jE'_d \cdot X'_2 \sin \theta}{R_2'^2 + X_2'^2 \cdot s^2}. \quad (37)$$

Используя выражение для электромагнитной мощности двигателя;

$$P_{эм} = m_1 \cdot E'_2 \cdot I'_{2a}, \quad (38)$$

после подстановки в него уравнения (2) получим

$$P_{эм} = \frac{m_1 \cdot E_2'^2 \cdot R'_2}{s \cdot \left(\frac{R_2'^2}{s^2} + X_2'^2\right)} \left[ 1 + \frac{\varepsilon}{s} \cos \theta + \varepsilon \frac{X'_2}{R'_2} \sin \theta \right], \quad (39)$$

где  $\varepsilon = E'_d / E'_2$ .

Выражение, стоящее перед квадратной скобкой, представляет собой электромагнитную мощность асинхронного двигателя в нормальной схеме включения. Исходя из этого для момента двигателя, при введении в цепь ротора добавочной ЭДС, будет справедливо соотношение:

$$M = \frac{2M_{к.н}(1+q)}{\frac{s}{s_{к.н}} + \frac{s_{к.н}}{s} + 2q} \left[ 1 + \frac{\varepsilon}{s} \cos \theta + \varepsilon \cdot \xi \sin \theta \right], \quad (40)$$

где  $M_{к.н}$  и  $s_{к.н}$  – критический момент, и критическое скольжение в нормальной схеме включения;

$$q = s_{к.н} \frac{R_1}{R'_2}; \quad \xi = \frac{X'_2}{R'_2}.$$

При введении в цепь ротора добавочной ЭДС момент двигателя имеет три составляющих:

$$M = M_H + M_1 + M_2, \quad (41)$$

где  $M_H$  – момент двигателя в нормальной схеме включения;

$M_1$  – момент, обусловленный влиянием активной составляющей добавочной ЭДС;  $M_2$  – момент, обусловленный влиянием реактивной составляющей добавочной ЭДС.

Моменты, обусловленные влиянием активной и реактивной составляющих, определяют из следующих выражений:

$$M_1 = \frac{2M_{к.н}(1+q)}{\frac{s}{s_{к.н}} + \frac{s_{к.н}}{s} + 2q} \cdot \frac{\varepsilon}{s} \cos \theta, \quad (42)$$

$$M = \frac{2M_{к.н}(1+q)}{\frac{s}{s_{к.н}} + \frac{s_{к.н}}{s} + 2q} \cdot \varepsilon \cdot \xi \sin \theta. \quad (43)$$

Критическое скольжение двигателя при наличии добавочной ЭДС в цепи ротора не совпадает с критическим скольжением в нормальном режиме. Оно оказывается зависимым от величины добавочной ЭДС и угла  $\theta$ . Рассматривая производную от момента по скольжению, на основании соотношения (40) находим

$$s_k = -\frac{\varepsilon \cdot \cos \theta}{1 + \varepsilon \cdot \xi \sin \theta} \pm \sqrt{s_{к.н}^2 + \frac{\varepsilon \cdot \cos \theta \cdot \varepsilon \cdot \cos \theta - 2 \cdot q \cdot s \cdot (1 + \varepsilon \cdot \xi \sin \theta)}{(1 + \varepsilon \cdot \xi \sin \theta)^2}}. \quad (44)$$

Из выражений (40) и (44) можно определить величину критического момента двигателя. При этом, однако, формула получается достаточно громоздкой. Для упрощения можно без существенной погрешности принять  $R_1 = 0$ . В этом случае имеем [4]

$$M_k = M_{к.н} (1 + \varepsilon \cdot \xi \sin \theta) \frac{s_{к.н}}{s_k}. \quad (45)$$

Как видно из соотношения (43), при наличии в цепи ротора двигателя добавочной э. д. с. его момент при синхронной скорости не равен нулю. Величина этого момента

$$M_0 = \frac{2M_{к.н}(1+q)}{s_{к.н}} \cdot \varepsilon \cdot \cos \theta. \quad (46)$$

Скорость холостого хода двигателя (при  $M = 0$ )

$$n_0 = n_c \left(1 + \frac{\varepsilon \cdot \cos \theta}{1 + \varepsilon \cdot \xi \sin \theta}\right), \quad (47)$$

где  $n_c$  – синхронная скорость двигателя.

При введении добавочной ЭДС в цепь ротора двигателя мощность в этой цепи определится соотношением:

$$P_{\text{рот}} = P_{\text{эм.н}} s + P_{\text{эм.н}} \cdot \varepsilon (\cos \theta + s \cdot \xi \sin \theta), \quad (48)$$

где  $P_{\text{эм.н}}$  – электромагнитная мощность двигателя в нормальной схеме включения;  $P_{\text{эм.н}} s$  – потери в меди ротора двигателя.

Добавочная мощность  $P_{\text{доб}} = P_{\text{эм.н}} \cdot \varepsilon (\cos \theta + s \cdot \xi \sin \theta)$  состоит из двух составляющих. Первая

$$P_{\text{доб}} = P_{\text{эм.н}} \cdot \varepsilon \cos \theta \quad (49)$$

определяется величиной активной составляющей добавочной ЭДС и при углах  $0 \leq \theta \leq 90^\circ$  потребляется роторной цепью двигателя. При  $90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$  эта мощность отдается источнику добавочной ЭДС. Вторая составляющая обусловлена реактивной составляющей добавочной ЭДС.

$$P_{\text{доб}} = P_{\text{эм.н}} \cdot \varepsilon \cdot \xi \sin \theta \quad (50)$$

Она поступает в цепь ротора двигателя при положительных значениях скольжения, т. е. при скорости ниже синхронной. При скоростях выше синхронной эта мощность отдается источнику добавочной ЭДС.

#### 1.4.5.3. Регулирование скорости АД в каскадных схемах включения

Потери скольжения в электроприводах с АД можно записать в виде:

$$\Delta P_2 = M \cdot \omega_0 \cdot s \quad (51)$$

В мощных электроприводах они значительны, поэтому необходимо использовать энергию скольжения для совершения полезной работы.

Первые схемы, где использовалась энергия скольжения, были соединения АД с другими машинами и назывались каскадными. В настоящее время энергию скольжения можно использовать без дополнительных машин, а с помощью полупроводниковых схем. Они также называются каскадными [25,29].

Каскадные схемы включения позволяют при регулировании скорости полезно использовать энергию скольжения. Различают схемы электрического и электромеханического каскадов. В электрическом каскаде (рис. 4) преобразователь преобразует мощность скольжения  $\Delta P_2$  при частоте  $f_2 = f_1 \cdot s$  в мощность  $P_{\text{эл.с}}$  при  $f_1$  и  $U_{1л}$  и отдает ее в сеть.  $P_{\text{эл.с}} = \Delta P_2 - \Delta P_{2\text{эл.}} - \Delta P_{\text{п}}$ .

В электромеханическом каскаде (рис. 5) мощность скольжения за вычетом потерь в роторе, преобразователе и вспомогательной машине поступает на вал в виде механической мощности  $P_{\text{вм}}$ :

$$P_M = \Delta P_2 - \Delta P_{\Pi} - \Delta P_{2эл} - \Delta P_{ВМ} \quad (52)$$

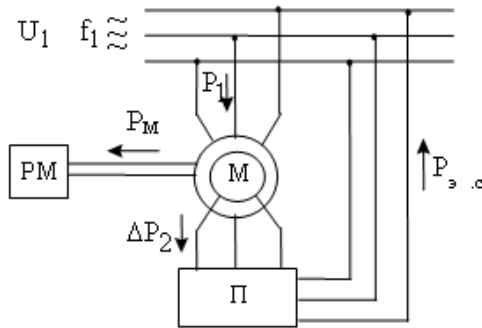


Рис. 1.41. Схема электрического каскада

Если пренебречь потерями в каскадной схеме, то на вал поступает от АД мощность  $P_M = P_2 = M \cdot \omega$  и от ВМ мощность  $P_{ВМ} = \Delta m_2 = M\omega_0 S$ . Суммарная мощность на валу

$$P_{\Sigma} = P_M + P_{ВМ} = M\omega + M\omega_0 S = M\omega_0 = P_{эм},$$

поэтому такие каскады называются каскадами постоянной мощности.

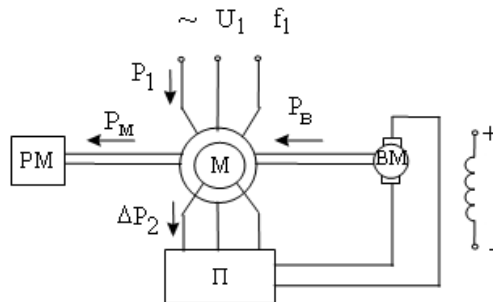


Рис. 1.42. Схема электромеханического каскада

Каскады бывают: а) машинные; б) машинно-вентильные; в) вентильные.

Машинно-вентильные каскады, в свою очередь, могут быть электро-механическими (рис. 41) и электрическими (рис.42).

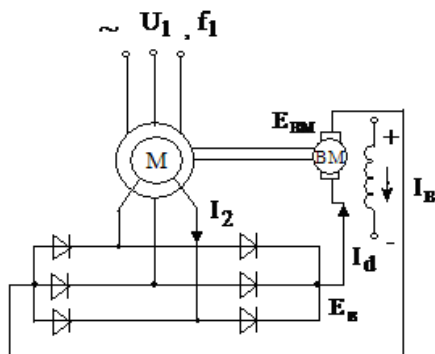




Рис. 1.43. Схема машинно-вентильного электромеханического каскада  
 Регулирование скорости машинно-вентильных каскадов происходит за счет изменения  $E_{\text{ВМ}}$  регулированием тока возбуждения  $I_{\text{В}}$ .

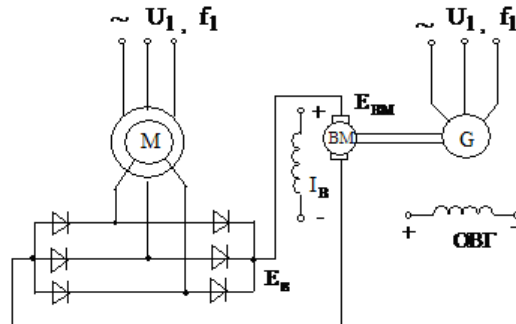


Рис. 1.44. Схема машинно-вентильного электрического каскада  
 При увеличении  $I_{\text{В}}$  увеличится  $E_{\text{ВМ}}$  и уменьшится выпрямленный ток  $I_d$ :

$$I_d = \frac{E_{\text{В}} - E_{\text{ВМ}}}{R_{\Sigma}}. \quad (53)$$

Уменьшение выпрямленного тока  $I_d$  и тока  $I_2$  вызовет уменьшение момента, в результате скорость АД начнет снижаться, а  $E'_2 = E_{2k} \cdot s$  и  $s$  начнут возрастать. Это приведет к увеличению тока  $I_2$  и момента АД. Двигатель АД начнет работать при более низкой скорости с требуемым моментом.

Механические характеристики электромеханического и электрического каскадов представлены на рис.1.45, 1.46.

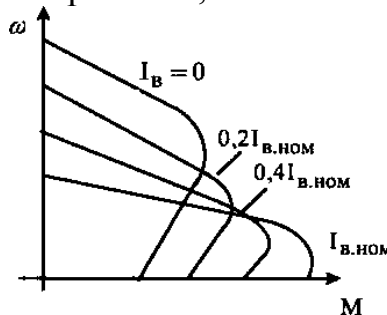


Рис. 1.45. Каскад постоянной мощности  $P_{\text{М}} = M_{\text{К}} \cdot \omega = \text{const}$

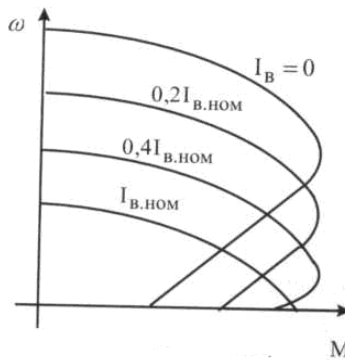


Рис. 1.46. Каскад постоянного момента  $M_K = \text{const}$

Машинно-вентильный электрический каскад можно заменить на статический ПЧ с выпрямителем В и инвертором И. Такой электрический каскад называется асинхронно-вентильным каскадом (рис.1.47), механические характеристики которого подобны характеристикам каскада постоянного момента. Такие каскадные схемы наиболее экономичны, позволяют регулировать скорость как вниз, так и вверх от синхронной и называются установками с двухзонным регулированием.

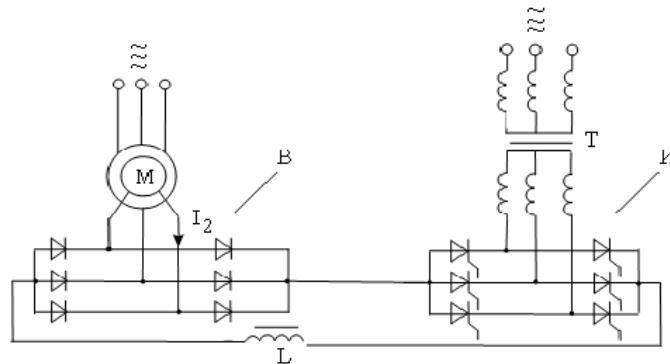


Рис. 1.47. Схема электрического асинхронно-вентильного каскада

#### 1.4.5.4. Асинхронный электропривод двойного питания

Асинхронный электропривод двойного питания – система "преобразователь частоты- асинхронный двигатель", в котором обмотка статора и ротора подключены к источнику энергии и одна из них получает питание от преобразователя частоты рис.1.48 [1].

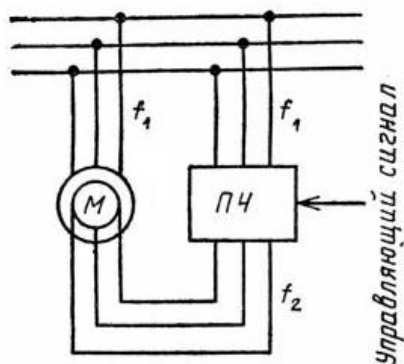


Рис. 1.48. Схема машины двойного питания  
*Принцип действия машины двойного питания*

По конструкции машина двойного питания (асинхронизированная синхронная машина, управляемая машина переменного тока) подобна асинхронной машине с фазным ротором. На ее статоре, как правило размещается трехфазная обмотка, а на роторе двухфазная или трехфазная. Обмотка статора получает питание от сети с частотой питающего напряжения  $f_1$ , а к обмотке ротора подводится управляемым вентильным преобразователем ПЧ напряжение с частотой  $f_2$  ( $f_2 < f_1$ ).

Частота и амплитуда напряжения ПЧ регулируются по заданному закону системой управления. Машины двойного питания целесообразно применять в установках большой мощности, где их преимущества наиболее сильно проявляются. Они могут работать в качестве генераторов и двигателей, как в синхронном, так и в асинхронном режиме.

В машине двойного питания, работающей двигателем, изменением  $f_2$  можно регулировать частоту вращения. Частота тока в роторе асинхронной машины  $f_2 = f_1 \cdot s$  где  $s = n_1 - n / n_1$ , а  $n_1$  — частота вращения магнитного поля. Осуществив подстановки и преобразования, получим:

$$n = n_1(f_1 \pm f_2) / f_1 \quad (54)$$

Знак плюс соответствует чередованию фаз ПЧ, при котором ротор и его магнитное поле вращаются в противоположных направлениях, а минус — когда они вращаются в одну и ту же сторону.

Из (54) следует, что в зависимости от направления вращения магнитного поля ротора можно получить  $n < n_1$ , или  $n > n_1$ . Если при работе поддерживать  $f_2 = \text{const}$ , то машина будет работать в синхронном режиме, а при  $f_2 = \text{var}$  — в асинхронном. Когда  $f_2 = 0$  (питание обмотки ротора по-

стоянным током), то машина работает как обычный синхронный двигатель.

С целью снижения активной мощности преобразователя частоты, которая равна  $P_{пч} = (f_2 / f_1) P_{эм}$  частоту  $f_2$  изменяют в небольших пределах. Кроме частоты вращения в машине двойного питания, работающей двигателем, можно регулировать реактивную мощность и  $\cos \phi$ . Машина может работать как с опережающим, так и с отстающим током. Если подводимая к обмотке ротора добавочная ЭДС  $\bar{E}_д$  совпадает по направлению с индуктированной в ней ЭДС  $\bar{E}_2$ , то в этом случае происходит регулирование частоты вращения ротора. При изменении фазы  $\bar{E}_д$  относительно  $\bar{E}_2$  одновременно с регулированием частоты вращения изменяется и реактивная мощность, т. е.  $\cos \phi$ .

Машины двойного питания, работающие в энергосистемах как генераторы, имеют определенные преимущества по сравнению с обычными синхронными генераторами: они более устойчиво работают в режимах глубокого потребления реактивной мощности, имеют большую динамическую устойчивость, обеспечивают компенсацию колебания частоты и т. д.

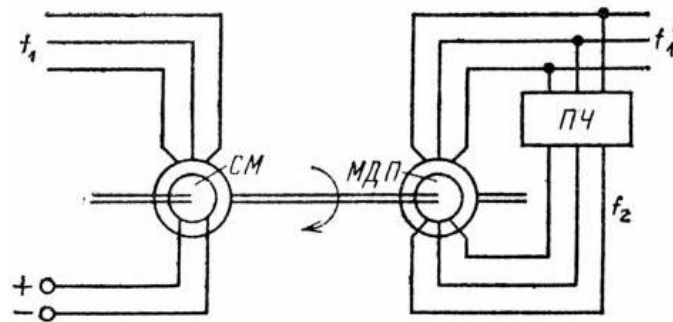


Рис. 1.49. Схема машины двойного питания (генераторный режим)

Машины двойного питания можно использовать в качестве электро-механического преобразователя частоты для гибкой связи энергосистем, частоты которых несколько отличаются друг от друга (не более 0,5 - 1%). Электро-механический преобразователь частоты для гибкой связи энергосистем состоит из двух машин, соединенных общим валом (рис. 15). Одна из этих машин является обычной синхронной машиной *СМ*, а другая – машиной двойного питания *МДП*. Статорные обмотки машин подключены к разным энергосистемам. Система управления вырабатывает такой сигнал, чтобы частота напряжения в роторе машины двойного питания равнялась

разности частот связываемых энергосистем. Одна из машин работает как двигатель, а другая - как генератор. При этом мощность из одной энергосистемы передается в другую.

Машина двойного питания может применяться как источник напряжения постоянной частоты при переменной частоте вращения ротора. Для этого необходимо в соответствии с выражением [ ] соответственно изменить частоту  $f_2$  подводимого к ротору напряжения

$$f_1 = \frac{pn}{60} \pm f_2 \quad (55)$$

Поскольку при преобразовании энергии поля должны быть неподвижны относительно друг друга, должны выдерживаться следующие соотношения скоростей и частот

$$\omega_{10} = \omega_{20} + \omega \text{ и } f_1 = f_2 + f \quad (56)$$

где  $\omega_{10}, \omega_{20}$  – угловые скорости поля статора и поля ротора относительно соответственно статора и ротора;  $f_1, f_2$  – частоты напряжения статора и ротора;  $f$  – частота, соответствующая угловой скорости ротора  $\omega$ .

Из этого следуют богатые возможности управления, скоростью ротора  $\omega$ : действительно, фиксируя  $f_1$ , т.е.  $\omega_{10}$ , и управляя  $f_2$  ( $\omega_2$ ), можно получать любые  $f$  и  $\omega$  теоретически в неограниченном диапазоне (рис. 1.50) [1].

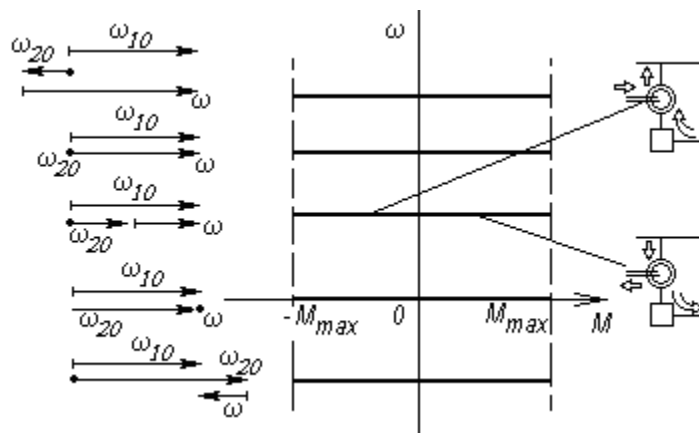


Рис. 1.50. Механические характеристики машины двойного питания

Если частота  $f_2$  задается независимо от  $\omega$ , то механические характеристики представляют собой горизонтальные линии (рис. 1.50). И в этом смысле машина подобна синхронной машине. При изменении момента нагрузки меняется угол  $\theta$  между осями полей статора и ротора – как бы по-разному растягивается “магнитная пружина”. Наибольший момент  $M_{max}$  определяется предельной силой магнитной связи статора и ротора.

При превышении моментом нагрузки этой величины нарушаются условия (56), “магнитная пружина” рвется, поля перестают быть неподвижными относительно друг друга, машина не развивает среднего момента и либо останавливается при реактивном  $M_C$ , либо вращается со скоростью, определяемой активным  $M_C$ ; это, разумеется, аварийный режим.

Возможно и другое построение системы: частота  $f_2$  может быть связана со скоростью ротора. В этом случае характеристики будут похожи на характеристики машины постоянного тока – будут иметь наклон, который можно трактовать как скольжение; видом связи можно формировать характеристики любого вида.

#### 1.4.5.5. Вентильный двигатель

Двигатели постоянного тока имеют хорошие регулировочные свойства, но наличие коллекторно-щеточного узла повышает эксплуатационные расходы, габариты и стоимость ДПТ. С развитием полупроводниковой техники появилась возможность заменить механический выпрямитель-коллектор электронным вентильным коммутатором, который представляет собой преобразователь частоты, управляемый в зависимости от положения ротора (якоря) двигателя. Такие двигатели получили название вентильных двигателей (ВД). Они имеют широкие возможности по регулированию скорости, момента за счет изменения напряжения, тока возбуждения и угла управления вентилями инвертора [7].

По конструкции ВД является синхронным двигателем. На статоре располагается трехфазная обмотка переменного тока, питаемая от вентильного коммутатора. Ротор может быть выполнен с постоянными магнитами или с обмоткой возбуждения, питаемой через контактные кольца постоянным током. В ВД используются 2 вида ПЧ: с промежуточным звеном постоянного тока (двухзвенные) и с непосредственной связью с сетью.

Коммутация тока в вентилях инвертора ПЧ может быть естественной или искусственной. Естественная коммутация вентилях используется в тех случаях, когда нагрузка инвертора (3-х фазная обмотка СД) содержит источник ЭДС той же частоты, что и выходное напряжение инвертора.

Схема ВД с естественной коммутацией вентилях инвертора представлена на рис.1.51. Схема содержит управляемый выпрямитель УВ, сглаживающий реактор  $L$ , управляемый инвертор УИ, тиристорный возбудитель ТВ двигателя и системы управления выпрямителем СУВ и инвертором

СУИ. Угловое положение ротора ВД контролируется косвенно по фазе напряжения  $U(\varphi)$  на выходах обмотки статора.

Регулирование скорости производится изменением выпрямленного напряжения на выходе УВ или тока возбуждения посредством ТВ (тиристорного возбуждателя).

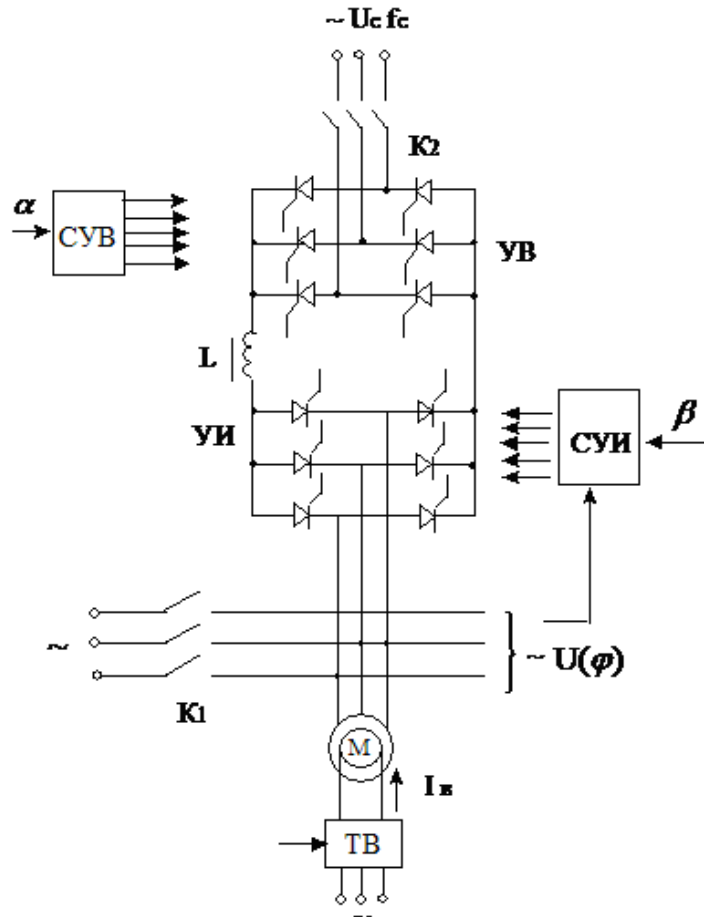


Рис. 1.51. Схема вентильного двигателя с естественной коммутацией

Естественная коммутация вентилей может быть осуществлена только при большой ЭДС двигателя, которая возникает при скорости не ниже 10% от номинальной. Поэтому при пуске вначале производят асинхронный пуск контактором  $K1$  непосредственно от сети, а затем отключают  $K1$  и включают  $K2$  для работы в вентильном или инверторном режиме.

Схема ВД с искусственной коммутацией вентилей инвертора представлена на рис. 1.52.

Инвертор с искусственной коммутацией вентилей - преобразователь постоянного тока или напряжения в переменное напряжение с принудительной коммутацией вентилей устраняет трудности при пуске.

Инвертор выполнен на тиристорах VS1 - VS6, управляемый выпрямитель - на тиристорах VS9 - VS14. Система управления выпрямителя (СУВ) подает импульсы на управляющие электроды тиристоров УВ, а система управления инвертора (СУИ) на управляющие электроды тиристоров УИ. Схема содержит коммутирующие тиристоры VS7 - VS8, обратный мост, выполненный на диодах VD1 - VD6, разрядные резисторы и диоды R1, R2, VD7, VD8, силовой фильтр L1, C1 и колебательные контуры коммутации L2 - L5, C2, C3.

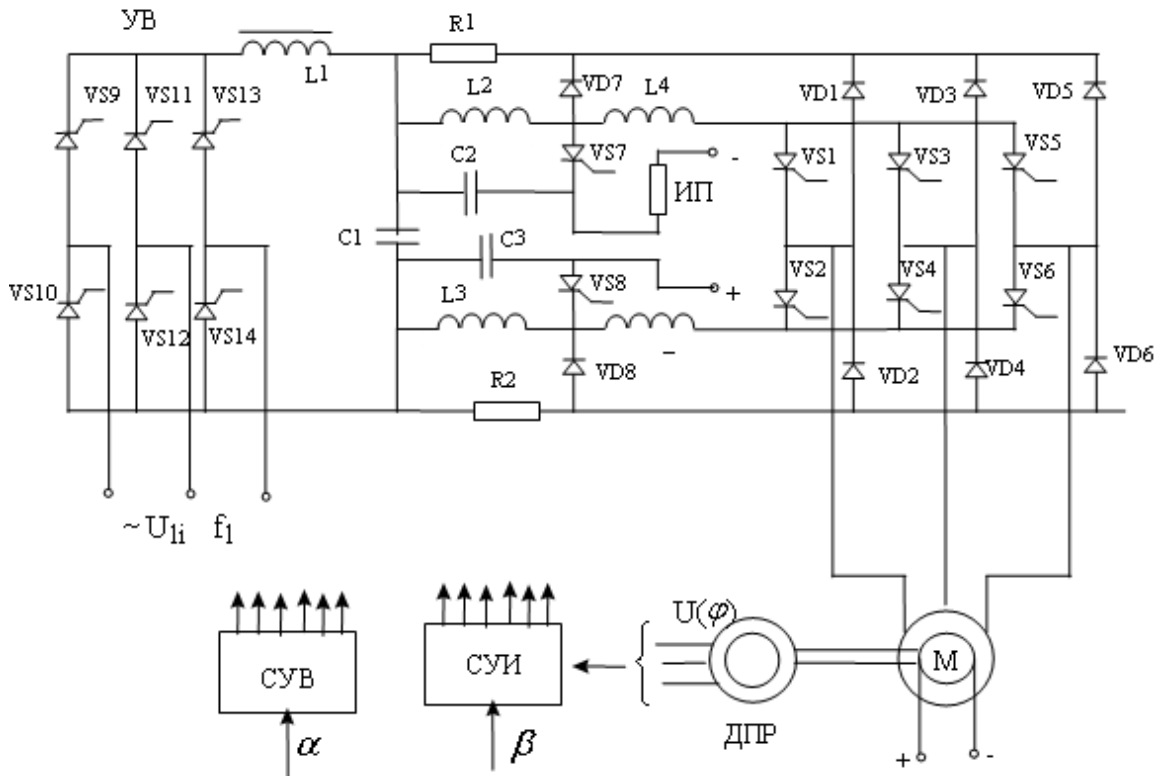


Рис 1.52. Схема вентильного двигателя с искусственной коммутацией вентилей инвертора

Искусственная коммутация осуществляется за счет энергии, запасенной в конденсаторах C2, C3 от дополнительного источника подзаряда ИП.

Управление инвертором производится в функции положения ротора двигателя датчиком положения ротора ДПР, который воздействует на СУИ. Регулирование скорости двигателя возможно изменением выпрямленного напряжения через СУВ и УВ (регулируя угол управления), тока



возбуждения и угла управления  $\beta$  тиристорами инвертора через СУИ. Для получения высокого качества регулирования используются схемы с обратными связями по принципу подчиненного регулирования (замкнутые схемы ЭП).

#### 1.4.5.6. Асинхронный электропривод с тиристорными регуляторами напряжения

Одной из эффективных возможностей повышения надежности и экономичности работы электроприводов с асинхронными двигателями является использование тиристорных регуляторов напряжения. Схема силовых цепей нереверсивного тиристорного регулятора напряжения приведена на рис. 1.53 [38]. Схема состоит из трех пар встречно-параллельно включенных тиристорных диодов  $VS1-VS6$ , управляемых от системы импульсно-фазового управления (СИФУ) входным сигналом  $U_y$ .

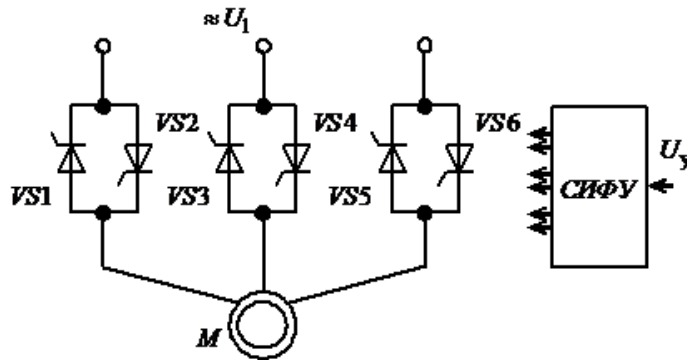


Рис 1.53. Схема нереверсивного тиристорного регулятора напряжения

Изменяя напряжение управления, можно плавно менять действующее значение напряжения на обмотках статора двигателя.

Добавление в схему рис. 1.53 еще двух пар тиристорных диодов позволяет получить реверсивную схему рис 1.54, обеспечивающую возможность вращения двигателя в двух направлениях. В тиристорных регуляторах напряжения небольшой мощности вместо пары тиристорных диодов используются симметричные тиристоры – симисторы, а также тиристорные модули различного типа, в том числе оптронные.

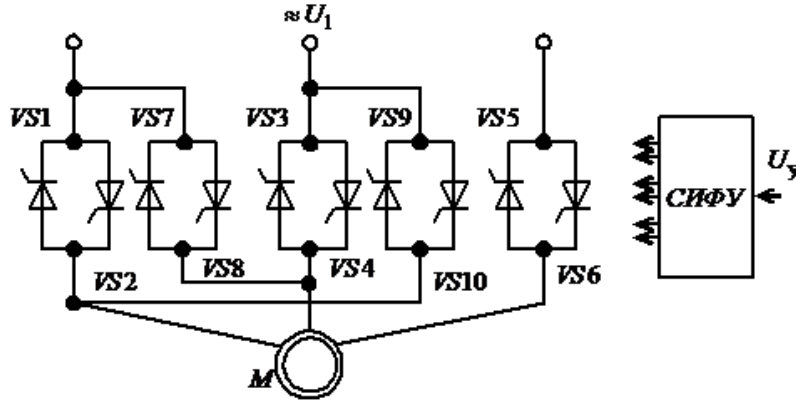


Рис 1.54. Схема реверсивного тиристорного регулятора напряжения  
 Механическая характеристика асинхронного двигателя при регулировании скорости изменением напряжения определяется выражением (57)

$$M = \frac{2 \cdot M_{\text{к}} \left( + a \cdot s_{\text{к}} \right)}{\frac{s_{\text{к}}}{s} + \frac{s}{s_{\text{к}}} + 2 \cdot a \cdot s_{\text{к}}}, \quad (57)$$

где  $s_{\text{к}} = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2}}$  – критическое скольжение,

$$M_{\text{к}} = \frac{m \cdot U_{1j}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left( R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2} \right)} \text{ – критический момент.}$$

При снижении фазного напряжения  $U_{1j}$  синхронная скорость  $\omega_0$  и критическое скольжение  $s_{\text{к}}$  двигателя остаются постоянными, а критический момент двигателя  $M_{\text{к}}$  уменьшается пропорционально квадрату фазного напряжения. Соответственно снижается жесткость рабочей части механической характеристики. При постоянной нагрузке  $M_{\text{с}}$  регулирование скорости возможно в диапазоне от  $\omega_0$  до  $\omega_0(1 - s_{\text{ке}})$ . Механические характеристики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при изменении напряжения обмотки статора приведены на рис. 1.55.

