

А.К.МАЛИНОВСКИЙ

# АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД МАШИН И УСТАНОВОК ШАХТ И РУДНИКОВ

*Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебника для студентов вузов, обучающихся по специальности «Электрификация и автоматизация горных работ»*



МОСКВА "НЕДРА" 1987

**Малиновский А. К.** Автоматизированный электропривод машин и установок шахт и рудников: Учебник для вузов.— М: Недра, 1987.— 277 с.

Рассмотрены автоматизированные электроприводы очистных и проходческих комбайнов, электровозов, конвейеров, вентиляторов, насосов, компрессоров и подъемных установок. Изложены общие вопросы электропривода, условия его работы. Для каждой рабочей машины приведены режимы работы и определены требования, предъявляемые к ее электроприводу. Даны возможные схемы электропривода и способы его автоматизации для реализации предъявляемых к нему требований. Описана методика расчета и выбора основных элементов электропривода, а также его типовые схемы.

Для студентов горных вузов, обучающихся по специальности «Электрификация и автоматизация горных работ».

Ил. 120, список лит.— 47 назв.

Рецензенты: кафедра электрификации горных предприятий Свердловского ордена Трудового Красного Знамени горного института им. В. В. Вахрушева; *А. Д. Динкель*, канд. техн. наук (Пермский политехнический институт)

## ПРЕДИСЛОВИЕ

---

Основными направлениями экономического и социального развития СССР на 1986—1990 годы и на период до 2000 года, утвержденными XXVII съездом КПСС, предусматривается опережающими темпами наращивать выпуск автоматизированных электроприводов. Особенно это важно для добывающей промышленности, основные задачи которой: дальнейшее совершенствование горно-добывающей техники и достижение на этой основе темпов роста добычи полезных ископаемых; создание полностью механизированных и автоматизированных шахт и рудников с автоматическим управлением всеми производственными процессами.

В горно-рудной промышленности электроприводом оснащены машины и установки по выемке полезного ископаемого (очистные комбайны и струги), по проходке горных выработок (проходческие комбайны), по транспортированию полезных ископаемых (скребковые и ленточные конвейеры, электровозы, скиповые и клетевые подъемные установки), по удалению воды из шахты (рудника), проветриванию, снабжению рабочих мест сжатым воздухом (насосы, вентиляторы, компрессоры). От технического совершенства электропривода в значительной степени зависят производительность, надежность работы, простота обслуживания и возможность автоматизации.

Одновременно с этим должны решаться вопросы повышения в оптимальных пределах единичной мощности машин и оборудования при одновременном уменьшении их габаритов, металлоемкости, электропотребления и снижения их стоимости.

По роду практической деятельности горному инженеру-электрику приходится заниматься вопросами эксплуатации, проектирования и создания систем автоматизированного электропривода машин и установок шахт и рудников. Поэтому будущие горные инженеры-электрики должны знать условия эксплуатации и режимы работы машин и установок, конкретные системы автоматизированных электроприводов; уметь выполнять проектно-конструкторские и расчетные работы по созданию и внедрению в эксплуатацию систем электроприводов; выявлять и устранять причины возможных нарушений в работе электроприводов. Все это требует от студентов глубокого знания теоретических основ электропривода.

Учебник написан в соответствии с программой курса «Автоматизированный электропривод машин и установок шахт и рудников», изложение данного курса базируется на материале дисциплины «Основы электропривода», «Электрические машины», «Электрические аппараты и средства автоматизации», «Промышленная электроника», изучение которых согласно учебному плану предшествует чтению данного курса.

Предлагаемый учебник позволяет получить необходимые знания для решения поставленных задач.

Электропривод в угольной промышленности начал применяться в конце XIX столетия. Это были первые электрифицированные водоотливные установки и передвижные насосы на Зырянском свинцово-серебряном руднике (Алтай) и на Кизеловских каменноугольных коях (Урал). Первая подъемная машина с электрическим двигателем была установлена в 1900 г. на Васильевском медном руднике (Урал).

Применение электрического привода дало не только экономический эффект — незначительный расход энергии, малые габариты машин, но и главным образом повысило надежность и увеличило безопасность работы подъемных установок.

Однако отсутствие в рудных и угольных бассейнах дореволюционной России мощных электрических станций, а также развитой машиностроительной промышленности ограничило применение на шахтах электрического привода. И только создание мощной энергетической базы и собственной электротехнической промышленности, что стало возможным после Великой Октябрьской социалистической революции, послужило большим толчком в развитии электропривода во всех отраслях народного хозяйства.

Применяемые в настоящее время на подъемных установках электроприводы немислимы без автоматизации. Это объясняется тем, что автоматизация подъемной установки — это повышение производительности и эксплуатационной надежности, высвобождение обслуживающего персонала, главным образом за счет рабочих, обслуживающих загрузку и разгрузку подъемных сосудов, освобождение машинистов от напряженного труда по управлению машиной. На машиниста в этом случае возлагаются только обязанности контроля за правильным функционированием установки и отдельных ее узлов и устранения возникающих при работе неполадок. Поэтому основное внимание советских ученых всегда было направлено на разработку схем автоматизации электропривода шахтных подъемных машин.

Первые теоретические работы в области автоматизации режима работы подъемной машины с асинхронным двигателем принадлежат инж. В. Б. Уманскому, опубликовавшему в 1930 г. статью «Автоматизация рудничного подъема с приводом от асинхронного двигателя».

В. Б. Уманский в своих последующих работах исследовал регуляторы хода, созданные советскими изобретателями и иностранными фирмами для автоматизации режима замедления подъемной машины. Результаты этих исследований легли в основу разработки требований к регуляторам хода и механиче-

ским тормозам, удовлетворение которых необходимо для осуществления автоматизации управления подъемной машиной.

Проф. В. С. Тулину принадлежит большая заслуга в разработке схем управления асинхронным приводом и в автоматизации пуска подъемной машины. В 1937 г. им была предложена схема автоматизации пуска подъемной машины с асинхронным двигателем в функции тока с корректировкой по времени. Схема, разработанная ХЭМЗом под его руководством (1938 г.), принята в качестве типовой для подъемных машин и применяется по настоящее время. Кроме того, В. С. Тулин впервые предложил период пуска автоматизировать по ускорению и разработал электрическую схему с использованием в качестве индикатора ускорения моментного двигателя.

Большой вклад в развитие асинхронного привода шахтных подъемных машин внесли советские ученые А. Е. Максимов, А. Е. Троп, Б. Л. Давыдов, М. Н. Василевский. А. Е. Максимов предложил схему автоматизации подъема с применением тормозного генератора или двух двигателей. А. Е. Троп провел исследование регулятора хода с однократным импульсом, Б. Л. Давыдов — регулятора хода, реагирующего на отклонение действительно пройденного пути подъемным сосудом от заданного и определил область работоспособности такого регулятора.

Проф. О. М. Крыжановский уделил большое внимание разработке принципиально новых регуляторов хода, воздействующих на механический тормоз, а также схем автоматического управления подъемной машиной в период замедления асинхронного двигателя, работающего в режиме динамического торможения.

Вопросами теоретического изучения регуляторов хода занимался также проф. К. М. Барамидзе. Им разработан и исследован центробежный регулятор хода, воздействующий на механический тормоз.

Анализу схем автоматизации пуска подъемной машины с асинхронным двигателем по ускорению с трансформаторным акселерометром посвящены работы проф. Г. Е. Иванченко. Разработанная им схема была внедрена на одной из шахт Карагандинского бассейна.

Одновременно с развитием электропривода шахтных подъемных машин на переменном токе шло развитие и усовершенствование электропривода шахтных подъемных машин на постоянном токе. Первые крупные подъемные машины на постоянном токе оборудовались редукторным электроприводом по системе генератор — двигатель (Г — Д) с контакторным управлением. Такая система привода была внедрена на подъеме шахты им. Карла Либкнехта в Кривом Роге.

Трест Электропривод (ныне ВНИИЭлектропривод) в 1951 г. разработал схему автоматического управления приводом подъемной машины с применением электромашинного усилителя

поперечного поля, которая была внедрена в 1952 г. на шахте «Капитальная» Лениногорского комбината им. Карла Маркса в Донбассе. Применение электромашинных усилителей (ЭМУ) в системе Г—Д позволило увеличить диапазон регулирования и уменьшить число коммутационной аппаратуры.

Дальнейшее совершенствование системы Г—Д шло в направлении увеличения надежности работы привода. Например, вращающийся преобразователь (ЭМУ) был заменен статическим — силовым магнитным усилителем (СМУ). Система Г—Д с СМУ была установлена в 1962—1965 гг. на четырех подъемных установках Криворожского бассейна.

Система Г—Д с тиристорным возбудителем впервые внедрена в 1966 г. на скиповом, а в 1969 г. — на клетевом подъеме на шахте «Северная» рудоуправления им. Ф. Э. Дзержинского.

Большая заслуга в дальнейших исследованиях и усовершенствованиях схем автоматизации различных режимов работы подъемной установки принадлежит советским ученым А. А. Иванову, Е. С. Траубе, А. И. Ефанову, В. М. Берловскому, М. Н. Василевскому, В. Е. Католикову, А. Д. Динкелю и многим другим.

В 1932 г. проф. М. В. Мартыновым и инж. К. С. Жарковым было предложено применить для шахтного подъема вместо системы генератор — двигатель систему управляемый выпрямитель — двигатель (УВ—Д). В результате исследовательских работ, проводимых в этом направлении, был создан первый ионный электропривод подъемной установки. В качестве управляемых вентилей использовались ртутные выпрямители.

Благодаря теоретическим и экспериментальным исследованиям, проведенным советскими учеными М. В. Мартыновым, Е. Л. Этингером, Ф. П. Бутаевым, С. З. Барским, в 1951 г. была сдана в эксплуатацию на одной из шахт Донбасса подъемная машина с ионным приводом.

Повышение производительности подъема вызвало необходимость увеличения мощности электропривода подъемных машин. В 1956 г. на одной из шахт Кривбасса впервые был установлен двухдвигательный электропривод постоянного тока с одним генератором, а в 1962 г. начал эксплуатироваться двухдвигательный электропривод с двумя генераторами.

Совершенствование электропривода шахтных подъемных машин на постоянном токе (системы Г—Д, УВ—Д) идет в направлении введения систем подчиненного регулирования на базе унифицированных блочных систем регуляторов (УБСР), позволяющих реализовать различные законы регулирования, уменьшить динамические ошибки регулирования.

В настоящее время работы по разработке и совершенствованию электропривода шахтного подъема ведут научно-исследовательские институты, заводы, конструкторские бюро и проектно-монтажные организации.

Начало электрификации подземного транспорта совпало

с началом XX в. Первые рудничные электровозы появились в России в 1907 г.

Выпуск отечественных рудничных контактных электровозов начался в 1924—1925 гг.

С 1932 г. начался выпуск рудничных аккумуляторных электровозов, на которых применялась контактная резисторная система управления, обладавшая рядом недостатков: большим числом контактов и контактной аппаратуры, снижавшей надежность привода, значительными потерями энергии в резисторах (до 15—20 % потребляемой энергии), скачкообразным изменением тока и силы тяги при переходе с одной позиции контроллера к другой, снижавшем коэффициент сцепления. Поэтому велись работы по созданию бесконтактных схем управления тяговыми двигателями. Одна из таких схем с тиристорным импульсным регулятором была создана Ворошиловградским филиалом института Гипроуглеавтоматизации в 1966 г. и испытана на электровозе 4КР на одной из шахт Подмосковского угольного бассейна. Тиристорные импульсные регуляторы для аккумуляторных электровозов 4,5АРП, 8АРП впервые были изготовлены в 1968 г. на Харьковском заводе «Электромашина» и испытаны на шахтах Донбасса.