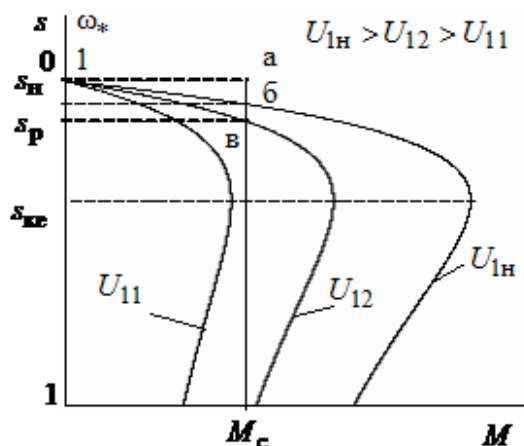


Рис. 1.55. Механические характеристики асинхронного двигателя при изменении напряжения обмотки статора

При снижении питающего напряжения на 30% критический момент асинхронного двигателя уменьшается примерно в два раза, и при значительном статическом моменте двигатель может остановиться и оказаться под пусковым током. Указанные случаи имеют место в слабых электрических сетях (северные районы, сельские местности). Следовательно, в системе управления электроприводом необходима времятоковая защита, предотвращающая нахождение двигателя под недопустимым током длительное время.

В то же время преднамеренное снижение напряжения, подаваемого на статорные обмотки, часто используется для регулирования скорости асинхронного двигателя и для обеспечения плавности пуска.

Регулирование скорости асинхронного двигателя путем изменения напряжения обмотки статора сопряжено с возможностью перегрева его ротора и может производиться лишь при определенных условиях:

- при малом диапазоне снижения скорости относительно номинальной;
- при снижении, относительно номинального, момента сопротивления на валу двигателя;
- при использовании двигателя с повышенным скольжением.

Если момент сопротивления на валу двигателя постоянный и равный номинальному ( $M_c = M_H$ ), то при снижении напряжения до  $U_{12}$  двигатель будет работать со скольжением  $s_p$  и скоростью  $\omega_p = \omega_0(1 - s_p)$ . Мощность  $\Delta P_{M2}$ , выделяемая в виде потерь в обмотке ротора двигателя, будет равна:

$$\Delta P_{M2} = M_c \cdot \omega_0 \cdot s_p = 3 \cdot \left( \frac{1}{2} \right)^2 \cdot R_2'$$

и пропорциональна площади прямоугольника  $0ab s_p$ .

Номинальная мощность скольжения, на рассеяние которой рассчитана конструкция двигателя, пропорциональна площади  $0ab s_H$ , она примерно в два раза меньше потерь в роторе двигателя, работающего в точке “в”. Естественно, что при работе в указанном режиме ротор двигателя будет перегреваться. Поэтому регулирование скорости асинхронного двигателя изменением напряжения статора возможно в том случае, когда момент сопротивления  $M_c$  при снижении скорости существенно меньше номинального момента. Свойством снижения момента сопротивления с уменьшением скорости обладают вентиляторные нагрузки:

$$M_c = M_0 + a \cdot \omega^x \quad (58)$$

где  $M_0$  – момент от сил трения, Н·м;  $a$  – коэффициент,  $\frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$ ;

$x = 2$  – для вентиляторов;  $x = 3$  – для центробежных насосов.

Механические характеристики для случая вентиляторной нагрузки приведены на рис. 1.56.

Поскольку со снижением скорости от  $\omega_H$  до  $\omega_0(1 - s_p)$  момент сопротивления  $M_c$  уменьшается примерно в квадрат раз от величины снижения скорости, то мощность потерь в обмотке ротора  $\Delta P_{M2}$  со снижением скорости растет в меньшей степени, чем при постоянной нагрузке. Скорости, соответствующие установившимся режимам работы электропривода, можно определить графически по точкам пересечения механических характеристик асинхронного двигателя  $M = f(\omega)$  и механической характеристики вентилятора  $M_c = f(\omega)$ .

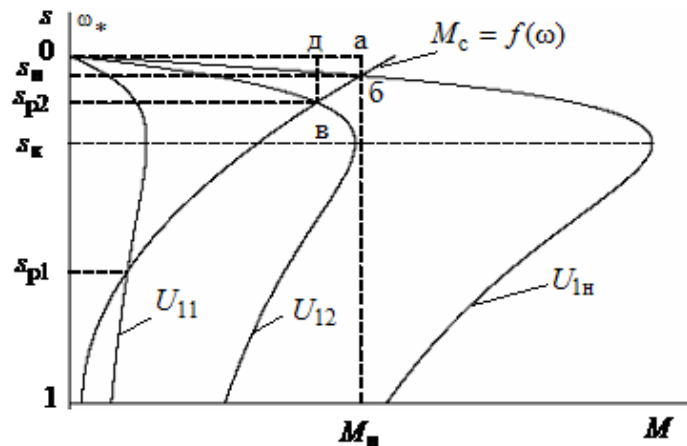


Рис. 1.56. Механические характеристики асинхронного двигателя при регулировании напряжения статора и вентиляторной нагрузке

Точки, соответствующие установившимся значениям скорости или скольжения  $s_n$ ,  $s_{p1}$ ,  $s_{p2}$  могут соответствовать устойчивому или неустойчивому равновесию.

Возникает вопрос об устойчивости работы электропривода с вентиляторной нагрузкой при скольжении  $s_{p1}$ . Критерием устойчивости работы электропривода является выполнение неравенства

$$k_{\beta} - k_{\beta c} < 0, \quad (59)$$

где  $k_{\beta} = \frac{dM}{d\omega}$  – жесткость механической характеристики двигателя в точке установившегося режима;

$k_{\beta c} = \frac{dM_c}{d\omega}$  – жесткость механической характеристики механизма (вентилятора) в точке установившегося режима.

Жесткость механической характеристики вентилятора нетрудно найти аналитически из (58)

$$k_{\beta c} = \frac{dM_c}{d\omega} = \frac{d(M_0 + a \cdot \omega^2)}{d\omega} = 2 \cdot a \cdot \omega. \quad (60)$$

Как следует из (60), жесткость вентилятора  $k_{\beta c}$  линейно увеличивается с ростом его скорости и во всем диапазоне регулирования скорости положительна.

Для определения жесткости механической характеристики двигателя преобразуем (57), подставив в него значение скольжения  $s = (\omega_0 - \omega)/\omega_0$ , получим:

$$M = \frac{m_c \cdot U_{1j}^2 \cdot R_2'}{(\omega_0 - \omega) \cdot \left[ \left( R_1 + R_2' \cdot \left( \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \right)^{-1} \right)^2 + \left( X_{1\sigma} + X_{2\sigma}' \right)^2 \right]}. \quad (61)$$

Тогда

$$k_\beta = \frac{dM}{d\omega} = d \left( \frac{m_c \cdot U_{1j}^2 \cdot R_2'}{(\omega_0 - \omega) \cdot \left[ \left( R_1 + R_2' \cdot \left( \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \right)^{-1} \right)^2 + \left( X_{1\sigma} + X_{2\sigma}' \right)^2 \right]} \right) / d\omega. \quad (62)$$

При известных параметрах вентилятора и двигателя значения  $k_{\beta c}$  и  $k_\beta$  достаточно просто определяются путем численного дифференцирования выражений (60) и (62) в математической системе MathCAD. Результаты расчетов  $k_{\beta c}$  и  $k_\beta$ , а также их разность  $k_\beta - k_{\beta c}$ , найденные для напряжения статора  $U_{11}$ , представлены на рис. 1.57 [7,38].

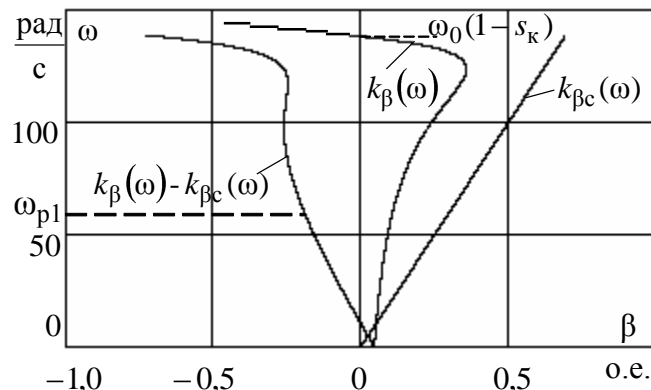


Рис. 1.57. Зависимости жесткости асинхронного двигателя  $k_\beta$  и вентилятора  $k_{\beta c}$  от скорости

Анализ графических зависимостей рис. 55 показывает, что условие (27) выполняется в окрестностях скорости  $\omega_{p1} = \omega_0(1 - s_{p1})$ . Поэтому вращение вентилятора при скольжении  $s_{p1}$  будет устойчивым. Устойчивое вращение вентиляторов со скольжениями большими  $s_k$  при регулировании их скорости изменением напряжения подтверждается практическими исследованиями для различных типов вентиляторов.

**Вывод.** Особенность механической характеристики вентилятора позволяет ему работать на участке механической характеристики асинхронного двигателя со скольжениями, большими  $s_k$ , что практически недостижимо для других видов нагрузок. Однако работа с большими скольжениями вызывает и большие потери в роторе асинхронного двигателя.

Полные электромагнитные потери в асинхронном двигателе

$$\Delta P_{эм} = \Delta P_{M1} + \Delta P_{M2} + \Delta P_{c1}, \quad (63)$$

где  $\Delta P_{M1}$  – потери в меди статора, Вт;  $\Delta P_{M2}$  – потери в обмотке ротора, Вт;  $\Delta P_{c1}$  – потери в стали статора, Вт.

При работе на естественной характеристике эти потери определяются выражениями [64]:

$$\begin{aligned} \Delta P_{M1} &= \left[ \frac{I_0}{I_{1H}} + \left( 1 - \frac{I_0}{I_{1H}} \right) \mu_c^2 \right] \cdot \Delta P_{M1H}; \\ \Delta P_{M2} &= \mu_c^2 \cdot \Delta P_{M2H}; \\ \Delta P_{c1} &= \left[ \beta + \left( -B \mu_c^2 \right) \right] \Delta P_{c1H}, \end{aligned} \quad (64)$$

где  $\Delta P_{M1H} = 3 \cdot I_{1H}^2 \cdot R_1$  – номинальные потери в меди статора, Вт;

$\Delta P_{M2H} = 3 \cdot I_{2H}^2 \cdot R_2'$  – номинальные потери в обмотке ротора, Вт;

$\Delta P_{c1H} = \Delta P_H - \left( \Delta P_{M1H} + 1,5 \cdot 10^{-2} P_H + 10^{-2} \frac{P_H \cdot s_H}{1 - s_H} \right)$  – номинальные потери в стали статора, Вт;

$\Delta P_H = \frac{P_H \cdot (1 - \eta_H)}{\eta_H}$  – суммарные потери в двигателе, Вт;

$\mu_c = \frac{M_c}{M_H}$  – относительное значение момента статической нагрузки, о.е.;

$B$  – конструктивный коэффициент, зависящий от серии асинхронного двигателя, о.е.  $B = 0,96 – 0,98$  – для серии асинхронных двигателей 4А;  $B = 0,94 – 0,97$  – для краново-металлургической серии.

При работе на регулировочной характеристике, реализуемой за счет снижения напряжения обмотки статора, полные электромагнитные потери в асинхронном двигателе определяются в соответствии с выражениями:

$$\begin{aligned} \Delta P_{M1} &= 1,1 \cdot \mu_c^2 \left[ \frac{I_0 \cdot s_H}{I_{1H} \cdot s} + \left( 1 - \frac{I_0}{I_{1H}} \right) \frac{s_H}{s} \right] \cdot \Delta P_{M1H}; \\ \Delta P_{M2} &= 1,1 \cdot \mu_c^2 \left( \frac{s}{s_H} \right) \cdot \Delta P_{M2H}; \\ \Delta P_{c1} &= \mu_c^2 \cdot \left[ B \frac{s_H}{s} + \left( -B \frac{s}{s_H} \right) \right] \cdot \Delta P_{c1H}. \end{aligned} \quad (65)$$

Анализ выражений (65) показывает, что при работе на характеристике с пониженным напряжением увеличиваются потери в обмотке ротора  $\Delta P_{M2}$ , но уменьшаются потери в меди статора  $\Delta P_{M1}$  и в стали статора  $\Delta P_{c1}$ , но их соотношение таково, что общие электромагнитные потери  $\Delta P_{эм}$  при работе на характеристике с пониженным напряжением оказываются меньше, чем при работе на естественной характеристике.

По литературным источникам [11], при регулировании скорости изменением напряжения для вентиляторной нагрузки удается снизить энергопотребление в 1,5 – 2 раза. Экономия электроэнергии будет тем больше, чем меньше момент двигателя, по сравнению с номинальным, и чем больше работает двигатель с недогрузкой.

#### **1.4.5.7. Асинхронные электроприводы с регулированием напряжения обмоток статора**

Известно что, регулировать скорость вращения асинхронного двигателя можно, изменяя напряжение обмоток статора. Однако в разомкнутом электроприводе такое регулирование происходит в ограниченном диапазоне скоростей. Для электроприводов с постоянной нагрузкой на валу двигателя изменение скорости может происходить в диапазоне от синхронной  $\omega_0$  до скорости  $\omega_0(1 - s_k)$ . Для электроприводов с вентиляторной нагрузкой диапазон регулирования значительно расширяется и на практике может достигать значений  $D = 1:10$ . Однако указанное регулирование воз-



можно только в хорошо отбалансированных вентиляторах с малым пусковым моментом  $M_{c3}$ .

Увеличить диапазон регулирования скорости в асинхронных электроприводах с регулированием напряжения обмоток статора удастся введением отрицательной обратной связи по скорости двигателя [13]. В таком электроприводе рис. 1.58. асинхронный двигатель  $M$  питается по цепи обмоток статора от регулятора напряжения, собранного из трех пар встречно-параллельно включенных тиристоров  $VS1..VS6$ , управляемых от системы импульсно-фазового управления (СИФУ).

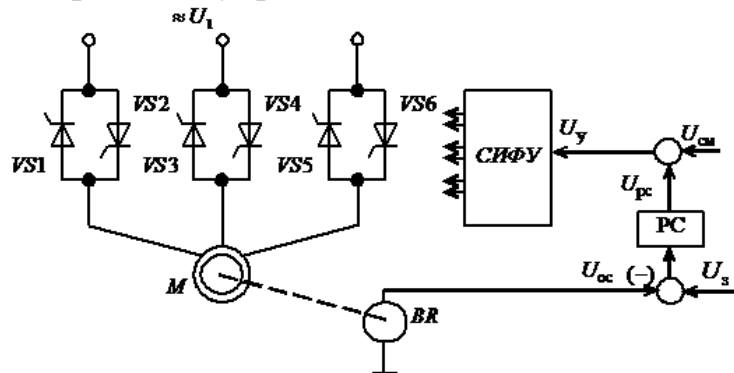


Рис. 1.58. Схема асинхронного электропривода с фазовым регулированием напряжения и отрицательной обратной связью по скорости

Напряжение управления  $U_y$  СИФУ образуется путем суммирования сигналов смещения  $U_{см}$  и регулятора скорости  $U_{pc}$ . Скорость вращения двигателя задается напряжением  $U_3$ , которое сравнивается на входе регулятора скорости РС с напряжением отрицательной обратной связи по скорости  $U_{oc}$ , формируемым датчиком скорости  $BR$ .

Для схемы рис.1.58, с учетом линеаризации характеристик, можно записать

$$U_{1j} = k_{трн} \cdot k_1 \cdot U_y, \quad (66)$$

где  $U_{1j}$  – фазное напряжение обмоток статора асинхронного двигателя;  $k_{трн}$  – коэффициент передачи тиристорного регулятора напряжения;  $k_1$  – коэффициент передачи системы импульсно-фазового управления;  $U_y$  – напряжение управления СИФУ.

В свою очередь, напряжение управления

$$U_y = U_3 - k_c \cdot \omega \overline{k}_{pc} + U_{см}, \quad (67)$$

где  $k_c$  – коэффициент обратной связи по скорости;  $k_{pc}$  – коэффициент усиления регулятора скорости;  $U_{см}$  – напряжение смещения, необходимое для получения характеристики с минимальным моментом двигателя, равным моменту холостого хода.

Подставив (67) в (66), получим:

$$U_{1j} = k_{трн} \cdot k_1 \left[ U_3 - k_c \cdot \omega \right] k_{pc} + U_{см} \quad (68)$$

Механические характеристики в замкнутой системе образуются из множества характеристик разомкнутой системы. Принцип действия электропривода в замкнутой системе заключается в следующем.

Предположим, что двигатель работал на характеристике с фазным напряжением  $U_{11}$  (рис.1.59) с моментом  $M_{c1}$ , что соответствует скорости  $\omega_1$  электропривода. Предположим, что нагрузка на валу двигателя возросла и стала равной  $M_{c2}$ .

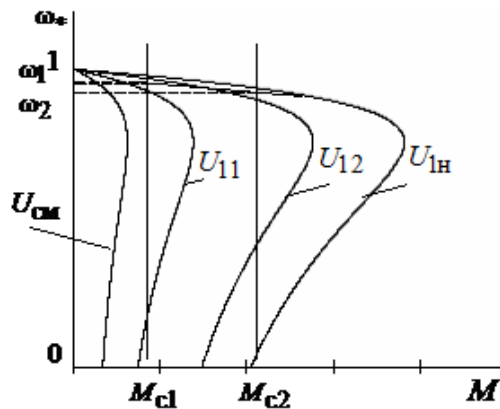


Рис. 1.59. Механические характеристики асинхронного электропривода

Так как момент двигателя  $M$  стал меньше момента сопротивления  $M_c$  на его валу, то в соответствии с уравнением движения скорость электропривода начинает падать. Это приводит к тому, что сигнал отрицательной обратной связи по скорости  $U_{oc} = k_c \cdot \omega$  уменьшается. Анализ уравнения (68) показывает, что в этом случае фазное напряжение  $U_{1j}$  возрастает и, следовательно, электропривод переходит на механическую характеристику, соответствующую фазному напряжению  $U_{12}$ . Новая точка установившейся работы электропривода соответствует скорости  $\omega_2$ . Результирующая характеристика замкнутой системы электропривода для задающего напряжения  $U_{32}$  более жесткая, а ее жесткость определяется общим коэффициентом усиления контура регулирования скорости. При снижении

задающего напряжения до уровня  $U_{31}$  электропривод работает в режиме стабилизации скорости и на неустойчивом участке механической характеристики. Механические характеристики замкнутой системы ограничены слева характеристикой с минимальным моментом, определяемой напряжением смещения  $U_{см}$ , справа – естественной механической характеристикой двигателя, формируемой полностью открытыми тиристорами регулятора напряжения.

## **Глава 2. ЭЛЕКТРОБОРУДОВАНИЕ ОБЩЕПРОМЫШЛЕННЫХ УСТАНОВОК**

Любой современный технологический процесс сопровождается применением определенного числа электромеханических систем, с помощью которых решаются задачи повышения качества продукции и эффективности технологического оборудования. Во многих случаях автоматические системы управления электроприводами представляют собой взаимосвязанные системы, так как в состав технологического оборудования могут входить десятки электроприводов, объединенных по цепям управления, питания и нагрузки. Стремление к электросбережению в результате замены нерегулируемых регулируемыми электроприводами приводит к необходимости рассматривать взаимосвязи электромеханических систем по цепям нагрузки в объектах, для которых ранее такие задачи не ставились. Следует отметить и взаимосвязь выходных переменных электромеханических систем при формировании технологических показателей обрабатываемых изделий, характеризующих их качество. Эта взаимосвязь осуществляется через систему функциональных устройств технологического объекта. В целом следует говорить о комплексе технологических процессов для определенного современного промышленного предприятия и производства.

Современный технологический комплекс необходимо рассматривать как автоматизированный технологический комплекс (АТК). Работа АТК связана с технологическим процессом и определяется выполнением алгоритма определенной программы. В соответствии с программой осуществляется контроль и регулирование электромагнитных, механических, технологических переменных, показателей качества готовой продукции (переработанного вещества); автоматическая оптимизация обобщенных показателей качества работы АТК; контроль состояния электротехнического, механического и технологического оборудования.

Несмотря на большое разнообразие технологических процессов в современном промышленном производстве можно выделить целые группы общепромышленных механизмов и установок, с помощью которых реализуется технологический процесс.

## 2.1. Обзор общепромышленных механизмов циклического действия

Обширная группа общепромышленных установок циклического действия включает в себя подъемные краны, одноковшовые экскаваторы, стационарные подъемники различных конструкций и назначения, маятниковые канатные дороги, конвейеры циклического действия, различные манипуляторы и промышленные роботы. Общим для этих установок является режим работы, при котором технологический процесс состоит из ряда повторяющихся однотипных циклов, каждый из которых представляет собой законченную операцию загрузки рабочего органа, перемещения его из исходной точки в пункт назначения и разгрузки. В зависимости от специализации цикл может содержать выполнение предусмотренных технологией процессов, например черпания грунта, кантования перемещаемых изделий и т. п.

Основные механизмы таких установок, как правило, имеют реверсивный электропривод, рассчитанный для работы в интенсивном повторно-кратковременном режиме. В каждом рабочем цикле имеют место неустановившиеся режимы работы электропривода: пуски, реверсы, торможения, оказывающие существенное влияние на производительность механизма, на динамические нагрузки привода и механизма, на к. п. д. установки и на ряд других факторов. Все эти условия предъявляют к электроприводу сложные требования, в значительной степени общие для всей рассматриваемой группы механизмов.

Несмотря на большое многообразие конкретных установок циклического действия, их рабочие движения обслуживаются ограниченным числом однотипных механизмов.

*Подъемные краны* объединяют большую группу подъемно-транспортных установок циклического действия. Наиболее типичными представителями этого класса механизмов являются: мостовой кран, козловой кран, перегрузочные мосты, поворотные и порталные краны.

*Одноковшовые экскаваторы* в отношении рабочих движений и конструкции имеют много общего с поворотными, например порталными, кранами. Небольшие экскаваторы могут при необходимости работать в качестве подъемных кранов, так как выполняются универсальными со сменным рабочим оборудованием. Более крупные экскаваторы являются спе-

специализированными землеройными машинами, предназначенными только для черпания грунта или предварительно разрушенной взрывом скальной породы и перемещения наполненного ковша к месту выгрузки.

По конструкции рабочего органа различают ряд типов экскаваторов: прямая лопата, обратная лопата, драглайн и т.п. По конструкции механизма передвижения можно выделить гусеничные и шагающие экскаваторы, экскаваторы на рельсовом ходу.

*Подъемники* циклического действия представляют собой стационарные подъемные установки циклического действия, предназначенные для подъема грузов (грузовые подъемники) или грузов и людей (грузопассажирские подъемники), или только людей (пассажирские подъемники или лифты).

Более подробная информация о механизмах циклического действия будет дана далее.

## **2.2. Обзор общепромышленных механизмов непрерывного действия**

К числу общепромышленных установок непрерывного действия относится большая группа машин и механизмов, включающая в себя различные конвейеры эскалаторы, кольцевые канатные дороги, многокабинные подъемники, центробежные насосы, вентиляторы, компрессоры и воздуходувки, а так же насосы и компрессоры поршневого типа. Все эти машины и механизмы, исключая компрессоры, объединены общностью назначения, так как их основной функцией является транспортировка людей, штучных и сыпучих грузов, а также жидкостей и газов. Важная роль, которую играют общепромышленные механизмы непрерывного действия как средства механизации и автоматизации поточно-транспортных систем, определяется в первую очередь простотой и эффективностью их режима работы. Непрерывность действия, с одной стороны, является фактором, обеспечивающим более высокую производительность машин, а с другой – определяет простоту и высокую надежность применяемых систем электропривода и автоматизации их рабочих процессов. Поэтому во всех случаях, когда технология позволяет организовать непрерывные поточно-транспортные системы, использование механизмов непрерывного действия дает значительный экономический эффект.

*Конвейеры* являются наиболее распространенными механизмами непрерывного транспорта сыпучих и штучных материалов. В зависимости от типа тягового элемента конвейеры подразделяются на три группы: ленточные, цепные и канатные.

*Ленточные конвейеры* по сравнению с другими типами, предназначенных для транспортировки сыпучих грузов, характеризуются наибольшей скоростью и производительностью. Наибольшая длина конвейера в односекционном исполнении достигает 4575 м. В многосекционном исполнении он может быть выполнен практически на любую длину (известен многосекционный конвейер длиной 12 км).

*Цепные конвейеры* находят широкое применение в промышленности, обслуживая различные технологические процессы производства, например, сборочные, сушильные, покрасочные линии. Пассажирский вариант цепного конвейера – эскалатор.

*Канатный конвейер* – канатные дороги.

Важное место среди установок непрерывного действия занимает группа *механизмов центробежного и поршневого типов*. К этим механизмам относятся насосы, вентиляторы и компрессоры. Под общим термином «насосы» объединяется многочисленная группа различных механизмов, предназначенная для транспортировки жидких сред. Сюда относятся, например, насосы в системе водоснабжения и канализации, землесосы, специальные насосы для химических сред (щелочей и кислот). Термин «вентиляторы» объединяет большую группу механизмов, осуществляющую по существу транспортировку газов (шахтные и промышленные вентиляторы, газодувки, дымососы и т. п.). Наконец, под компрессорами понимаются механизмы, предназначенные для получения и транспортировки сжатого воздуха с целью использования его энергии для создания сильного дутья, для привода пневматических тормозов, рабочих машин (молотов, прессов), инструмента (отбойных молотков) и т. п.

Таким образом, первые две группы механизмов – насосы и вентиляторы имеют одну общую функцию – транспортировать жидкости и газы при непрерывном характере работы. Компрессоры выполняют и другую функцию, осуществляя аккумуляцию энергии в форме энергии сжатого воздуха. С насосами и вентиляторами компрессоры объединяет в основном общность принципа действия и конструкция данных механизмов. Исходя

из назначения, и характера работы, насосы и вентиляторы можно было бы отнести к механизмам непрерывного транспорта. Однако по принципу работы и конструкции они существенно отличаются от рассмотренных ранее транспортных механизмов и поэтому выделены совместно с компрессорами в отдельную группу механизмов непрерывного действия.

По принципу действия насосы, вентиляторы и компрессоры делятся на две основные категории, а именно на механизмы центробежного и поршневого типов. Механизмы центробежного типа обладают высокой подачей (сотни кубометров в минуту жидкости для насосов и сжатого воздуха для компрессоров и тысячи кубометров воздуха для вентиляторов), просты по конструкции и надежны в эксплуатации и поэтому нашли широкое применение.

Механизмы поршневого типа более сложны по конструкции и условиям эксплуатации, но обладают высоким КПД и способны обеспечить сжатие газов до весьма высоких давлений (до  $10^5$  кПа). Вследствие этого механизмы поршневого типа используются главным образом в качестве компрессоров небольшой и средней производительности и в редких случаях – в качестве небольших насосов.

### **2.3. Общие требования, предъявляемые к электроприводу промышленных механизмов**

Требования к электроприводу формируются отдельно для каждого производственного механизма или для группы идентичных механизмов. Но есть общие требования, которые предъявляются к электроприводам всех механизмов. К таким требованиям относятся:

1. Обеспечение заданного технологического процесса и требуемой производительности.
2. Обеспечение требуемых условий пуска и торможения (в том числе по величине ускорения) производственных механизмов, а при необходимости - реверсирования и регулирования скорости.
3. Ограничение перегрузок, динамических и ударных.
4. Принцип управления электроприводом (ручное, автоматическое, программное и т.п.).
5. Требования по надежности, которые, как правило, отражаются в заданном времени наработки на отказ.



6. Требования по конструктивной защищенности электрооборудования (степени защиты IP), по условиям окружающей среды, климатическому исполнению.

7. Экономические показатели; к которым следует относить не только минимальную стоимость электропривода, но и затраты электроэнергии на его работу.

8. Экологические требования. К ним относят уровень шума и ограничение влияния электропривода на питающую сеть, связанное с мощностью искажения, вызванную высшими гармониками тока.

Обычно в требованиях указываются также параметры электроснабжения (величина напряжения, частоты, допустимые отклонения). Дополнительные требования для конкретных групп машин будут приведены в дальнейшем.

## **2.4. Электропривод насосов, вентиляторов, компрессоров**

### **2.4.1. Общие сведения.**

Центробежные насосы, вентиляторы, компрессоры и воздуходувки, а так же насосы и компрессоры поршневого типа, относятся к числу общепромышленных установок непрерывного действия. Важное место среди установок непрерывного действия занимает группа *механизмов центробежного и поршневого типов*. К этим механизмам относятся насосы, вентиляторы и компрессоры. Под общим термином «насосы» объединяется многочисленная группа различных механизмов, предназначенная для транспортировки жидких сред. Сюда относятся, например, насосы в системе водоснабжения и канализации, землесосы, специальные насосы для химических сред (щелочей и кислот). Термин «вентиляторы» объединяет большую группу механизмов, осуществляющую по существу транспортировку газов (шахтные и промышленные вентиляторы, газодувки, дымососы и т. п.). Наконец, под компрессорами понимаются механизмы, предназначенные для получения и транспортировки сжатого воздуха с целью использования его энергии для создания сильного дутья, для привода пневматических тормозов, рабочих машин (молотов, прессов), инструмента (отбойных молотков) и т. п.

Таким образом, первые две группы механизмов — насосы и вентиляторы имеют одну общую функцию — транспортировать жидкости и газы при непрерывном характере работы. Компрессоры выполняют и другую функцию, осуществляя аккумуляцию энергии в форме энергии сжатого

воздуха. С насосами и вентиляторами компрессоры объединяет в основном общность принципа действия и конструкция данных механизмов. Исходя из назначения, и характера работы, насосы и вентиляторы можно было бы отнести к механизмам непрерывного транспорта. Однако по принципу работы и конструкции они существенно отличаются от транспортных механизмов и поэтому выделены совместно с компрессорами в отдельную группу механизмов непрерывного действия.

По принципу действия насосы, вентиляторы и компрессоры делятся на две основные категории, а именно на механизмы центробежного и поршневого типов. Механизмы центробежного типа обладают высокой подачей (сотни кубометров в минуту жидкости для насосов и сжатого воздуха для компрессоров и тысячи кубометров воздуха для вентиляторов), просты по конструкции и надежны в эксплуатации и поэтому нашли широкое применение.

Механизмы поршневого типа более сложны по конструкции и условиям эксплуатации, но обладают высоким КПД и способны обеспечить сжатие газов до весьма высоких давлений (до  $10^5$  кПа). Вследствие этого механизмы поршневого типа используются главным образом в качестве компрессоров небольшой и средней производительности и в редких случаях — в качестве небольших насосов.

К основным особенностям, с точки зрения условий работы электропривода таких механизмов, относятся:

1. зависимость момента нагрузки и мощности на валу от скорости вращения;
2. длительный режим работы;
3. отсутствие реверсов и торможений;
4. ограниченный диапазон регулирования скорости вращения;
5. отсутствие перегрузок.

До недавнего времени как в нашей стране, так и в зарубежной практике для привода насосов, вентиляторов и компрессоров применялись почти исключительно нерегулируемые электроприводы на базе синхронного либо асинхронного двигателей. Отказ от регулируемых приводов объясняется главным образом отсутствием в те годы технических средств для создания экономичных, достаточно мощных регулируемых электроприводов с двигателями переменного тока.

С начала 60-х годов регулируемый привод привлекает все большее внимание конструкторов как средство повышения эксплуатационного к. п. д. установок, т. е. экономии электроэнергии, и как средство регулирования

тех производственных процессов, в которых перечисленные механизмы используются как звено технологической цепи.

Совершенствование и разработка новых средств электропривода: электродвигателей, тиристорных преобразовательных устройств, полупроводниковых регуляторов и др. – создали материальные предпосылки для массового применения регулируемых электроприводов для общепромышленных установок непрерывного действия.

#### **2.4.2. Назначение и устройство насосов, вентиляторов и компрессоров**

Насосы являются основными исполнительными элементами в промышленных и коммунальных насосных станциях и установках.

Насосные установки предназначены для транспортировки жидкости, заполнения и осушения резервуаров, для обслуживания механизмов (например, систем водяного охлаждения).

Насосные станции предназначены для централизованного обеспечения водой промышленных и сельскохозяйственных объектов. Элементами насосных станций являются крупные насосные агрегаты, требующие для обслуживания обслуживающего персонала.

Вентиляторы предназначены для вентиляции производственных помещений, отсасывания газов, подачи воздуха или газа в камеры электропечей, котельных и других установках.

Компрессоры – это машины для сжатия и подачи воздуха или для сжатия и подачи любого газа под давлением. Если взять компрессор, привод и дополнительное оборудование, то получится компрессорная установка.

Компрессоры применяют для получения сжатого воздуха или другого газа, с целью использования его энергии в приводах пневматических молотов и прессов, в пневматическом инструменте, в устройствах пневмоавтоматики.

Наиболее широко компрессоры используют как в строительстве, так и в промышленности:

- при строительстве и ремонте дорог;
- буровзрывных работах;
- в шахтах;
- при добыче нефти и газа;
- для пескоструйных работ;

- высокоскоростной прокладки оптоволоконных линий связи способом «задувки».

По конструктивному исполнению и устройству насосы, вентиляторы и компрессоры имеют много общего, и подразделяются на **машины лопастного типа и машины объемного типа** [29, 31, 41, 48].

Наличие вращающегося рабочего колеса с лопастями является отличительным признаком лопастных машин (в технической литературе такие машины часто называют турбомеханизмами). Схемы лопастных машин приведены на рис. 2.2.