Применение тиристорных импульсных регуляторов позволило: обеспечить плавное регулирование скорости электровоза с одновременным увеличением коэффициента сцепления с 0,6 до 0,95 и сцепного веса на 20—30 %, увеличить надежность электрической и механической частей электровозов, создать бесконтактное электрическое торможение в режимах противовключения, резисторном (электродинамическом) и рекуперативном.

Большой вклад в развитие общей теории и практики электровозной тяги был внесен трудами советских ученых А. М. Терпигорева, А. О. Спиваковского, Ф. Н. Шклярского, С. А. Волотковского, В. Г. Шорина, И. Г. Штокмана и других.

Дальнейшее развитие тягового электропривода должно идти в направлении усовершенствования существующих систем постоянного тока с возможной заменой двигателя с последовательным возбуждением на двигатель с независимым возбуждением, а также разработки новых систем с асинхронными и синхронными двигателями с регулированием частоты сети.

Вначале электропривод вентиляторных, насосных и компрессорных установок был нерегулируемым. Эти установки, как правило, оснащались электроприводом с асинхронным короткозамкнутым двигателем. И только в дальнейшем, когда мощности электроприводов вентиляторов, насосов и компрессоров стали достигать 500 кВт и более, начали применяться синхронные двигатели.

Однако, несмотря на высокие энергетические показатели синхронного двигателя, электропривод шахтных вентиляторов с таким двигателем имеет ряд существенных недостатков: не всегда обеспечивается разгон вентиляторов с большими маховыми мас-

сами, длительный пуск с большими пусковыми токами требует более мощную систему электроснабжения шахты.

Поэтому, наряду с синхронными двигателями, идет совершенствование электропривода вентиляторов главного проветривания мощностью 500—1600 кВт благодаря широкому использованию высоковольтных асинхронных двигателей с фазным ротором, а при мощности более 2000 кВт — только асинхронных двигателей.

Проведенные статистические исследования параметров проветривания действующих шахт и рудников за длительный период их эксплуатации показали, что свыше 40 % шахт и рудников имеют большой диапазон изменения количества воздуха, подаваемого в подземные выработки для их проветривания, а давление (депрессия) для перемещения воздуха по выработкам изменяется в 2 раза и более.

Все это привело к тому, что более половины всех вентиляторов эксплуатируются с к. п. д. ниже 0,6. Эксплуатация непрерывно круглосуточно работающего вентилятора с низким к. п. д. приводит к чрезмерно большому расходу электроэнергии.

Снизить неоправданный расход электроэнергии можно, используя на вентиляторах регулируемый электропривод. Наибольший эффект может дать регулируемый электропривод на центробежных вентиляторах как наиболее мощных, энергоемких и имеющих менее эффективные существующие устройства аэродинамического регулирования (только направляющие аппараты). Поэтому с 1969 г. началось промышленное производство комплексного электрооборудования регулируемого электропривода по системе асинхронного машинно-вентильного каскада (АВМК).

Опыт эксплуатации электрооборудования регулируемого электропривода на вентиляторных установках с вентиляторами ВЦД-32М (ВЦД-31,5М), ВЦД-40, ВЦД-47 «Север» на шахтах и рудниках Советского Союза показал целесообразность их применения как с точки зрения экономичности работы вентилятора, так и с точки зрения настройки вентилятора на заданный режим работы, обеспечения большой глубины регулирования его производительности и давления, оперативности управления вентиляторной установкой.

В настоящее время идет совершенствование систем регулируемого электропривода вентиляторов заменой машинных преобразователей на полупроводниковые.

Переходя к истории развития электропривода очистных и проходческих комбайнов, необходимо отметить, что начиная с самых первых машин и по сегодняшний день подавляющее большинство имеет электропривод, выполненный на базе асинхронного короткозамкнутого двигателя. Советскими учеными А. М. Терпигоревым, А. В. Докукиным, В. С. Тулиным еще в 1939 г. была доказана необходимость перехода на регулируемый электропривод добычных машин.

Создание регулируемого электропривода добычных машин на постоянном токе сдерживалось усложнением конструкции двигателя, увеличением его стоимости, а на переменном токе — отсутствием достаточно экономичных и простых систем регулируемого электропривода.

Вопросами разработки и промышленной реализации регулируемого электропривода добычных машин занимаются ИГД им. А. А. Скочинского, Гипроуглеавтоматизация, Донгипроуглемаш, ВНИИВЭ и Горловский машиностроительный завод им. С. М. Кирова.

Мощность электропривода ленточных конвейеров может достигать несколько тысяч киловатт. Как правило, это двухбарабанный привод с тремя двигателями, из которых два приводят во вращение первый барабан, один — второй барабан по ходу ленты.

К электроприводу мощных ленточных конвейеров предъявляются требования обеспечения предварительного натяжения ленты в период его пуска во избежание пробуксовки барабанов, а после пуска конвейера в работу натяжение ленты должно быть ослаблено. Это может быть достигнуто применением автоматически управляемых лебедок натяжных устройств.

Электропривод мощных ленточных конвейеров должен обеспечивать: плавность пуска ленточного конвейера, выравнивание нагрузок между двигателями в многодвигательном электроприводе, регулирование скорости движения ленты конвейера.

Для реализации вышеперечисленных требований применяются системы регулируемого электропривода. Наиболее простой системой является асинхронный двигатель с фазным ротором и резисторным регулированием. Применение двигателей с фазным ротором позволяет наиболее простыми методами обеспечить равномерную загрузку двигателей, а также плавность пуска ленточного конвейера.

Длительная работа ленточного конвейера на пониженной скорости, необходимая при его работе с неполной нагрузкой, обеспечивается применением регулируемого электропривода по системе асинхронного вентильного каскада. Применение регулируемого электропривода позволит увеличить срок службы ленты, который зависит от числа перегибов при огибании барабанов.

Электротехнической промышленностью в настоящее время ведется выпуск взрывобезопасного электропривода по системе асинхронного вентильного каскада (АВК), предназначенного для магистральных конвейеров мощностью до 315 кВт и напряжением до 660 В. В качестве инвертора применяется станция тиристорного преобразователя СПУ5.

Для электропривода по системе АВК мощных ленточных конвейеров, установленных в наклонных стволах, может быть использовано электрооборудование общепромышленного исполнения мощностью до 5000 кВт.

Дальнейшее развитие электропривода машин и установок шахт и рудников должно идти в направлении: развития и практической реализации регулируемого электропривода переменного и постоянного тока с использованием полупроводниковой техники для подъемных машин, очистных и проходческих комбайнов и стругов, электровозов и установок непрерывного транспорта; разработки и практической реализации регулируемого электропривода вентиляторов главного проветривания и компрессорных станций; создания высокоэкономичных электроприводов машин и установок с нерегулируемой скоростью (компрессоры, насосы, ленточные и скребковые конвейеры); разработки и исследования систем управления с использованием УБСР и микропроцессорной техники.

## **ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СПЕЦИФИКЕ РАБОТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА МАШИН И УСТАНОВОК ШАХТ И РУДНИКОВ**

---

### **1.1. УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ МАШИН И УСТАНОВОК ШАХТ И РУДНИКОВ**

В подземных выработках угольных шахт и рудников проходческие и добычные работы сопровождаются дроблением горных пород и полезного ископаемого, а следовательно, загрязнением атмосферы механическими примесями. Одновременно с этим из обнаженных поверхностей пласта, вмещающих пород, из отбитого угля в выработанное пространство выделяется метан. Смесь последнего с воздухом в угольных шахтах, смесь водорода и метана в калийных шахтах, угольной и других видов пыли во взвешенном состоянии может вызвать взрыв при соприкосновении с источником воспламенения. Поэтому в подземных выработках шахт, опасных по газу или пыли, должно применяться рудничное электрооборудование и электродвигатели во взрывобезопасном исполнении (РВ). Рудничное электрооборудование в исполнении повышенной надежности (РН) может применяться в выработках со свежей струей воздуха. И наконец, в околоствольных выработках шахт, опасных по газу или пыли, на свежей струе воздуха допускается применение электрооборудования в рудничном нормальном (РН) и даже в нерудничном исполнении.

В подземных выработках электропривод горных машин подвергается вредному действию влаги и пыли, а в некоторых выработках — постоянному капежу с кровли. Электропривод, работающий в таких условиях, должен иметь специальное конструктивное исполнение, защищающее его от проникновения внутрь влаги и пыли, а также влагостойкую изоляцию и антикоррозионное покрытие наиболее ответственных частей.

Большинство горных машин работает в выработках с ограниченным пространством (очистные комбайны и комплексы, струги). В большинстве случаев габариты этих машин всецело определяются размерами горной выработки и в первую очередь мощностью угольного пласта. Поэтому электродвигатели, являющиеся составной частью горной машины, также должны иметь минимальные размеры и массу.

Технология ведения горных работ требует либо постоянного перемещения большинства механизмов (очистные и проходческие комбайны, струги, погрузочные машины), либо периодического (конвейеры, маневровые лебедки, буровые станки,

передвижные подстанции, осветительные установки) — вслед за продвижением забоя. Таким образом, необходимо частое отключение и подсоединение электрооборудования к сети, что в свою очередь требует применения быстроразъемных устройств.

В отдельных случаях на угольных шахтах и очень широко на рудниках применяются взрывные работы, которые вызывают опасность повреждения электрооборудования разбрасываемой при взрыве породой или полезным ископаемым. Сюда необходимо также добавить возможность повреждения электрооборудования от частичных обрушений породы и полезного ископаемого, вызванное давлением боковых пород. Все это требует создания электромеханического оборудования высокой механической прочности.

Стационарные машины и установки (вентиляторы главного проветривания, компрессоры, шахтные подъемные машины), расположенные на поверхности шахт и рудников, эксплуатируются на чистом воздухе и в сухих помещениях, и поэтому в качестве электропривода могут использоваться электродвигатели и электрооборудование нормального нерудничного исполнения.

## **1.2. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ И ОБЛАСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ**

Современная шахта или рудник — это высокоэлектрифицированное горное предприятие. Поэтому основной привод рабочих механизмов и машин — электрический. В электроприводе машин и установок шахт и рудников применяются электродвигатели переменного и постоянного тока, асинхронные двигатели с короткозамкнутым или фазным ротором и синхронные двигатели, двигатели постоянного тока с независимым, последовательным и со смешанным возбуждением.

Из двигателей переменного тока для привода машин и установок шахт и рудников наиболее широкое применение нашли асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором как наиболее простые, дешевые и удобные в эксплуатации (очистные и проходческие комбайны, струги, конвейеры, насосы, вентиляторы). Асинхронные двигатели, как правило, имеют малый пусковой момент. Для механизмов, работающих в тяжелых пусковых режимах, применяются асинхронные двигатели со специальным короткозамкнутым ротором (двойная беличья клетка, глубокий паз). Тяжелый пуск — это пуск при полной нагрузке, когда статический момент  $M_{ст} = (0,8—1,2) M_{ном}$ . К машинам с таким режимом относятся ленточные, скребковые конвейеры и шахтные подъемные машины и лебедки. Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором наиболее широко применяются для привода горных машин, не требующих регулирования скорости. Для электроприводов, требующих регулирования скорости (шахтные подъемные машины и лебедки), исполь-

зуются асинхронные двигатели с фазным ротором. Они применяются в машинах с тяжелыми пусковыми режимами, а также когда требуется большая плавность пуска (ленточные конвейеры большой производительности).

Наравне с асинхронными в угольной промышленности применяются синхронные двигатели. Это в основном установки с постоянной частотой вращения и редкими пусками. К таким установкам относятся вентиляторы главного проветривания, крупные насосы, компрессоры, сетевые двигатели преобразовательных агрегатов шахтных подъемных машин. Это как раз те установки, применение на которых синхронных двигателей дает большой экономический эффект.