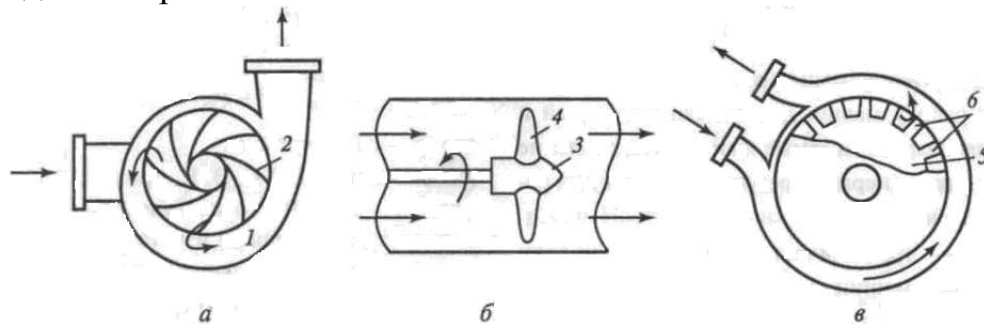


Рис. 2.2. Схемы лопастных машин  
*а* – центробежного типа; *б* – осевого типа; *в* – вихревого типа

Поток жидкости или газа, проходя через рабочее колесо 1 с лопастями 2 машин центробежного (ЦМ) типа, изменяет свое направление под углом  $90^\circ$ , в осевых машинах (ОМ) он перемещается вдоль оси рабочего колеса 3 с лопастями 4, а в вихревых (ВМ) – по периферии рабочего колеса 5 с лопастями 6.

Схемы машин объемного типа приведены на рис. 2.3.

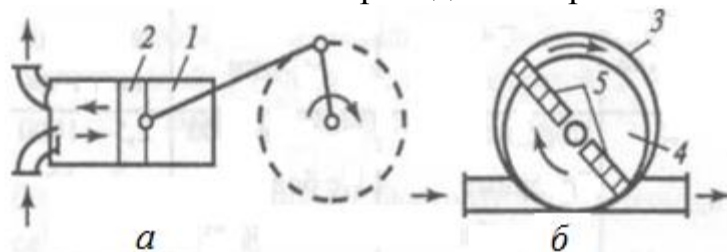


Рис. 2.3. Схемы объемных машин  
*а* – поршневого типа (одностороннего действия);  
*б* – осевого типа (с двумя пластинами);

Работа объемных машин основана на всасывании и вытеснении жидкости или газа твердыми телами, движущимися в рабочих полостях. В машинах поршневого типа (ПМ) изменение объема рабочей полости (цилиндра /) осуществляется за счет возвратно-поступательного движения поршня 2. В роторных машинах (РМ) внутри рабочей полости (корпуса 3) вра-

щается эксцентрично расположенный ротор 4 с пластинами 5, которые под действием центробежных сил прижимаются к внутренней поверхности корпуса.

Наибольшее распространение в практике имеют центробежные машины (ЦМ), осевые машины (ОМ) и поршневые машины (ПМ). При этом ОМ предпочтительнее там, где требуется обеспечить высокую подачу при низком напоре. Вихревые машины (ВМ) позволяют обеспечить наиболее высокий напор среди турбомеханизмов, однако они не нашли широкого распространения, так как характеризуются более низким КПД по сравнению с объемными машинами, обеспечивающими практически такие же значения напора и подачи, как и ВМ. Среди машин объемного типа наибольшее распространение имеют поршневые насосы (Н) и компрессоры (К), которые используются в основном в тех случаях, когда необходимо обеспечить высокий напор при небольших значениях подачи.

На рис. 2.4 показаны области применения водяных насосов различных типов в зависимости от развиваемых ими значений напора  $H$  и подачи  $Q$  [48]. Ориентировочные значения основных параметров компрессоров (К) и вентиляторов (В) приведены в таблице 1.

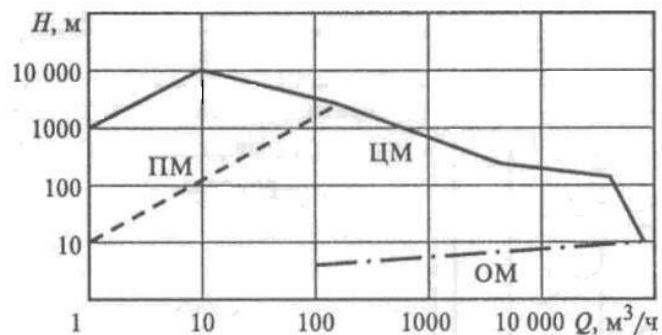


Рис. 2.4. Графики подачи и напора водяных насосов различных типов

Таблица 2.1

Ориентировочные значения основных параметров компрессоров и вентиляторов

Рабочая машина	Тип	Подача, м <sup>3</sup> /мин	Степень повышения давления
Компрессор	Поршневые	Не более 500	2,5 – 1000
	Роторные	Не более 500	3 – 12
	Центробежные	100 – 4000	3 – 20
	Осевые	100 – 15 000	2 – 20
Вентилятор	Центробежные	Не более 6000	1 – 1,15
	Осевые	50 – 10 000	1 – 1,04

Анализ данных таблицы 1 показывает, что вентиляторы выпускаются двух типов, а именно: центробежные и осевые. При перемещении воздуха или других газов общий напор, не превышает  $15000 \text{ Н/м}^2$ . Степень повышения давления воздуха в вентиляторах невелика и не оказывает какого-либо существенного влияния на процесс в них. Поэтому при исследовании работы и расчете вентилятора можно считать, что газ не сжимается.

Центробежные вентиляторы, насосы и компрессоры объединяются в один класс нагрузочных механизмов для электропривода, так как их характеристики с точки зрения требований и условий работы электропривода имеют много общего. Большая часть электроприводов указанных механизмов является нерегулируемыми.

### **2.4.3. Системы электропривода насосов, вентиляторов и компрессов**

В настоящее время в системах электроприводов насосов, вентиляторов и компрессоров применяются, как правило, машины переменного тока. Электроприводы с двигателями постоянного тока используются редко, для единичных установок.

Всю совокупность электроприводов (ЭП) для насосов, вентиляторов и компрессоров можно разбить на две группы, а именно:

- системы нерегулируемых электроприводов;
- системы регулируемых электроприводов.

Для нерегулируемых электроприводов большой мощности применяют, как правило, синхронные двигатели, так как они могут работать в режиме компенсации реактивной мощности. Скорость такого электропривода не регулируется, номинальная мощность привода  $P_{\text{ном}} < 30 \text{ МВт}$ . При мощностях менее  $1000 \text{ кВт}$  и при отсутствии требований по регулированию скорости вращения исполнительного механизма используют в качестве исполнительного двигателя – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Механические характеристики синхронного и асинхронного двигателя и нагрузки приведены на рис. 2.5.

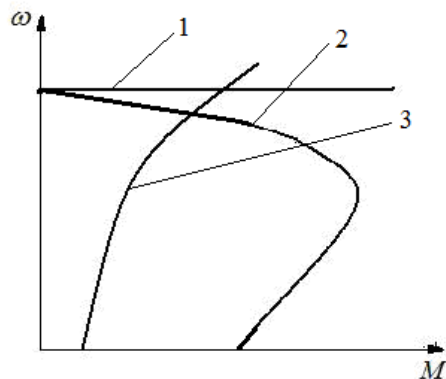


Рис. 2.5 Механические характеристики

1 – характеристика синхронного двигателя; 2 – характеристика асинхронного двигателя; 3 – характеристика нагрузки

Регулируемые системы электроприводов, как правило, применяются для механизмов центробежного типа (ЦМ). Эти электропривода можно разделить на четыре группы со следующими признаками:

1. со ступенчатым регулированием скорости – АД с реостатным управлением, многоскоростные АД, синхронно-асинхронный ЭП;
2. с рекуперацией энергии скольжения – асинхронный вентильный каскад и двигатель двойного питания при однозонном регулировании скорости вниз от скорости холостого хода;
3. с двухзонным регулированием скорости – двигатель двойного питания, АД и СД с частотным управлением;
4. с потерями энергии скольжения – АД с реостатным управлением, с преобразователем переменного напряжения, индукционной муфтой скольжения.

Системы ЭП со ступенчатым регулированием скорости обычно применяют тогда, когда требуется облегчить условия пуска или обеспечить пониженную производительность насоса (Н) и вентилятора (В) в нерабочее время (ночные смены, праздничные дни и т.п.). Двухдвигательный синхронно-асинхронный электропривод целесообразен для крупных В с тяжелыми условиями пуска.

Электропривод со ступенчатым регулированием скорости выполняют на базе асинхронного электродвигателя с фазным ротором и реостатным управлением.

Способ регулирования осуществляется с помощью секционированного резистора, ступени которого переключаются регулировочными контактами. Реостатное регулирование скорости, как правило, *ступенчатое* и производится под нагрузкой. Направление регулирования – *вниз* от есте-

ственной характеристики. Установившиеся значения скорости  $\omega_{yi}$  под нагрузкой  $M_{\text{наг}}$  уменьшаются с увеличением добавочного сопротивления в цепи обмотки ротора.

Электропривод на базе АД с фазным ротором используется преимущественно при тяжелых пусковых режимах,  $P_{\text{ном}} < 5000\text{кВт}$  и обеспечивает диапазон регулирования скорости  $D = (1,5 - 2) : 1$ .

Семейство механических характеристик электропривода с АД с фазным ротором и механическая характеристика нагрузки приведены на рис. 2.6.



Рис. 2.6. Механические характеристики электропривода с АД с фазным ротором и механическая характеристика нагрузки

Электропривод с двухскоростным (многоскоростным) АД используют при мощностях  $P_{\text{ном}} < 1400\text{кВт}$  и  $D = (1,5 - 3)$ . Семейство механических характеристик электропривода с двухскоростным АД и механическая характеристика нагрузки приведены на рис. 2.7.

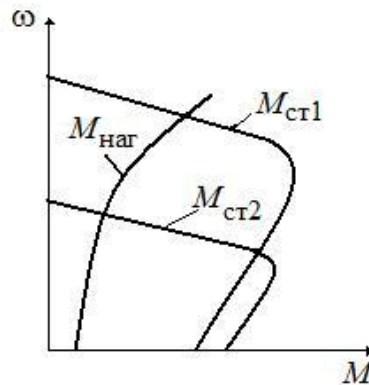


Рис. 2.7. Механические характеристики электропривода с двухскоростным АД и механическая характеристика нагрузки



Достоинством электропривода с рекуперацией энергии скольжения является то, что мощность преобразователя, включенного в цепь ротора, пропорциональна номинальной мощности АД и диапазону регулирования его скорости. Это свойство ЭП с рекуперацией энергии скольжения определяет целесообразность их использования для насосов, вентиляторов, компрессоров большой мощности при неглубоком регулировании скорости. Характеристики и свойства ЭП с рекуперацией энергии скольжения описаны в каскадных электроприводах настоящего пособия и [45,48]. К недостаткам этих систем ЭП следует отнести необходимость применения дополнительных пусковых устройств и низкий  $\cos \varphi = (0,2—0,7)$  вентиляных каскадов. Двигатели двойного питания позволяют поддерживать  $\cos \varphi = 1$ , а при некотором увеличении габаритных размеров преобразователя и двигателя – работать с опережающим коэффициентом мощности.

В двигателях двойного питания можно регулировать скорость вверх от скорости холостого хода  $\omega_0$ , при этом энергия скольжения не рекуперирована, а потребляется из сети, т.е. момент на валу АД создается за счет суммарной мощности, потребляемой из сети по цепям статора и ротора. Двухзонное регулирование скорости (вверх и вниз относительно  $\omega_{ном}$ ) обеспечивается также при частотном управлении АД и СД. Максимальное значение скорости в этих случаях определяется предельной частотой преобразователя и допустимой скоростью двигателей. Мощность серийных полупроводниковых преобразователей частоты достигает сотен киловатт, а выходная частота – сотен герц. Максимальная частота вращения короткозамкнутого АД общепромышленного исполнения ограничивается значением 3000 об/мин, а для СД должна согласовываться с заводом-изготовителем.

При регулировании скорости выше  $\omega_0$  необходимо учитывать, что момент на валу двигателей возрастает, поэтому их мощность  $P_{max}$  необходимо рассчитывать при максимальной скорости  $\omega_{max}$ , а затем приводить к номинальной скорости  $P_{ном} = P_{max} \omega_{ном} / \omega_{max}$ .

При соответствующих законах управления в системах ЭП с частотным управлением и с двигателями двойного питания можно минимизировать (уменьшить на 10–20 %) потери в двигателях.

Значительное уменьшение момента при снижении скорости определяет целесообразность использования для лопастных машин малой и средней мощности асинхронных ЭП с потерями энергии скольжения. В ЭП с рео-

статным управлением и муфтой скольжения мощность приводного двигателя завышать не требуется, так как потери скольжения при регулировании скорости выделяются в резисторах и муфте.

При регулировании напряжения мощность короткозамкнутого АД необходимо выбирать таким образом, чтобы потери скольжения не вызывали его повышенного нагрева.

#### **2.4.4. Общие требования к электроприводу машин для подачи жидкостей и газов**

Основными свойствами машин для подачи жидкостей и газов, которые определяют требования к ЭП, являются:

- 1) продолжительный режим работы со спокойной нагрузкой;
- 2) широкий диапазон мощностей – от сотен ватт до нескольких десятков мегаватт;
- 3) целесообразность регулирования скорости по технологическим и энергетическим соображениям;
- 4) как правило, небольшой диапазон регулирования скорости  $D \leq (2-3):1$ ;
- 5) отсутствие необходимости реверсирования в силу особенностей конструкции и условий технологического процесса (исключение составляют осевые машины, для которых реверсирование скорости позволяет изменять направление подачи);
- б) отсутствие генераторного режима.

Для возникновения генераторных режимов насосов, вентиляторов, компрессоров необходимо создание условий, при которых направление подачи изменяется, т.е. жидкость или газ должны перетекать с выхода на вход машины. Такие режимы являются нежелательными, а иногда и аварийными, поэтому во избежание их появления на стороне выхода устанавливают обратный клапан, который автоматически закрывается, если указанные условия возникают.

Характерными особенностями лопастных машин являются существенное снижение момента при уменьшении скорости, возможность облегченного пуска при закрытой задвижке, большой момент инерции центробежных вентиляторов. Спецификой объемных машин являются пульсации момента на валу с постоянным, не зависящим от скорости средним его значением и невозможность пуска при закрытой задвижке.

Указанные выше особенности, в первую очередь широкий диапазон мощностей насосов, вентиляторов, компенсаторов и целесообразность ре-

гулирования скорости, определяют многообразие систем электроприводов, применяемых для этих машин.

#### 2.4.5. Характеристики машин для подачи жидкостей и газов

Основными параметрами, характеризующими работу машин для подачи жидкостей и газов, являются создаваемые ими подача, давление и напор, а также энергия, сообщаемая потоку их рабочими органами.

*Подача* – это количество жидкости или газа, перемещаемое машиной в единицу времени. При измерении подачи в единицах объема ее называют объемной и обозначают обычно  $Q$ . Используется также понятие массовой подачи  $M_\gamma$  – массы жидкости или газа, подаваемой машиной в единицу времени,

$$M_\gamma = \gamma Q \quad (2.1)$$

где  $\gamma$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;  $Q$  – объемная подача, м<sup>3</sup>/с.

Подачу можно определять на входе либо на выходе машины. Массовые подачи на входе и выходе машины любого типа одинаковы. Объемные подачи же одинаковы только в насосных машинах, подающих практически несжимаемую среду, и приблизительно одинаковы в вентиляторах. Объемная подача в компрессорах на выходе меньше, чем на входе, вследствие существенного изменения удельного объема при повышении давления газа. В расчетах принято исчислять объемную подачу компрессора на их входе.

*Давление насоса* определяется зависимостью:

$$p = p_K - p_H + \gamma \frac{c_K^2 - c_H^2}{2} + \gamma g (z_K - z_H) \quad (2.2)$$

где  $p_K$  и  $p_H$  — соответственно давление на выходе (конечное) и на входе (начальное), Па;  $c_K$  и  $c_H$  – скорости потока жидкости на выходе и входе насоса, м/с;  $z_K$  и  $z_H$  – высоты расположения центров тяжести выходного и входного сечений насоса, м;  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>.

*Полный напор*, развиваемый насосом, м.ст. жидкости

$$H = p/(\gamma g) \quad (2.3)$$

Эксплуатационные свойства ЦН определяются зависимостью напора (давления жидкости) на выходе от производительности при различных скоростях

$$H = F(Q), \quad (2.4)$$

где  $H$  – напор на выходе, м.ст. жидкости;  $Q$  – производительность, м<sup>3</sup>/с.

Эти зависимости, обычно, приводятся в виде графиков в каталогах для каждого конкретного агрегата.

Напор, создаваемый вентилятором, выражают иногда в миллиметрах водяного столба:  $h = p/g$ , мм. вод. ст.

Давление в компрессоре измеряют по степени его повышения

$$\varepsilon = p_k / p_n. \quad (2.5)$$

Важным параметром, характеризующим работу машин рассматриваемого типа с энергетической стороны, является удельная полезная работа. Для насосов и вентиляторов она определяется зависимостью  $L = p/\gamma$ , Дж/кг. Удельная работа компрессора вычисляется более сложно с учетом вида термодинамического процесса [49].

Полезную мощность  $P_{\Pi}$ , Вт, передаваемую машиной потоку жидкости или газа, можно определить следующим образом:

$$P_{\Pi} = M_{\gamma} L_{\Pi} = Qp = M_{\gamma} gH = \gamma gHQ. \quad (2.6)$$

Мощность, кВт, на валу насоса, вентилятора, компрессора при максимальной скорости машины

$$P = P_{\Pi} / 1000\eta, \quad (2.7)$$

где  $\eta$  – КПД машины.

Тогда предварительно мощность двигателей для насосов, вентиляторов и компрессоров рассчитывают по соотношению

$$P_d = k_3 k_p P / \eta_{\text{пер}}, \quad (2.8)$$

где  $P$  – мощность на валу насоса, вентилятора, компрессора;  $\eta_{\text{пер}}$  – КПД передаточного устройства;  $k_3$  – коэффициент запаса, учитывающий неточности расчета  $P$  (при  $P > 5$ кВт  $k_3 = 1,1$ , для  $P < 5$ кВт значения  $k_3$  приведены на рис. 2.8);

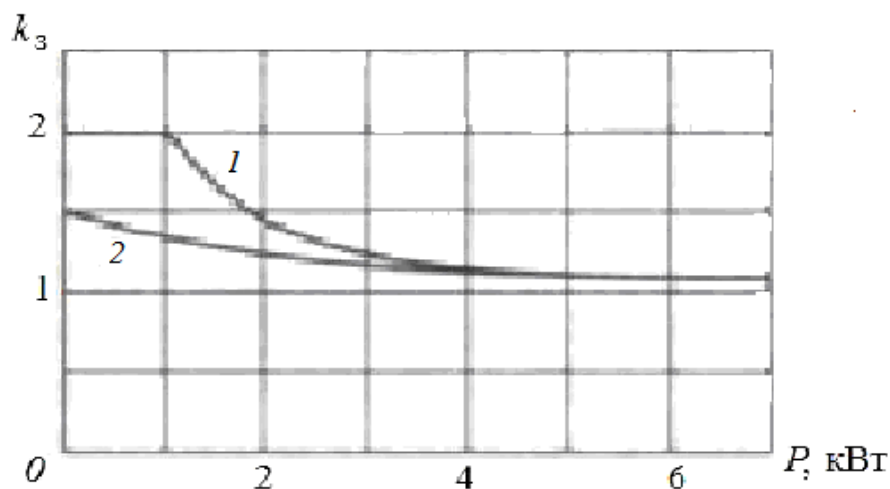


Рис. 2.8. Коэффициент запаса для центробежных машин  
1 – для вентиляторов; 2 – для насосов

Значения  $k_p$ , а также пределы регулирования скорости различных систем электроприводов приведены в таблице. 2. Значения  $k_p$ , приведенные в таблице 2.2, не учитывают изменение теплоотдачи двигателей при регулировании их скорости.

Таблица 2.2

*Пределы регулирования скорости различных систем электроприводов*

Система ЭП	Пределы регулирования скорости	$k_p$
АД с частотным управлением	$0,1\omega_{\text{НОМ}} - 314 \text{ 1/с}$	$1,1\omega_{\text{НОМ}} / \omega_{\text{max}}$
СД с частотным управлением	$0,1\omega_{\text{НОМ}} \div \omega_{\text{доп}}$	$1,1\omega_{\text{НОМ}} / \omega_{\text{max}}$
Вентильный каскад	$0,5\omega_{\text{НОМ}} \div \omega_{\text{НОМ}}$	1,1
Двигатель двойного питания	$0,65\omega_{\text{НОМ}} \div 1,35\omega_{\text{НОМ}}$	$\omega_{\text{НОМ}} / \omega_{\text{max}}$
АД с регулирование напряжения	$0,5\omega_{\text{НОМ}} \div \omega_{\text{НОМ}}$	$\Delta P_{2\text{max}} / (P_{\text{НОМ}} s_{\text{НОМ}})$
АД с реостатным управлением, муфтой скольжения	$0,5\omega_{\text{НОМ}} \div \omega_{\text{НОМ}}$	1
Двигатель постоянного тока	$0,1\omega_{\text{НОМ}} \div \omega_{\text{НОМ}}$	1
Вентильный двигатель	$0,1\omega_{\text{НОМ}} \div \omega_{\text{доп}}$	$1,1\omega_{\text{НОМ}} / \omega_{\text{max}}$

Значения КПД насосов, вентиляторов, компрессоров приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3

*Коэффициенты полезного действия насосов, вентиляторов, компрессоров*

Название механизма	Значение КПД
Центробежные насосы, вентиляторы, компрессоры большой мощности	0,75 – 0,92
Центробежные насосы малой и средней мощности	0,6 – 0,75
Осевые насосы и вентиляторы	0,7 – 0,9
Осевые компрессоры	0,8 – 0,9
Вихревые насосы	0,3—0,5
Поршневые насосы	0,65—0,85
Поршневые компрессоры	0,5—0,8
Роторные насосы	0,6—0,9
Роторные компрессоры	0,5—0,7

Часто для увеличения производительности эти машины изготавливают в виде блока, содержащего несколько последовательно соединенных ступеней. КПД таких многоступенчатых машин может быть определен по данным таблицы 8, как произведение КПД отдельных ступеней.

Характеристиками машин для подачи жидкостей и газов называют графически изображенные зависимости, отражающие характер изменения напора  $H$  (давления  $p$ ), подачи  $Q$ , мощности  $P$  и КПД  $\eta$  машины при изменении ее режима работы.

Для лопастных насосов и вентиляторов характеристики изображают в виде зависимостей напора, мощности и КПД от подачи (рис. 2.9).

В объемных машинах подача почти не зависит от напора. Поэтому в качестве аргумента здесь иногда используют давление или напор (рис. 2.10).

Для компрессоров характеристики имеют такой же вид, как на рис. 2.9 и 2.10, с тем отличием, что вместо напора указывается степень повышения давления  $\varepsilon$ , а подача измеряется в единицах массы.

Основные типы напорных характеристик  $H = f(Q)$  насосов, вентиляторов, компрессоров показаны на рис.2.11.

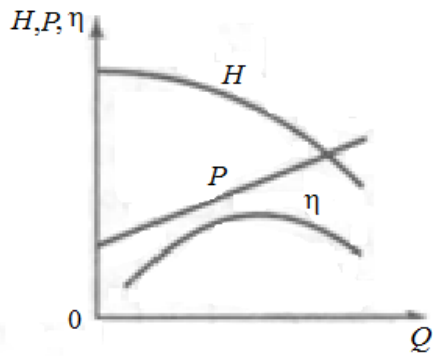


Рис. 2.9. Характеристики центробежных машин

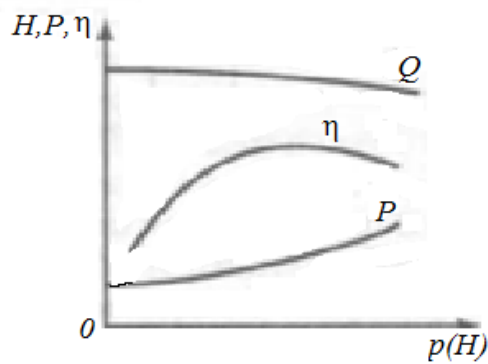


Рис. 2.10. Характеристики объемных машин

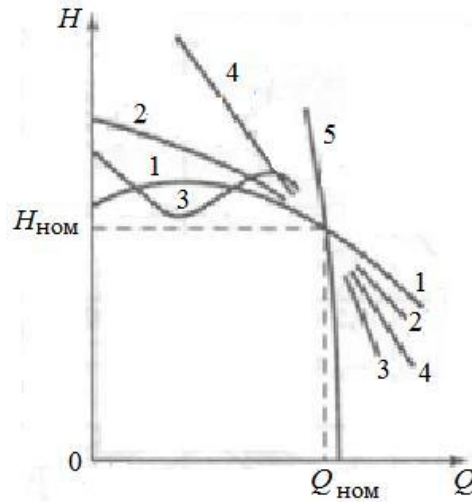


Рис. 2.11. Напорные характеристики машин для подачи жидкостей и газов

1 – центробежной тихоходной; 2 – центробежной быстроходной;  
3 – осевой; 4 – вихревой; 5 – объемной (поршневой и роторной)

Вид характеристик центробежных машин зависит от коэффициента быстроходности  $n_s$ , который определяется по номинальным данным ма-

шины. Для центробежных насосов коэффициент быстроходности находится по выражению

$$n_s = \frac{3,65 n_{\text{НОМ}} \sqrt{Q_{\text{НОМ}}}}{H_{\text{НОМ}}^{3/4}}. \quad (2.9)$$

Входящие в это выражение номинальные величины соответствуют режиму работы насоса с максимальным КПД

#### 2.4.6. Работа машин для подачи жидкостей и газов с магистралью

Совместная работа насоса, вентилятора, компрессора и магистрали в установившемся режиме работы определяется точкой пересечения напорной характеристики машины  $H_{\text{Н}} = F(Q)$  и характеристики магистрали  $H_{\text{М}} = F(Q)$ , подключенной к машине.

Представление о характеристиках центробежного насоса и магистрали дает рис. 2.12.

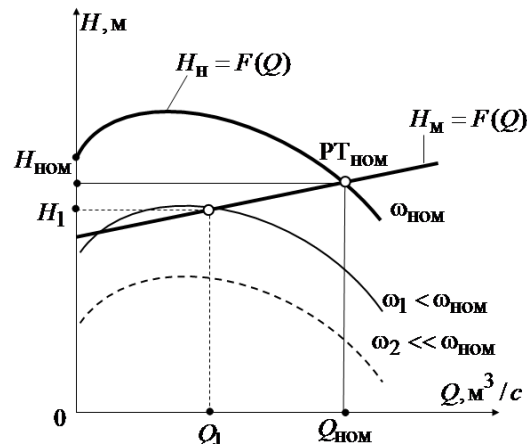


Рис. 2.12. Характеристики  $H=F(Q)$  при статическом напоре  
Полный напор ( $H$ ) в системе состоит из двух составляющих:

$$H = H_c + H_{\text{дин}} = H_c + CQ^2 \quad (2.10)$$

где  $H_c$  – статический напор, м;  $H_{\text{дин}}$  – динамический напор, м;  $Q$  – производительность,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $C$  – коэффициент гидро- или аэродинамического сопротивления магистрали (постоянная величина).

В зависимости от преобладающей составляющей, характеристика магистрали может быть статической (рис. 2.12) или динамической (рис. 2.13), которая представляет собой параболу по форме. Из анализа характеристик



видно, что при снижении оборотов приводного ЭД характеристика насоса перемещается вниз параллельно номинальной скорости ( $\omega_{\text{НОМ}}$ ).

Регулирование производительности насоса, вентилятора, компрессора осуществляется двумя способами: воздействием на характеристику магистрали или характеристики машин.

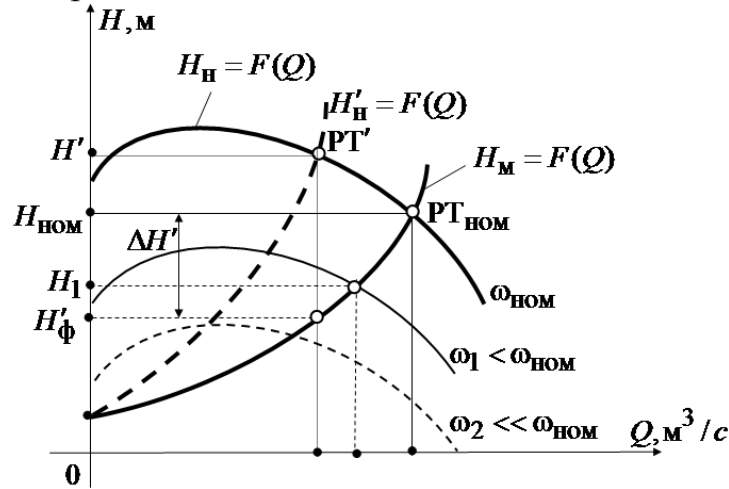


Рис. 2.13. Характеристики  $H=F(Q)$  при динамическом напоре

Наиболее распространенный первый способ — дросселирование с помощью заслонки на выходе машины. Способ заключается в том, чтобы ограничить поперечное сечение выпускного тракта насоса с помощью дроссельной задвижки и тем самым изменить коэффициента сопротивления магистрали. К сожалению, этот способ регулирования оказывает существенное влияние на КПД насоса или вентилятора, так как дроссельная задвижка оказывает сопротивление движущемуся потоку, таким образом, часть энергии рассеивается на задвижке.

При дросселировании скорость вращения рабочего колеса насоса остается практически неизменной, при этом асинхронный электродвигатель работает непосредственно от сети, и его скорость на 5 – 7 % отличается от синхронной частоты. Потребление электроэнергии двигателем пропорционально производительности насоса. При этом характеристика магистрали перемещается влево (до точки  $РТ'$ ) при неизменной угловой скорости насоса ( $\omega_{\text{НОМ}}$ ) (рис. 2.13). При новом положении рабочей точки ( $РТ''$ ) производительность ( $Q''$ ) уменьшается, а напор ( $H''$ ) увеличится (теоретически). Реально часть напора ( $\Delta H'$ ) теряется на регулирующем устройстве, а следовательно, фактический напор ( $H'_\Phi$ ) тоже уменьшится. Расчеты показывают, что уменьшение производительности ( $Q$ ) в два раза приводит к

снижению КПД насоса в 4 раза и увеличивает потери мощности до 38% от номинальной мощности ЭД.

Дроссельная задвижка также может устанавливаться на входе насоса, ограничивая, таким образом, приток жидкости, при этом насос не может обеспечить требуемый расход, так как часть энергии тратится на преодоление сопротивления задвижки. Механические характеристики насоса при разных положениях задвижки на входе насоса приведены на рис.2.14.

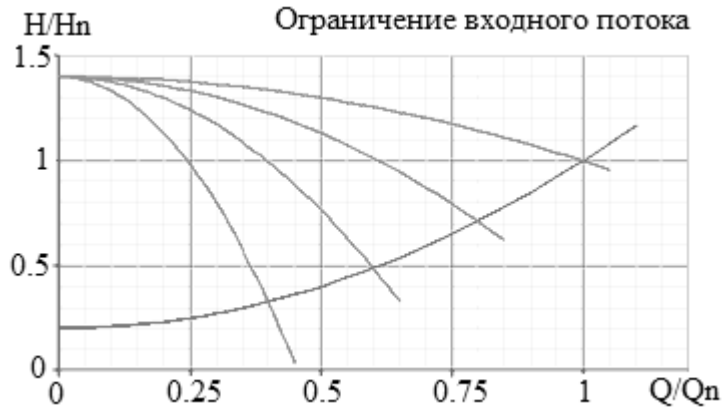


Рис. 2.14. Механической характеристики насоса при разных положениях задвижки на входе насоса.

При работе насоса в условиях, ограничивающих приток жидкости, проявляются такие нелинейные эффекты, как, например, кавитация. При этом уменьшается эффективная площадь поверхности лопаток колеса насоса, участвующих в создании давления. По этой причине этот метод обычно не применяют для перекачивания жидкостей. С энергетической точки зрения этот метод несколько лучше предыдущего, но он также оказывает существенное влияние на КПД насоса. Потребление электроэнергии пропорционально квадрату производительности насоса.

Изменение угловой скорости осуществляется изменением подводимого к статору электродвигателя напряжения (дроссель насыщения) или включением в цепь ротора добавочного сопротивления. Из рис 2.12 и 2.13 видно, что при статической характеристике производительность ( $Q_1$ ) снижается значительно больше, чем при динамической для одной и той скорости ( $\omega_1$ ).

Расчеты показывают, что электрический способ регулирования более экономичен, чем дросселирование, так потери мощности меньше (до 16%).

Следовательно, данный способ целесообразно применять в установках средней мощности (десятки кВт).

**Примечание** – Для установок большой мощности (сотни и тысячи кВт) этот способ неэкономичен. В этом случае применяются каскадные схемы электроприводов, в которых «потери скольжения» возвращаются в сеть или преобразуются в механическую мощность и поступают на вал механизма; преобразование «энергии скольжения» возможно с помощью вентильных схем или вспомогательных машин на одном валу с главным двигателем.

#### **2.4.7. Перспективы развития электропривода машин для подачи жидкостей и газов**

В последние годы во всех развитых странах мира интенсивно ведутся разработки по использованию для насосов, вентиляторов, компрессоров асинхронных и синхронных ЭП с полупроводниковыми преобразователями частоты. Мощность единичных установок достигла 1–1,5 МВт. Ведутся также разработки вентильных ЭП на базе СД и машин специального исполнения, которые целесообразно использовать для насосов, вентиляторов, компрессоров большой мощности.

Для поршневых машин ведутся работы по созданию ЭП с линейным АД. Имеются сведения о таком ЭП для плунжерных насосов, предназначенных для откачки нефти из скважин глубиной 2,5–4 км.

Рассмотрим несколько конкретных примеров использования частотного электропривода на водонапорных станциях, на компрессорно-насосных станциях, в компрессорных установках, в системах вентиляции и кондиционирования воздуха и в котельных.

Использование частотно регулируемого электропривода в системах вентиляции и кондиционирования воздуха обеспечивает экономию электроэнергии (до 75% за счет устранения шибберирования), плавное включение и выход на рабочий режим вентилятора (полную защиту электродвигателя), увеличение ресурса электродвигателя управление скоростью вращения двигателя вентилятора. Установка с таким приводом приведена на рис. 2.15.

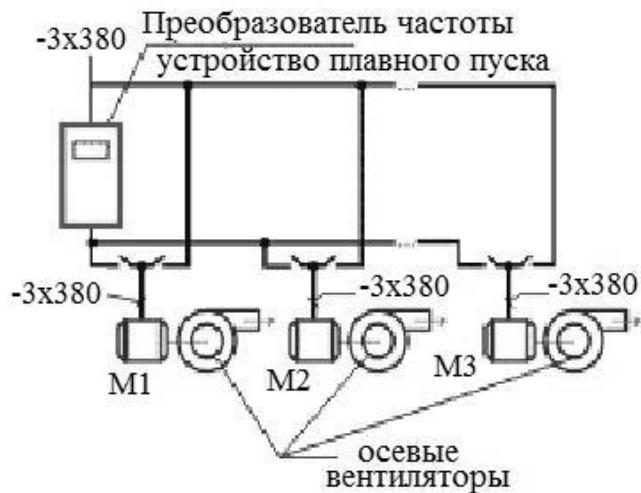


Рис. 2.15. Электропривод в системах вентиляции и кондиционирования воздуха

Использование частотно регулируемых электроприводов в котельных позволяет решать задачу согласования режимных параметров и энергопотребления тягодутьевых механизмов с изменяющимся характером нагрузки котлов, эффективно автоматизировать технологический процесс, позволяет сэкономить до 70% электроэнергии, идущей на приведение в действие дымососа и вентилятора, обеспечивает экономию топлива за счет оптимальной совместной работы вентилятора и дымососа. Плавный пуск электроприводов и полная защита электродвигателя позволяет увеличить межремонтный период, снизить аварийность оборудования. Установка с таким приводом приведена на рис. 2.16.

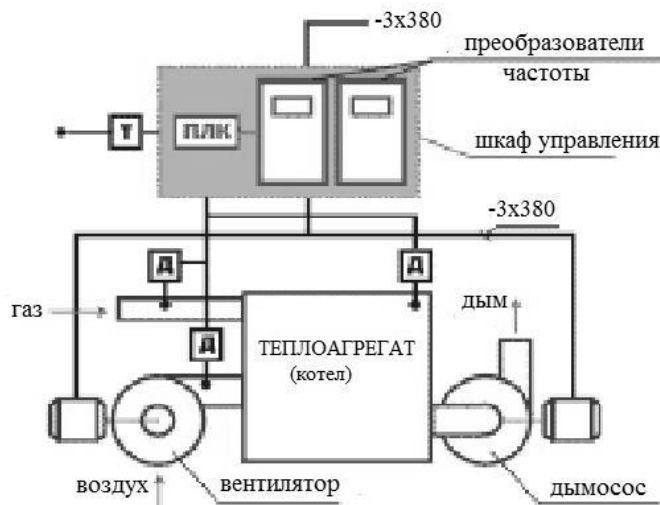
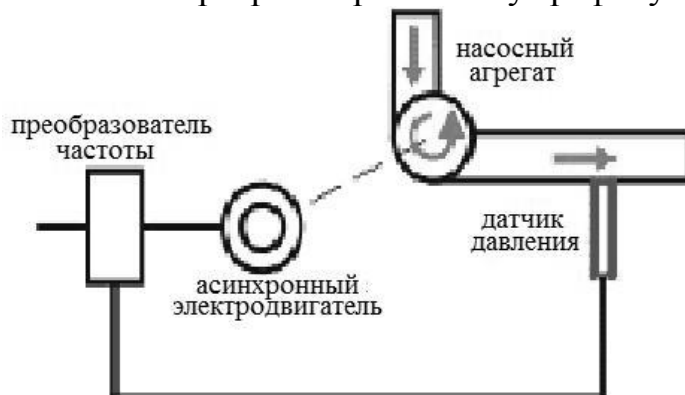


Рис. 2.16. Электроприводов в котельных

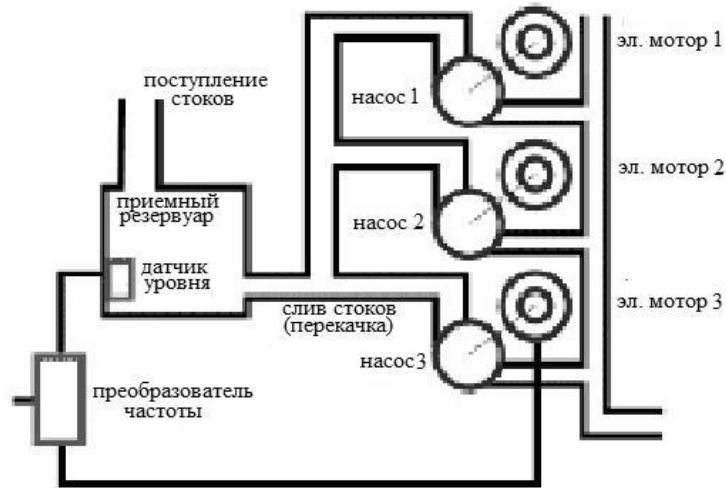
Применение частотно регулируемого асинхронного электропривода на водонапорных станциях осуществляется по схеме, представленной на рис. 2.17. Преобразователь частоты в таких схемах устанавливается между питающей сетью и электродвигателем, для обеспечения обратной связи. В напорный коллектор на выходе насосного агрегата устанавливается датчик давления.

Плавное регулирование частоты преобразователем и высокая точность поддержания давления в сетях водоснабжения позволяет экономить электроэнергию (от 30 до 60%). Кроме этого ведёт к экономии перекачиваемой воды, исключает гидроудары (существенно увеличивается срок службы трубопроводов и запорной арматуры), осуществлять пуск агрегатов на номинальных токах (увеличивает срок службы электродвигателей и коммутационной аппаратуры), работать в автоматическом режиме по часам реального времени по запрограммированному графику.



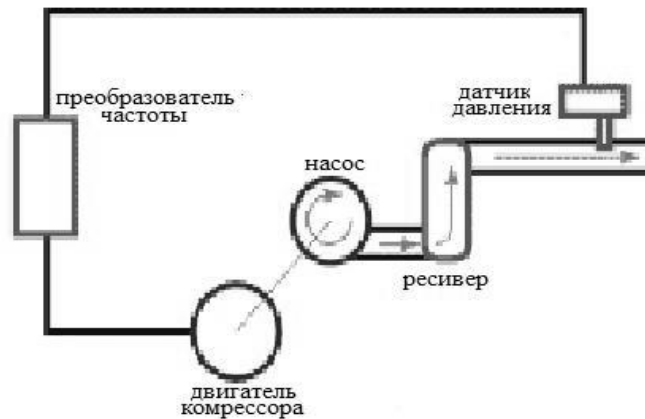
*Рис. 2.17. Схема электропривода насосного агрегата*

Частотно регулируемого управляемого электропривода для компрессорной насосной станции позволяет экономить электроэнергию (за счет стабилизации максимально допустимого уровня в приёмном резервуаре при больших потоках), устранить гидроудары в трубопроводах, уменьшить число коммутационных переключений в силовых цепях и цепях управления насосными агрегатами. Схема такого электропривода с обратной связью, реализуемой с помощью датчика уровня, представлена на рис. 2.18.



*Рис. 2.18. Схема электропривода компрессорной насосной станции*

Применение частотно регулируемого электропривода в компрессорных установках позволяет получить экономию электроэнергии, сравнимую с экономией при управлении центробежными насосами (до 60%). При этом снижается износ коммутационной аппаратуры (в связи с отсутствием больших пусковых токов). Отсутствует утечка сжатого воздуха (за счет оптимизации давления в пневмосети). Увеличивается срок службы электродвигателя (из-за снижения его нагрузки и отсутствия тяжёлых пусковых режимов). Схема частотно регулируемого электропривода в компрессорных установках представлена на рис. 2.19.



*Рис. 2.19. Схема электропривода компрессорной установки.*

## 2.5. Электроприводы специальных промышленных устройств

*Типичными представителями этой группы электроприводов являются электроприводы кранов, подъемников периодического действия и экскаваторов.*

Общим для этих установок является режим работы, при котором технологический процесс состоит из ряда повторяющихся однотипных циклов, каждый из которых представляет собой законченную операцию загрузки рабочего органа, перемещения его из исходной точки в пункт назначения и разгрузки. Основные механизмы таких установок, как правило, имеют реверсивный электропривод, рассчитанный на работу в интенсивном повторно - кратковременном режиме. В каждом рабочем цикле имеют место неустановившиеся режимы работы электропривода: пуски, реверсы, торможения.

### 2.5.1. Подъемные краны

*Подъемные краны — это грузоподъемные устройства для вертикального и горизонтального перемещения грузов на небольшие расстояния.*

В цехах предприятий наибольшее распространение получили мостовые краны.

Однотипными узлами всех кранов являются:

- механизм передвижения моста,
- механизм передвижения тележки,
- механизм подъема и опускания груза.

*Механизм передвижения моста.*

Передвижение моста (несущей конструкции) осуществляется по рельсам подкранового пути, вдоль пролета цеха.

Кинематическая схема механизма передвижения представлена на рис. 2.20. Главные балки коробчатого сечения или в виде решетчатых ферм расположены по ширине пролета цеха и скреплены концевыми балками

К концевым балкам устанавливаются ходовые колеса (5), которые движутся по рельсам (3). Привод колес от ЭД (1) с тормозом (2) через редуктор (4) может быть отдельным или общим. Скорость передвижения моста номинальная — от 2,0 до 2,3 м/с.

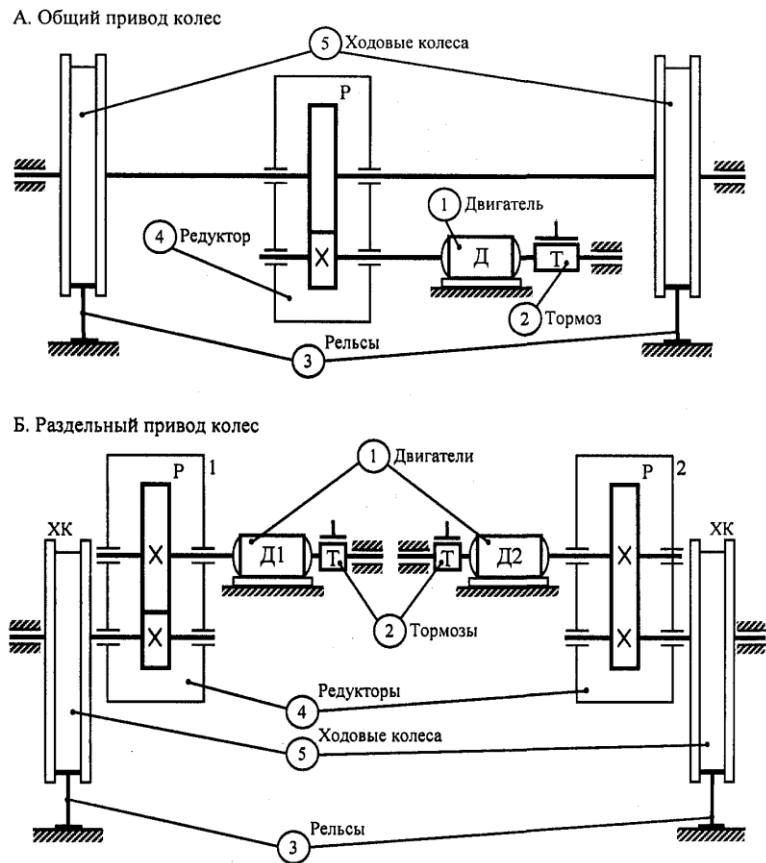


Рис. 2.20. Кинематические схемы механизма передвижения моста с общим (А) и раздельным (Б) приводом колес.

Механизм передвижения тележки осуществляет передвижение тележки вдоль моста по проложенным рельсам на 4 ходовых колесах. Кинематическая схема механизма передвижения тележки представлена на рис. 2.21



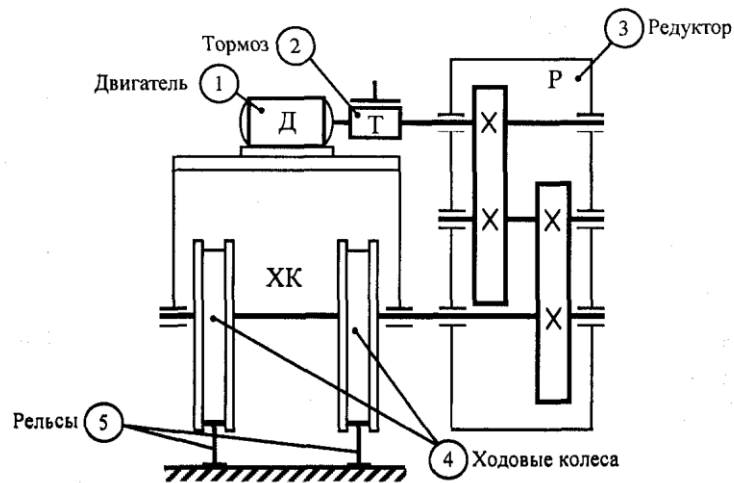


Рис. 2.21 Кинематическая схема механизма передвижения тележки

Привод колесной пары от электродвигателя (1) с электромагнитным тормозом (2) через редуктор (3). Колеса (4) передвигаются по рельсам (5). На тележке установлена лебедка подъемная для груза. Скорость передвижения тележки номинальная – от 0,65 до 1,0 м/с.

Механизм подъема представляет собой подъемную лебедку барабанного типа. Кинематическая схема механизма подъема представлена на рис. 2.22

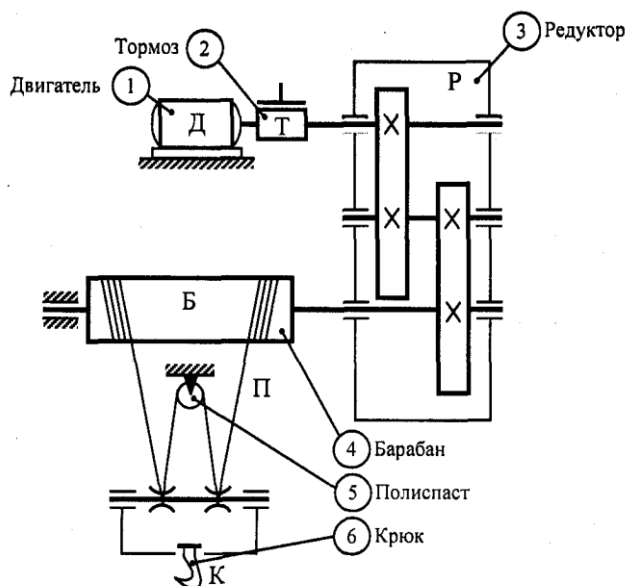


Рис. 2.22. Кинематическая схема механизма подъема

Барабан лебедки (4) с намотанным на него канатом приводится во вращение двигателем (1) с тормозом (2) через редуктор (3).

К канату крепится грузозахватывающее устройство – крюк (6). Для механизмов подъема наибольшее применение получили полиспасты (5), которые передают движение от барабана (4) к крюку (6). Передаточное число полиспаста – 4 (для данной схемы).

В зависимости от вида транспортируемых грузов на мостовых кранах могут устанавливаться и другие грузозахватывающие устройства (электромагниты, клещи и т.п.).

Наиболее часто применяются крюки или электромагниты. Скорость движения крюка номинальная – от 0,15 до 0,2 м/с.

По **грузоподъемности** мостовые краны условно делятся на малые (от 5 до 10 т), средние (от 10 до 25 т) и крупные (более 50 т).

На тележках мостового крана грузоподъемностью более 15 т устанавливается два механизма подъема:

- главный – для подъема тяжелых грузов с малой скоростью,
- вспомогательный – для подъема легких грузов с большой скоростью.

Вызвано это тем, что подъем легких грузов тяжелым крюком не выгоден, так как производительность не высокая, а расход электроэнергии увеличен.

Подвод электропитания – от главных троллеев, уложенных вдоль подкранового пути, по скользящим токосъемникам. Питание электромагнитов грузоподъемных, подвешенных к крюку цепями, осуществляется гибким кабелем. Кабель намотан на барабан, который вращается через передачу от барабана лебедки.

Управление механизмами крана из кабины оператора-крановщика, в которой установлены контроллеры или командоконтроллеры. Для выхода на мост из кабины предусмотрен верхний люк, так как кабина размещена справа под мостом. Аппаратура управления и резисторы расположены на мосту.

### 2.5.2. Основные типы кранов

На промышленных предприятиях используют в основном следующие типы подъемных кранов, именно:

- мостовые краны;
- козловые краны;
- порталные краны;

- башенные краны.

### Мостовые краны

Мостовые краны (рис. 2.23) являются наиболее массовыми грузоподъемными машинами на промышленных предприятиях.

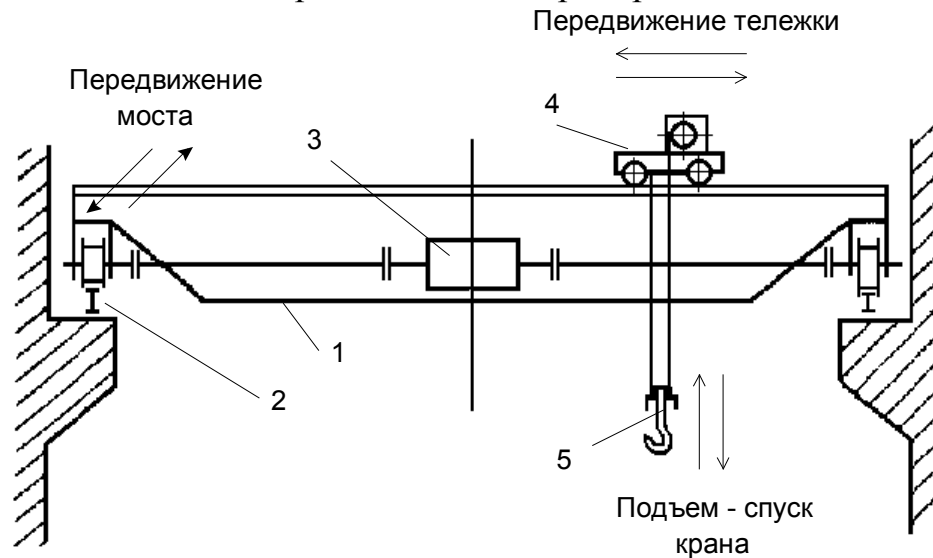


Рис. 2.23. Мостовой кран

Стальная конструкция моста крана 1 опирается на ходовые тележки и с помощью механизма перемещения 3 может перемещаться по подкрановым путям 2, укрепленным над обслуживаемой площадью на стационарных опорах. Вдоль моста крана проложены рельсы, по которым перемещается тележка 4. На тележке установлен механизм передвижения подъемной лебедки, осуществляющей подъем и спуск грузов. Таким образом, основными механизмами мостового крана являются: механизм передвижения моста, механизм передвижения тележки и подъемная лебедка, которые снабжаются индивидуальным электроприводом.

В зависимости от вида грузозахватывающего устройства 5 различают крюковые, магнитные грейферные и т.д. краны. На тележке грейферного крана обычно устанавливаются две лебедки, одна из которых служит для закрывания грейфера. Подъем закрытого грейфера осуществляется обеими лебедками. На мосту крана на одном рельсовом пути могут устанавливаться две или три тележки. Так магнитно - грейферный кран имеет магнитную тележку с лебедкой подъема магнита и грейферную тележку с лебедками подъема и закрывания грейфера.

Существует разделение мостовых кранов на краны общего назначения, предназначенные для подъема и перемещения грузов во всех отраслях промышленности, и специальные краны, предназначенные для обслуживания определенных технологических процессов, например, в металлургической промышленности. По конструкции механизмов специальные краны могут значительно отличаться от кранов общего назначения.

Мостовые краны имеют механизмы подъема, передвижения крана и передвижения грузовой тележки. Механизмов подъема может быть несколько, расположенных как на одной, так и на нескольких грузовых тележках.

Мостовые краны могут эксплуатироваться как в закрытых помещениях, так и на открытом воздухе. Режим работы большинства мостовых кранов общего назначения не превышает 5К. Режим работы специальных кранов металлургического производства, как правило, выше 5К. Как среди кранов общего назначения (ремонтные краны), так и среди специальных (краны плотин гидроэлектростанций) можно выделить группу редко используемых кранов с режимом работы 1К. Такие краны часто имеют большую грузоподъемность (до нескольких сот тонн). Номинальная скорость подъема груза для кранов общего назначения, как правило, не превышает 0,25 м/с, номинальная скорость механизмов передвижения может достигать 1,7 м/с.

Требований ГОСТ по диапазону регулированию скорости для таких кранов не существует, однако, для механизма подъема (если значение посадочной скорости не оговорено специально) можно ориентироваться на значение посадочной скорости для башенных кранов – 0,08 м/с. Таким образом, необходимый диапазон регулирования скорости не превышает 4 – 6:1. Необходимый диапазон регулирования скорости механизмов передвижения может достигать 20:1.

К мостовым кранам относятся и так называемые кран – балки или одnobалочные мостовые краны. Такие краны чаще всего управляются с пола посредством подвесного пульта или по радиоканалу. В качестве механизмов подъема и передвижения тележки используются серийные электротали. Режим работы таких кранов редко превышает 4К.

#### *Козловые краны*

Козловые краны относятся к кранам мостового типа и по режиму работы не отличаются от них. Пример конструктивной схемы такого крана приведен на рис. 2.24.

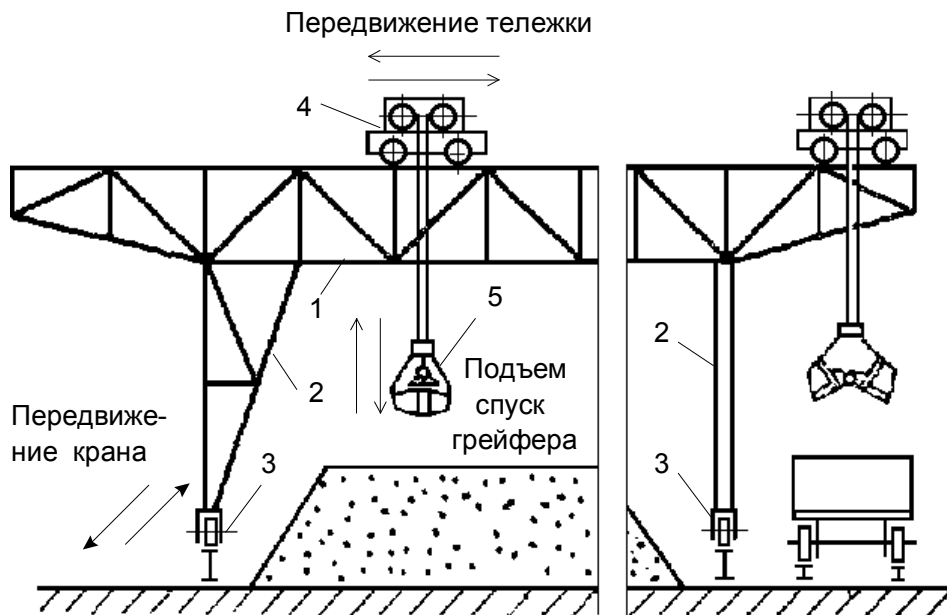


Рис. 3.5. Козловой кран

Несущая ферма крана 1 опирается на подвижные опоры 2, перемещающиеся с помощью нескольких пар ходовых тележек 3. Козловой кран имеет те же основные механизмы, что и мостовой: механизм передвижения моста (иногда с индивидуальным приводом каждой ведущей тележки), механизм передвижения тележки 4 и размещенные на ней лебедки подъема и закрывания грейфера.

Особенностью конструкции козловых кранов, предъявляющей требования к электроприводу механизмов передвижения, является большая наветренная площадь и соответственно большая ветровая нагрузка, действующая поперек пролетного строения. Кроме того, при больших длинах пролета, во избежание поломки металлоконструкции, бывает необходимо синхронизировать работу механизмов передвижения опор крана.

Козловые краны, предназначенные для работы под открытым небом, в отношении рабочих движений вполне аналогичны мостовым.

Таковую же конструктивную схему и те же основные механизмы имеют перегрузочные мосты (например рудные или угольные перегрузатели), предназначенные для обслуживания обширных открытых складских территорий (пролет может превышать 100 м). Несколько сотнями метров измеряется пролет так называемых кабель - кранов, в которых вместо жесткой фермы 1 используется несущий стальной канат

К специальным козловым кранам можно отнести рудноугольные грейферные перегрузатели, работающие на тепловых электростанциях и

металлургических заводах и перегружающие насыпные грузы при помощи специального грузозахватного приспособления – грейфера. Такие краны имеют высокие рабочие скорости, режим работы механизмов подъема и передвижения тележки 6М, большую длину пролета.

К особенностям грейферного режима следует отнести необходимость синхронизации скоростей подъемной и замыкающей лебедок для равномерного распределения нагрузок. Механизм передвижения таких кранов обеспечивает установочное движение.

Краны, предназначенные для перегрузки контейнеров, также имеют некоторые отличия от козловых кранов общего назначения, связанные, прежде всего с наличием специального грузозахватного органа – спредера.

### *Портальные краны*

Портальный кран (рис. 2.25) является характерным представителем группы поворотных кранов.

Основанием крана является портал 1, который с помощью механизма передвижения с индивидуальным электроприводом ходовых тележек 4 может перемещаться по подкрановым путям. Поворотная платформа 2 опирается на портал через роликовый круг или поворотные балансировочные тележки, катающиеся по кольцевому рельсу при вращении платформы механизмом поворота. Угол наклона стрелы крана 3 может изменяться с помощью лебедки изменения вылета. Необходимая уравновешенность крана при разных вылетах стрелы обеспечивается подвижным противовесом 5, связанным со стрелой рычагом 6. Подъем и опускание крюка 7 осуществляется подъемной лебедкой, установленной в машинном зале поворотной платформы 2.

На грейферных портальных кранах, оборудованных двухканатными грейферами, устанавливаются две однотипные подъемные лебедки для подъема и закрывания грейфера.

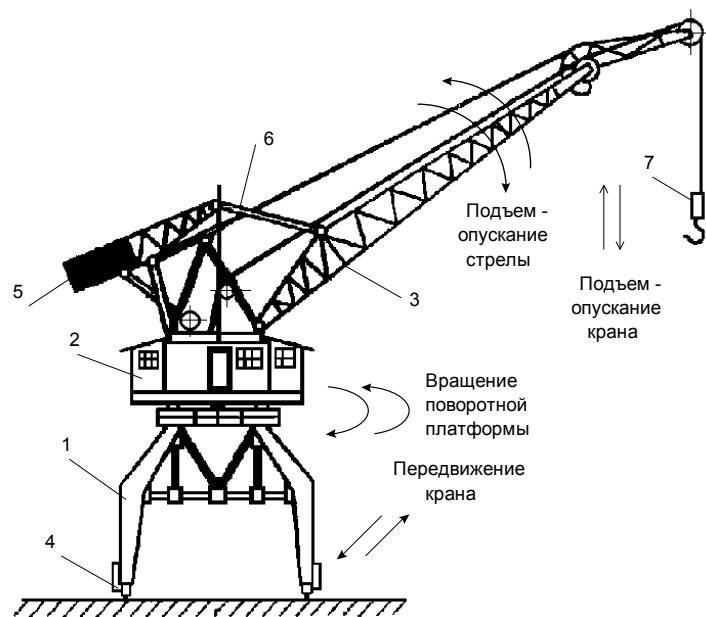


Рис. 2.25. Портальный кран

Портальные краны можно разделить на две группы:

*Монтажные краны*, применяющиеся в основном на судостроительных и судоремонтных заводах. Такие краны имеют умеренные номинальные скорости и повышенные требования к диапазону регулирования скорости и плавности переходных процессов. Режим работы, как правило, не превышает 5К.

*Перегрузочные краны*, работающие в морских и речных портах. Такие краны являются универсальными, т.е. могут работать как в крюковом режиме, так и в грейферном. Для работы с грейфером такие краны имеют две грузовые лебедки, которые управляются отдельно. При работе в крюковом режиме лебедки синхронизируются. Для обеспечения высокой производительности такие краны имеют высокие рабочие скорости. Режим работы может достигать до 8К. Диапазон регулирования скорости механизма подъема в крюковом режиме может достигать до 8:1.

Портальные краны имеют также механизмы поворота, изменения вылета стрелы и передвижения. У перегрузочных портальных кранов передвижение является установочным (т.е. редко используемым) движением.

#### *Башенные краны*

Башенные краны применяются в промышленном и гражданском строительстве. На рис. 2.26 приведена конструктивная схема башенного поворотного строительного крана.

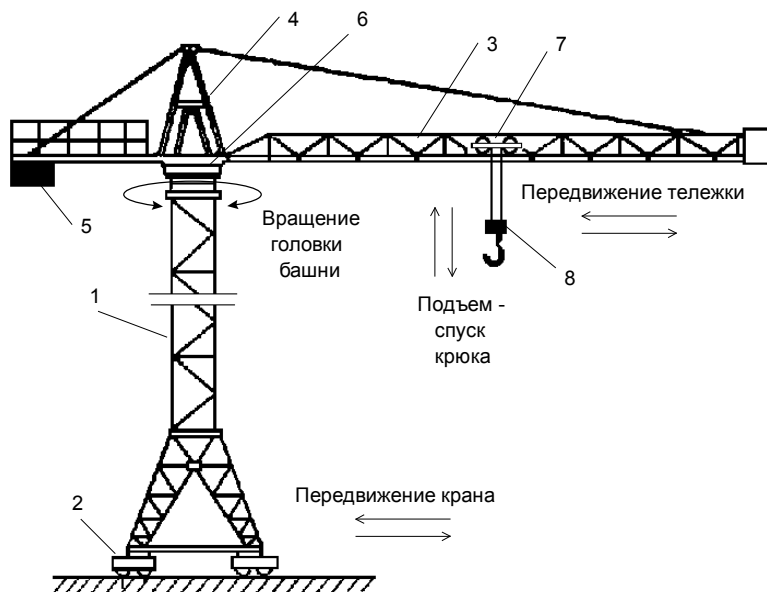


Рис. 2.26. Поворотный строительный кран

Строительный башенный кран имеет башню 1, портал которой опирается на ходовые тележки 2. В верхней части башни имеется поворотный круг 6, на котором вращается поворотная головка башни 4 со стрелой 3 и консолью противовеса 5. Изменение вылета крюка 8 достигается перемещением тележки 7 вдоль стрелы (в других конструкциях для этой цели используется подъем - опускания стрелы). Все рабочие движения крана обслуживаются следующими механизмами: подъемной лебедкой, механизмом передвижения крана, механизмом передвижения тележки и механизмом поворота.

К специфическим требованиям, предъявляемым к электроприводу механизма подъема башенных кранов, относится необходимость подъема и опускания легких грузов с повышенной скоростью.

Это связано с желанием обеспечить высокую производительность при большой высоте подъема, учитывая, что грузы, близкие по массе к номинальным, поднимаются редко. Таким образом, общий диапазон регулирования скорости (ниже и выше номинальной) может достигать 40:1.

Можно выделить два основных архитектурных типа башенных кранов – с поворотной и неповоротной башнями.

Особенностью башенного крана является также наличие больших упругих деформаций металлоконструкций, требующих учета при выборе механических характеристик электроприводов (прежде всего механизмов поворота) и режимов пуска и торможения.



Многие башенные краны имеют специальные механизмы и приспособления для самомонтажа. Спецификой работы башенного крана является также питание его от временных электрических сетей малой мощности или автономных источников электроэнергии. Это предъявляет к его электрооборудованию дополнительные требования в части сохранения работоспособности при провалах напряжения.

## 2.6. Статические и динамические нагрузки электроприводов подъемников и тяговых лебедок

Наиболее простым и универсальным механизмом перемещения является подъемная или тяговая лебедка, предназначенная для передачи усилий от привода к рабочему органу с помощью подъемного или тягового каната соответствующей длины. По принципу работы лебедки подразделяются на *одноконцевые* и *двухконцевые* лебедки. Отличаются друг от друга наличием ветвей подъемного каната. По конструкции органа навивки каната - на *барабанные лебедки* и *лебедки с канатоведущими шкивами* (при большой длине подъемных канатов габариты барабанов недопустимо возрастают, и при этих условиях более удобным является использование лебедки с канатоведущим шкивом трения).

Одноконцевые лебедки являются неуравновешенными подъемными механизмами (рис. 2.27).

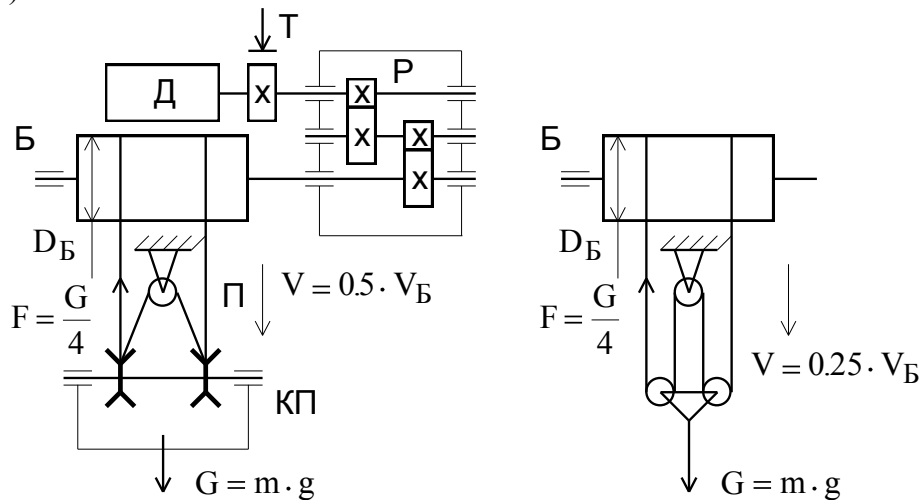


Рис. 2. 27. Кинематическая схема одноконцевой подъемной лебедки.

*Д - двигатель, Т - механический тормоз, Р - редуктор, П - полиспаст, КП - крюковая подвеска*

Если не учитывать потерь на трение, приведенный к валу двигателя момент, обусловленный весом груза, можно определить с помощью соотношения

$$M_{\text{гр}} = \frac{G_0 + G}{2 \cdot i_p \cdot i_{\text{п}}} D_{\text{б}}, \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.11)$$

где  $G = m \cdot g$  – вес груза, имеющего массу  $m$ , Н;  $G_0 = m_0 \cdot g$  – вес грузозахватывающего устройства, масса которого  $m_0$ , Н;

$i_p, i_{\text{п}}$  – передаточные отношения редуктора и полиспаста;  $D_{\text{б}}$  – диаметр барабана, м.