Синхронным двигателем должен быть, где это только возможно, заменен асинхронный, так как первый в режиме перевозбуждения работает с опережающим коэффициентом мощности. В этом режиме синхронный двигатель отдает реактивную энергию в сеть, являясь, таким образом, генератором реактивной мощности, что позволит улучшить общешахтный коэффициент мощности и обеспечить более экономичную работу энергосистемы. Другим достоинством синхронного двигателя является высокий к. п. д. и высокая надежность. Последняя объясняется значительным зазором между статором и ротором.

В машинах и установках, где требуется регулирование скорости в продолжительном режиме работы и получение нужных механических характеристик, применяются двигатели постоянного тока. Например, двигатели постоянного тока с независимым возбуждением нашли применение в электроприводах шахтных подъемных машин, осуществляемых по системе Г—Д. В приводе ходовой части рудничных электровозов применяются двигатели постоянного тока с последовательным возбуждением. Генераторы постоянного тока со смешанным возбуждением используются в качестве возбудителей генераторов постоянного тока или как источники постоянного тока для питания цепей управления.

Электродвигатели, используемые в качестве привода горных машин, имеют широкий диапазон по мощности (от киловатт до нескольких тысяч киловатт) и частоте вращения (от 25 до 3000 об/мин.).

Условия работы машин и установок шахт и рудников самые разнообразные. Например, забойные машины (очистные и проходческие комбайны, струги и погрузочные машины) работают в окружающей среде, содержащей пыль, влагу, взрывоопасные смеси. Одновременно с этим на шахтах и рудниках имеются установки (такие как вентиляторы главного проветривания, шахтные подъемные машины), электроприводы которых эксплуатируются на чистом воздухе и в сухих помещениях. Исходя из способа защиты от окружающей среды электродвигатели приводов машин и установок шахт и рудников могут иметь

открытое, защищенное, закрытое, взрывозащищенное и герметическое исполнения.

Конструкция электродвигателей разнообразна. Корпуса их мощные и иногда имеют прямоугольную форму. По конструктивному исполнению двигателей особое место занимают встроенные двигатели. Это электродвигатели, встроенные в корпус вентилятора, барабана ленточного конвейера или лебедки.

### 1.3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

#### 1.3.1. Комбайновые электродвигатели

Для привода угольных очистных комбайнов и комплексов применяются специальные рудничные взрывобезопасные комбайновые электродвигатели. Это асинхронные короткозамкнутые двигатели серии ЭДК, ЭКВ, ЭДКО и ЭДКОР. Конструкция этих двигателей существенно отличается от взрывобезопасных электродвигателей общего применения как формой, так и повышенной жесткостью корпуса.

К переднему и заднему торцам электродвигателя крепятся редукторы подающей и режущей частей машины, имеющие прямоугольную форму. Поэтому и корпус комбайнового двигателя имеет прямоугольную форму и достаточно жесткую конструкцию. Он выполняется стальным — литым или сварным.

Электродвигатели ЭДКО4Р-МК67У5, 1ЭДО5РУ5, ЭДКО4-75У5, ЭДКО3,5-40У5 и ЭКВ3,5-125У5 взрывобезопасные (РВ) без сочленения их с корпусными узлами машин. Остальные же двигатели — взрывобезопасные только в сочленении с корпусами машин.

Комбайновый электродвигатель имеет два конца вала: один — для привода режущей части комбайна, а другой — для привода подающей части. Оба конца вала рассчитываются на полную нагрузку, т. е. на передачу полной мощности электродвигателя.

Электродвигатели этих серий выпускаются на мощности от 30 до 315 кВт с синхронной частотой вращения 1500 об/мин в пяти габаритах, определяемых высотой корпуса, мм: 310, 350, 400, 450 и 500, регламентируемые мощностью угольных пластов, в которых должен работать угольный комбайн.

Номинальный режим работы комбайновых двигателей — продолжительный. Однако допускается их эксплуатация в кратковременном режиме с длительностью периода неизменной нагрузки в 60 мин.

Комбайновые электродвигатели изготавливаются на напряжение 380/660 В, только на напряжение 660 В и на напряжение 660/1140 В. Они имеют высокую перегрузочную способность и высокие пусковые моменты при сравнительно низких пусковых токах. Кратность начальных пусковых моментов  $M_n/M_{ном}$  таких электродвигателей находится в пределах 2,0—2,5; кратности

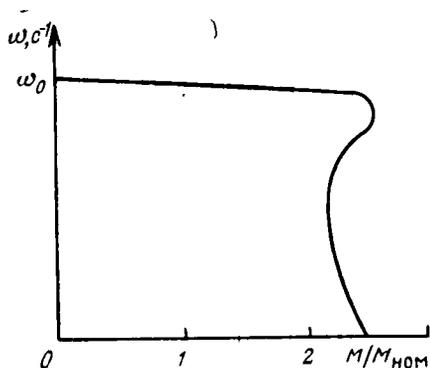


Рис. 1.1. Механическая характеристика комбайновых двигателей

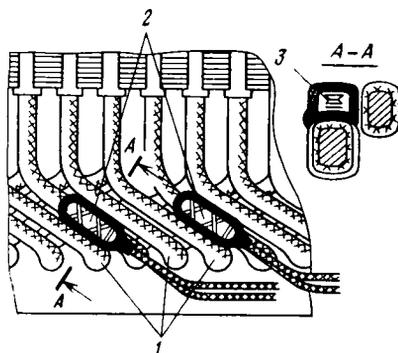


Рис. 1.2. Расположение датчиков ДТР-3М на обмотке статора: 1 — лобовые части обмоток статора; 2 — датчик; 3 — размыкающий контакт

максимальных моментов  $M_{\max}/M_{\text{ном}}$  — 3,0—3,5; кратности пусковых токов  $I_{\text{п}}/I_{\text{ном}}$  в пределах 5—6. Характерные механические характеристики комбайновых электродвигателей приведены на рис. 1.1.

Способ охлаждения комбайновых электродвигателей может быть воздушным и водяным.

Электродвигатели серии ЭДК имеют воздушное охлаждение: наружное естественное и внутреннее. Внутреннее охлаждение представляет собой замкнутую аксиальную систему, в которой циркуляция воздуха осуществляется центробежным вентилятором и вентиляционными лопатками ротора.

Электродвигатели серий ЭДКО и ЭДКОР имеют как внутреннюю, так и наружную вентиляцию. Наружная вентиляция осуществляется вентилятором, насаженным на вал ротора.

Водяное охлаждение имеют электродвигатели серии ЭКВ. Они охлаждаются проточной водой, поступающей по специальным каналам корпуса. Вода, идущая для охлаждения двигателя, берется из системы орошения комбайна.

Тяжелый режим работы (частые пуски, технологические перегрузки, опрокидывание) комбайновых двигателей, а также возможность застыковки вентиляционных отверстий или кратковременный перерыв в подаче охлаждающей воды могут вызвать недопустимый перегрев двигателя и привести к выходу его из строя.

Поэтому необходима температурная защита комбайновых электродвигателей. Для этой цели применяются датчики ДТР-3М (рис. 1.2), устанавливаемые непосредственно на лобовых частях двух фаз статорных обмоток и реагирующие на абсолютную температуру изоляции обмоток. Размыкающий контакт датчика температуры находится в цепи катушки линейного контактора магнитного пускателя, от которого получает пита-

ние двигатель. Обмотка статора комбайновых электродвигателей имеет изоляцию класса F типа «Монолит».

Роторы электродвигателей — короткозамкнутые, имеют двухклеточные пазы, залитые алюминием. Это позволяет иметь лучшие динамические характеристики двигателя в связи с более низким моментом инерции ротора из-за его небольшой массы.

Обслуживание комбайновых двигателей на напряжении 1140 В не отличается от обслуживания двигателей на 660 В. Разница лишь в том, что перед спуском двигателя в шахту его изоляция проверяется мегомметром на 2,5 кВ. Это сопротивление в холодном состоянии должно быть не менее 20 МОм.

В условных обозначениях электродвигателей единой серии Э(ЭД) указываются: первая цифра — порядковый номер; Э или ЭД — электродвигатель; К — комбайновый; В — водяное охлаждение; О — обдуваемый. Следующая за буквой цифра — высота двигателя в дециметрах; буква Р означает, что двигатель относится к новому ряду; следующие цифры после тире — области основного применения по типу очистной машины или заводская модификация у двигателей, спроектированных до 1971 г., и мощность двигателя (кВт) у разработывавшихся с 1971 г.; У — климатическое исполнение; последняя цифра — категория размещения двигателей по ГОСТ 15150—69 и ГОСТ 15543—70.

Дальнейшее усовершенствование комбайновых электродвигателей идет в направлении повышения их мощностей при тех же габаритах, улучшении моментных показателей. Это может быть достигнуто применением новых активных и изоляционных материалов, дальнейшей интенсификацией охлаждения. В перспективе применение диэлектрической жидкости, позволяющей в значительной степени повысить эффективность охлаждения и увеличить его мощность при тех же размерах.

### 1.3.2. Конвейерные электродвигатели

Для привода скребковых конвейеров в угольных шахтах, опасных по газу или пыли, применяются специальные электродвигатели серии ЭДКОФ мощностью от 37 до 110 кВт при синхронной частоте вращения 1500 об/мин десяти модификаций, а с 1979 г. выпускаются двигатели только шести модификаций. Эти двигатели рассчитаны для работы в продолжительном режиме. Характерная особенность этих двигателей — высокая перегрузочная способность и высокий пусковой момент при сравнительно низких пусковых токах. Кратности начальных пусковых моментов  $M_n/M_{ном}$  находятся в пределах 2,5—3,0; кратности максимальных моментов  $M_{max}/M_{ном}$  — 2,7—3,0; кратности пусковых токов  $I_n/I_{ном}$  — 6,0—6,5.

Конструктивно конвейерные двигатели серии ЭДКОФ выполнены в цилиндрической оребренной сварной станине с фланцем с одной стороны.

Охлаждение электродвигателей воздушное. Наружная станина охлаждается внешним вентилятором, насаженным на вал ротора, а внутреннее охлаждение осуществляется за счет циркуляции воздуха, производимой вентиляционными лопатками ротора.

Электродвигатели серии ЭДКОФ имеют два ввода силовых кабелей и по одному вводу для кабеля дистанционного управления. Применение двух вводов позволяет осуществлять транзитное питание и одновременный пуск электродвигателей от одного пускателя в многодвигательных приводах, т. е. когда на одном механизме работает несколько приводных двигателей.

Коробка вводов имеет шесть силовых зажимов, позволяющих осуществлять переключение обмоток статора с треугольника на звезду при напряжениях 380/660 или 660/1140 В. Для подключения реле температуры и цепи управления в коробке вводов имеются дополнительно три зажима.

Для привода шахтных скребковых конвейеров также серийно выпускается электродвигатель ВРТ180 мощностью 30 кВт.

Условные обозначения электродвигателей единой серии ЭДКОФВ-53/4-У2-5 расшифровываются следующим образом: Э — электрический, Д — двигатель, К — конвейерный, О — обдуваемый, Ф — фланцевый, В — на номинальное напряжение 1140 В; первая цифра — условное обозначение габарита, вторая — условная длина статора; цифра после знака дроби — число полюсов обмотки статора; У или Т — климатическое исполнение; цифры после климатического исполнения — категории размещения.

### 1.3.3. Электродвигатели взрывобезопасные серий ВР и ВАО

Электродвигатели серии ВР предназначены для приведения в движение рабочих механизмов погрузочных машин, маневровых лебедок, вентиляторов местного проветривания, работающих в условиях взрывоопасной среды. Электродвигатели этой серии, предназначенные для привода механизмов хода и подъема ковша породопогрузочных машин, имеют мощность от 15 до 55 кВт с синхронной частотой вращения 1500 об/мин. Режим работы таких двигателей повторно-кратковременный с ПВ-25 % при числе включений в 1 ч до 600 при полной нагрузке. Механические характеристики двигателей мягкие, но с достаточно высоким пусковым моментом  $M_n/M_{ном} = 1,8 \div 2,3$ . Такая форма механических характеристик получается за счет того, что короткозамкнутый ротор залит специальным алюминиевым сплавом с высоким удельным электрическим сопротивлением, например сплавом АКМЦ-10-2. По способу монтажа исполнение двигателей — фланцевое.