Момент  $M_{\text{гр}}$  является активным моментом, направленным в сторону спуска. Он изменяется при изменении веса поднимаемого груза, но не зависит от направления движения.

В реальном механизме присутствуют потери трения и обуславливают наличие реактивного момента  $M_{\text{тр}}$ , который всегда препятствует движению, изменяя свое направление (знак) при изменении направления движения.

В случае перемещения достаточно тяжелых грузов моменты потерь при расчете статических нагрузок учитываются с помощью соответствующих значений общего КПД механизма. При подъеме номинального груза  $G = G_{\text{ном}}$ :

$$M_{\text{ст1}} = M_{\text{гр.ном}} + M_{\text{тр.ном}} = \frac{M_{\text{гр.ном}}}{\eta_{\text{л.ном}}}, \quad (2.12)$$

где:

$$M_{\text{гр.ном}} = \frac{G_0 + G_{\text{ном}}}{2 \cdot i_p \cdot i_{\text{п}}} D_{\text{б}}; \quad (2.13)$$

$\eta_{\text{л.ном}} = \eta_{1\text{ном}} \cdot \eta_{2\text{ном}} \cdot \eta_{3\text{ном}}$  – общий КПД лебедки, учитывающий КПД всех звеньев кинематической цепи установки.

Для режима спуска номинального груза

$$M'_{\text{ст1}} = M_{\text{гр.ном}} - M_{\text{тр.ном}} = M_{\text{гр.ном}} \cdot \eta_{\text{л.ном}}$$

Статический момент при подъеме пустого грузозахватывающего устройства  $G = 0$  равен

$$M_{\text{ст2}} = M_{\text{гр0}} + M_{\text{тр0}}, \quad (2.14)$$

где  $M_{гр0} = \frac{G_0 \cdot D_6}{2 \cdot i_p \cdot i_{п}}$ ,  $M_{тр0} = \frac{M_{гр0} \cdot (1 - \eta_{л0})}{\eta_{л0}}$ .

Статический момент при спуске пустого грузозахватывающего устройства  $G = 0$  равен

$$M'_{ст2} = M_{гр0} - M'_{тр0}, \quad (2.15)$$

где  $M'_{тр0}$  – момент потерь при спуске пустого грузозахватывающего устройства.

Момент нагрузки двигателя в зависимости от веса грузозахватывающего устройства может быть либо движущим, либо тормозным. При тяжелом грузозахватывающем устройстве  $\left(\frac{G_0}{G_0 + G_{ном}}\right) \geq 0.1$   $M_{гр0} > M'_{тр0}$ , момент  $M'_{ст2}$  является движущим (тормозной спуск) и его значение при условии  $M'_{тр0} = M_{тр0}$  находится по выражению

$$M'_{ст2} = M_{гр0} \cdot \left(2 - \frac{1}{\eta_{л0}}\right).$$

При легком грузозахватывающем устройстве  $\left(\frac{G_0}{G_0 + G_{ном}}\right) < 0.1$  возможно соотношение  $M_{гр0} < M'_{тр0}$ , при котором потери трения в механизме преодолеваются совместно моментом от веса грузозахватывающего устройства и движущим моментом двигателя (силовой спуск). В этом случае расчет значения  $M'_{ст2}$  ведется по формуле (2.15).

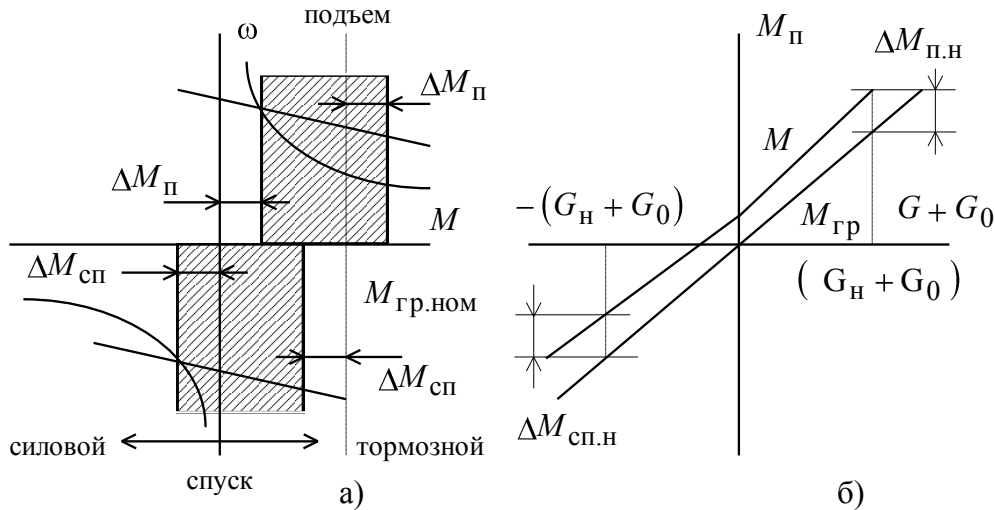


Рис. 2.28. Нагрузки подъемных лебедок

Определение статических нагрузок является важным этапом проектирования электропривода. Оно необходимо для построения нагрузочных диаграмм, выбора мощности двигателя и проверки его по нагреву. Характер нагрузок и пределы их изменений в значительной степени определяют режимы работы и выбор схемы электропривода. Изменение нагрузки является основным возмущением при работе электропривода, поэтому без знания пределов, в которых она может изменяться, нельзя обеспечить требуемую точность регулирования координат.

Динамические нагрузки электропривода одноконцевой подъемной лебедки связаны с необходимостью пусков, реверсов и торможений. При заданном ускорении  $\varepsilon_{\text{доп}}$ , которое обычно ограничено технологическими условиями, динамический момент двигателя может быть определен из соотношения

$$M_{\text{дин}} = J_{\text{экр}} \cdot \frac{d\omega}{dt} = J_{\text{экр}} \cdot \varepsilon_{\text{доп}} \quad (2.16)$$

В этом выражении  $J_{\text{экр}}$  представляет собой эквивалентный приведенный к валу двигателя момент инерции, включающий в себя момент инерции ротора двигателя и приведенный момент инерции всех вращательно и поступательно движущихся масс установки. При рабочей скорости лебедки  $V_p < 2 \frac{M}{c}$  основную долю в моменте  $J_{\text{экр}}$  составляет момент инерции двигателя  $J_{\text{экр}} = (2 \div 1.6) J_{\text{дв}}$ . Для более быстроходных установок влияние приведенных масс механизма более значительно.

## 2.7. Статические и динамические нагрузки электроприводов механизмов передвижения и поворота

Кинематические схемы механизмов передвижения и поворота приведены на рис. 2.29.

Для механизмов передвижения, работающих на горизонтальном пути в производственном помещении, приведенный к валу двигателя статический момент, обусловленный силами трения, определяется по формуле

$$M_{\text{ст.передв.}} = \frac{k_p \cdot (G + G'_0) \left( \mu \cdot \frac{d_{\text{ц}}}{2} + f \right)}{i_p \cdot \eta_m} \quad (2.17)$$

где:  $G'_0$  – общий вес незагруженного механизма;  $\mu$  – коэффициент трения в опорах ходовых колес;  $f$  – коэффициент трения качения ходовых колес;  $\eta_m$  – КПД передач механизма;  $d_{\text{ц}}$  – диаметр цапф (подшипников) колес;  $k_p$  – коэффициент, учитывающий трение реборд колес о рельсы, возникающее вследствие возможного перекоса конструкции моста или тележки.

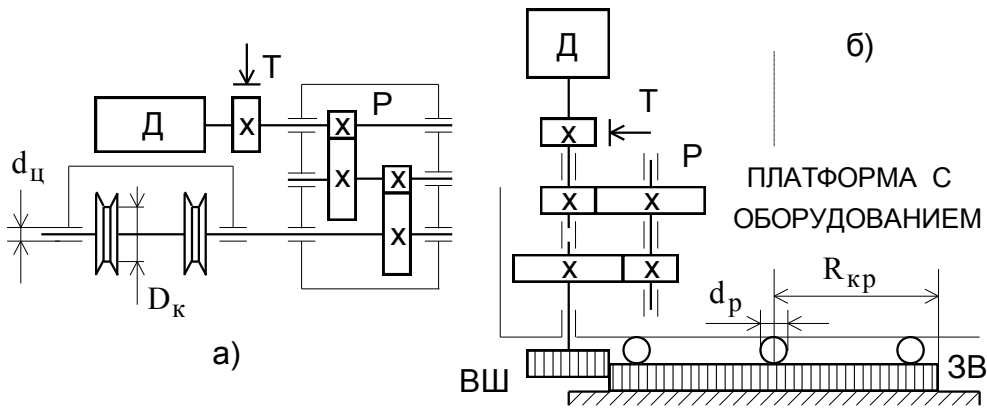


Рис. 2.29. Кинематическая схема механизма передвижения (а) и поворота (б). Д - двигатель, Т - тормоз, Р - редуктор, ВШ - ведущая шестерня, ЗВ - зубчатый венец,  $D_k$  - диаметр колеса,  $d_{\text{ц}}$  - диаметр цапф (подшипников) колес,  $R_{\text{кр}}$  - радиус роликового круга,  $d_p$  - диаметр роликов (в случае опорных тележек - диаметр их колес)

Численные значения коэффициентов, входящих в данное выражение, берутся из справочных данных.

При горизонтальном положении платформы и отсутствия ветра статический момент поворота (рис. 2.29) равен

$$M_{\text{ст.пов}} = k_p \cdot \frac{2 \cdot f \cdot (G + G'_0) \cdot D_{\text{кр}}}{d_p \cdot i \cdot \eta}, \quad (2.18)$$

где:  $k_p$  – коэффициент, учитывающий трение реборд колес опорных тележек о рельсы или роликов опорного роликового круга о направляющие, а также трение в центральной цапфе оси вращения платформы;  $D_{\text{кр}}$  – диаметр роликового круга;  $d_p$  – диаметр роликов (в случае опорных тележек – диаметр их колес);  $f$  – коэффициент трения качения роликов или ходовых колес.

Статические нагрузки установок, работающих на открытом воздухе, могут существенно изменяться при наличии уклона или воздействия ветра. В общем случае сила сопротивления движению для механизмов передвижения может быть представлена в виде алгебраической суммы

$$F = F_K + F_{\text{ц}} + F_{\text{т.реб}} + F_{\text{в}} + F_{\text{г}} + \dots$$

где:  $F$  – сила сопротивления движению;  $F_K$  – сила трения качения колеса по рельсам;  $F_{\text{ц}}$  – сила трения в цапфах;  $F_{\text{т.реб}}$  – сила трения реборд колес о рельсы;  $F_{\text{в}}$  – сила давления встречного воздуха;  $F_{\text{г}}$  – дополнительные усилия от не горизонтальности поверхности.

Уклон и ветровая нагрузка в значительной степени расширяют пределы изменения нагрузок и изменяют их характер. При наличии уклона, нагрузка становится несимметричной аналогично рис. 1.9 а.

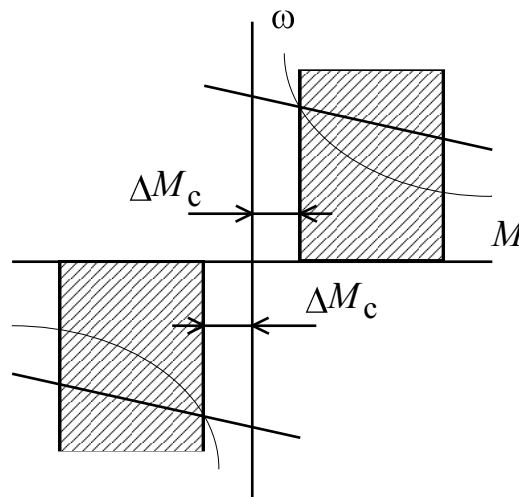


Рис. 2.30. Нагрузки механизмов передвижения и поворота без учета ветровой нагрузки и уклона

Ветровая нагрузка может иметь любое направление, и при большой парусности пределы изменения статической нагрузки могут охватывать как двигательный, так и тормозной режимы. Кроме того, для механизмов поворота статический момент, обусловленный ветром, при постоянной силе ветра зависит от угла поворота платформы.

#### *Сила сопротивления от давления ветра*

Сила сопротивления от давления ветра для механизмов передвижения и поворота определяется из выражения

$$F_B = P_B \cdot S_B,$$

где:  $P_B$  – ветровое давление (для кранов, работающих на открытом воздухе, принимается равным  $150 \div 200 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$  или  $(0.5 \div 2.5) \cdot 10^{-3}$ , атм);  $S_B$  –

площадь парусности машины,  $\text{м}^2$ ;

Площадь парусности машины определяется по выражению

$$S_B = k_{\text{СП}} \cdot S_{\text{ВК}} + S_{\text{Г}},$$

где:  $k_{\text{СП}}$  – коэффициент сплошности конструкции, численно равный  $0.3 \div 0.6$  для ферм и  $0.7 \div 0.8$  для механизмов;  $S_{\text{ВК}}, S_{\text{Г}}$  – площадь, ограниченная контуром конструкции и груза.

Для механизмов передвижения момент сопротивления от давления ветра определяется по выражению

$$M = F_B \cdot \frac{D_K}{2},$$

где  $D_K$  – диаметр колеса.

Для механизмов поворота статический момент, обусловленный ветром, при постоянной силе ветра зависит от угла поворота платформы. При перпендикулярном направлении по отношению к поверхности конструкции (максимальный момент) определяется по выражению

$$M_{\text{В.макс}} = F_{\text{ВГ}} \cdot R + F_{\text{ВК}} \cdot L,$$

где:  $F_{\text{ВГ}}, F_{\text{ВК}}$  – сила сопротивления от давления ветра на груз и конструкцию;  $R, L$  – плечо приложения силы ветра на поворотную часть.

При произвольном положении поворотной платформы статический момент определяется по выражению

$$M_B^\varphi = M_{\text{В.макс}} \cdot \sin \varphi,$$

где  $\varphi$  – угол поворота платформы по отношению к направлению ветра.

Среднеквадратичная величина статического момента при произвольном положении поворотной платформы

$$M_{\text{в.ск}} = 0.7 \cdot M_{\text{в.маск}}.$$

### 2.7.1. Моменты сопротивления при подъеме по наклонной плоскости

При движении тележки по наклонной плоскости

$$F_{\Gamma} = F_{\text{гр}} + F_{\text{тр}} \quad (2.19)$$

где:  $F_{\text{гр}} = G \cdot \sin \alpha$  – сила, возникающая от подъема груза, Н;

$F_{\text{тр}} = G \cdot \cos \alpha \cdot k_{\text{тр}}$  – сила трения, Н;  $k_{\text{тр}}$  – коэффициент трения;  $\alpha$  – угол наклона плоскости, по которой движется тележка.

Подставив значения  $F_{\text{гр}}$  и  $F_{\text{тр}}$  в выражение (9) и приняв, что  $G = G_{\Gamma} + G_0$  получим

$$F_{\Gamma} = (G_{\Gamma} + G_0) (\sin \alpha + \cos \alpha \cdot k_{\text{тр}}). \quad (2.20)$$

Момент сопротивления на валу двигателя определяется по выражению

$$M = \frac{F_{\Gamma} \cdot D_{\text{к}}}{2 \cdot i \cdot \eta}. \quad (2.21)$$

Важнейшей особенностью механизмов передвижения и поворота является большая механическая инерция, влияние которой тем больше, чем тяжелее движущее сооружение и чем выше скорость движения. Приведенный к валу двигателя момент инерции движущихся масс установки для механизмов передвижения и поворота кранов в 2 - 20 раз больше собственного момента инерции двигателя. Поэтому для таких механизмов при большой частоте включений динамические нагрузки определяют необходимую мощность двигателя, а статические нагрузки невелики в сравнении с динамическими нагрузками.

Кроме того в механизмах перемещения и поворота необходимо учитывать отсутствие пробуксовки. Это определяется следующими выражениями

$$a \leq \mu \cdot g,$$

где:  $a$  – ускорение;  $g = 9.81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$  – ускорение свободного падения;  $\mu = 0.15$

– коэффициент трения колес о рельсы (начальное значение).



Быстродействие работы механизмов подъема, перемещения, поворота определяется, в общем случае выражением

$$M - M_c = J_{\text{экв}} \cdot \frac{d\omega}{dt} = J_{\text{экв}} \cdot \varepsilon, \quad (2.22)$$

где

$$J_{\text{экв}} = J_{\text{дв}} + \underbrace{0.15 \cdot J_{\text{дв}}}_{\text{Тормоз}} + \underbrace{0.1 \cdot J_{\text{дв}}}_{\text{Механическая передача}} + \underbrace{J_{\text{пр}}}_m$$

Приблизительные значения времен пуска и торможения данного класса механизмов можно определить по выражениям

$$t_{\text{пуск}} = J_{\text{экв}} \cdot \frac{\omega_{\text{кон}} - \omega_{\text{нач}}}{M_{\text{п.ср}} - M_c} \Leftrightarrow \frac{V}{a_{\text{доп}}},$$

$$t_{\text{торм}} = J_{\text{экв}} \cdot \frac{\omega_{\text{н}}}{M_{\text{т.ср}} + M_c} \Leftrightarrow t_{\text{торм}} = t_{\text{пуск}} \cdot$$

Значение величины  $a_{\text{доп}}$  берется из таблицы 2.4 [].

В таблице 2.5 приведены значения величины среднего значения пускового момента  $M_{\text{п.ср}}$  для разных типов двигателей.

Таблица 2.4

Значение величины  $a_{\text{доп}}$

	Подъем, опускание груза, а, м/с <sup>2</sup>	Поворот ε, рад/с <sup>2</sup>	Подъем, опускание стрелы, а, м/с <sup>2</sup>	Передвижение тележки, а, м/с <sup>2</sup>	Передвижение крана, а, м/с <sup>2</sup>
Литейные и крупные монтажные краны	0.15	–	–	0.15	0.15
Мостовые краны общего назначения	0.3	–	–	0.4	0.5
Строительные башенные краны	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2
Судовые грузовые краны	1.0	1.0	0.7	–	–
Стреловые поворотные краны общего назначения	0.4	0.5	0.5	–	0.5

Таблица 2.5

*Величины средних значений пусковых моментов  $M_{п.ср}$*

Тип электрического двигателя	$M_2$	$M_1$	$M_{п.ср}$
ДПТ независимого возбуждения	$1.1 \cdot M_H$	$0.6 \div 2.5 \cdot M_H$	$0.6 \div 1.8 \cdot M_H$
ДПТ последовательного возбуждения		$0.6 \div 5 \cdot M_H$	$0.6 \div 3 \cdot M_H$
АД с фазным ротором		$0.6 \div 2.5 \cdot M_H$	$0.6 \div 2 \cdot M_H$
АД с короткозамкнутым ротором	-----		$0.45 \cdot (M_{п.ср} + M_{к.з})$

### 2.8. Классификация режимов работы кранов и их механизмов

Приступая к расчету и проектированию электроприводов кранов необходимо учитывать требования регламента по режимам работы кранов и крановых механизмов.

В России для определения режима работы крановых механизмов действует ГОСТ 25835 83, для определения группы режима работы крана " ГОСТ 25546 82. В значительной степени эти ГОСТы увязаны с международным стандартом ИСО 4301/1 86.

Режим работы крана учитывается при расчете мощности и выборе типа двигателя и аппаратуры управления. ГОСТ 25835"83 предусматривает шесть групп режима работы, каждая из которых характеризуется определенным сочетанием классов использования и нагружения. Классы использования устанавливаются в зависимости от нормы времени работы механизма. Ориентировочная характеристика класса использования механизма представлена в таблице 2.6, ориентировочная характеристика классов нагружения в таблице 2.7.

Таблица 2.6

*Классы использования крановых механизмов*

Класс использования	Использование во времени
A0	Редкое
A1	Нерегулярное
A2	Регулярное малой интенсивности
A3	Регулярное средней интенсивности
A4	Нерегулярное интенсивное (двухсменная работа)

A5	Интенсивное при трехсменной работе
A6	Весьма интенсивное при трехсменной работе

Таблица 2.7

*Классы нагружения крановых механизмов*

Класс нагружения	Характеристика действующих нагрузок	
	Механизм подъема крана	Механизм горизонтального перемещения
B1	Преобладают минимальные нагрузки; максимальные нагрузки редки, например, при монтажных и ремонтных работах	Редкие пуски и торможения, значительные рабочие и холостые пробеги; малые массы грузов; производства с малой интенсивностью работы и большими площадями обслуживания
B2	Преобладают средние минимальные нагрузки; максимальные нагрузки относительно редки	Редкие, но регулярные пуски и торможения; небольшие рабочие и холостые пробеги; незначительные массы грузов; производства с постоянной, но ограниченной интенсивностью работы и площадями обслуживания
B3	Преобладают средние и минимальные нагрузки; минимальные нагрузки носят эпизодический характер; характерно для производств с разнообразными массами грузов	Регулярные пуски и торможения; малые рабочие и холостые пробеги; сравнительно большие массы грузов; производства с высокой интенсивностью работы и малыми площадями обслуживания
B4	Преобладают максимальные нагрузки и близкие к максимальным; средние нагрузки носят эпизодический характер; ха-	Частые пуски и торможения с очень редким выходом на установившийся режим; большие массы грузов; производства с высокой интенсивностью работы и ограниченными площадями обслуживания

	рактерно для производств с относительно постоянной массой груза	
--	---	--

Группы режимов работы механизмов представлены в таблице 2.8.

Таблица 2.8.

*Группы режимов работы крановых механизмов*

Класс использования	Норма времени работы механизма, ч.	Класс нагружения			
		B1	B2	B3	B4
A0	До 800	1М	1М	1М	1М
A1	От 800 до 1600	1М	1М	2М	3М
A4	От 6300 до 12500	3М	4М	5М	6М
A5	От 12500 до 25000	4М	5М	6М	—
A6	От 25000 до 50000	5М	6М	—	—

На практике группу режима работы механизмов часто устанавливают по группе режима работы крана. Ориентировочное соответствие групп режима работы крана и механизмов приведено в таблице 2.9.

Таблица 2.9

*Ориентировочное соответствие групп режимов работы кранов и механизмов*

Группа режима крана	Группа режима механизма	
	Механизмы, действующие при каждом цикле работы крана	Механизмы для установочных операций или используемые не при каждом цикле работы крана
1К	1М	1М
2К	1М	1М
3К	1М – 2М	1М
4К	2М – 3М	1М – 2М
5К	3М – 4М	1М – 2М
6К	4М – 5М	2М – 3М
7К	5М – 6М	3М – 4М
8К	6М	5М – 6М

## 2.9. Системы электроприводов.

Традиционно для кранового электропривода применяются специально разработанные серии электродвигателей переменного и постоянного тока. Поэтому в зависимости от применяемых электродвигателей разрабатываются системы электроприводов постоянного и переменного тока. Режим работы электродвигателей в крановом электроприводе характеризуется широким изменением нагрузок, частыми пусками и торможениями, широким диапазоном изменения скорости ниже и выше номинальной. Крановые двигатели рассчитаны для работы в повторно-кратковременном режиме, который характеризуется продолжительностью включения (ПВ) 15, 25, 40 и 60% при продолжительности цикла не более 10 мин.

Основным номинальным режимом крановых двигателей переменного тока является ПВ=40%. Из-за высоких требований к динамике двигателей в переходных процессах пуска и торможения и для снижения расхода энергии при этом двигатели конструируются таким образом, чтобы момент инерции ротора был, по возможности, минимальным. Снижение момента инерции достигается путем уменьшения высоты оси вращения при заданной мощности двигателя.

В таблице 2.9 приведены основные технические данные выпускаемых промышленностью крановых электроприводов переменного и постоянного тока. Основными одноступенчатыми узлами для всех кранов, как было отмечено, являются:

- механизмы передвижения и поворота;
- механизм подъема и опускания груза.

Для этих механизмов соответственно разработаны электроприводы механизма подъема и электроприводы механизмов горизонтального перемещения.

Таблица 2.9

*Системы крановых электроприводов*

Электропривод	Диапазон		
	Мощностей, кВт	Регулирование скорости	
		<i>D</i>	
		Ниже номинальной	Выше номинальной

Асинхронный электропривод с кулачковым контроллером, регулирование скорости реостатное	2:30	3:1	–
Асинхронный электропривод с кулачковым контроллером, регулирование скорости реостатное при использовании схемы динамического торможения с самовозбуждением	5:30	7:1	–
Асинхронный электропривод с магнитным контроллером и реостатным регулирование скорости	2:180	4:1	–
Асинхронный электропривод с магнитным контроллером и реостатным регулирование скорости при использовании схемы динамического торможения с самовозбуждением	20:180	8:1	–
Асинхронный электропривод с импульсно-ключевым управлением	2:30	10:1	–
Асинхронный электропривод с тиристорным преобразователем напряжения статора и резисторами в роторе	2:180	10:1	–
Асинхронный электропривод с многоскоростным АД и преобразователем частоты с непосредственной связью	2:60	40:1	–
Электропривод постоянного тока с кулачковым кон-	3:15	4:1	2:1

троллером, регулирование скорости реостатное с использованием потенциометрических схем			
Электропривод постоянного тока с магнитным контроллером, реостатным регулирование скорости и использованием потенциометрических схем	3:180	6:1	2:1
Электропривод постоянного тока по системе Г – Д	20:180	10:1	2,5:1
Электропривод постоянного тока по системе ТП– Д	50:300	10:1	2,5:1

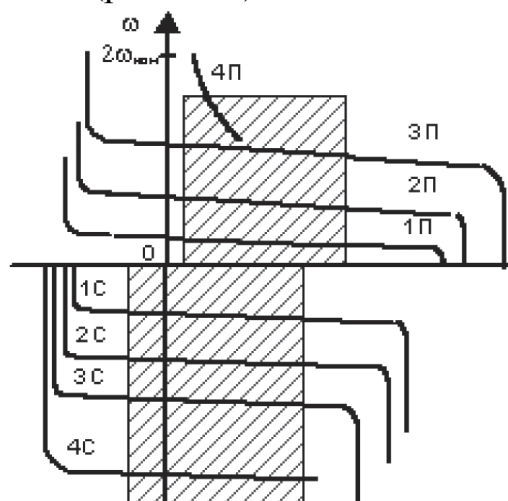
## 2.9. Электропривод механизма подъема

Главной отличительной особенностью электропривода механизма подъема является наличие активного (потенциального) характера момента нагрузки. Активный момент нагрузки всегда имеет один знак, т.е. момент, создаваемый весом груза, всегда стремится раскрутить механизм в сторону спуска. Таким образом, при подъеме груза (первый квадрант механических характеристик) электропривод должен преодолевать этот момент (работать в двигательном режиме), при работе в направлении спуска (четвертый квадрант механических характеристик) не давать грузу опускаться в режиме свободного падения (тормозной режим). Потенциальная энергия груза при опускании должна или возвращаться в питающую сеть (что более предпочтительно) или рассеиваться в виде тепла в специальном устройстве. Необходимость обеспечения установившейся скорости в тормозном режиме является главным требованием к электроприводу механизма подъема и является определяющим при выборе структуры силовой цепи.

Кроме того, для большинства электроприводов механизма подъема существует так называемый режим силового спуска – когда статический момент, создаваемый весом легкого груза или пустого крюка, не преодолевает момент от потерь в механической части (редукторе, канатно-блочной системе). В этом случае электропривод работает в двигательном режиме с весьма небольшим тормозным моментом – не более 10-15% от номиналь-

ного момента. Характеристики силового спуска располагаются в третьем квадранте.

Во втором квадранте электропривод не имеет установившегося режима и работает только в режиме торможения с высших на низшие скорости. Поскольку большинство электроприводов механизма подъема требуют регулирования скорости, в каждом квадранте располагается несколько механических характеристик (рис. 2.31).



*Рис.2.31. Желаемые механические характеристики электропривода механизма подъема*

Характеристика 1 в первом квадранте служит в основном для обтягивания строп грузозахватного приспособления. Характеристика 2 является промежуточной. При работе на характеристике 3 производится подъем груза с номинальной скоростью. Характеристики 4, лежащие в первом, третьем и четвертом квадрантах используются в электроприводе кранов с большой высотой подъема, прежде всего башенных. При работе на этих характеристиках производится подъем и опускание грузов массой меньше номинальной с повышенной скоростью.

Наибольшее влияние на выбор системы электропривода и ее структуру оказывает характеристика 1, лежащая в третьем и четвертом квадрантах. Скорость опускания груза на этой характеристике называется посадочной или установочной, определяется технологическими требованиями к крану и является одной из главных характеристик электропривода механизма подъема.

При активном моменте нагрузки всегда возникает опасность падения груза с угрозой для жизни людей и разрушения механизмов. Поэтому, к конструкции как механической, так и электрической частей правилами



«Устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов» предъявляются требования, направленные на обеспечение безопасности.

*Первым* из них является обязательное наличие в конструкции механической части тормоза так называемого «нормально замкнутого типа», т.е. при отключенном приводе механизм должен быть всегда заторможен. Тормоз должен обладать достаточным запасом тормозного момента, называемым «коэффициентом запаса торможения».

*Вторым* требованием является обязательное обеспечение опускания груза только работающим электродвигателем.

Указанные требования определяют схемные решения, и построение силового канала электропривода механизма подъема с преобразователем частоты:

- электропривод должен обеспечивать достаточный запас пускового момента при максимальной допустимой нагрузке и максимальном допустимом снижении питающего напряжения;
- растормаживание механического тормоза должно производиться только после того, как электропривод разовьет пусковой момент достаточный для подъема груза;
- срабатывание любой защиты электропривода должно приводить к отключению электропривода с затормаживанием механическим тормозом;
- преобразователь частоты должен быть оборудован устройством рекуперации или рассеяния энергии торможения (тормозной резистор) с мощностью, достаточной для обеспечения опускания груза максимальной допустимой массы на номинальной скорости.

Наиболее распространенная структурная схема частотного электропривода для механизма подъема крюкового крана общего назначения представлена на рис. 2.32.

Управление электромеханическим (электрогидравлическим) приводом тормоза производится контактором, включающимся встроенным релейным выходом преобразователя частоты после того, как электродвигатель разовьет достаточный пусковой момент. Для рассеяния энергии торможения служит тормозной резистор, хотя может применяться и устройство рекуперации энергии. Кроме того, некоторые электроприводы могут содержать датчики скорости и перемещения.

Наряду с представленной на рисунке традиционной компоновки механической части привода существует также вариант, при котором механический тормоз с электромагнитным приводом составляет одно целое с

двигателем. Некоторое распространение в крановом электроприводе получили также двигатели с коническим подвижным ротором, растормаживание которых производится при осевом перемещении ротора под действием электромагнитных сил, электродвигатели со встроенными электромагнитами постоянного тока и электродвигатели с электромагнитными вставками [11,12].

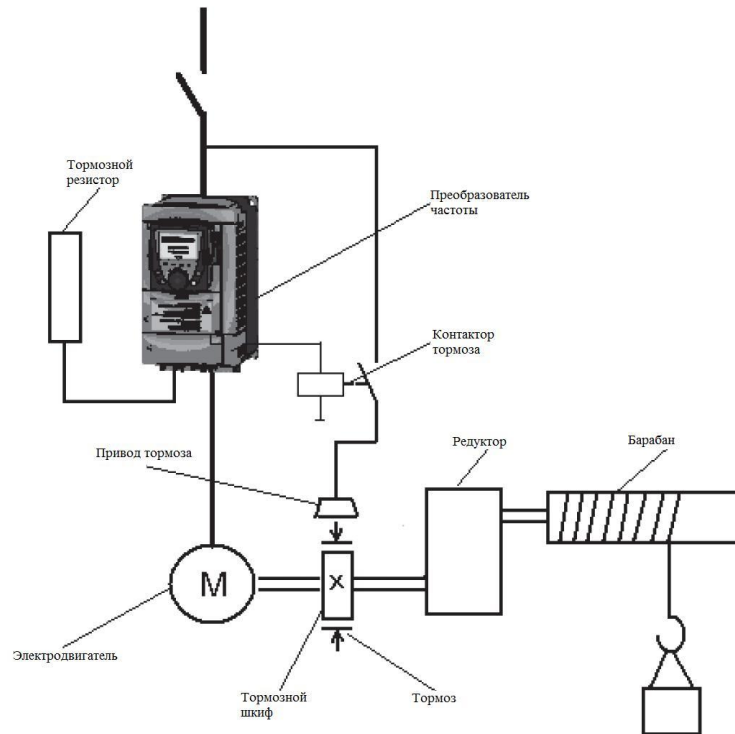


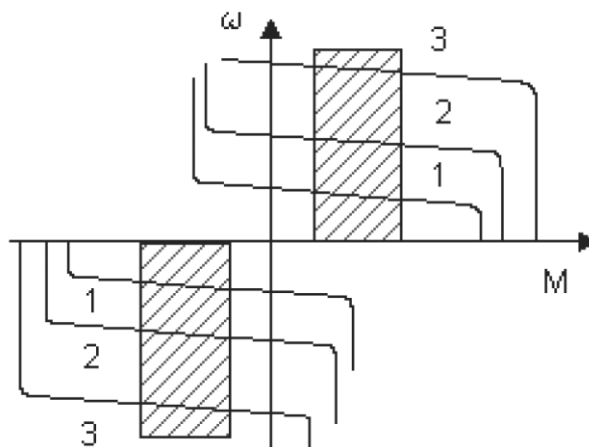
Рис. 2.32. Структурная схема электропривода механизма подъема

## 2.10. Электропривод механизмов горизонтального перемещения

К механизмам горизонтального перемещения относят механизмы передвижения кранов и грузовых тележек, а также механизмы поворота. Все эти механизмы имеют реактивный (т.е. независящий от направления движения) момент нагрузки.

Идеальный электропривод механизма горизонтального перемещения должен обеспечивать жесткие механические характеристики (рис. 2.33.) в двигательном и тормозном режимах. В отличие от механизма подъема тормозной режим механизмов горизонтального перемещения занимает лишь небольшое время цикла и возникает, как правило, при переходе с высших на низшие скорости.

В тормозном режиме электропривод механизмов горизонтального перемещения может работать также при движении под уклон (что бывает при неисправности рельсовых путей) или при движении по ветру.



*Рис.2.33. Желаемые механические характеристики электропривода механизма горизонтального перемещения*

Многие механизмы горизонтального перемещения имеют большой приведенный момент инерции, поэтому, во избежание повышенных динамических нагрузок на металлоконструкции и механизмы электропривод должен ограничивать ускорения при пуске и торможении.

В связи с большим моментом инерции электродвигатели таких механизмов выбираются с учетом повышенных пусковых потерь, из-за этого статический момент на валу электродвигателей в установившемся режиме не превышает, как правило, 50% номинального момента. Масса перемещаемого груза оказывает небольшое влияние на статический момент электропривода механизма передвижения, т.к. масса металлоконструкции крана обычно больше массы груза.

Масса груза и масса грузовой тележки мостового крана уже соизмеримы, а масса грузовой тележки башенного крана намного меньше массы груза. Поэтому масса перемещаемого груза оказывает значительное влияние на загрузку механизмов.

Алгоритм управления тормозом в электроприводах механизмов горизонтального перемещения проще, чем в электроприводах механизмов подъема. Из-за реактивного момента нагрузки снятие тормоза в большинстве случаев можно производить, не дожидаясь, пока момент электродвигателя возрастет до значения статического момента. Основным требовани-

ем является наложение тормоза при скорости, близкой к нулевой, для снижения динамических нагрузок и уменьшения износа тормозных накладок.

Особенностью электроприводов горизонтального перемещения является то, что большинство из них реализуются как многодвигательные приводы, например, приводы механизмов передвижения кранов и механизмов поворота. В этом случае электродвигатели могут питаться как от одного преобразователя частоты (рис. 2.34), что является наиболее экономичным вариантом, так и от индивидуальных преобразователей, обеспечивающих более гибкое управление крановыми механизмами. Можно предположить, что в многодвигательных приводах мостовых и козловых кранов общего назначения с небольшими пролетами достаточно одного преобразователя для питания группы двигателей. В этом случае, каждый двигатель должен быть оборудован индивидуальной защитой от перегрузки в виде теплового реле (рис. 2.34).

Питание двигателей от индивидуальных преобразователей представляется целесообразным для приводов механизмов передвижения мостовых и козловых кранов с большими пролетами.

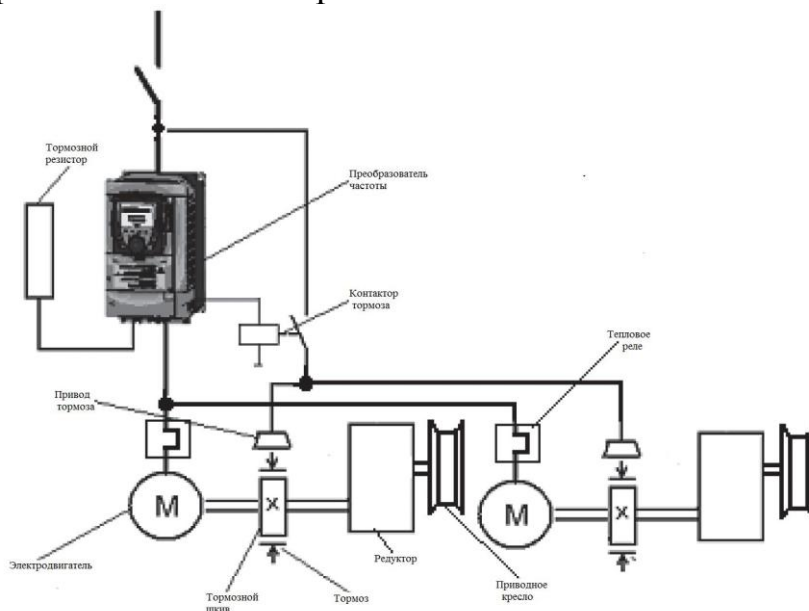


Рис. 2.34. Структурная схема электропривода механизма горизонтального перемещения

В этом случае благодаря большей гибкости управления возможно обеспечение выравнивания нагрузки между двигателями по схеме «ведущий-ведомый», синхронизации движения приводов с целью устранения перекоса моста крана и т.д.

Наиболее сложными с точки зрения организации управления являются электроприводы механизмов поворота башенных кранов, особенно с верхним расположением поворотного строения. Наличие упругих металлоконструкций, широкий диапазон изменения статического момента и момента инерции существенно усложняют управление такими механизмами. Общий подход к построению таких электроприводов пока не выработан, и практически каждая краностроительная фирма имеет свой вариант реализации такого привода.

Следует отметить, что в крановых приводах, особенно для механизмов подъема, весьма важным является вопрос обеспечения тормозных режимов работы приводов. При переходе двигателя в режим торможения, например, при спуске груза или интенсивном торможении крана или тележки, энергия торможения может гаситься на тормозных резисторах или рекуперироваться в сеть с помощью специальных модулей.

### **2.11. Выбор электродвигателей механизмов кранов.**

Выбор электродвигателей представляет собой важную и сложную задачу, и от того, насколько правильно она будет решена, зависят технико-экономические показатели электропривода

Основным требованием при выборе электродвигателя является соответствие его мощности условиям технического процесса исполнительного механизма (рабочей машины). Применение двигателя недостаточной мощности может привести:

1. повышенному нагреву двигателя, ускоренному старению изоляции обмоток и сокращению срока службы (например, превышение температуры на  $10^{\circ}$  влечет за собой уменьшение срока службы с 15 до 8 лет.
2. нарушению заданного цикла работы, снижению производительности, преждевременному выходу двигателя из строя (экономические потери).

Недопустимым является использование двигателей завышенной мощности, так как при этом

1. повышается первоначальная стоимость электропривода;
2. снижается к.п.д. и увеличиваются потери энергии;
3. для АД снижается коэффициент мощности.

При выборе двигателя должно проверяться также его соответствие условиям пуска исполнительного механизма и возможных перегрузок.

Выбор электродвигателя обычно производится в следующей последовательности:

1. Расчет мощности и предварительный выбор двигателя.
2. Проверка выбранного двигателя по условиям пуска и перегрузки.
3. Проверка выбранного двигателя по нагреву.

Если выбранный в п.1 двигатель удовлетворяет условиям проверки по пп. 2 и 3, то на этом выбор двигателя заканчивается. Если же выбранный двигатель не удовлетворяет условиям п. 2 или п. 3, то выбирается другой двигатель (как правило, большей мощности, и проверка продолжается).

Проверка двигателя по нагреву выполняется не только при выборе вновь проектируемого ЭП, но и для работающих двигателей для определения их загрузки и теплового режима.

Двигатели для механизмов, выполняющих рабочие операции по подъему и горизонтальному перемещению груза, выбираются в зависимости от требований, предъявляемых к работе каждого механизма, перерабатываемого груза, рода тока, значения напряжения, скорости и диапазона ее регулирования, конструктивного исполнения двигателя, способа защиты от влияния окружающей среды.

Исходными данными при выборе электродвигателей являются: статические и динамические нагрузки, приведенные к валу двигателя; параметры режима работы; время приложения статической и динамических нагрузок, а также технологические особенности работы механизмов, определяющие число групповых циклов.

Основой для расчета мощности и выбора электродвигателя являются нагрузочная диаграмма и диаграммы скорости (тахограммы) исполнительного органа рабочей машины.

*Нагрузочной диаграммой* исполнительного органа рабочей машины называется зависимость приведенного к валу двигателя статического момента нагрузки от времени  $M_c(t)$ . Эта диаграмма рассчитывается на основании технологических данных, характеризующих работу рабочих машин.

*Диаграммой скорости или тахограммой* называется зависимость скорости движения исполнительного органа от времени  $V_{и.о.}(t)$  или  $\omega_{и.о.}(t)$ . После операции приведения эти зависимости изображаются в виде графика  $\omega(t)$ .

Простейшие нагрузочная диаграмма и тахограмма рабочей машины приведены ниже на (рис. 2.35).

Из диаграммы видно, что исполнительный механизм создает при своей работе момент нагрузки  $M_c = \text{const}$ . Движение исполнительного механизма состоит из участков: разгона ( $t_p$  – время разгона), движение с установившейся скоростью ( $t_{уст}$  – время работы с установившейся скоростью), торможения ( $t_T$  – время торможения) и паузы ( $t_0$  – время паузы).

Полное время цикла составляет:

$$t_u = t_p + t_{уст} + t_T + t_0. \quad (2.23)$$

Порядок расчета мощности и предварительного выбора и проверки двигателя рассмотрим на примере этих диаграмм.

1. Ориентировочно определяется номинальный момент двигателя

$$M_H \geq k_3 \cdot M_{сэ}, \quad (2.34)$$

где  $M_{сэ}$  – эквивалентный момент нагрузки,  $k_3 = (1,1 \div 1,3)$  – коэффициент запаса, учитывающий динамические режимы работы электродвигателя, когда он работает с повышенными моментами.

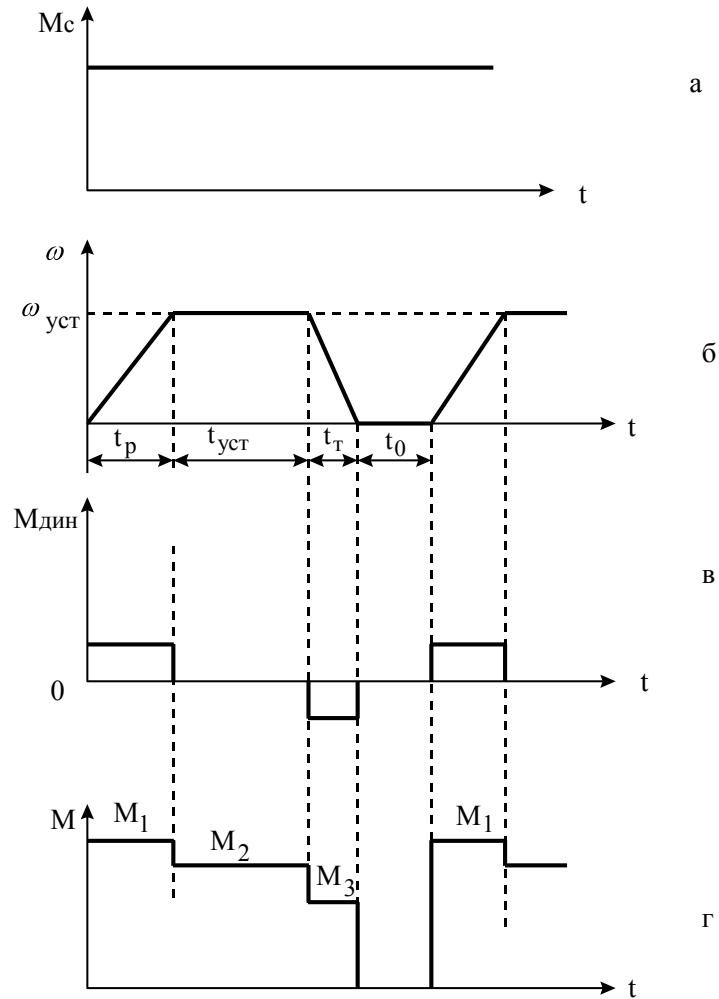


Рис.2.35. Нагрузочная диаграмма и тахограмма рабочей машины

В нашем случае  $M_{сэ} = M_c$ . Если же момент нагрузки  $M_c$  изменяется во времени и нагрузочная диаграмма имеет несколько участков, то  $M_{сэ}$  определяется по следующему выражению:

$$M_{сэ} = \sqrt{\frac{1}{t_{ц}} \cdot \sum_{i=1}^n M_{c_i}^2 \cdot t_i} , \quad (2.35)$$

где  $M_{c_i}$  – момент статической нагрузки  $i$ -го участка;  $t_i$  – длительность  $i$ -го участка.

2. Определяется номинальная скорость двигателя.

$$\omega_{уст} \leq \omega_H.$$



Если во время работы исполнительного органа его скорость регулируется, то номинальная скорость определяется способом регулирования.

3. Определяется номинальная расчетная мощность двигателя

$$P_H = M_H \cdot \omega \geq k_3 \cdot M_{сз} \cdot \omega_{уст}. \quad (2.36)$$

4. Из каталога выбирается двигатель ближайшей большей мощности и скорости, имеющий конструктивное исполнение, соответствующее условиям работы данной рабочей машины.

5. Осуществляется проверка выбранного двигателя по перегрузочной способности.

Для этого строится зависимость момента двигателя от времени с помощью уравнения движения

$$M = M_c + J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = M_c + M_{дин}. \quad (2.37)$$

График динамического момента приведен на рис. 2.35 в. Динамический момент определяется приведенным моментом инерции и заданным ускорением на участке разгона замедлением на участке торможения диаграммы  $\omega(t)$ . Зависимость  $M(t)$  приведена на графике рис.2.35 г.

Для проверки выбранного электродвигателя по перегрузочной способности сопоставляется максимально допустимый момент двигателя  $M_{max}$  с максимальным моментом, взятым из найденной зависимости  $M(t)$ .

При этом необходимо, чтобы

$$M_{max} \geq M_1 \quad (2.38)$$

Если это соотношение выполняется, то двигатель обеспечит ускорение на участке разгона, если нет, то необходимо выбирать другой двигатель.

Для ДПТ обычного исполнения  $M_{max} = M_{доп} = (1,5 \div 2,5)M_H$ .

Для АД с фазным ротором этот момент может быть принят равным  $M_K$ .

6. При выборе АД с короткозамкнутым ротором двигатель должен быть проверен также по условиям пуска. Для этого сравнивается его момент с моментом нагрузки при пуске, т. е.

$$M_{пАД} \geq M_{сп}. \quad (2.39)$$

Для нашего случая  $M_{п} \geq M_c$ . Если выбранный двигатель удовлетворяет пунктам 5 и 6, то далее осуществляется его проверка по нагреву.

## 2.12. Ограничение механических перегрузок механизмов циклического действия

Механические перегрузки являются важной особенностью рабочих режимов для большинства общепромышленных механизмов циклического действия. Для механизмов передвижения на рельсовом ходу они обусловлены либо перекосами при большом пролете крана, либо ветровой нагрузкой, если сооружение работает под открытым небом. Перегрузки крюковых подъемных лебедок могут возникать, например, при подхвате примерзшего или заклиненного груза.

Во всех случаях, когда возникающие по любой причине механические перегрузки превосходят перегрузочную способность привода и допустимую нагрузку механизма, должно обеспечиваться автоматическое ограничение момента, развиваемого двигателем, допустимым значением. Допустимый момент двигателя определяется максимально допустимой нагрузкой механизма по условиям его механической прочности. С другой стороны, его кратность по отношению к номинальному моменту не должна превосходить перегрузочной способности двигателя. Выбранное из этих двух условий значение момента в дальнейшем будет называться допустимым стопорным моментом  $M_{\text{стоп}}$ .

Требования к системе ограничения момента для разных механизмов различны. Если опасные перегрузки - несистематическое, редкое явление, система может действовать как защитное устройство, вызывающее отключение привода и перерыв в работе механизма. Примером электрического устройства может служить максимальная защита двигателя, отключающая его от сети с помощью контактора или автомата при токе, превышающем номинальный в 2 - 2.5 раза. Примером механического защитного устройства может служить введение в кинематическую цепь механизма недостаточно прочного звена, например ослабленной шпонки. При опасной перегрузке шпонка срывается, разобщая механизм и двигатель.

Однако подобные устройства неприменимы для механизмов, работа которых систематически сопровождается перегрузками и стопорениями. В таком случае должно предусматриваться автоматическое ограничение момента, не вызывающее перерывов в работе механизма. Такое ограничение осуществляется двумя путями: *электрическим и механическим*.

*Электрическое непрерывное ограничение момента* достигается использованием электропривода с экскаваторной характеристикой (рис. 2.36).

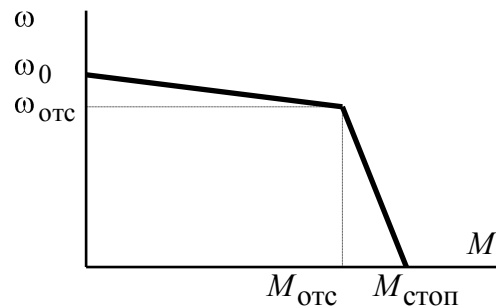


Рис. 2.36. Экскаваторная характеристика электропривода

Механическое непрерывное ограничение момента обеспечивается путем использования муфт предельного момента или других устройств с ограниченным предельным передаваемым моментом. При перегрузке механизма муфта  $M$  (рис. 2.37) проскальзывает, разобщая жесткую связь двигателя с рабочим оборудованием механизма и развивая при этом постоянный момент  $M = M_{\text{стоп}}$  на валу двигателя. Недостатком муфт предельного момента являются их большие габариты и стоимость, быстрый износ при интенсивной работе.

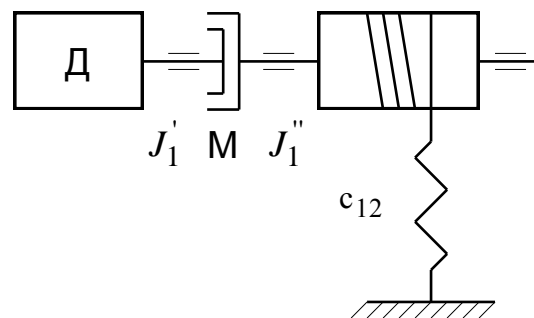


Рис. 2.37. Муфта предельного момента

### 2.13. Электрооборудование и автоматизация лифтов и шахтных подъемных машин

Подъемные машины находят широкое применение во многих отраслях промышленности. К числу наиболее распространенных разновидностей механизмов вертикального транспорта следует отнести лифты и шахтные подъемные машины.

Несмотря на большое разнообразие конструктивных вариантов пассажирских и грузовых лифтов, основным оборудованием для них являются кабина, подъемная лебедка, канаты, направляющие, противовес, ограничи-

тель скорости, буфера или упоры, двигатель, электромеханическое тормозное устройство и аппараты управления. Все оборудование лифта располагается в шахте и в помещениях выше и ниже нее.

### 2.13.1. Общие сведения.

Наибольшее распространение имеют в народном хозяйстве обычные вертикальные грузовые и пассажирские подъемники, которые в обиходе принято называть лифтами.

Лифты по своему назначению подразделяют на:

- *Пассажирские лифты.* Для перевозки людей. Также допускается перевозка грузов, если общая масса пассажиров с грузом не превысит грузоподъемности лифта.

- *Грузовые лифты.* Для перевозки габаритных грузов и людей.

- *Больничные лифты.* Лифты для лечебно-профилактических учреждений устанавливаемые. Используются для транспортировки больных, в том числе на больничных транспортных средствах (каталках, инвалидных колясках), с сопровождающим персоналом (как правило, лифтёром).

- *Грузопассажирские.* Для транспортировки людей и грузов. Имеет увеличенную площадь пола и размер дверей. В настоящее время данные лифты называются «Пассажирскими».

- *Грузовые платформы.* Для транспортировки грузов, материалов и оборудования.

- *Грузовые с проводником.* Для транспортировки грузов и сопровождающих их лиц.

- *Грузовые без проводника.* Для транспортировки только грузов. Оборудуются наружным управлением, перемещение людей в этих лифтах не допускается.

- *Грузовые малые.* Используются как правило в ресторанах и кафе (для подъема продуктов питания), библиотеках, складах и т. д. Грузоподъемность, как правило, от 5 до 300 кг. Подъем людей на них категорически запрещён.

- *Промышленные.* Для установки в зданиях с запылённой, содержащей агрессивные газы, взрыво- и пожароопасной окружающей средой и для опасных производств.

Такое деление заложено во всех документах, относящихся к лифтам: в «Правилах устройства и безопасной эксплуатации лифтов» Госгортехнадзора, ОСТах и ГОСТах, технических условиях и т. п. Кроме вышеука-

занных основных групп существуют более мелкие деления лифтов по частным признакам. Так, например, пассажирские лифты делятся на лифты общего пользования, индивидуальные, предназначенные для перемещения ограниченного круга людей, пожарные, находящиеся в распоряжении пожарной охраны здания, служебно-хозяйственные, служащие для перевозки грузов и служебного персонала, и др.

Среди грузовых лифтов различают вокзальные, автомобильные, лифты на бойнях, театральные для декораций и др. Малые грузовые лифты по месту установки часто называют буфетными, кухонными, магазинными, библиотечными и пр.

Пассажиры помещаются в кабине, закрытой со всех сторон и имеющей двери для входа и выхода.

Кабина движется по направляющим в шахте, огражденной со всех сторон и по всей высоте проволочной сеткой или стенками из других материалов. Шахта снабжается дверями на всех площадках, где должна производиться посадка или высадка пассажиров.

Грузовые лифты мало отличаются от пассажирских лифтов. В них грузы также перевозятся в кабинах, движущихся по направляющим. Кабины движутся, как и в пассажирских лифтах, также в закрытом со всех сторон пространстве – шахте, снабженной на площадках дверями, обязательно закрытыми при отсутствии кабины.

В зависимости от типа привода различают лифты:

- *С электрическим приводом:*
  1. с барабанными лебёдками, которые имеют жёсткого соединения кабины и противовеса с барабаном.
  2. лебёдки с канатоведущим шкивом, которые не имеют жёсткого соединения кабины и противовеса с канатоведущим шкивом.
- *С гидравлическим приводом.*
- *С пневматическим приводом.*

Объектом изучения в настоящем пособии являются электрические приводы лифтов.

### **2.13.2. Устройство и конструкция лифта.**

В устройство лифта с электрическим приводом входят следующие основные элементы и устройства:

1. Средства подвески кабины и противовеса;
2. Лебёдка;

3. Кабина;
4. Противовес;
5. Шахта лифта;
6. Ловитель;
7. Буфера;
8. Электрические устройства;
9. Станция управления лифтом.

*Средства подвески* кабины и противовеса представляют собой стальные проволочные канаты. Сегодня также применяются плоские канаты, которые позволяют снизить уровень шумов при работе лифта.

В электрическом лифте с канатной подвеской кабина движется посредством тяговых канатов, которые расположены на канатоведущем шкиве (КВШ), приводимом в движение электродвигателем. Электропривод может быть расположен в верхней части шахты или в машинном помещении. Для балансировки движения кабины внутри шахты имеется противовес.

*Лебёдка* является силовой установкой. По конструкции привода различают лебёдки с редукторным и безредукторным приводом. Лебёдки с редукторным приводом применяют на лифтах с небольшими скоростями, безредукторные лебёдки применяют, наоборот, на лифтах с большими скоростями. В безредукторном приводе канатоведущий шкив закреплен непосредственно на валу электрического двигателя.

*Кабина* – это часть лифта, предназначенная для перевозки пассажиров и/или других грузов, представлена на рис. 2.38. Кабина состоит из пола (1), стенок (2), двери (3) (или дверей) и потолка (4). Конструкция пола состоит из пояса, изготовленного из металлического профиля, на котором укреплен стальной лист. Стенки кабины изготовлены из окрашенных стальных листов либо из нержавеющей стали. Возможна отделка стен ламинированным пластиком. Крыша кабины представляет собой стальной лист, способный выдержать вес обслуживающего электромеханика. Двери кабины изготовлены из того же материала, что и кабина, приводятся в движение автоматическим оператором. Двери движутся в горизонтальной плоскости и могут быть центрального или бокового (телескопического) открывания. Двери, как правило, состоят из двух - четырех панелей.



Рис. 2.38. Кабина лифта

*Противовес* предназначен для балансировки движения кабины внутри шахты и уравнивает силу тяжести массы кабины и часть массы номинального груза.

*Шахта лифта* полностью или частично огороженное место, простирающееся от пола приемки до перекрытия рис. 2.39. *Шахта* предназначена для размещения направляющих, по которым движутся кабина и противовес, этажной аппаратуры и аппаратуры обеспечения безопасности. С наружной стороны шахты (на этажных площадках) размещена аппаратура «вызова», шахтные двери по всей высоте.

Двери шахты открываются автоматически с помощью привода.

В нижней части шахты (в приемке) расположены гидравлические буферы кабины и противовеса и натяжные устройства уравнивающих канатов и ограничителя скорости. Кабина и противовес подвешены на 8 тяговых канатах.

Таким образом, внутри шахты находятся противовес (1), кабина (2) и детали, соединенные с ними: каркас шахты (3), направляющие (4), буферы, электропривод (5).

Шахта делится на следующие части:

- **прямом** - часть шахты расположенная ниже уровня крайнего нижнего этажа из обслуживаемых кабиной;
- **верхний этаж** - часть шахты, расположенная выше крайнего верхнего этажа из обслуживаемых кабиной;
- **ствол шахты** - часть шахты соответствующая пути кабины между двумя крайними остановками.



*Рис. 2.39. Шахта лифта (вид сверху)*

**Ловитель** – механическое устройство для остановки и удержания кабины или противовеса на направляющих в случае обрыва, ослабления натяжения канатов подвески или если скорость опускающейся кабины (противовеса) превышает номинальную скорость на заранее установленную величину. Тормозное действие ловителя инициируется ограничителем скорости, обычно расположенным в машинном помещении.

**Буфера.** Устройства плавного замедления кабины за пределами нижнего расчётного положения кабины или противовеса. Могут быть полиуретановыми, пружинного или масляного типа, в зависимости от номинальной скорости. Предназначены для накопления или рассеивания кинетической энергии кабины или противовеса.

**Электрические устройства.** Включают электрические устройства безопасности и освещения.



*Станция управления лифтом (контроллер) – это сердце лифта, то его мозг. Лифты производства "Могилёвлифтмаш" стандартно комплектуются микропроцессорной станцией управления серии УЛ (рис. 2.40). Она используется для управления пассажирскими, грузовыми и больничными лифтами со скоростью движения кабины до 1,6 м/с с одиночным и групповым (в том числе парным) управлением. Достоинствами данной системы являются: - простота монтажа и ремонта; - уменьшенное количество проводов; - глубокая дистанционная система самодиагностики; - помехоустойчивый, последовательный интерфейс связи с кабиной (CAN).*



*Рис. 2.40. Микропроцессорная станция управления серии УЛ*

Для лифтов используют электропривода переменного тока с односкоростными и двухскоростными короткозамкнутыми асинхронными двигателями, двигатели постоянного тока с управляемыми тиристорными преобразователями и в современных лифтах компактные синхронные безредукторные электродвигатели ZETATOR. Такой электродвигатель имеет постоянный магнит и внутренний ротор, что обеспечивает выполнение всех требований, предъявляемых к приводам современных лифтов, а именно: простой монтаж, хорошая управляемость, очень низкий уровень шума, высокая комфортность перемещения, компактные размеры. Электропривод лифта с электродвигателем ZETATOR представлен на рис 2.41.

Здесь электродвигатель (1) установлен на тавровой балке (5).

1

Максимальная безопасность пользования лифтом обеспечивает встроенным в электродвигатель или пристроенным тормозом (2) Тормоз предназначен только для статических применений. Динамическое торможение ограничивается только аварийным торможением и торможением при испытаниях. При статическом применении тормоз не изнашивается. Следовательно, такой тормоз практически не требует никакого обслуживания. Тормоз выключается электрически с помощью аккумулятора или источника питания напряжением 24 В. Ток в цепи тормоза равен около 5 А.



Рис. 2.41. Электропривод лифта с электродвигателем ZETATOR

### 2.13.3. Схемы управления лифтовыми установками

Схемы управления лифтовыми установками содержат определенный набор устройств или блоков, каждый из которых предназначен для выполнения определенных функций.

Схема управления лифтом (подъемником) включает в свой состав следующие основные узлы:

- контроля положения кабины в шахте;
- автоматического выбора направления движения;
- торможения;
- точной остановки;
- автоматического открывания и закрывания дверей;

- защиты.

Командные сигналы, задающие программу движения кабины, разделяются на два типа: команды (приказы), поступающие из кабины и команды (вызовы), поступающие с этажных площадок. В зависимости от реакции на команды и способа их отработки различаются схемы отдельного и сборного управления. При отдельном принципе управления схема воспринимает и обрабатывает только одну команду и во время ее выполнения не реагирует на другие приказы и вызовы. Такая схема наиболее проста в реализации, но ограничивает производительность лифта и поэтому применяется только для лифтов жилых домов высотой до девяти этажей.

В общем случае структурную схему лифтовой установки можно представить в виде, показанном на рис. 2.42. В соответствии с этой схемой лифтовая установка работает следующим образом.



Рис. 2.42. Структурная схема лифтовой установки

Команда на начало движения лифта подается с помощью кнопочного устройства приказов и вызовов в узел, который осуществляет запоминание и последующее снятие соответствующих команд после их выполнения. Одним из наиболее сложных и ответственных узлов схемы управления лифтовой установкой является позиционно-согласующее устройство (ПСУ), которое служит для определения положения кабины в шахте и выдачи сигналов для движения кабины в нужном направлении и ее остановки. Конструктивно ПСУ выполняют в виде набора электромеханических переключателей, размещаемых в шахте или смонтированных в специальных приборах — копировальном аппарате или селекторе, которые находятся в машинном помещении и связаны с кабиной механической или электрической связью.

Сигналами с выхода ПСУ осуществляется управление электроприводом подъемной лебедки и механическим тормозом с электромагнитным приводом. Узел точной остановки осуществляет перевод кабины на пониженную скорость или введение в систему ЭП контура регулирования положения. После остановки кабины автоматически включается ЭП дверей кабины и шахты. В лифтах с ручным управлением дверей этот узел отсутствует.

Узел защиты и блокировки обеспечивает безопасность работы лифта. Этот узел исключает возможность движения кабины при открытых или незаблокированных замками дверях и открывания дверей шахты при отсутствии кабины на данном этаже, осуществляет остановку кабины при обрыве канатов, превышении допустимой скорости, нажатии аварийной кнопки «Стоп» и срабатывании защиты.

Схема управления лифта включает также устройства сигнализации и освещения кабины. Вызывная сигнализация предназначена для извещения пассажиров о занятости кабины, направлении ее движения, принятии вызова, а также для извещения обслуживающего персонала о состоянии схемы вызывных устройств.

Позиционная световая сигнализация предназначена для извещения пассажиров и обслуживающего персонала о местонахождении кабины в данный момент.

#### **2.13.4. Требования к электроприводу лифта.**

Основными требованиями, которым должен удовлетворять электропривод лифтов, является возможность реверсирования; точная остановка кабины против заданного уровня; обеспечение минимального уровня переходных процессов при строго ограниченных максимальных значениях ускорения и рывка.

Предъявляемые к электроприводу лифтов требования можно представить в следующем виде:

- надежность в работе, обеспечение безопасности при пользовании лифтовой установкой;
- малощумность (для лифтов используют специальные электродвигатели, обеспечивающие пониженный уровень шума);
- удобство и простота в эксплуатации и обслуживании;

- ограничение ускорений кабины (по условиям комфортности для пассажирских лифтов и отсутствия проскальзывания каната относительно канатоповедущего шкива для грузовых лифтов);
- обеспечение плавных переходных процессов пуска и торможения при широких пределах изменения момента сопротивления;
- наличие ревизионной пониженной скорости  $v_{рев} < 0,36$  м/с для лифтов с основной рейсовой скоростью более 0,71 м/с;
- обеспечение точности остановки кабины относительно уровня этажной площадки (10—20 мм для скоростных и больничных лифтов, 35—50 мм для остальных лифтов). Для лифтов с номинальной скоростью кабины не выше 1,4 м/с указанные ревизионная скорость и точность остановки реализуются путем создания механической характеристики ЭП лифта при пониженной скорости;
- оборудование лифтовой лебедки автоматически действующим тормозом нормально замкнутого типа.

По рабочей скорости движения пассажирские лифты подразделены на четыре категории (таблица 2.10).

Таблица 2.10

*Категории лифтов по скорости*

Категория лифтов	Скорость движения кабины, м/с
Тихоходные	$\leq 0.5$
Быстроходные	$\leq 1.0$
Скоростные	$\leq 2.5$
Высокоскоростные	$> 2.5$

Согласно правила эксплуатации лифтов электроприводы должны обеспечивать:

- верхний предел скорости движения кабин пассажирских лифтов, равный 5 м/с.
- для грузовых лифтов жилых и административных зданий чаще всего скорость движения кабины составляет 0.1 - 0.5 м/с.
- помимо основной скорости движения кабины должна быть предусмотрена ревизионная скорость  $V \leq 0.36$  м/с, необходимая для контрольного обследования шахты.

В лифтовых установках при движении допускается относительный перепад скорости двигателя не более 5%.

Так как пассажирские лифты устанавливаются в жилых, общественных и административных зданий, то на работу их оборудования накладывается ограничение по уровню допустимого шума, который должен быть не более 50 дБ.

Выражение, определяющее производительность лифта имеет вид

$$\Pi = \frac{3600 \cdot \gamma \cdot E}{\frac{2 \cdot H}{V} + \Sigma t}, \quad (2.40)$$

где:  $\Pi$  – производительность лифта, т.е. число перевезенных пассажиров в час;  $E$  – номинальная расчетная емкость кабины (грузоподъемность), число человек;  $H$  – высота подъема, м;  $V$  – скорость движения кабины, м/с;  $\Sigma t$  – время, затрачиваемое на всех остановках на открывание и закрывание дверей, вход и выход пассажиров, ускорение и замедление кабины, с;  $\gamma$  – коэффициент загрузки кабины, которая зависит от интенсивности потока пассажиров и равен примерно 0.6 - 0.8.

Практический ряд скоростей движения лифтов составляет: 0.71, 1.0, 1.4, 2.0 и 4.0 м/с, ряд грузоподъемности 320, 500 и 1000 кг.

Для лифтов очень важным является вопрос о допустимых значениях ускорения и замедления и их производных. Максимальное значение ускорения и замедления движения кабины при нормальных режимах работы не должны превышать для всех лифтов, кроме больничного,  $2 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}$ , для боль-

ничного  $1 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}$ . Максимальное замедление при остановке кнопкой «СТОП»

не должно превышать  $3 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}$ . Производная ускорения, рывок, не подлежит строгому нормированию. Для скоростных лифтов он обычно составляет  $(3.0 \div 10) \frac{\text{М}}{\text{с}^3}$ . Ограничение ускорение и рывка определяется нормальным самочувствием пассажиров, но целесообразно и в целях снижения динамических усилий на несущие канаты и кабину лифта.