Станина, подшипниковые щиты изготавливаются стальными, чтобы повысить их механическую прочность, так как при работе

погрузочной машины все ее узлы подвержены тряске и вибрациям. Статорные обмотки имеют усиленную масло- и нагревостойкую изоляцию класса Н.

Для привода маневровых лебедок применяются специальные двигатели мощностью от 3 до 13 кВт. Режим работы повторно-кратковременный с продолжительностью включения  $PB = 25 \div 40 \%$ . Допустимое число включений при полной нагрузке в 1 ч 150—500.

Охлаждение воздушное: внутреннее — лопатками ротора, наружное — собственным вентилятором, расположенным на валу двигателя и защищенным кожухом.

Электродвигатели серии ВР предназначены также для привода вентиляторов местного проветривания. Это двигатели специальной конструкции, позволяющей встраивать их в вентиляционную систему. Двигатели имеют номинальное напряжение 660 В и синхронную частоту вращения 1500÷3000 об/мин. Мощность этих двигателей находится в пределах от 2,2 до 110 кВт. Режим работы — продолжительный. Эти двигатели по сравнению с базовыми двигателями имеют большую мощность при тех же габаритах. Это объясняется тем, что рабочее колесо вентилятора насаживается на вал двигателя и он при работе находится в основном потоке воздуха, идущего от рабочего колеса вентилятора. Омывающая электродвигатель струя воздуха создает перепад давления между внутренней и наружной частями двигателя, под действием которого из подшипниковых узлов начинает вытекать смазка наружу и внутрь двигателя. Для исключения этого подшипниковый узел со стороны, противоположной рабочему концу вала, плотно закрывается глухой крышкой.

Электродвигатели серии ВАО предназначены для работы в среде, опасной по газу или угольной пыли. Они применяются в качестве электропривода предохранительной лебедки, насоса орошения, кабелеукладчика, лесодоставочной лебедки, лебедки 1ЛГНК, рабочих и подпиточных насосов насосной станции крепи очистных комбайнов и комплексов.

Конструктивно электродвигатели серии ВАО выполнены закрытыми в ребристом корпусе с наружным обдувом от собственного вентилятора.

Электродвигатели серии ВАО мощностью от 132 до 315 кВт предназначены для работы в продолжительном режиме на стационарных установках. Питание таких двигателей мощностью до 200 кВт производится напряжением 380 и 660 В, а двигателей мощностью свыше 200 кВт — напряжением 660 В. Электродвигатели мощностью от 200 до 2000 кВт предназначены для приводов насосов, углесосов, вентиляторов и других механизмов, работающих в продолжительном режиме. Номинальное напряжение питания в этом случае 6 кВ. Условные обозначения электродвигателей серий ВР и ВАО: В — взрывобезопасный; Р — рудничный; А — асинхронный; О — обдуваемый.

### 1.3.4. Электродвигатели общепромышленного исполнения

Такие электродвигатели на шахтах и рудниках могут быть использованы в качестве привода подъемных машин, вентиляторов главного проветривания и др.

Электродвигатели, применяемые для привода рудничных подъемных машин, выпускаются электротехнической промышленностью серийно и изготавливаются с фундаментной плитой (рамой).

В качестве электропривода переменного тока в зависимости от мощности и типа подъемной машины применяются асинхронные двигатели с фазным ротором серии АК.

Электродвигатели незащищенного исполнения серии АКН устанавливаются на двух стояковых, литых, разъемных подшипниках скольжения с кольцевой смазкой, с двумя концами вала: один — для присоединения к редуктору подъемной машины при помощи полумуфты, другой — для сочленения с тахогенератором через клиноременную передачу. Исполнение двигателя — открытое с самовентиляцией. Обмотка статора имеет шесть выводов для подсоединения к сети 6 или 3 кВ. Она двухслойная петлевая с изоляцией класса А, а ротора — класса В. Контроль температуры обмоток статора двигателя ведется с помощью термореле, а подшипников — термосигнализаторами.

Электродвигатели серии АКН входят в комплект шахтных подъемных машин мощностью от 200 до 1250 кВт с синхронной частотой вращения от 250 до 600 об/мин.

Электродвигатели серии АКЗ в защищенном исполнении предназначены для привода подъемных машин малых мощностей от 55 до 320 кВт на напряжении 220/380, 380, 500 и 3000 В. Эти электродвигатели более быстроходные (600—1000 об/мин).

Для электропривода шахтных подъемных машин на постоянном токе серийно выпускаются электродвигатели постоянного тока независимого возбуждения серий ПБК и П 21-, 23- и 26-го габаритов. Электродвигатели этих серий тихоходные (24—40 об/мин), имеют закрытое исполнение с принудительной вентиляцией от отдельного вентилятора и предназначены для крупных шахтных подъемных машин мощностью до 4000 кВт в одно — или двухдвигательном исполнении.

Быстроходные генераторы постоянного тока независимого возбуждения серий П, ГП, МП (375—1000 об/мин) применяются для питания электродвигателей постоянного тока серий ПБК и П. Эти генераторы имеют два свободных вала. Один предназначен для соединения с валом приводного синхронного двигателя, а другой — соединяется с возбудителем для питания обмоток возбуждения генератора, подъемного двигателя и цепей станции управления.

Для привода генераторов постоянного тока используются синхронные двигатели серии СДН. Они также имеют два свободных вала: один — для соединения с возбудителем синхрон-

ного двигателя, а другой — для соединения с валом генератора постоянного тока. Возбудитель синхронного двигателя представляет собой машину постоянного тока серии П параллельного возбуждения мощностью 19—35 кВт.

Синхронные двигатели серии СДН могут быть использованы для привода механизмов, не требующих регулирования скорости (мощные насосы, компрессоры, мельницы и др.). Аналогичное назначение имеют синхронные двигатели серии СДНЗ закрытого исполнения. Эти двигатели могут быть установлены в загрязненных, запыленных и взрывоопасных помещениях. Двигатели этой серии выпускаются на мощности 1250 кВт и выше с номинальным напряжением 10 кВ.

Синхронные двигатели СД и СДЗ предназначены для приводов шахтных вентиляторов главного проветривания. Это двигатели мощностью 75—2000 кВт с синхронной частотой вращения (750—1500 об/мин). Номинальное напряжение 380/660 В для двигателей мощностью до 250 кВт и 6 кВ — для двигателей большей мощностью. Пуск синхронных двигателей — асинхронный, с возбудителем, включенным через разрядный резистор.

Прямой пуск синхронного или асинхронного двигателя сопровождается значительными пусковыми токами, которые вызывают увеличение падения напряжения в питающей сети. Вызванное этим снижение напряжения не должно превышать 30 % при редких пусках и раздельном питании силовой и осветительной нагрузок. Если же эта величина при пуске становится больше, то необходимо предусматривать мероприятия, позволяющие ограничить пусковые токи. К таким мероприятиям относятся: введение в цепь статора синхронного или асинхронного двигателя пусковых резисторов или дросселей, а также автотрансформаторов.

В условных обозначениях синхронных двигателей серий СД, СДЗ, СДН и СДНЗ указывается: СД — синхронный двигатель; следующая буква — исполнение (Н — нормальное, З — закрытое); первая цифра — условный диаметр; вторая цифра после дефиса — активная длина сердечника статора, см; третья цифра после дефиса — число полюсов.

Электродвигатели серии 4А предназначены для диапазона мощностей от 0,12 до 400 кВт с частотой вращения от 600 до 1500 об/мин. Они могут быть закрытого и защищенного исполнения на напряжения 220/380 и 380/660 В. Электродвигатели этой серии имеют три модификации: двигатели с повышенным пусковым моментом, двигатели с повышенным скольжением и многоскоростные двигатели.

Двигатели с повышенным моментом могут быть использованы для приводов, имеющих большие статические и инерционные моменты в момент пуска (компрессоры, конвейеры, насосы). Роторы этих двигателей имеют двойную клетку, залитую алюминием, обеспечивающую повышение пускового момента и снижение пускового тока.

Двигатели с повышенным скольжением используются для приводов механизмов, работающих в повторно-кратковременном режиме с частыми пусками. Такие двигатели имеют мягкую характеристику. Для получения таковой ротор двигателя изготовляется с уменьшенными размерами пазов, заполненных специальным сплавом повышенного сопротивления.

Многоскоростные двигатели предназначены для привода механизмов со ступенчатым регулированием частоты вращения от 500 до 3000 об/мин. Регулирование скорости привода достигается изменением схемы соединения обмоток статора. Имеются двигатели: двух-, трех- и четырехскоростные.

Электродвигатели серии 4АК, АК, АКЗ — это электродвигатели с фазным ротором. Они предназначены для электроприводов, требующих регулирования скорости, а также не требующих регулирования скорости, но имеющих тяжелые условия пуска (мощные ленточные конвейеры).

В условных обозначениях двигателей серии 4А (например, 4АР200L6УЗ) указывается: первая цифра — порядковый номер серии; А — вид двигателя (асинхронный); Р, С или В — модификация двигателей (Р — с повышенным пусковым моментом, С — с повышенным скольжением, В — встроенные двигатели); Н — конструктивное исполнение по способу защиты от окружающей среды (Н — защищенные: при отсутствии данной буквы — закрытые обдуваемые); А или Х — исполнение двигателя по материалу станины и щитов (А — алюминиевые; Х — из чугуна и алюминия; отсутствие А и Х — чугунные или стальные); вторая цифра — высота по оси вращения, мм; индекс S, М или L — размер по длине станины (S — короткая длина, М — средняя, L — большая); третья цифра — число полюсов (2, 4, 6, 8, 10 и 12); У — климатическое исполнение (У — умеренный, Т — тропический); последняя цифра — категория размещения.

Для аккумуляторных и контактных электровозов электротехнической промышленностью выпускаются электродвигатели серий МТ, ЭДР, ДПТР и ЭТ в рудничном повышенной надежности и в нормальных исполнениях на напряжение питания до 250 В. Это электродвигатели постоянного тока с последовательным возбуждением.

#### 1.4. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Применяемые в угольной промышленности электроприводы выполняются как с двигателями переменного, так и постоянного тока. В последнем случае для их питания требуется постоянный ток, который может быть получен из переменного путем его преобразования. В электроприводах переменного тока, требующих регулирования скорости, необходимо преобразование тока одной частоты и напряжения в переменный ток другой частоты и напряжения. Иными словами, для преобразования электрической энергии промышленной частоты в энергию постоянного

тока или переменного с регулируемой частотой и напряжением требуются специальные устройства, которые называются преобразователями электрической энергии.

Преобразователи подразделяются на электромашинные и статические. Электромашинные преобразователи — это преобразователи электрической энергии, состоящие из электрических машин. Примерами электромашинных преобразователей могут служить генераторы постоянного или переменного тока, электромашинные усилители, приводимые во вращение асинхронным или синхронным двигателем. Статические преобразователи — это преобразователи электрической энергии, не имеющие вращающихся частей. К ним относятся полупроводниковые управляемые или неуправляемые (диоды, тиристоры, симисторы) или электронные (тиратроны, газотроны, экситроны, игнитроны) вентили, магнитные усилители.

В качестве примера электромашинного преобразования электрической энергии могут служить следующие системы:

генератор — двигатель переменного тока, электромашинный усилитель — двигатель переменного тока, служащие для преобразования переменного тока в постоянный;

электромашинный преобразователь с синхронным генератором для преобразования переменного тока промышленной частоты и напряжения в переменный ток другой частоты и напряжения.