Отмеченные условия ограничения ускорения и рывка позволяют выявить закон изменения скорости кабины в переходных процессах. Обычно принято считать «оптимальным» такой график движения, при котором значения рывка и ускорения на определенных интервалах переходного процесса поддерживаются постоянными и равными предельно допустимым значениям (рис. 2.43).

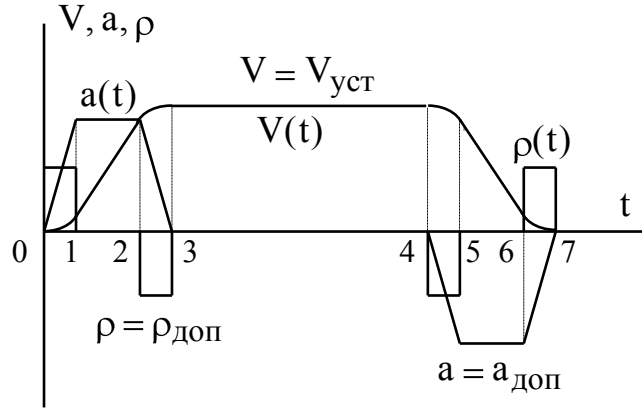


Рис. 2.43. Оптимальные зависимости  $v(t)$ ,  $a(t)$ ,  $\rho(t)$  при пуске и торможении электропривода лифта

Работа по интервалам:

1. Интервал 0 – 1. Постоянство рывка  $\rho = \rho_{\text{доп}} = \text{const}$ . При этом ускорение изменяется по линейному закону  $a = \rho_{\text{доп}} \cdot t$ , а скорость по параболе  $V = \frac{\rho_{\text{доп}} \cdot t^2}{2}$ . Длительность этого интервала определяется из условия  $t_{\text{пуск(0-1)}} = \frac{a_{\text{доп}}}{\rho_{\text{доп}}}$ .

2. Интервал 1 – 2. Постоянство ускорения  $a = a_{\text{доп}} = \text{const}$ . При этом  $\rho = 0$ , а скорость изменяется по линейному закону  $V = V_1 + a_{\text{доп}} \cdot t$ . Длительность второго интервала  $t_{\text{пуск(1-2)}} = \frac{V_{\text{уст}}}{a_{\text{доп}}} - \frac{a_{\text{доп}}}{\rho_{\text{доп}}}$ .

3. Интервал 2 – 3. Ускорение снижается по линейному закону  $a = a_{\text{доп}} - \rho_{\text{доп}} \cdot t$ , чему соответствует постоянный по величине и отрицательный по знаку рывок  $\rho = -\rho_{\text{доп}} = \text{const}$ . Длительность этого интервала  $t_{\text{пуск(2-3)}} = t_{\text{пуск(0-1)}}$ . Скорость на этом интервале изменяется по закону  $V = V_{\text{уст}} - \frac{a_{\text{доп}}^2}{2 \cdot \rho_{\text{доп}}} + a_{\text{доп}} \cdot t - \frac{\rho_{\text{доп}} \cdot t^2}{2}$ . В конце этого интервала  $V = V_{\text{уст}}$ .

4. Интервал 4 – 5.  $\rho = -\rho_{\text{доп}}$ ;  $a = -\rho_{\text{доп}} \cdot t$ ;  $V = V_{\text{уст}} - \frac{\rho_{\text{доп}} \cdot t^2}{2}$ ;

$t_{\text{торм.(4-5)}} = t_{\text{пуск(0-1)}}$ .

$$5. \text{ Интервал } 5 - 6. \quad \rho = 0; \quad a = -a_{\text{доп}}; \quad V = V_{\text{уст}} - \frac{a_{\text{доп}}^2}{2 \cdot \rho_{\text{доп}}} - a_{\text{доп}} \cdot t;$$

$$t_{\text{торм.}(5-6)} = t_{\text{пуск}(1-2)}.$$

$$6. \text{ Интервал } 6 - 7. \quad \rho = \rho_{\text{доп}}; \quad a = -a_{\text{доп}} + \rho_{\text{доп}} \cdot t; \quad V = \frac{a_{\text{доп}}^2}{2 \cdot \rho_{\text{доп}}} - a_{\text{доп}} \cdot t;$$

$$t_{\text{торм.}(6-7)} = t_{\text{пуск}(2-3)}.$$

В процессе создания электрооборудования лифтов конструкторы стремились использовать наиболее простой электропривод. Таким без сомнения является асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Однако АД с КЗ по техническим показателям могут быть использованы только на тихоходных подъемных установках, ибо они не удовлетворяют требованиям точности остановки и благоприятного протекания переходных процессов. Для получения улучшенных показателей точной остановки на быстроходных лифтах применяются асинхронные двухскоростные двигатели. В тихоходных и грузовых лифтах для точной остановки специальные меры не применяются, а в быстроходных используется переход на пониженную скорость. Асинхронные двигатели с фазным ротором применяются на тихоходных и в редких случаях – быстроходных лифтах при ограниченной мощности сети, питающей двигатель подъемной установки. Необходимо отметить, что двигатели с фазным ротором допускают большую частоту включений, чем двигатель с короткозамкнутым ротором. Для последних этот вопрос настолько важен, что именно по этой причине в некоторых случаях ограничивается их применение на лифтах.

Самым распространенным электроприводом для скоростных и высокоскоростных лифтов является система генератор - двигатель. В качестве источников питания обмотки возбуждения генератора используются усилители различных типов. Система является дорогой и сложной в наладке и эксплуатации. Однако при ее использовании удается получить близкий к оптимальному закон изменения скорости во время пуска и торможения, а также обеспечивается точность остановки в пределах технических требований. Все более широкое применение получают на лифтах системы ТП - Д, который позволяют почти точно реализовать закон оптимального разгона и торможения.

В таблице 8 приведены типовые системы электроприводов лифтов.

Таблица 8



### Типовые системы электроприводов

Электропривод	Диапазон регулирования скорости	Тип лифта
АД с КЗ	1 : 1	Тихоходный
АД с ФР	1 : 1	Тихоходный
ЭП по системе Г-Д редукторный или безредукторный	10 : 1 и выше	Скоростной, высокоскоростной
ЭП по системе ТП-Д редукторный или безредукторный	10 : 1 и выше	Скоростной, высокоскоростной

#### 2.13.5. Выбор электродвигателя лифта.

Современные пассажирские и грузовые лифты, а также некоторые шахтные подъемные машины выполняются с противовесом, или, как его называют контргрузом. В шахтных машинах уравнивание чаще производится не противовесом, а вторым подъемным сосудом.

Предварительный выбор электродвигателя лифта осуществляется по максимальной требуемой мощности  $P_{тр.мах}$  вала. Величину этой мощности определяют по моменту сопротивления механизма  $M_c$ , приведенного к валу двигателя. Электродвигатель привода лифта работает в двигательном и генераторном режимах. При этом учитывают заданные максимальные значения скорости и ускорения выходного вала привода, которые необходимы для получения желаемых механических характеристик для механизмов подъема лифтов.

Противовес для подъемников выбирается с таким расчетом, чтобы он уравнивал вес подъемного сосуда (кабины) и часть номинального поднимаемого груза.

$$G_{пр} = G_0 + \alpha \cdot G_H, \quad (2.41)$$

где:  $G_H$  - вес номинального поднимаемого груза, Н;  $G_0$  - вес кабины, Н;  $G_{пр}$  - вес противовеса, Н;  $\alpha$  - коэффициент уравнивания, обычно принимается равным 0.4 - 0.6.

Необходимость уравнивания тяжелых подъемных сосудов является очевидной, так как для их перемещения при отсутствии контргруза необходимо соответствующее увеличение мощности двигателя.

Наличие противовеса приводит к выравниванию графика нагрузки двигателя, что снижает его нагрев в процессе работы (рис.2.44).

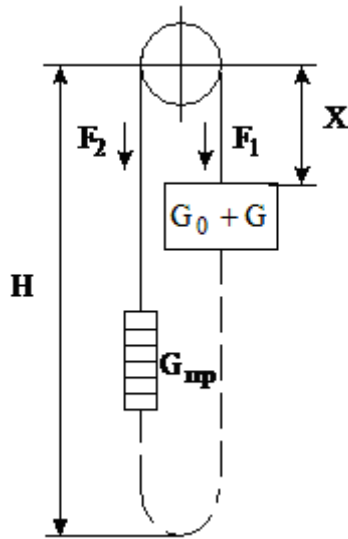


Рис. 2.44. Расчетная схема подъемного устройства лифта

Если обратиться к схеме (рис. 2.44), то при значении веса противовеса  $G_{\text{пр}} = G_0 + \alpha \cdot G_{\text{н}}$ , отсутствии уравновешивающего каната и трения кабины и противовеса о направляющие, можно записать:

$$F_1 = G_0 + G + g_{\text{к}} \cdot X; \quad (2.42)$$

$$F_2 = G_{\text{пр}} + g_{\text{к}} \cdot (H - X), \quad (2.43)$$

где  $g_{\text{к}}$  – вес 1 м каната, Н/м.

Усилие на канатопроводящем шкиве равно

$$F = F_1 - F_2 = G - \alpha \cdot G_{\text{н}} + g_{\text{к}} \cdot (2 \cdot X - H). \quad (2.44)$$

Момент и мощность на валу двигателя определяется на основании выражений:

$$\begin{cases} M_1 = \frac{F}{i \cdot \eta} \cdot \frac{D_{\text{ш}}}{2}; & P_1 = \frac{F \cdot V}{\eta} \cdot 10^{-3}; \\ M_2 = \frac{F}{i} \cdot \frac{D_{\text{ш}}}{2} \cdot \eta; & P_2 = F \cdot V \cdot \eta \cdot 10^{-3}, \end{cases} \quad (2.45)$$

где  $M_1, P_1$  – момент и мощность при работе привода в двигательном режиме, соответственно Нм и кВт;  $M_2, P_2$  – момент и мощность при работе привода в генераторном режиме, соответственно Нм и кВт;  $i$  – передаточное число редуктора подъемной лебедки;  $\eta$  – КПД редуктора;  $D_{\text{ш}}$  – диаметр канатопроводящего шкива, м;  $V$  – скорость движения, м/с.

Результирующее усилие  $F$  представляется в виде алгебраической суммы активного усилия  $F_{гр}$  и реактивного, обусловленного трением усилия  $F_{тр}$ . Эти составляющие определяют соответственно активную  $M_{гр}$  и реактивную  $M_{тр}$  составляющую приведенного к валу двигателя статического момента  $M_{ст}$

$$M_{ст} = M_{гр} + M_{тр} = \frac{[G + g_k \cdot (2 \cdot X - H) - \alpha \cdot G_H] \cdot D_{ш}}{2 \cdot i} + M_{тр}. \quad (2.46)$$

Из приведенного соотношения следует, что статический момент зависит от загрузки кабины и от коэффициента уравнивания  $\alpha$ . Кроме того, при большой высоте подъема  $H$  на статический момент может оказывать существенное влияние вес ветвей каната.

Если высота каната невелика, составляющая  $g_k \cdot (2 \cdot X - H) \approx 0$ , тогда при подъеме номинального груза ( $G = G_H$ ) и пустой кабины ( $G = 0$ ) статический момент можно определить с помощью соотношений:

$$M_{ст1} = M_{гр} + M_{тр} = \frac{(1 - \alpha) \cdot G_H \cdot D_{ш}}{2 \cdot i \cdot \eta}; \quad (2.47)$$

$$M_{ст2} = -M_{гр} + M_{тр} = -\frac{\alpha \cdot G_H \cdot D_{ш}}{2 \cdot i} \cdot \eta, \quad (2.48)$$

где  $\eta$  - КПД подъемной установки с учетом потерь на трение.

Из соотношений для моментов  $M_{ст1}$ ,  $M_{ст2}$ ,  $M'_{ст1}$ ,  $M'_{ст2}$  видно, что при  $\alpha = 0.5$  максимальные и минимальные нагрузки как по значению, так и по характеру одинаковы при любом направлении движения (рис. 2.45).

Мощность выбранного электродвигателя должна быть равна или несколько больше рассчитанной требуемой мощности:  $P_{ном} \geq P_t$ , которая равна наибольшей мощности и моменту, рассчитанных по выражению (2.45)

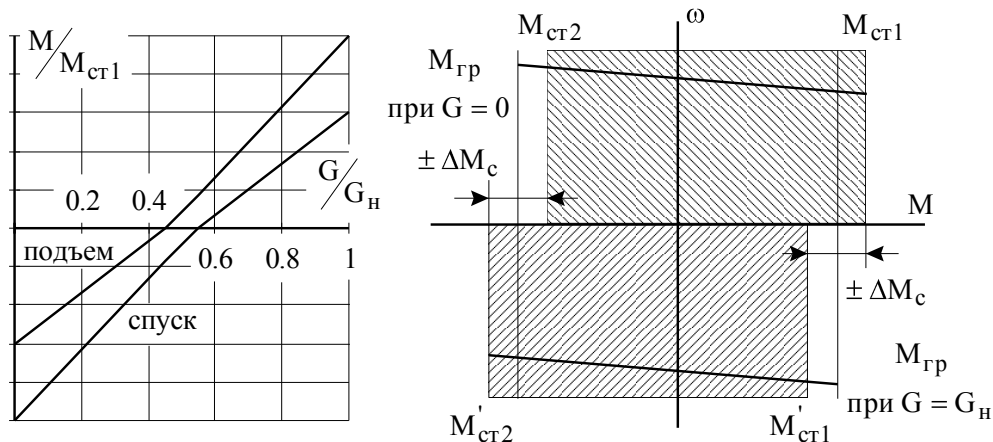


Рис. 2.45. Область изменения моментов сопротивлений при транспортировке грузов в лифтовом подъемнике

### 2.13.6. Точная остановка подъемных машин

Для выполнения предъявляемых к электроприводу лифтов требований необходимо, чтобы электропривод имел желаемые механические характеристики, и желаемые зависимости от времени скорости  $v$ , ускорения  $a$  и рывка  $\rho$  кабины лифта. Для этого электроприводы подъемников лифтов должны обеспечивать подъем и спуск грузов с номинальной скоростью и обладать так называемой «ревизионной скоростью» для обеспечения точности остановки подъемных кабин около заданного уровня. Желаемые механические характеристики для механизмов подъема лифтов представлены на рис. 2.46.

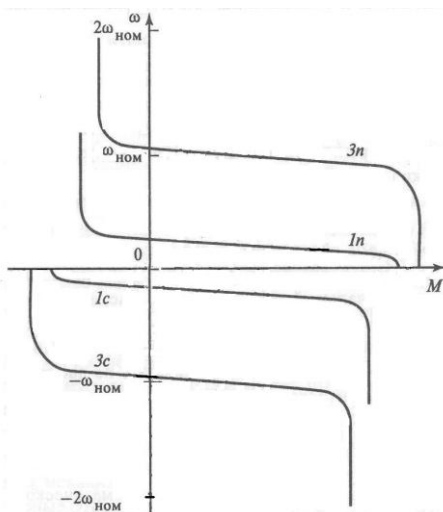


Рис. 2.46. Желаемые механические характеристики для механизма подъема лифтов

Характеристики  $3n$  и  $3c$  используются для подъема и спуска грузов с номинальной скоростью. Характеристики  $1n$  и  $1c$  используются для получения так называемой «ревизионной скорости» и обеспечения точной остановки около заданного уровня.

Вертикальные участки характеристик указывают на ограничения моментов и ускорений при пуске и торможении механизма. Для подъема и спуска грузов в подъемниках лифтов формируются одинаковые характеристики, что объясняется примерно одинаковыми значениями моментов сопротивления при подъеме и спуске грузов

Правилами Гостехнадзора в зависимости от типа лифта устанавливается *предельная скорость*  $v_{пр}$ , которая колеблется в пределах от 1,15 до 1,4 номинальной скорости лифта  $v_{ном}$ .

Кроме этого очень важным вопросом при проектировании подъемных установок, является точная остановка подъемника против заданного уровня. Кабина лифта или клеть шахтного подъемника после торможения должна останавливаться против уровня загрузки с заданной степенью точности. Недостаточная точность остановки ухудшает эксплуатационные качества подъемных машин, снижает безопасность пользования ими и их производительность.

Некоторые системы лифтов допускают подход кабины к остановке с пониженной скоростью, обеспечивающей более точную остановку кабины на уровне площадок этажей. Эта скорость в несколько раз меньше номинальной и называется остановочной скоростью.

Пониженная скорость движения кабины лифта нужна так же для ревизионных осмотров шахты и приборов, установленных в ней, для осмотра канатов и направляющих, производимых эксплуатационным персоналом или инспекцией. В этом случае пониженная скорость называется ревизионной. Ревизионная скорость по правилам Госгортехнадзора должна быть не более 0,25 м/сек.

При автоматизации подъемной установки управление всеми элементами рабочего процесса и, в частности, процессом остановки полностью возлагается на электропривод. В связи с этим к нему предъявляются жесткие требования в отношении точной остановки, которые в ряде случаев оказывают решающее влияние на выбор системы электропривода.

Рассмотрим в качестве примера остановку кабины лифта (рис. 2.47). При подходе кабины к этажной площадке происходит переключение путевого датчика точной остановки ДТО упором  $У$  на кабине, и в схему управ-

ления электропривода поступает командный импульс. После срабатывания датчика кабина некоторое время будет продолжать следовать с постоянной скоростью  $V = V_H$ , пока не сработают аппараты, отключающие двигатель от сети, и не наложится механический тормоз. Кабина при этой скорости пройдет путь  $S'$ , определяемый выражением

$$S' = V_H \cdot \Sigma t, \text{ м}, \quad (2.49)$$

где:  $V_H$  - начальная постоянная скорость, м/с;  $\Sigma t$  - суммарное время работы аппаратов, с.

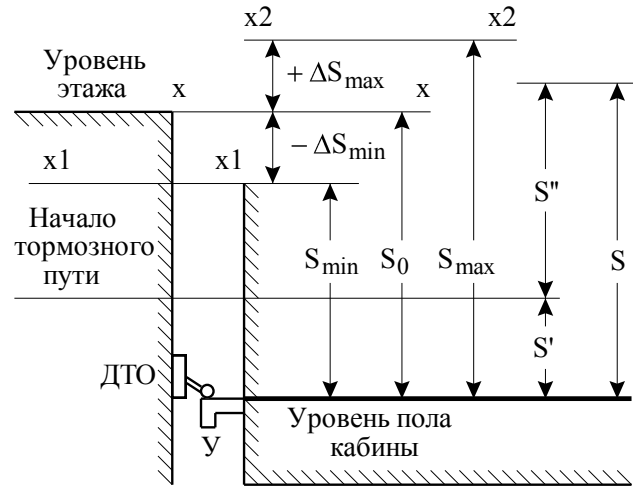


Рис. 2.47. . Процесс остановки кабины. Уровни пола кабины:  $x1 - x1$  при недоподъеме;  $x2 - x2$  при переподъеме;  $x - x$  при точной остановке

Далее начинается торможение кабины, за время которого она проходит путь  $S''$ . Кинетическая энергия, запасенная в движущихся частях лифта, расходуется на совершение работы по преодолению сил сопротивления на пути  $S''$

$$\frac{m \cdot V_H^2}{2} = (F_T + F_C) \cdot S'' \text{ или } S'' = \frac{m \cdot V_H^2}{2 \cdot (F_T + F_C)},$$

где:  $m$  – приведенная к скорости движения кабины масса всех движущихся частей подъемника, кг;  $F_C, F_T$  – статическое и тормозное усилия, приведенные к скорости движения кабины, Н.

Путь, пройденный кабиной с момента воздействия на датчик точной остановки до полной остановки равен

$$S = S' + S'' = V_H \cdot \Sigma t + \frac{m \cdot V_H^2}{2 \cdot F_{\text{дин}}}, \quad (2.50)$$

где  $F_{\text{дин}} = F_T + F_C$ , или та же величина, выраженная через  $\omega$

$$S = S' + S'' = \left( \frac{D_{\text{ш}}}{2} \right) \cdot \left[ \omega_H \cdot \Sigma t + \frac{J_{\Sigma} \cdot \omega_H^2}{2 \cdot M_{T\Sigma} \cdot i_p} \right]. \quad (2.51)$$

Величины  $\omega_H$ ,  $J_{\Sigma}$ ,  $\Sigma t$  и  $M_{T\Sigma} = M_T \pm M_C$  при работе лифта изменяются в более или менее широких пределах. Например, момент инерции  $J_{\Sigma}$  и статический момент  $M_C$  зависят от загрузки кабины, скорость  $\omega_H$  определяется жесткостью механической характеристики двигателя и значением  $M_C$ , время  $\Sigma t$  и момент тормоза  $M_T$  не остаются в процессе работы постоянными под влиянием различных случайных факторов. Поэтому путь  $S$  также меняется по величине.

Если обозначить через  $S_{\text{max}}$  и  $S_{\text{min}}$  наибольшее и наименьшее возможные значения пути  $S$ , то его среднее значение определяется по формуле

$$S_0 = \frac{S_{\text{max}} + S_{\text{min}}}{2}.$$

Датчик точной остановки ДТО устанавливается на расстоянии  $S_0$  от уровня пола этажа. Тогда максимальная неточность остановки кабины, характеризуется величиной

$$\Delta S_{\text{max}} = \frac{S_{\text{max}} - S_{\text{min}}}{2}, \quad (2.56)$$

может быть подсчитана по формуле

$$\Delta S_{\text{max}} \approx S_0' \cdot \left( \frac{\Delta \Sigma t}{\Sigma t_0} + \frac{\Delta \omega_H}{\omega_{H0}} \right) + S_0'' \cdot \left( 2 \cdot \frac{\Delta \omega}{\omega_{H0}} + \frac{\Delta M_{T\Sigma}}{M_{T\Sigma 0}} + \frac{\Delta J_{\Sigma}}{J_{\Sigma 0}} \right), \quad (2.57)$$

где:  $\Delta \omega$ ,  $\Delta \omega_H$ ,  $\Delta \Sigma t$ ,  $\Delta M_{T\Sigma}$ ,  $\Delta J_{\Sigma}$  - наибольшие возможные отклонения величин от их средних значений;  $S_0'$  и  $S_0''$  - составляющие остановочного пути для средних значений  $\omega_{H0}$ ,  $\Sigma t_0$ ,  $M_{T\Sigma 0}$ ,  $J_{\Sigma 0}$ .

Из выражения (2.57) следует, что повысить точность остановки можно в первую очередь путем снижения  $\omega_{H0}$ , а также уменьшением времени  $\Sigma t_0$  и увеличением тормозного момента  $M_{T\Sigma 0}$ . Повышение момента механиче-

ского тормоза может привести, однако, к увеличению темпа торможения кабины выше допустимого значения.

Наиболее эффективно влияет на точность остановки начальная скорость кабины при торможении. Поэтому при больших рабочих скоростях лифта необходимо заблаговременно снизить перед остановкой кабины ее скорость до значения  $V_n \leq V_{n, \text{доп}}$ , при которой неточность остановки  $\Delta S_{\text{max}}$  не будет превосходить допустимого значения  $\Delta S_{\text{доп}}$ . Следовательно, электропривод должен обеспечивать достаточный диапазон регулирования скорости и иметь достаточно жесткие характеристики во всем диапазоне. Значение  $\Delta S_{\text{доп}}$  лежит в пределах: 35 - 50 мм для пассажирских и грузовых свободно загружаемых лифтов; 10 - 15 мм для грузопассажирских и грузовых лифтов с грузами на тележках; 250 - 300 мм для скиповых шахтных подъемников.

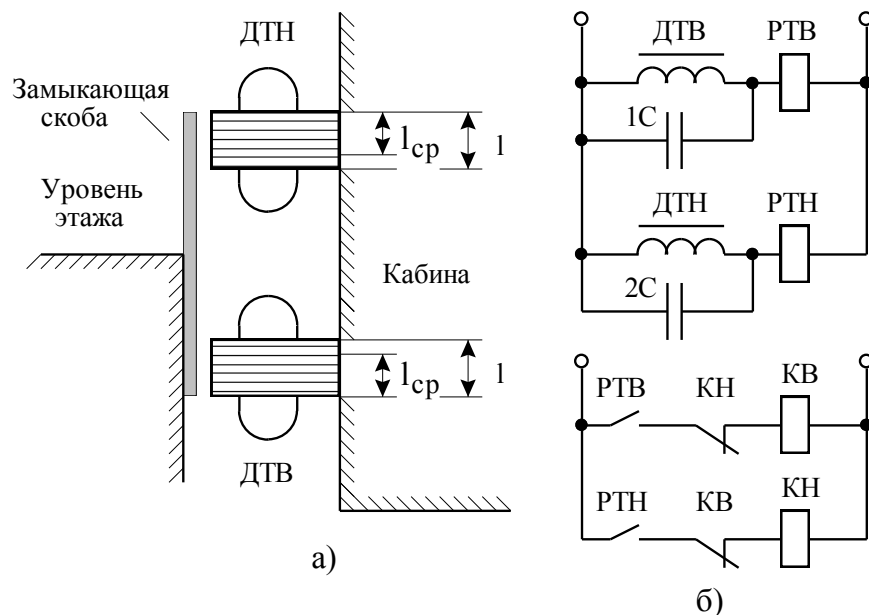
#### 2.13.7. Автоматическое регулирование положения

Повышение требований к точности остановки подъемно-транспортных механизмов привело к широкому использованию систем автоматического регулирования положения рабочего органа механизма по отклонению от уровня точной остановки. При этом процесс точной остановки происходит в два этапа:

- на первом этапе происходит замедление электропривода от рабочей скорости до пониженной
- на втором этапе рабочий орган механизма входит в зону автоматического контроля положения, и система регулирования устанавливает его в заданную позицию с требуемой точностью.

Если разгрузочно-погрузочные операции производятся без наложения механического тормоза, электропривод под действием системы регулирования положения непрерывно компенсирует возмущения, обусловленные упругостью подъемного каната, и удерживает рабочий орган в зоне остановки с требуемой точностью. Такие устройства в настоящее время используются для повышения точности остановки и в тех случаях, когда после выравнивания должен накладываться механический тормоз. Схема расстановки датчиков контроля положения приведена на рис. 2.48, а.





2.48.. Расстановка датчиков (а) и узлы релейной схемы выравнивания (б)

Индуктивные датчики ДТВ и ДТН, расположенные на кабине подъемника, у уровня точной остановки замыкаются скобой ЗС. При этом сигналы на выходе ДТВ и ДТН имеют наименьшее значение и равны друг другу. При опускании кабины вниз на расстояние  $l$  магнитопровод датчика ДТВ размыкается и на его выходе сигнал максимален.

При подъеме на расстояние  $l$  соответственно максимален сигнал на выходе датчика ДТН.

Датчики ДТВ и ДТН могут быть использованы для управления релейной системой контроля положения либо включены в непрерывную схему контроля положения, дающую зависящий от положения кабины сигнал  $U_{п.к.} = f(\Delta S)$ , воздействующий на систему автоматического регулирования положения по отклонению на уровне точной остановки.

В релейной системе (рис. 2.48, б) на выход датчика ДТВ и ДТН подключается реле РТВ и РТН, которые в режиме выравнивания непосредственно управляют реверсивными контактами КВ и КН. Если кабина находится ниже уровня этажа, то включен контактор В и осуществляется подъем кабины со скоростью  $V_k$  до точки, в которой напряжение на выходе датчика ДТВ, уменьшаясь, станет равным напряжению отпадания реле РТВ. Реле РТВ отпадает и отключает контактор КВ, накладывается механический тормоз.

В процессе торможения кабина может достигнуть точки выше уровня этажа, в которой напряжение на выходе датчика ДТН, увеличиваясь, ста-

новится равным напряжению срабатывания реле РТН. Реле РТН, срабатывая, включает контактор КН, и после остановки происходит пуск привода в противоположном направлении. Двигаясь вниз, кабина проходит положение, в котором отпадает реле РТН и контактор КН. Далее процесс выравнивания протекает аналогично изложенному выше до тех пор, пока начальная скорость в момент отключения КВ (КН) не станет достаточно малой. При этом кабина остановится, не дойдя до точки срабатывания реле РТН (РТВ), и процесс выравнивания заканчивается. Расстояние между точками срабатывания реле РТВ и РТН  $2 \cdot l_{\text{ср}}$  должно быть связано с допустимой неточностью остановки соотношением  $2 \cdot l_{\text{ср}} = 2 \cdot \Delta S_{\text{доп}}$ .

Таким образом, процесс выравнивания сопровождается затухающими колебаниями, а при определенных условиях за счет влияния времени срабатывания аппаратуры может быть и неустойчивым. Удовлетворительное затухание колебаний обеспечивается выбором такой средней начальной скорости, при которой за время торможения скорость успевает снизиться до конечной скорости равной 0.2 - 0.3 начальной.

Вариант схемы, позволяющий получить на выходе непрерывный сигнал  $U_{\text{п.к.}} = f(\Delta S)$ , представлен на рисунке 2.49.

В этой схеме напряжение  $U_{\text{п.к.}} = U_{d1} - U_{d2}$ , где  $U_{d1}$  и  $U_{d2}$  - напряжение на выходе выпрямителей В1 и В2, соответственно зависящие от индуктивного сопротивления датчиков ДТВ и ДТН. Характеристики схемы приведены на рис. 2.50.

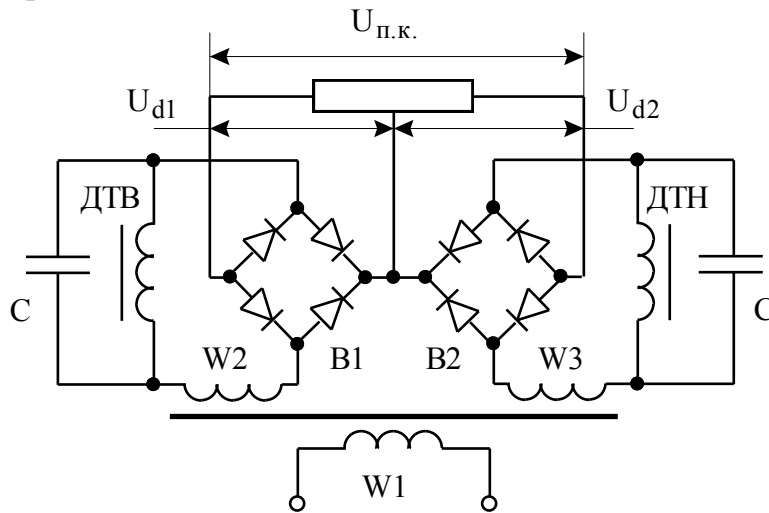


Рис. 2.49. Схема непрерывного контроля положения

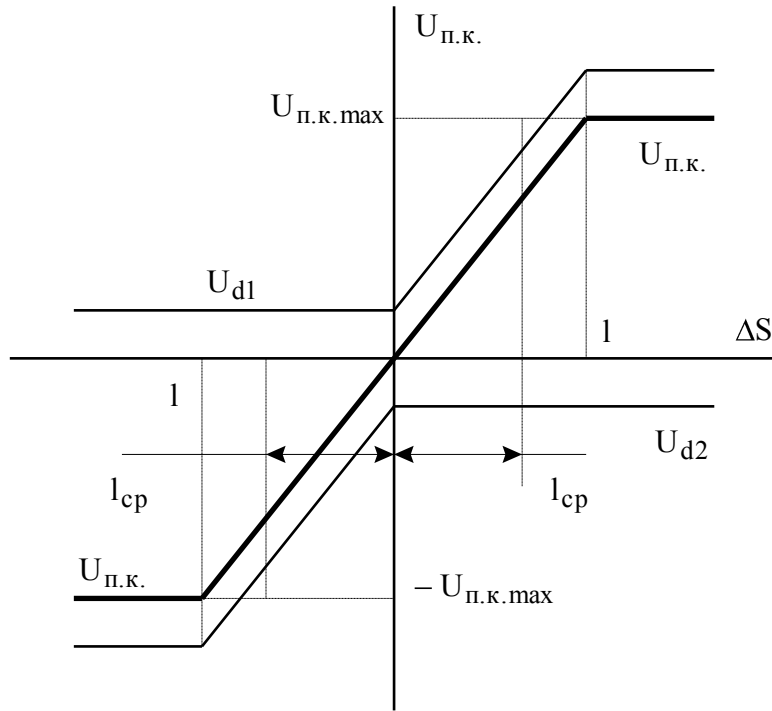


Рис. 2.50. Характеристики схемы непрерывного контроля

В системе непрерывного действия теоретически можно получить любую требуемую точность остановки. Если обозначить статический коэффициент усиления системы выравнивания  $k_{в.ст} = \frac{M}{U_{п.к.}}$ , а максимальный сигнал на выходе системы контроля положения  $U_{п.к. max}$ , то можно установить взаимосвязь между допустимой точностью остановки и коэффициентом усиления  $k_{в.ст}$  при заданной ширине зоны  $2 \cdot l$ , в пределах которой  $U_{п.к.}$  изменяется от  $+U_{п.к. max}$  до  $-U_{п.к. max}$ , полагая  $\Delta S_{доп} < l$

$$k_{в.ст} = \frac{M_{ст. max} \cdot l}{U_{п.к. max} \cdot \Delta S_{доп}}. \quad (2.58)$$

В процессе выравнивания динамический момент электропривода непрерывно изменяется, возрастая от нуля до наибольшего значения и наоборот. Если принять среднее ускорение при замедлении и разгоне в зоне выравнивания равным  $0.2 \div 0.3 \cdot a_{доп}$ , то из условия ограничения колебаний можно получить ориентировочно соотношение для определения средней остановочной скорости

$$V_{\text{ср.ост}} < (0.9 \div 1.1) \cdot \sqrt{a_{\text{доп}} \cdot l}.$$

Например, если для лифта рабочая скорость  $V_p = 3.5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ,  $l = 0.02 \text{ м}$ ,

$a_{\text{доп}} = 2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ , то требуемая остановочная скорость должна выбираться из

условия  $V_{\text{ср.ост}} = (0.15 \div 0.2) \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

### 3.7. Системы электроприводов лифта.

Основные задачи, которые возникают при проектировании и исполнении схем управления лифтами, сводятся к тому, что эти схемы должны быть простыми в монтаже и эксплуатации, дешевыми, надежными в работе; они должны четко отрабатывать все вызовы и приказы; аппараты и машины не должны создавать радиопомех и по возможности быть бесшумными. Кроме того, для нормальной работы лифта очень важны вопросы техники безопасности. В первую очередь это определяется тем, что лифт является движущейся машиной с относительно сложным электрооборудованием, которым, как правило, управляют пассажиры, не имеющие соответствующей квалификации. Следовательно, их роль при пользовании лифтом должна быть сведена к элементарно простым операциям с одной-двумя кнопками.