Известные недостатки электромашинных преобразователей, такие как высокая установленная мощность электрических машин, низкий к. п. д., высокие эксплуатационные расходы и сложность обслуживания, привели к замене их на системы электроприводов со статическими преобразователями. К ним относятся следующие системы:

магнитный усилитель — неуправляемый выпрямитель — двигатель постоянного тока;

управляемый выпрямитель — двигатель постоянного тока;

вентильный преобразователь частоты — двигатель переменного тока и др.

Из статических преобразователей наибольшее распространение получили вентильные, так как они имеют меньшие капитальные и эксплуатационные затраты, высокий к. п. д., более длительный срок службы, высокое быстродействие и меньшие габариты и массу.

*Вентильные преобразователи постоянного тока* служат для питания обмоток возбуждения и якорных цепей двигателей постоянного тока в том случае, когда требуется иметь большой диапазон регулирования скорости и высокое качество протекания переходных режимов электропривода.

Для указанных потребителей силовые схемы вентильных преобразователей могут быть: нулевые или мостовые, однофазные или трехфазные. Выбор той или иной схемы преобразователя должен исходить из [35, 47]:

обеспечения допустимых пульсаций в кривой выпрямленного напряжения;

ограничения числа и величины высших гармонических напряжений в сети переменного тока;

высокого использования силового трансформатора.

Общеизвестно, что пульсирующее выпрямленное напряжение преобразователя создает пульсирующий ток двигателя, нарушающий нормальную коммутацию двигателя. Кроме того, пульсации напряжения вызывают дополнительные потери в двигателе, что приводит к необходимости завышения его мощности.

Улучшение коммутации и уменьшение потерь в электродвигателе может быть достигнуто либо увеличением числа фаз выпрямителя, либо введением сглаживающей индуктивности, либо конструктивным усовершенствованием двигателя.

Если преобразователь предназначен для питания якорной цепи двигателя, обладающей незначительной индуктивностью, наиболее рациональными его силовыми схемами являются трехфазные: двойная трехфазная нулевая с уравнильным реактором, мостовая (рис. 1.3).

Для питания обмоток возбуждения двигателей постоянного тока, обладающих значительной индуктивностью, силовые схемы вентильных преобразователей могут быть как трехфазные нулевые, так и мостовые однофазные или трехфазные (рис. 1.4).

Из трехфазных схем выпрямления наиболее широкое распространение получила трехфазная мостовая (рис. 1.3, б). Достоинствами этой схемы выпрямления являются: высокое использование согласующего трехфазного трансформатора (коэффициент использования  $k_n=1,045$ , в то время как у схемы на рис. 1.3, а  $k_n=1,26$ ), наименьшая величина обратного напряжения на вентилях  $k_{обр}=1,045$ , а для других схем этот коэффициент равен 2,1.

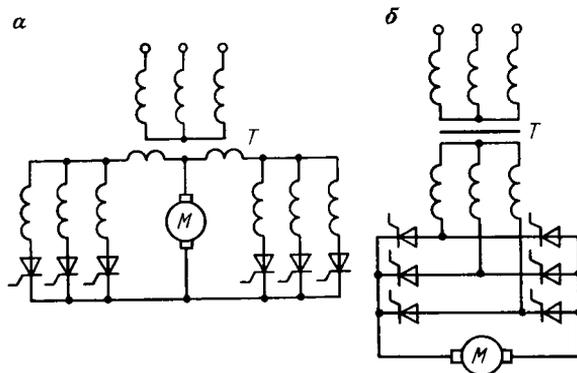


Рис. 1.3. Силовые схемы трехфазных тиристорных преобразователей: а — двойная трехфазная нулевая с уравнильным реактором; б — мостовая

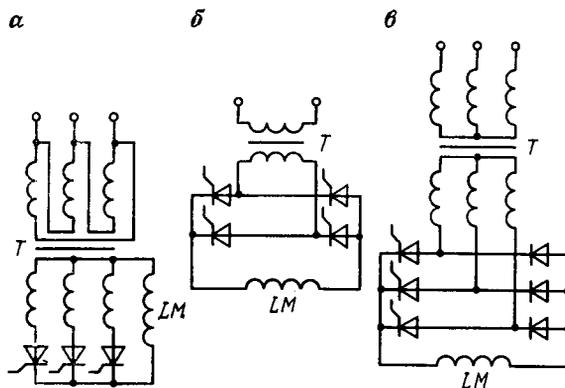


Рис. 1.4. Схемы тиристорных выпрямителей для питания обмоток возбуждения:

*а* — трехфазная нулевая; *б* — однофазная мостовая; *в* — трехфазная полууправляемая мостовая

Для электроприводов больших мощностей, которыми являются электроприводы шахтных подъемных машин, снижение пульсаций выпрямленного напряжения достигается параллельным или последовательным соединением выпрямительных мостов. В этом случае питание выпрямительных мостов производится либо от одного трехобмоточного трансформатора, либо от двух двухобмоточных трансформаторов. В первом случае первичная обмотка трансформатора соединена в «звезду», а вторичные одна — в «звезду», другая — в «треугольник». Во втором случае один из трансформаторов соединен по схеме «звезда—звезда», а второй — по схеме «треугольник—звезда». В связи с тем, что первичные или вторичные обмотки трансформаторов имеют разные схемы соединения, выпрямленное напряжение одного моста будет иметь пульсации, сдвинутые по фазе на угол  $\pi/6$  относительно пульсаций выпрямленного напряжения другого моста. В результате суммарное выпрямленное напряжение на якоре двигателя будет иметь пульсации, частота которых в 2 раза выше частоты пульсаций каждого моста. Уравнение мгновенных значений выпрямленных напряжений параллельно соединенным мостам производится уравнивающим реактором. При последовательном соединении выпрямительных мостов схема работает аналогично.

Для уменьшения числа управляемых вентилях применяются полууправляемые или несимметричные мостовые схемы выпрямления. В этом случае одна половина моста, например катодная группа, является управляемой, а анодная — неуправляемой, т. е. собрана на диодах (см. рис. 1.4, *в*).

Все вышерассмотренные силовые схемы преобразователей неререверсивные, так как обеспечивают протекание тока в нагрузке лишь в одном направлении. Переход от неререверсивной

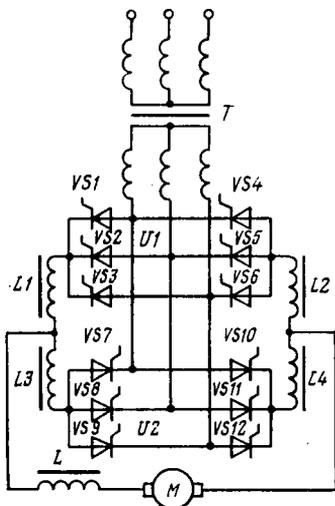


Рис. 1.5. Схема встречно-параллельного включения преобразователей

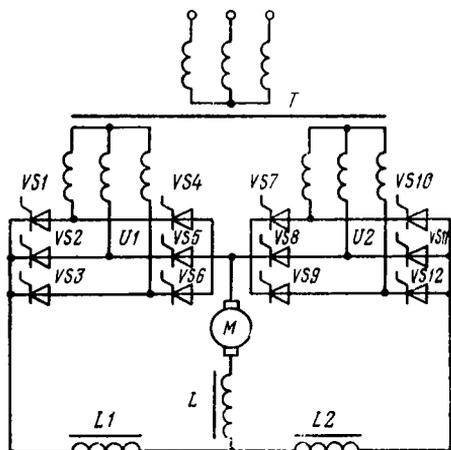


Рис. 1.6. Схема перекрестного включения преобразователей

схемы к реверсивной может быть осуществлен либо применением контактного реверсора, либо установкой двух комплектов выпрямителей. Такие выпрямители выполняются по встречно-параллельной (рис. 1.5) или перекрестной (рис. 1.6) схемам. При встречно-параллельной схеме оба моста  $U1$  и  $U2$  (см. рис. 1.5) питаются от общей обмотки трансформатора и включены встречно и параллельно друг другу. В перекрестной схеме каждый мост питается от отдельной обмотки и включен перекрестно по отношению к нагрузке.

Управление вентилями мостов двухкомлектных реверсивных преобразователей может быть раздельное или совместное. При раздельном управлении управляющие импульсы подаются на вентили только того моста, который в данный момент находится в работе и обеспечивает нужное направление тока в цепи нагрузки. Вентили другого моста при этом заперты. При совместном управлении на вентили обоих мостов управляющие импульсы подаются одновременно, независимо от направления тока в нагрузке. Следовательно, при таком управлении один из мостов работает в выпрямительном режиме, а другой — подготовлен к инверторному режиму. В свою очередь совместное управление может быть согласованным и несогласованным. При согласованном управлении управляющие импульсы подаются на вентили обоих мостов так, чтобы средние значения выпрямленного напряжения у последних были равны между собой. Для выполнения этого условия необходимо соблюдать равенство  $\alpha_v + \alpha_{и} = \pi$ , где  $\alpha_v$  и  $\alpha_{и}$  — углы регулирования вентилями мостов, работающих соответственно в выпрямительном и инверторном режимах.

При несогласованном управлении необходимо, чтобы среднее выпрямленное напряжение моста, работающего в инверторном режиме (инверторная группа вентиляей), превышало напряжение моста, работающего в выпрямительном режиме (выпрямительная группа вентиляей). Это достигается при условии  $\alpha_{\text{в}} + \alpha_{\text{и}} > \pi$ . При изменении угла регулирования выпрямительной группы  $\alpha_{\text{в}}$  угол опережения инверторной группы  $\beta_{\text{и}} = \pi - \alpha_{\text{и}}$  поддерживается неизменным и равным  $\beta_{\text{min}}$ .

Работа реверсивных схем с совместным управлением характеризуется наличием уравнивающего тока в замкнутом контуре, образованном вентилями группы и обмотками трансформатора, который появляется из-за неравенства мгновенных значений напряжений групп во все моменты времени. Для ограничения последнего в схемы вводят уравнивающие дроссели  $L1 - L4$  (см. рис. 1.5).

Преимущества совместного согласованного управления — простота, готовность перехода из одного режима в другой, однозначность статических характеристик, отсутствие режима прерывистых токов даже при малых нагрузках. Однако при таком управлении в схеме протекают большие уравнивающие токи.

Схемы с несогласованным управлением имеют меньшие габариты сглаживающих дросселей, чем при согласованном управлении. Однако при таком управлении снижается диапазон допустимых углов регулирования, что приводит к недоиспользованию трансформатора и к снижению коэффициента мощности.

Вышеперечисленных недостатков лишена схема преобразователя с отдельным управлением. Такой способ управления полностью ликвидирует уравнивающие токи, так как в этом случае подача управляющих импульсов производится только на работающую группу вентиляей. Следовательно, отсутствует необходимость в уравнивающих дросселях и полностью используется габаритная мощность трансформатора, так как выпрямительную группу можно открывать с нулевым значением угла регулирования. Схема с отдельным управлением более сложная, так как требует введения логического переключающего устройства ЛПУ, исключающего возможности одновременной подачи управляющих импульсов на обе группы вентиляей.

*Вентильные преобразователи переменной частоты.* Наиболее экономичный и эффективный способ регулирования скорости электропривода с асинхронным двигателем — изменение частоты питающего напряжения. Асинхронный привод при таком методе регулирования скорости по своим статическим и динамическим свойствам не уступает электроприводу постоянного тока. Поэтому в настоящее время находят широкое распространение преобразователи частоты, которые делятся на две группы: преобразователи с промежуточным звеном постоянного тока и преобразователи с непосредственной связью.