В механическом оборудовании лифтов имеются устройства, предотвращающие развитие аварий при обрыве канатов, превышении номинальной скорости движения кабины и т.п. В указанных случаях необходимы также отключение электропривода и наложение механических тормозов, равно как и при неполадках в системе электропривода, на которые реагируют минимальная и максимальная защиты, а также защита от перегрузки. Схемы управления лифтами проектируются таким образом, что в них включается большое количество блокировочных аппаратов, предотвращающих неправильное пользование лифтом. Например, при открытых дверях кабины, шахты, надшахтных и подшахтных помещений, открытом верхнем люке кабины, ослабленных канатах и т.п. электропривод отключается. В случае повреждения оборудования и несоблюдения, основных правил пользования лифтом от соответствующих аппаратов подается импульс на отключение двигателя от сети, и тормозные колодки затормаживают привод.

Для лифтов используют электроприводы переменного тока с односкоростными и двухскоростными короткозамкнутыми АД и электроприводы постоянного тока с управляемыми тиристорными преобразователями (ТП)

Для лифтов со скоростью движения до 0,5 м/с применяется простейшая схема ЭП с короткозамкнутым АД (рис. 2.51). Ограничение ускорений в этом случае производится путем преднамеренного увеличения момента инерции ЭП лифтовой лебедки за счет применения специальных лифтовых двигателей с повышенным моментом инерции и дополнительных маховиков, устанавливаемых на валу двигателя.

При скорости кабины выше 0,5 м/с необходимо иметь дополнительную механическую характеристику, обеспечивающую возможность работы двигателя на пониженной скорости. Эта характеристика нужна для движения кабины с ревизионной скоростью и обеспечения требуемой точности остановки.

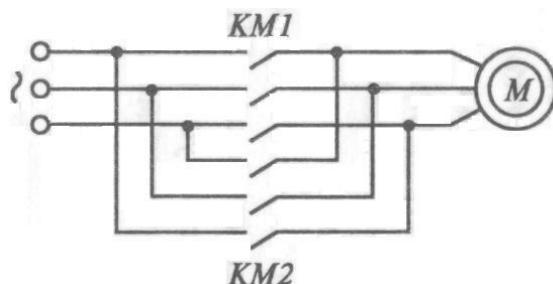


Рис. 2.51. Схема силовой части электропривода с короткозамкнутым асинхронным двигателем

Скорость в этом электроприводе не регулируется. Ограничение ускорений параметрическое. Торможение при замедлении механическое. *KM1*, *KM2* – реверсивные контакторы. Механические характеристики этого электропривода представлены на (рис. 2.52).

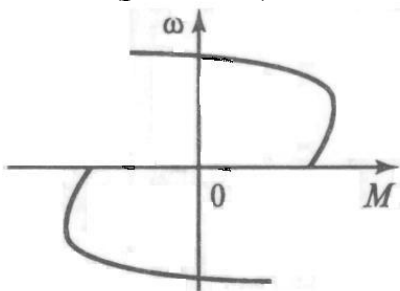


Рис.2.52. Механические характеристики электропривода с короткозамкнутым АД

Для лифтов со скоростью движения кабины не выше 1,4 м/с наиболее распространенным является электропривод с двухскоростным асинхрон-

ным двигателем и контакторным управлением. Схема силовой части такого ЭП представлена на рис. 2.53.

Диапазон регулирования скорости вращения данного электропривода  $D = (3 - 4) : 1$ . Ограничение ускорений параметрическое. Разгон при пуске и движение с номинальной скоростью осуществляется по характеристике *Б*. Дотягивание и реверсия по – по характеристикам *М*. Контакторы *КМ3* и *КМ4* обеспечивают соответствующее переключение с большой скорости (*Б*) на малую скорость (*М*) и наоборот за счет изменения числа пар полюсов обмотки статора. Контакторы *КМ1* и *КМ2* осуществляют реверс электродвигателя.

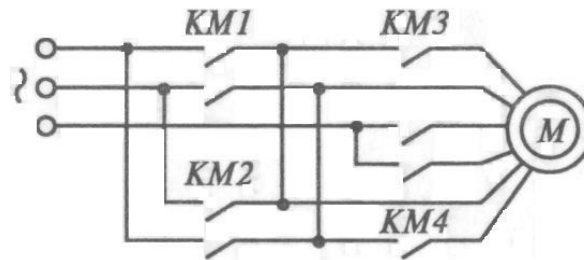


Рис. 2.53. Схема силовой части ЭП с двухскоростным АД  
Механические характеристики электропривода приведены на рис 1.54.

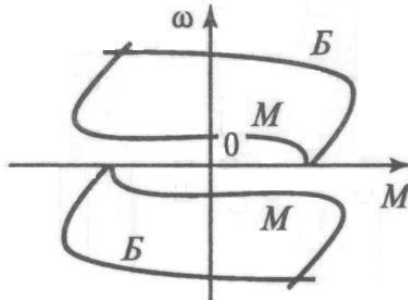


Рис. 2.54. Механические характеристики электропривода с двухскоростным асинхронным двигателем

Использование двухскоростных АД с независимыми обмотками, управляемыми тиристорными преобразователями, позволяет увеличить скорость движения кабины до 2 м/с. Ограничение ускорений и рывков в такой системе ЭП осуществляется в одноконтурной замкнутой системе регулирования скорости путем формирования оптимальной тахограммы движения.

На рис. 2.55 приведена схема с двухскоростным АД, обмотка большой скорости которого питается от тиристорного преобразователя переменного напряжения ТПН, а обмотка малой скорости используется для получения

ревизионной скорости и формирования режима динамического торможения АД при питании от управляемого выпрямителя ТП.

Диапазон регулирования скорости вращения данного электропривода  $D = 10:1$ . Разгон электродвигателя при пуске и движение с номинальной скоростью осуществляется по характеристикам *Б* рис. 2.56.

Торможение и замедление скорости реализуется по характеристикам *Т* (при питании обмотки малой скорости от ТП).

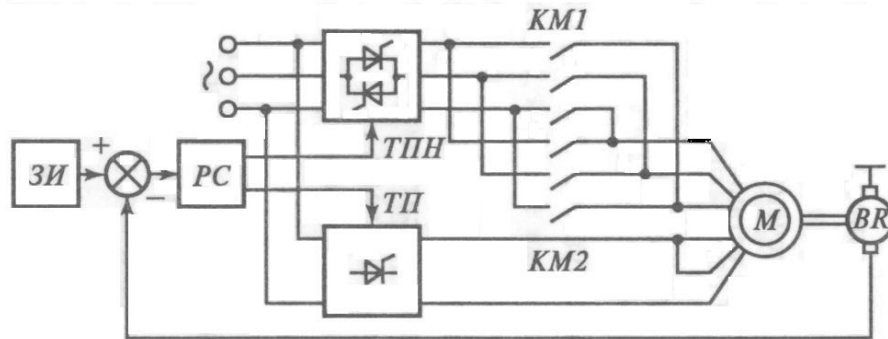


Рис. 2.55. Схема электропривода с двухскоростным АД-ТП

Электропривод лифта, схема которого приведена на рис. 3.2.14 имеет контур регулирования скорости *BR-PC*. Контакторы *KM1* и *KM2* осуществляют реверс электродвигателя. Задатчик интенсивности *ЗИ* обеспечивает формирование оптимальной тахограммы движения. Ревизия и движение на малой осуществляется по характеристикам *М*.

Цепи питания обмотки малой скорости переменным током на схеме не показаны.

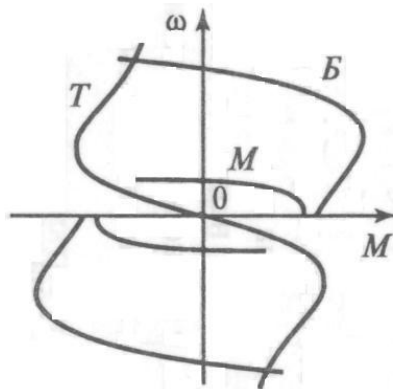


Рис. 2.56.. Механические характеристики электропривода с двухскоростным АД-ТП

При скорости движения кабины более 2 м/с используются ЭП постоянного тока по системе Г—Д (рис. 2.57.) и ТП—Д (рис. 2.59). Эти ЭП помимо контуров регулирования скорости имеют контуры регулирования то-

ка. Точность остановки кабины осуществляется контуром положения, который включается при подходе кабины к зоне точной осНа рис. 2.57. приведена схема электропривода по системе Г-Д. Диапазон регулирования скорости вращения данного электропривода  $D=10:1$ . Ограничение ускорений и рывков осуществляется с помощью задатчика *ЗИ*. Регулятор скорости *РС* – пропорциональный с ограничением тока, регулятор тока *РТ* – пропорционально-интегральный.

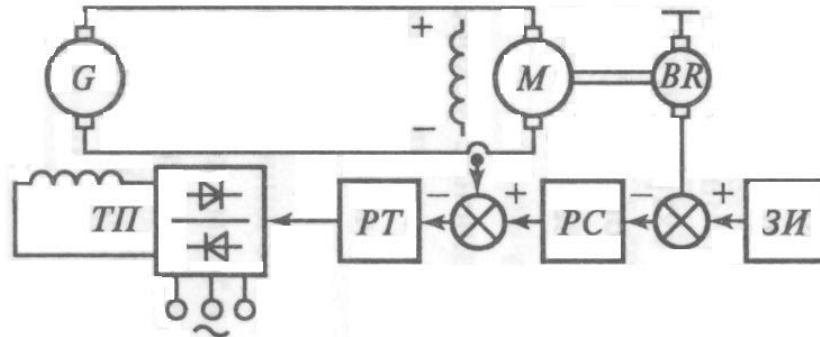


Рис. 2.57. Схема электропривода Г-Д

Механические характеристики данного электропривода приведены на рис. 2.58.

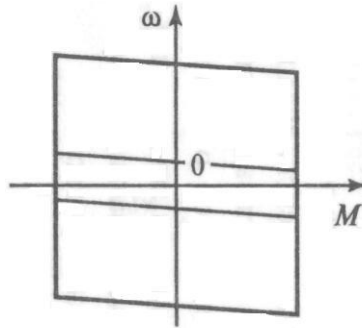


Рис. 2.58. Механические характеристики ЭП системы Г-Д

Линейные механические характеристики в системе ТП—Д обеспечиваются путем исключения работы ЭП в зоне прерывистых токов за счет введения в систему регулирования дополнительных регуляторов тока *РТ1* и *РТ2*, предназначенных для поддержания на требуемом уровне уравнительных токов.

Диапазон регулирования скорости вращения электропривода, выполненного по системе ТП—Д,  $D=10:1$ . Ограничение ускорений и рывков осуществляется с помощью задатчика *ЗИ*. Регуляторы скорости *РС* и тока *РТ* – пропорционально-интегральный. Регулятор скорости *РС* выпол-



нен с ограничением. Регуляторы уравнивающих токов  $PT1$  и  $PT2$  и положения  $PP$  – пропорциональные,  $ДП$  – датчик положения.

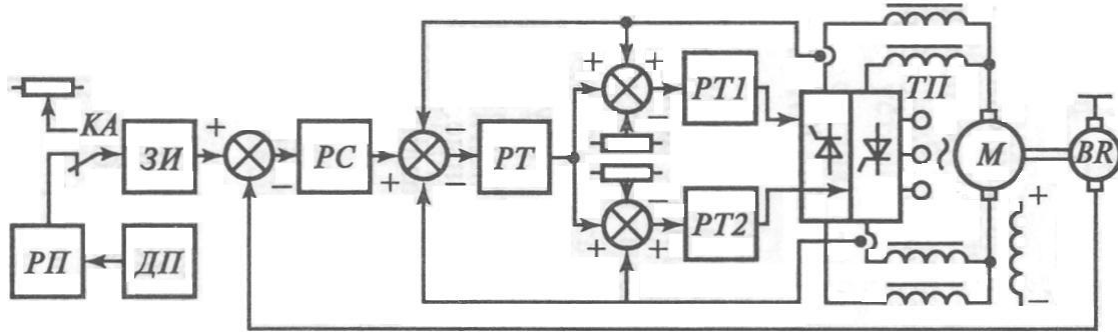


Рис. 2.59. Схема электропривода ТП–Д

### 3.7. Пример структурной схемы электропривода лифта

Схему системы управления одиночным лифтом в режиме нормальной работы можно представить в виде (рис. 52).

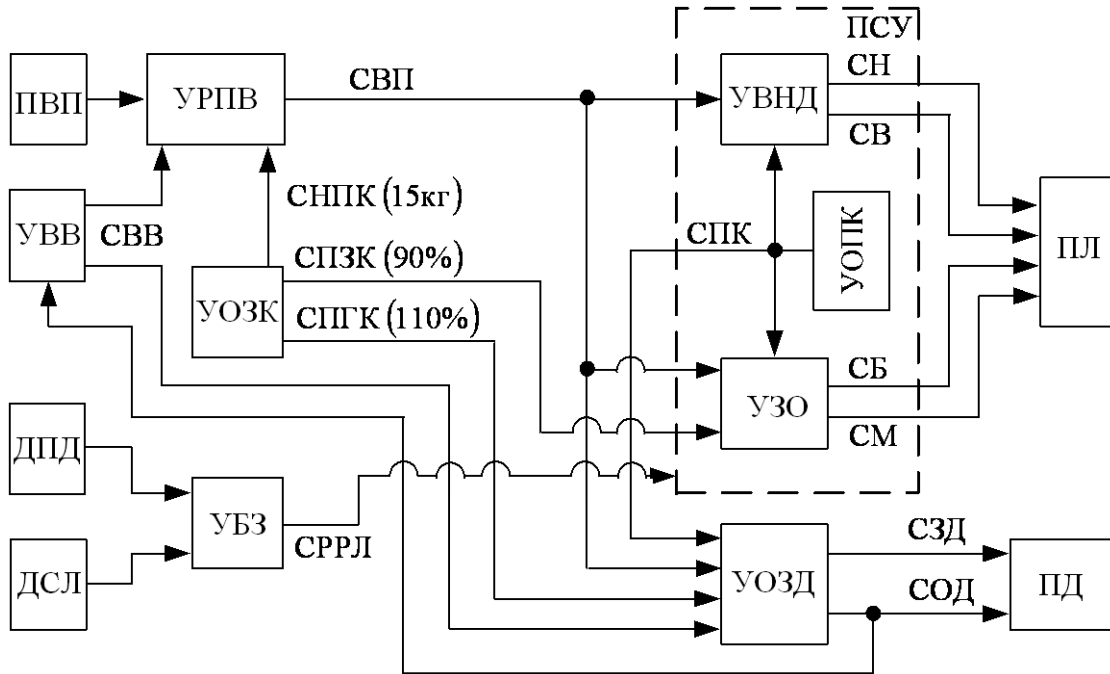


Рис.2.60. Структурная схем системы управления одиночным лифтом

В схеме приняты следующие обозначения:

- ПЛ – привод лифта;
- ПД – привод дверей;
- ПВП – посты вызовов и приказов;
- УРПВ – узел регистрации приказов и вызовов;

УВНД – узел выбора направления движения;  
УОПК – узел определения положения кабины;  
УЗО – узел замедления и остановки;  
ДПД – датчик положения дверей;  
ДСЛ – датчик состояния лифта;  
УБЗ – узел блокировки и защиты;  
УВВ – узел выдержки времени;  
УОЗД – узел закрывания и открывание дверей;  
ПСУ – позиционно - согласующее устройство;  
СВ – сигнал движения вверх;  
СН – сигнал движения вниз;  
СБ – сигнал большой скорости;  
СМ – сигнал малой скорости;  
СЗД – сигнал закрывания дверей;  
СОД – сигнал открывания дверей;  
СВВ – сигнал выдержки времени;  
СВП – сигнал о вызовах и приказах;  
СНПК – сигнал о наличие пассажира в кабине;  
УОЗК – узел определения загрузки кабины;  
СПЗК – сигнал о полной загрузке кабины;  
СПГК – сигнал о перегрузке кабины;  
СРРЛ – сигнал регулирования разгона лифта;  
СПК – сигнал положения кабины.

В качестве примера рассматривается структурная схема высокоскоростного лифта, разработанная фирмой АЭГ (рис.2.61).

Безредукторная подъемная лебедка приводится в движение двигателем Д, получающим питание от индивидуального генератора Г. Для управления полем генератора применен реверсивный тиристорный возбудитель ТВ. Схема управления является двухконтурной. Внутренний контур содержит регулятор тока РТ, на входе которого в каждый момент времени сравнивается заданный ток с действительным, причем максимальное значение тока ограничивается формой характеристики регулятора скорости. На входе регулятора скорости РС сравнивается заданная скорость с действительной и при автоматическом управлении вводится дополнительный сигнал коррекции по пройденному пути. При ручном управлении и ревизии заданное значение скорости формируется задатчиком интенсивности ЗИ.

В автоматическом режиме управление электропривода производится с помощью цифровой ЭВМ, с выхода которой выдаются кодированные значения заданной скорости  $V_{расч}$  и путевой ошибки  $\Delta S = S_{расч} - S$ , которые после преобразования в аналоговые величины подаются на вход регулятора скорости

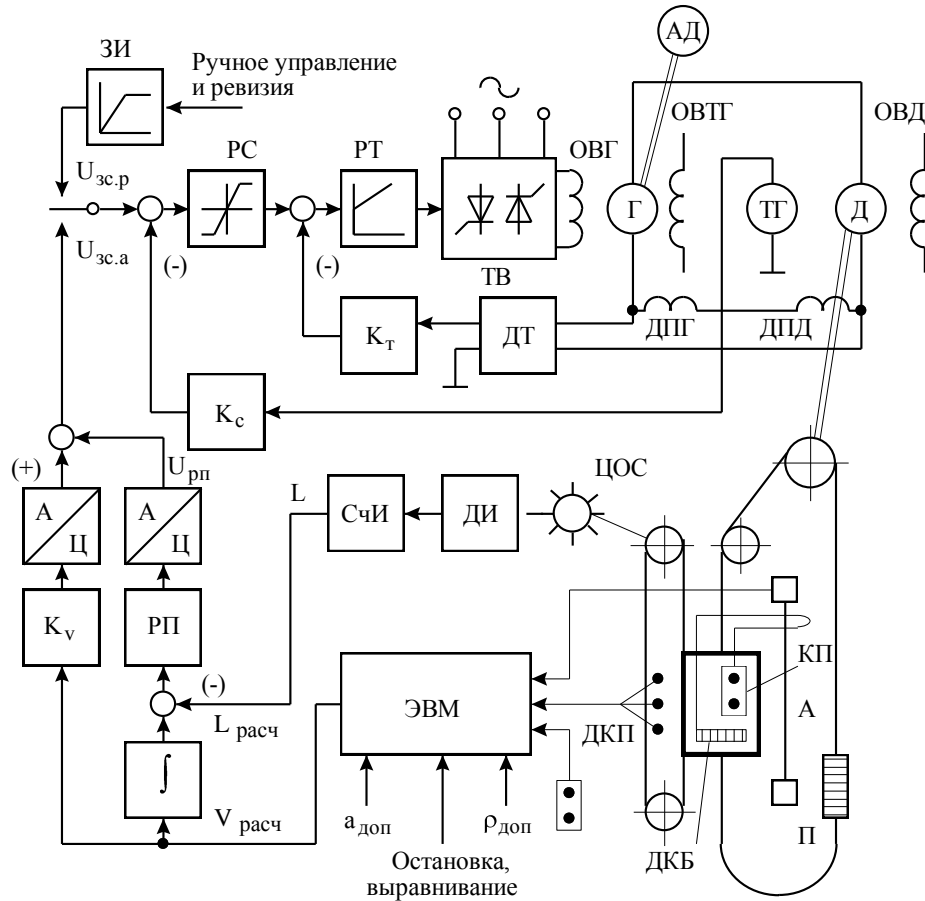


Рис.2. 61. Схема высокоскоростного лифта

На рис. 2.62 показано формирование заданной кривой скорости  $V_{расч} = f(t)$  вычислительной машиной. При наладке устанавливаются кодированные максимально допустимые значения  $\rho_{доп}$ ,  $a_{доп}$  и  $V_{доп}$ . Поэтому при получении команды «Пуск» на базе этих величин машина вычисляет заданные значения скорости, осуществляет операции интегрирования в соответствии с графиком рис. 2.62.

ЭВМ в каждый момент задает нужное значение скорости. Интегрированием получается расчетное значение пройденного пути, которое сравнивается с истинными значениями пройденного пути, полученные в виде ко-

да с помощью счетчика СЧИ и датчика импульсов ДИ связанного с осью центробежного ограничителя скорости ЦОС

Лифт имеет большую рабочую скорость движения 7 м/с. При ограниченном ускорении и рывке путь, проходимый кабиной после получения команды на замедление, измеряется десятками метров. При собирательном управлении схемой может быть зафиксирован приказ или вызов на этаж, находящийся в данный момент ближе, чем путь замедления. В данном случае приказ или вызов не должен быть выполнен.

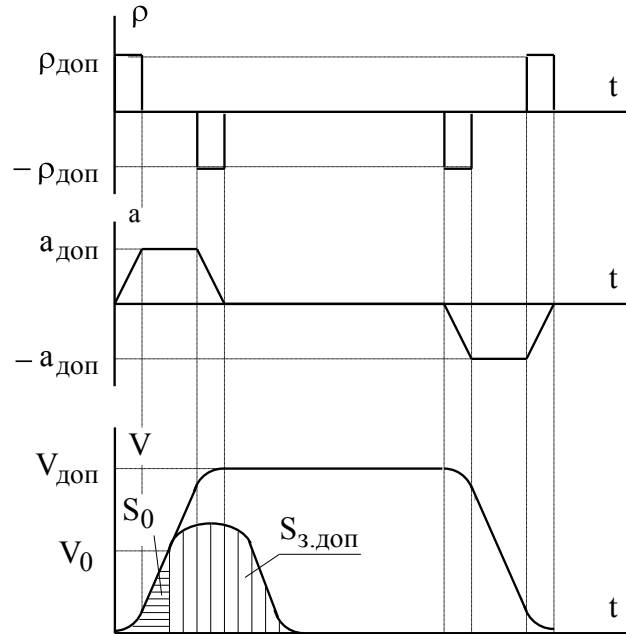


Рис. 2.62. Графики формирования заданной кривой скорости

В данной схеме вычислительная машина в каждый момент времени, считая текущее заданное значение скорости начальным  $V_0$ , определяет путь замедления  $S_{з.доп} = f(V_0, a_0)$ , который должна пройти кабина до остановки при заданном рывке  $\rho_{доп}$  и начальном ускорении  $a_0$ . Этот путь на рис. 2.62 изображен площадью с вертикальной штриховкой. В сумме с пройденным к этому моменту времени пути  $S_0$  (горизонтальная штриховка) он составляет путь допустимой остановки  $S_{доп}$ , отсчитываемый от исходной точки. Это путь сопоставляется с отсчитываемым от той же точки расстоянием  $H_i$  до ближайшего пункта, на котором заказана остановка по приказу или вызову. Если  $S_{доп} < H_i$ , то продолжается движение до тех пор, пока не выполнится условие  $S_{доп} = H_i$ , что и послужит основанием

для переключения привода на замедление с последующей остановкой на заданном этаже. Если  $S_{\text{доп}} > H_i$ , то поступающий приказ или вызов не обрабатывается.

Связь с кабиной является бесконтактной. Сигналы приказов КП или датчиков контроля безопасности ДКБ, установленных в кабине, передаются через антенну А и приемно-передающее устройство в схему управления.

При нахождении кабины на этаже схемой с помощью датчиков контроля положения ДКП осуществляется автоматическое выравнивание. Тормоз накладывается лишь при длительных остановках.

При установленных при наладке значениях  $\rho_{\text{доп}}$  и  $a_{\text{доп}}$  время пуска до скорости 7м/с составляет около 15 с. Во всех режимах приведенная система работает как система поддержания постоянства скорости.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизированный электропривод промышленных установок. Под ред. Г.Б. Онищенко.– М.:РАСХН-2001.– 520 с.
2. Асинхронные двигатели серии 4А. Справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболевская. М.: Энергоатомиздат. 1982. – 150 с.
3. Аристов А.В., Бурулько Л.К., Паюк Л.А. Математическое моделирование в электромеханике: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 145 с.
4. Башарин А.В., Голубев Ф.Н., Кепперман В.Г. Примеры расчетов автоматизированного электропривода. – Л., Энергия, 1971. – 440 с.
5. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. – Л.: Энергоиздат, 1982.– 392 с.
6. Бродовский В.Н., Иванов Е.С. Приводы с частотно-токовым управлением. – М.: Энергия, 1974. – 165 с.
7. Бекишев Р.Ф. Общий курс электропривода: Учеб. пособие для студентов высших учебных заведений. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 302 с.
8. Булгаков А.А. Частотное управление асинхронными электродвигателями. – М.: Наука, 1982. 284 с.
9. Бурулько Л.К. Динамика электромеханических систем: Учебное пособие. – Томск: изд. ТПИ им С.М. Кирова, 1991. – 89 с.
10. Бурулько Л.К. Расчет и проектирование следящего привода: Учебное пособие. Часть 1. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 74 с.
11. Бурулько Л.К. Расчет и проектирование следящего привода: Учебное пособие. Часть 2. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 120 с.
12. Бурулько Л.К., Боровиков Ю.С. Специальные электроприводы переменного тока: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 145 с.
13. Бурулько Л.К., Глазачев А.В. Электропривод летательных аппаратов: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 120 с.
14. Воронин П.А. Силовые полупроводниковые ключи. М.: Изд. Дом «Додекс», 2001. – 384 с.
15. Вольдек А.И. Электрические машины. – М.: Энергия, 1974. – 782 с.

16. Воронина Н.А., Петрович В.П. Силовые преобразователи электрической энергии: Учебное пособие. – Томск:Изд-во ТПУ, 2004.– 263 с.
17. Герман-Галкин С.Г. Силовая электроника: лабораторные работы на ПК.-СПб.: Корона принт, 2002.-304 с.
18. Герман-Галкин С.Г.Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MathLab 6.0: Учеб. пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2001.– 320 с.
19. Герман-Галкин С.Г. Цифровые электроприводы с транзисторными преобразователями. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 248 с.
20. Т.А.Глазенко, В.А. Прянишников. Электротехника и основы электроники: Учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 1996. – 210 с.
21. Загорский А.Е. Электродвигатели переменной частоты. – М.: Энергия, 1975. – 152 с.
22. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: Учебное пособие. – Изд. 2-е, испр. и доп. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 664 с. – (Серия «Учебники НГТУ»).
23. Ефимов А.А., Шрейнер Р.Т. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока. – Новоуральск: Изд-во НГТИ, 2001. – 250 с.
24. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
25. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 704 с.
26. Кривицкий С.О., Эпштейн И.И. Динамика частотно-регулируемых электроприводов с автономными инверторами. – М.: Энергоатомиздат, 1970. – 152 с.
27. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. Для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1974. – 832 с.
28. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат; 1986. – 416 с..
29. Онищенко Г.Б., Аксенов М.И. и др. Автоматизированный электропривод промышленных установок. – М.: РАСХН, 2001. – 520 с.
30. Петров И.И., Мейстель А.М. Специальные режимы работы асинхронного электропривода. – М.: Энергия, 1968. – 256 с.

31. Поздеев А.Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах. – Чебоксары: Изд-во Чувашского университета, 1998. – 172 с.
  32. Рудаков В.В., Столяров И.И., Дартау В.А. Асинхронные электроприводы с векторным управлением. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 136 с.
  33. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Основы преобразовательной техники. – М.: Высшая школа, 1980. – 423 с.
  34. Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. – М.: Энергия, 1974. – 321 с.
  35. Сабинин Ю.А., Грузов В.Л. Частотно-регулируемые асинхронные электроприводы. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 128 с.
  36. Сварка и резка материалов: Учеб. пособие.; Под ред. Ю.В. Казакова. – М.: Издательский центр «Академия», 2001. – 400 с.
  37. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным управлением: учебник для студ. высш. учеб. Заведений; – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 272 с.
  38. Усынин Ю.С. Системы управления электроприводов: Учеб. пособие. – 2-е изд., испр. и доп. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 328 с.
  39. Чернышев А.Ю., Дементьев Ю.Н., Чернышев И.А. Электропривод переменного тока: Учеб. пособие для студентов высших учебных заведений. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 213 с.
  40. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода: Учебник для вузов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.
  41. Шубенко В.А., Браславский И.Я. Тиристорный асинхронный электропривод с фазовым управлением. – М. Энергия, 1972.- 200 с.
  42. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2001. – 654 с.
  43. Электротехнический справочник в четырех томах: Т4 Использование электрической энергии. – М. Издательство МЭИ, 2002. – 695 с.
- [www.electroprivod.ru](http://www.electroprivod.ru)  
[www.szma.com](http://www.szma.com)  
[www.schiebel.ru](http://www.schiebel.ru)  
[www.e-privod.ru](http://www.e-privod.ru)  
[www.elvpr.ru](http://www.elvpr.ru)  
[www.mexanic.ru](http://www.mexanic.ru)



[www.speckomplect.ru](http://www.speckomplect.ru)  
[www.elprivod.ru](http://www.elprivod.ru)

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
Глава 1 ОСНОВНЫЕ СИСТЕМЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ.....	6
1.1. Типовое технологическое оборудование промышленных предприятий .....	7
1.2. Электропривод производственных механизмов .....	10
1.3. Характерные черты современного электропривода .....	12
1.4. Основные используемые в промышленности системы регулируемого электропривода .....	18
1.4.1. Система «Генератор – двигатель» .....	19
1.4.2. Импульсный электропривод .....	22
1.4.2.1. Импульсный способ регулирования координат ДПТ .....	23
1.4.2.2. Схемы тиристорных ключей для импульсного регулирования .....	27
1.4.3. Система «Управляемый выпрямитель – двигатель» .....	29
1.4.4. Система «Преобразователь частоты – асинхронный двигатель» .....	36
1.4.4.1. Структура частотного преобразователя .....	38
1.4.4.2. Асинхронный электропривод с частотным регулированием угловой скорости .....	41
1.4.4.3. Электромеханические и механические характеристики АД при частотном управлении .....	46
1.4.5. Каскадный электропривод .....	48
1.4.5.1. Функциональные схемы каскадного асинхронного электропривода .....	49
1.4.5.2. Принцип работы каскадных электроприводов .....	50
1.4.5.3. Регулирование скорости АД в каскадных схемах включения .....	55
1.4.5.4. Асинхронный электропривод двойного питания .....	58
1.4.5.5. Вентильный двигатель .....	62
1.4.5.6. Асинхронный электропривод с тиристорными регуляторами напряжения .....	65
1.4.5.7. Асинхронные электроприводы с регулированием напряжения обмоток статора .....	72
Глава 2. ЭЛЕКТРОБОРУДОВАНИЕ ОБЩЕПРОМЫШЛЕННЫХ УСТАНОВОК.....	76
2.1. Обзор общепромышленных механизмов циклического действия .....	77
2.2. Обзор общепромышленных механизмов непрерывного действия .....	78
2.3. Общие требования, предъявляемые к электроприводу промышленных механизмов .....	80
2.4. Электропривод насосов, вентиляторов, компрессоров .....	81
2.4.1. Общие сведения .....	81
2.4.2. Назначение и устройство насосов, вентиляторов и компрессоров .....	83
2.4.3. Системы электропривода насосов, вентиляторов и компрессоров .....	86
2.4.4. Общие требования к электроприводу машин для подачи жидкостей и газов .....	90
2.4.5. Характеристики машин для подачи жидкостей и газов .....	91
2.4.6. Работа машин для подачи жидкостей и газов с магистралью .....	96

2.4.7. Перспективы развития электропривода машин для подачи жидкостей и газов .....	99
2.5. Электроприводы специальных промышленных устройств .....	103
2.5.1. Подъемные краны .....	103
2.5.2. Основные типы кранов .....	106
2.6. Статические и динамические нагрузки электроприводов подъемников и тяговых лебедок .....	113
2.7. Статические и динамические нагрузки электроприводов .....	117
2.7.1. Моменты сопротивления при подъеме по наклонной плоскости .....	120
2.8. Классификация режимов работы кранов и их механизмов .....	122
2.9. Системы электроприводов .....	125
2.9. Электропривод механизма подъема .....	127
2.10. Электропривод механизмов горизонтального перемещения .....	130
2.11. Выбор электродвигателей механизмов кранов .....	133
2.12. Ограничение механических перегрузок механизмов циклического действия .....	138
2.13. Электрооборудование и автоматизация лифтов и шахтных подъемных машин .....	139
2.13.1. Общие сведения .....	140
2.13.2. Устройство и конструкция лифта .....	141
2.13.3. Схемы управления лифтовыми установками .....	146
2.13.4. Требования к электроприводу лифта .....	148
2.13.5. Выбор электродвигателя лифта .....	153
2.13.6. Точная остановка подъемных машин .....	156
2.13.7. Автоматическое регулирование положения .....	160
3.7. Системы электроприводов лифта .....	164
3.7. Пример структурной схемы электропривода лифта .....	169
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	174
ОГЛАВЛЕНИЕ .....	178

Учебное издание

БУРУЛЬКО Лев Кириллович  
ДЕМЕНТЬЕВ Юрий Николаевич

## ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

### Электроприводы промышленных механизмов и устройств

Учебное пособие

Научный редактор  
*доктор технических наук,  
профессор А.Г. Гарганеев*

Редактор *И.О. Фамилиа*

Верстка *Л.А. Егорова*


**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии  
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати                      Формат 60×84/16.  
Бумага «Снегурочка». Печать Хероx.  
Усл. печ. л. 3,02. Уч.-изд. л. 2,74.  
Заказ                      . Тираж                      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.  
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, [www.tpu.ru](http://www.tpu.ru)