В преобразователе частоты с промежуточным звеном постоянного тока переменное напряжение сети сначала выпрям-

Рис. 1.7. Принципиальные схемы преобразователей частоты:

*а* — со звеном постоянного тока; *б* — с непосредственной связью

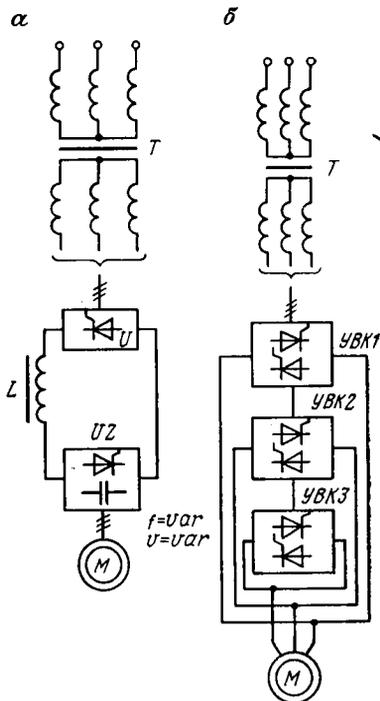
ляется с помощью управляемого выпрямителя, а затем через фильтр подается на автономный инвертор, который вновь преобразует постоянное напряжение в переменное, но с регулируемой частотой.

В схеме преобразователя частоты с промежуточным звеном постоянного тока имеется выпрямитель  $U$  (рис. 1.7, а), который может быть управляемым или неуправляемым. Если регулирование напряжения на нагрузке осуществляется автономным инвертором  $UZ$  или специальным импульсным преобразователем в цепи постоянного тока (на схеме не показан), то выпрямитель  $U$  может быть неуправляемым.

Наиболее ответственным узлом в преобразователях частоты с промежуточным звеном постоянного тока является автономный инвертор. Дело в том, что этот инвертор работает на автономную нагрузку, в которой отсутствует источник э.д.с. Поэтому автономный инвертор снабжен узлом искусственной коммутации, который прерывает ток в вентиле и включает его в нужный момент времени в соответствии с работой схемы управления.

Преобразователь частоты со звеном постоянного тока позволяет изменять частоту на нагрузке как вверх, так и вниз относительно частоты сети в широком диапазоне. Это обстоятельство и определило широкую область применения.

Преобразователь частоты с непосредственной связью (ПЧН) обеспечивает регулирование частоты и амплитуды напряжения на нагрузке без каких-либо промежуточных преобразований. Принципиальная схема электропривода с вентильным преобразователем частоты и непосредственной связью показана на рис. 1.7, б. Управляемые вентильные коммутаторы  $УВК1$  —  $УВК3$  построены из полупроводниковых вентилей. Нагрузкой преобразователя является статор асинхронного короткозамкнутого двигателя. При такой нагрузке ПЧН должен обеспечивать помимо выпрямительного инверторный режим работы вентилей, необходимый для пропускания реактивного тока нагрузки и обеспечения генераторного режима работы



двигателя. Между двигателем и сетью может находиться трансформатор, если требуется согласование напряжения сети с напряжением двигателя.

Управление ПЧН может быть согласованным или отдельным. При согласованном управлении переход из выпрямительного режима в инверторный и наоборот осуществляется автоматически при изменении направления тока и не связан с какими-либо операциями в системе управления. Однако такое управление сопряжено с протеканием уравнительного тока, а следовательно, с необходимостью его ограничения с помощью реакторов. Это усложняет схему электропривода и увеличивает его габариты.

Этих недостатков лишен ПЧН с отдельным управлением, т. е. при таком управлении исключается протекание уравнительного тока, а следовательно, необходимость использования ограничивающих реакторов. Однако отдельное управление требует усложнения схемы управления, заключающееся в том, что при работе одной группы вентиля запрещается подача управляющих импульсов на вентили другой группы. Эти дополнительные устройства запрета, вводимые в систему управления, должны обладать высокой надежностью, так как их сбой в работе приведут к аварии. И только с введением в системы управления интегральных микросхем, позволяющих реализовать сложные логические операции при высокой степени надежности, отдельный способ управления найдет широкое применение.

Рассмотрим некоторые типы преобразователей для электроприводов постоянного и переменного тока, выпускаемых в СССР.

*Тиристорные преобразователи частоты серий ТПЧ, ПЧИ и ЭКТ [47].*

Преобразователи частоты серии ТПЧ выпускаются мощностью до 100 кВ·А с напряжением питания 220/380 В. Они позволяют регулировать частоту в пределах от 5 до 60 Гц и предназначены для питания асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Преобразователи частоты серии ПЧИ выпускаются мощностью от 125 до 600 кВ·А с напряжением питания 380 В. Они обеспечивают регулирование частоты от 2 до 70 Гц. Преобразователи серии ТПЧ позволяют регулировать частоту вращения асинхронных двигателей, работающих в продолжительном режиме, а также обеспечивают плавный пуск и торможение без рекуперации энергии в сеть. Преобразователи серии ПЧИ, кроме регулирования частоты вращения асинхронных двигателей в режимах пуска и установившегося движения, обеспечивают регулируемое торможение с рекуперацией энергии в сеть.

Преобразователи частоты серии ТПЧ построены с промежуточной цепью постоянного тока и с управляемым выпрямителем. Они имеют замкнутую систему регулирования напряжения и частоты с компенсацией падения напряжения в активных

сопротивлениях статора, обеспечивающей постоянство потока статора во всем диапазоне изменения частот.

Преобразователи серии ПЧИ позволяют осуществлять регулирование ниже номинальной частоты в режиме постоянного момента, а выше номинальной — в режиме постоянной мощности. При частоте выше номинальной напряжение поддерживается постоянным.

Новая серия преобразователей ЭКТ разработана на основе автономных инверторов напряжения. Главное ее отличие от серии ТПЧ заключается в том, что система управления, защиты и сигнализации выполнена не на дискретных элементах, а на микросхемах, что позволило улучшить их технические характеристики.

*Тиристорные преобразовательные агрегаты серий АТ(АТР), ТП(ТПР) и ТВ(ТВР).* В автоматизированном электроприводе постоянного тока для питания якорных цепей и обмоток возбуждения применяются тиристорные агрегаты серий АТ(АТР), ТП(ТПР) и ТВ(ТВР).

Тиристорные агрегаты любой серии выполняются в нереверсивном или реверсивном исполнении и обозначаются соответственно АТ (АТР), ТП(ТПР) и ТВ(ТВР).

Питание тиристорных агрегатов осуществляется от сети: трехфазного переменного тока напряжением 380 В через токоограничивающие (анодные) реакторы (для агрегатов на ток до 500 А с номинальным выпрямленным напряжением 460 В) или через силовые трансформаторы (для агрегатов на ток до 500 А с номинальным выпрямленным напряжением 230 В); 6 или 10 кВ через силовой трансформатор (для агрегатов на токи до 800 и 1000 А с номинальным выпрямленным напряжением 230 и 460 В).

Тиристорные агрегаты имеют следующую шкалу номинальных выпрямленных токов: 50, 100, 200, 320, 500, 800, 1000 А для серий ТП(ТПР) и 800, 1000, 1600, 2000, 4000, 5000, 6300 А для серий АТ(АТР).

Структурные схемы управления нереверсивным и реверсивным возбудителями типа ТВ(ТВР) приведена на рис. 1.8, а преобразователи типа ТПН(ТПР) — на рис. 1.9. Схемы управлений включают в себя следующие функциональные блоки: фазового управления *БФУ* для формирования симметричной шестифазной системы импульсов при управлении тиристорным блоком *U* (фазосмещение построено по «вертикальному» принципу с опорным пилообразным напряжением и распределением управляющих импульсов с помощью индивидуальных импульсных трансформаторов); фильтра *БФ* для питания синхронизированного трансформатора блока *БФУ* неискаженным напряжением переменного тока 380 В, 50 Гц; контроля максимального тока *БКМТ* для контроля тока в сети переменного тока; реле *БРЛ* для блокировок и сигнализации тиристорных преобразовательных агрегатов; управления дистанционным

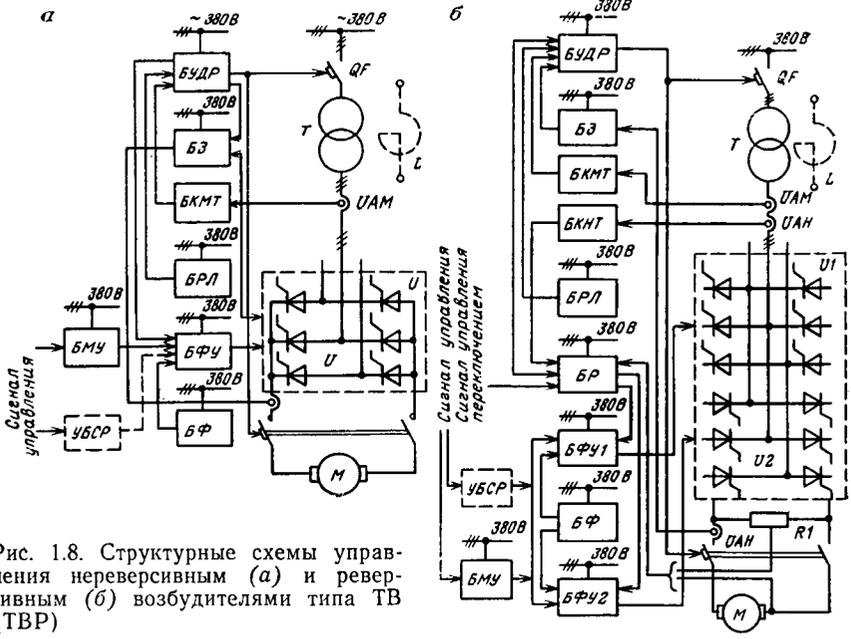


Рис. 1.8. Структурные схемы управления нереверсивным (а) и реверсивным (б) возбудителями типа ТВ (ТВР)

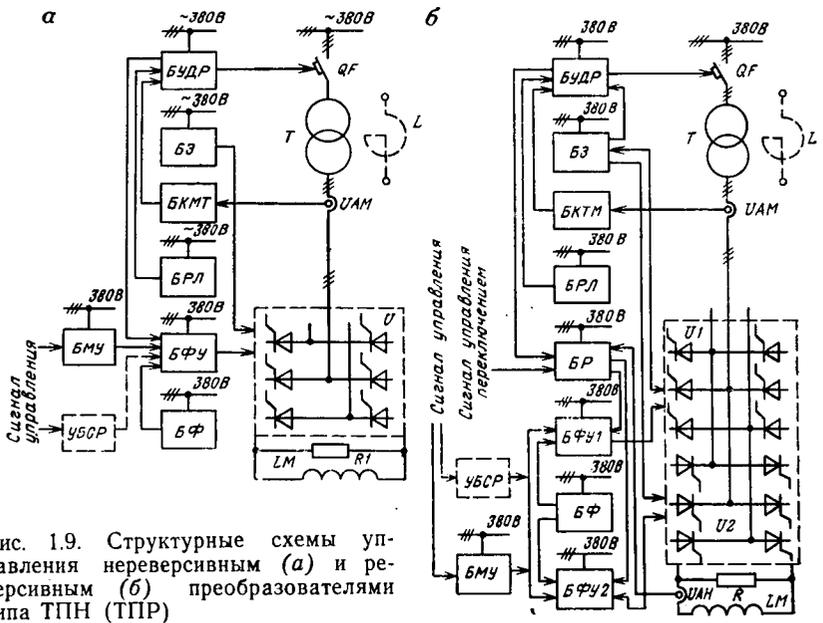


Рис. 1.9. Структурные схемы управления нереверсивным (а) и реверсивным (б) преобразователями типа ТПН (ТПР)

расцепителем *БУДР* для выработки форсированных сигналов отключения автоматических выключателей *QF* при коротких замыканиях, перегрузках и исчезновении питания с блоков управления; защиты *БЗ* для защиты от перенапряжений, перегрузок и токов к. з. на стороне постоянного тока; магнитного усилителя *БМУ* для суммирования и усиления сигналов управления.

Контроль номинального и максимального тока ведется с помощью датчиков *УАН* и *УАМ*.

Структурные реверсивные схемы от нереверсивных отличаются наличием в схемах блока реверса *БР*, блока контроля нулевого тока *БКНТ* и двух блоков *БФУ1* и *БФУ2*. Блок *БКНТ* предназначен для реверса и в сочетании с блоками *БФУ1* и *БФУ2* обеспечивает раздельную работу выпрямительных групп реверсивного агрегата. При подаче команды на реверс изменяется полярность управляющего сигнала. Ток нагрузки уменьшается до значения, близкого к нулю, а затем на блок фазового управления одной группы поступает разрешение на выработку управляющих импульсов и одновременно — запрет генерации отпирающих импульсов на блок фазового управления другой группы.

Для согласования напряжения сети с напряжением нагрузки в схемах используется трансформатор *T*. При его отсутствии в схему включается дроссель насыщения *L*.

При аварийном отключении автоматического выключателя *QF* от блока *БУДР* через блок реверса *БР* поступает сигнал, запрещающий генерацию управляющих импульсов обоих блоков *БФУ1* и *БФУ2*.

Структурные схемы управления нереверсивным и реверсивным агрегатами серии АТ (АТР) приведены на рис. 1.10. Пита-

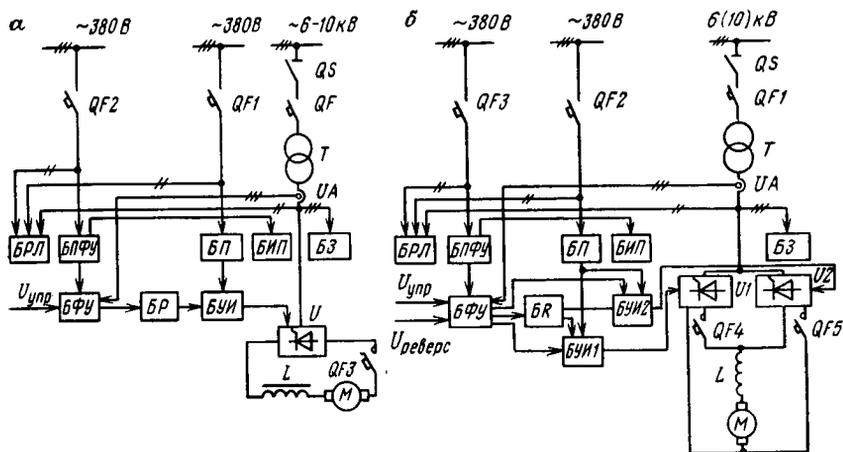


Рис. 1.10. Структурные схемы управления нереверсивным (а) и реверсивным (б) агрегатами серии АТ (АТР)

ние тиристорных агрегатов осуществляется от сети трехфазного переменного тока напряжением 6 или 10 кВ через разъединитель  $QS$ , масляный выключатель  $QF$  и силовой трансформатор  $T$ . В цепь выпрямленного тока включен сглаживающий дроссель  $L$ . Защита тиристорного агрегата от токов к. з. на стороне постоянного тока осуществляется быстродействующим автоматическим выключателем  $QF3$  для неререверсивной схемы, а для реверсивной схемы — выключателями  $QF4$  и  $QF5$ . Защита от токов к. з. в сети переменного тока осуществляется автоматическими выключателями:  $QF2$  — для неререверсивной схемы и выключателями  $QF1$ ,  $QF3$  — для реверсивной схемы.

Кроме уже известных функциональных блоков схемы содержат блоки: питания системы фазового управления  $БПФУ$ , предназначенный для создания опорных напряжений и напряжений питания для всех узлов системы фазового управления  $БФУ$  и получающий питание от сети трехфазного тока через автоматический выключатель  $QF2$  ( $QF3$ ); питания системы усиления и размножения импульсов  $БП$  для обеспечения коллекторного питания выходного каскада усиления импульсов, обратного смещения транзисторов усилителя и смещения импульсных трансформаторов; усиления импульсов  $БУИ$  для выработки системы импульсов управления силовыми тиристорами; измерительных приборов  $БИП$ , предназначенный для контроля напряжения системы управления; резисторов  $БР$ , предназначенный для согласования выхода блока  $БФУ$  и входа блока  $БУИ$ .

Регулирование величины и полярности выходного напряжения тиристорных агрегатов осуществляется изменением сигнала управления  $U_{упр}$ , а изменение полярности — изменением сигнала переключения групп  $U_{реверс}$ .

Переключение групп происходит только при отсутствии тока, разрешение на которое поступает в блок  $БФУ$  от трансформаторов тока.

Контроль правильности работы: блоков питания  $БП$  и  $БПФУ$  осуществляется блоком измерительных приборов  $БИП$ ; блокировки и сигнализации в агрегате — блоком реле  $БРЛ$ ;

В тиристорных агрегатах предусмотрены следующие виды защит: от токов к. з. — быстродействующими плавкими предохранителями ПНБ, включенными последовательно с каждым тиристором;

от перегрузок и опрокидывания инвертора — автоматическими выключателями и электронной защитой, снимающей импульсы управления с тиристоров в случае аварии;

от перенапряжений на стороне переменного тока —  $RC$ -фильтром, установленным в блоке БЗ и подключенным на входе преобразователя;

от коммутационных перенапряжений и ограничения скоро-

сти нарастания анодного напряжения, для чего параллельно каждому тиристорному включению включена цепочка  $RC$ , установленная в ячейке управления вентиляционного блока.

### 1.5. РЕЗИСТОРЫ

Резисторы широко используются в электроприводе для ограничения тока при пуске и торможении, для получения искусственных механических характеристик при регулировании частоты вращения электродвигателей.

Материалом для изготовления резисторов служат сплавы из различных металлов (меди, никеля, стали, хрома, марганца, алюминия), а также чугун. Все они обладают высоким удельным сопротивлением, минимальным изменением сопротивления от температуры, достаточной прочностью, слабой подверженностью коррозии и невысокой стоимостью.

На подъемных установках с приводом переменного тока в качестве пусковых резисторов применяются ящики резисторов открытого исполнения ЯС-1 и ЯС-2 (с чугунными элементами), КФ (с фехралевыми элементами) и нормального рудничного исполнения ЯС-130.

Наибольшее распространение получили ящики резисторов ЯС-2 с чугунными элементами. Чугунные элементы, из которых набираются ящики, представляют собой литые зигзагообразные пластины с отверстиями на концах для крепления. Двадцать чугунных элементов через изоляционные втулки насажены на стержни, которые через изоляторы соединяются с двумя боковыми стойками. Чугунные элементы, образующие ящик сопротивлений, разделены на пять ступеней по четыре элемента в каждой.

Установка ящиков резисторов допускается только в вертикальном положении элементов резисторов, что способствует наилучшей теплоотдаче.

Широко применяются также ящики резисторов КФ с фехралевыми элементами. Они состоят из спиралей фехралевой ленты, которая намотана узкой стороной на ребристые фарфоровые цилиндры. Стержни со спиральями помещаются между двух боковин. Размеры и конструкция боковин такая же, как и у ящиков резисторов ЯС-2. Фехралевые элементы по сравнению с чугунными имеют ряд преимуществ: высокая прочность; большая температура перегрева (до  $850^{\circ}\text{C}$ ).

Резисторы ЯС-130 состоят из трех отдельных ящиков, установленных один на другой и скрепленных между собой.

Пусковые роторные резисторы располагаются в подвальном помещении здания подъемной машины и устанавливаются на стеллажах друг над другом по шесть — восемь штук. Расстояние между стеллажами должно быть не менее 320 мм.

Контактные электровозы оборудуются ленточными фехралевыми резисторами КЛ-2Б-2, состоящими из десяти элементов КФ.

Аккумуляторные электровозы оснащаются пусковыми резисторами ЯСВ-15А, состоящими из девяти элементов, распределенных на два взрывобезопасных ящика. Пусковые резисторы рудничных электровозов размещаются на раме со стороны, противоположной кабине машиниста, в специальной камере, которая защищает их от загрязнения и механических повреждений, или за кабиной машиниста.

Для управления электроприводом переменного тока шахтных подъемных машин и лебедок наряду с металлическим находят применение и жидкостные резисторы. В настоящее время применяются жидкостные резисторы ЖРН-500, ЖРН-1000 и ЖРН-2000 в нормальном исполнении и ВЖР-250 и ВЖР-350Р во взрывобезопасном исполнении.

Применение жидкостного резистора вызвано следующими его достоинствами перед металлическим: обеспечивается плавность пуска и торможения подъемного двигателя; снижаются динамические усилия в механических элементах установки в переходных режимах, а следовательно, увеличивается срок их службы; достигается возможность получения малых скоростей; появляется возможность использования одного типа резистора для широкого диапазона мощностей без каких-либо переделок.

Жидкостный резистор ВЖР (рис. 1.11) представляет собой бак 3, заполненный до определенного уровня электролитом 1. В качестве последнего применяется раствор соды  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  в воде. Величина такого сопротивления зависит от концентрации, температуры и плотности тока, проходящего через него. Наиболее часто употребляемая концентрация электролита — 1—6 %-ный раствор кальцинированной соды.

Подвижные электроды 4 на изоляторах размещены на общем валу. Ток к ним подводится по гибким связям 6 от токо-

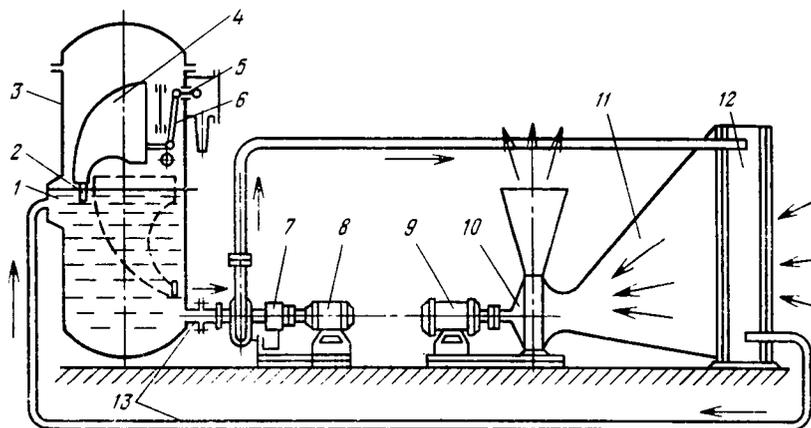


Рис. 1.11. Схема устройства жидкостного реостата ВЖР

ведущих шпилек 5 проходных изоляторов, установленных на стенке бака. Подвижные электроды приводятся в движение либо непосредственно от рукоятки резистора, расположенной на пульте управления подъемной машины, либо от сервопривода. Привод резисторов ВЖР-350А — электрический.

Изменение положения электродов вызывает изменение сопротивления от максимума до минимума. Крайнее верхнее положение, когда в электролит опущены только концы электродов 2, соответствует максимальному сопротивлению резистора. После поворота рукоятки на  $90^\circ$  электроды занимают положение, показанное на рис. 1.11 пунктирными линиями, что соответствует минимальному сопротивлению резистора.

Для поддержания постоянства температуры электролита в процессе его работы предусмотрена система охлаждения. В нее входят: насос 7 с электродвигателем 8, вентилятор 10 с электродвигателем 9 и диффузором 11, теплообменник 12 и трубопроводы 13. Охлаждение электролита происходит следующим образом. Нагретый электролит через отверстие, расположенное в стенке бака, насосом засасывается в трубопровод 13 и перегоняется через теплообменник 12. Теплообменник устанавливается в месте интенсивного обдува воздухом за счет общешахтной депрессии, а также с помощью вентилятора 10 с диффузором 11.

Крупный недостаток жидкостных резисторов — интенсивное испарение электролита при повышенных и длительных перегрузках, вызванное повышением его температуры. Это влечет за собой изменение сопротивления резистора. Поэтому для поддержания температуры электролита в допустимых пределах предусмотрена автоматизация работы вентилятора системы охлаждения. Температура электролита контролируется термосигнализатором.

## 1.6. КОНТРОЛЛЕРЫ И КОМАНДОАППАРАТЫ

Контроллер — аппарат, посредством которого осуществляются переключения в главных цепях двигателя переменного и постоянного тока. Переключения производятся вручную поворотом маховика или рукоятки. Контроллеры бывают двух видов: барабанные и кулачковые. В производстве находятся лишь кулачковые контроллеры.

Командоаппарат выполняет те же функции, что и контроллер, но имеет более легкую контактную систему, так как предназначен для переключения в цепях управления. Благодаря этому появляется возможность дистанционного управления более мощными системами электропривода.

Контроллеры нашли применение в электроприводах электровозов, малых подъемных машин, лебедок и кранов.

На рис. 1.12 показан контроллер КВС-201, которым оборудованы контактные электровозы. Контроллер имеет два бара-

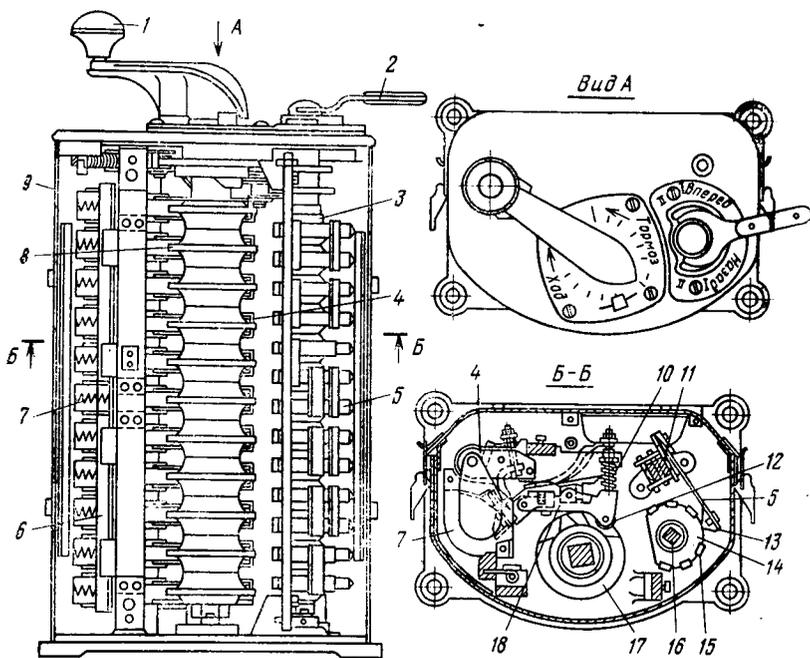


Рис. 1.12. Кулачковый контроллер КВС-201

бана: главный и реверсивный. Главный барабан 8 осуществляет пуск, регулирование скорости, остановку, торможение, реверсивный барабан 3 — изменение направления вращения тяговых двигателей, схему включения двигателей и переход на тормозной режим работы.

Главный барабан приводится во вращение рукояткой 1, установленной на крышке контроллера. На валу главного барабана установлены одиннадцать пластмассовых шайб 17, на которых имеются вырезы 4 и выступы 5. Параллельно шайбам на отдельной стойке 6 имеются одиннадцать различных кулачковых контакторов, установленных на пластмассовых изоляторах. При повороте главного барабана кулачковая шайба 17 нажимает своим выступом на ролик 12 рычага 18, подвижный контакт при этом отходит от неподвижного и происходит размыкание электрической цепи; при подходе ролика к впадине контакты под действием пружины 10 вновь замыкаются.

Контакты контроллера, которые осуществляют разрыв главных цепей, во избежание перекрытия между фазами и для улучшения условий гашения электрической дуги помещаются в асбоцементные камеры 7.

Реверсивный барабан представляет собой вал 16 с укрепленным на нем бакелитовым цилиндром 14, на котором закреплены медные сегменты 15. Параллельно реверсивному барабану

установлена стойка *11* с контактными пальцами *13*, укрепленными на изолированной рейке. Подвижными контактами являются медные сегменты, а неподвижными — пальцы. Реверсивный барабан приводится во вращение съемной рукояткой *2*, установленной также на крышке контроллера. Поворот рукоятки *2* приводит к переключению обмоток двигателя за счет того, что сегменты перекрывают соответствующие пальцы.

Реверсивный барабан имеет семь позиций: «Нулевую», при которой силовая цепь разомкнута, по три положения хода «Вперед» и «Назад». Позиции *I* и *II* «Вперед» и *I* и *II* «Назад» соответствуют включению в работу одного из двух двигателей. Позиция «Вперед» или «Назад» соответствует включению двух двигателей.

Главный и реверсивный барабаны заблокированы между собой механически так, что исключается, во-первых, поворот рукоятки главного барабана, если реверсивный барабан не поставлен в одно из ходовых положений, и, во-вторых, постановка реверсивного барабана в положение «Стоп», если главный барабан стоит на одном из ходовых положений. Кроме того, предусмотрена блокировка, не допускающая переход на электрическое торможение и параллельную работу двигателей, если в работе находится только один двигатель. Таким образом, механическая блокировка устраняет опасность неправильных включений и предохраняет электровоз от аварии.

Для управления аккумуляторными электровозами предназначен контроллер ГР-9А-1, имеющий взрывобезопасное исполнение.

Главный барабан имеет семь позиций, а реверсивный — только три позиции: «Вперед», «Назад» и «Нулевую». Контроллер заключен в стальную оболочку *9*, ввод проводов в которую осуществляется через специальную коробку зажимов, залитую компаундной массой.

Привод малых подъемных машин и лебедок с электроприводом переменного тока осуществляется контроллером КМГ-3310. Он осуществляет управление приводом подъемного двигателя мощностью до 150 кВт с роторным током 300 А и может быть применен в выработках, проветриваемых свежей струей воздуха.

Контроллер имеет семнадцать положений: по восемь «Вперед» и «Назад» и одно «Нулевое». В «Нулевом» положении контроллера замыкается цепь защиты. Предусмотрена блокировка, не допускающая включение подъемного двигателя, если штурвал контроллера находится не в нулевом положении.

Основные технические данные, по которым выбираются контроллеры, — допустимый ток главной цепи при заданной продолжительности включения и допустимое число включений в 1 ч.

Командоконтроллеры предназначены для дистанционного управления асинхронными двигателями и двигателями постоян-

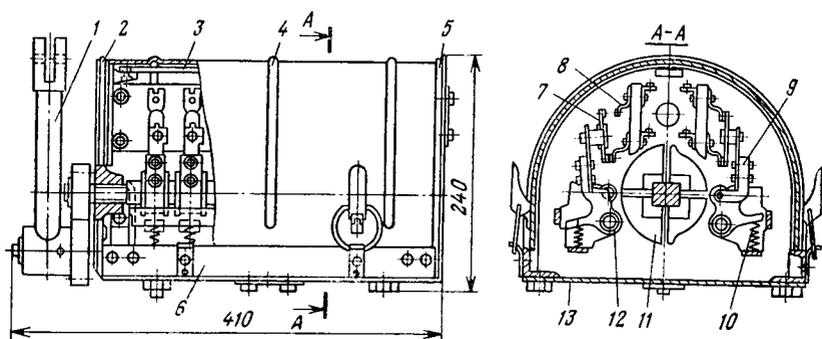


Рис. 1.13. Кулачковый командоаппарат типа КА-5052

ного тока в системе Г — Д. В шахтном подъеме нашли применение следующие типы кулачковых командоаппаратов: КА-5052/2-816 и КА-5052/2-1003. Они отличаются друг от друга только числом цепей (у первых их восемь, а у вторых — десять).

Конструкция кулачкового командоаппарата КА-5052 показана на рис. 1.13. Коммутирующее устройство помещено в корпус, состоящий из двух боковых плит 2 и 5, соединенных между собой угольниками 6 и планкой 3, дна 13 и полукруглой крышки 4. В коммутирующее устройство входят: кулачковый вал с контактными рычагами 9, на которых укреплены подвижные контакты 7 мостикового типа с роликом 12 и пружиной 10, неподвижные контакты 8 и кулачковая шайба, собранная из четырех кулачков 11.

Принцип работы кулачкового командоаппарата аналогичен принципу работы контроллера. Кулачковый вал приводится во вращение рукояткой 1, которая находится на пульте управления подъемной машины, через зубчатую передачу 1:2. Командоаппарат имеет пятнадцать положений: по семь «Вперед» и «Назад» и одно «Нулевое».

Кулачковые командоаппараты обладают следующими недостатками: повышенным износом и недолговечностью контактов; ступенчатостью регулирования; необходимостью постоянного наблюдения и ухода за контактами. Этих недостатков лишены бесконтактные командоаппараты, у которых в качестве основного задающего и регулирующего элемента применены бесконтактные сельсины. Такие командоаппараты получили название сельсинных командоаппаратов.

В командоаппаратах используются сельсины БД-501А или БД-501Б. Первичная обмотка их включена в сеть переменного тока, а снимаемое с двух фаз вторичной обмотки напряжение подается в элементы управления электроприводом. Сельсин работает в режиме потенциал-регулятора, а поэтому выходное напряжение, снимаемое с ротора, пропорционально углу его поворота относительно статора, т. е.  $U_{\text{вых}} = U_{\text{max}} \sin \delta$ , где

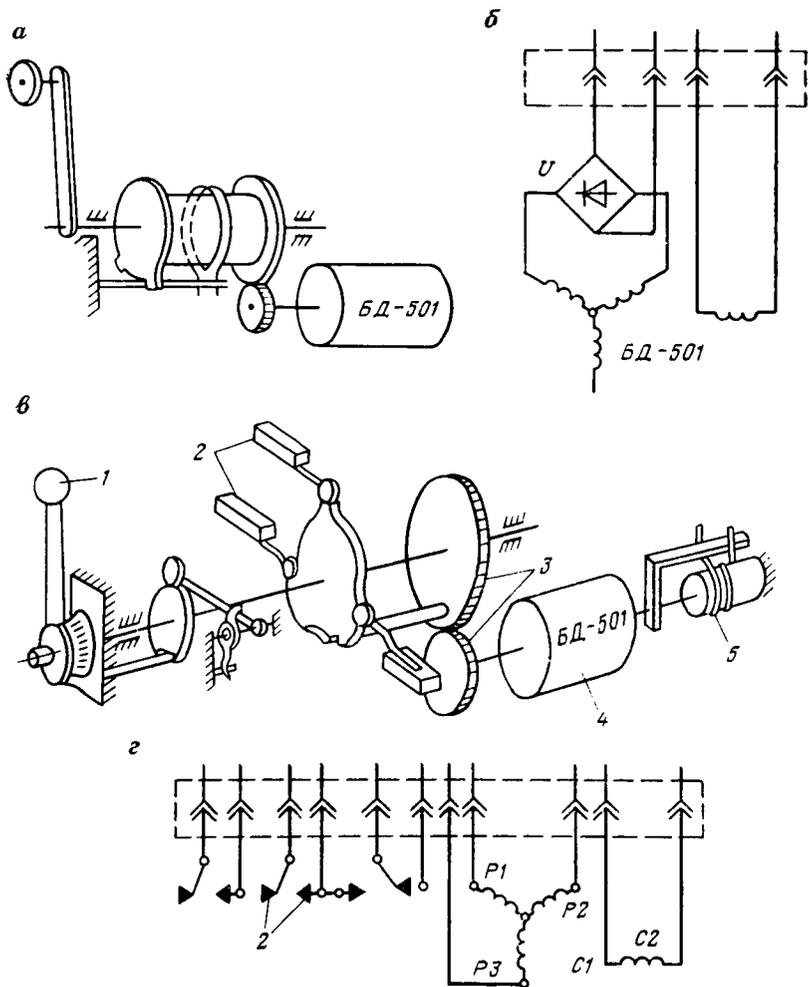


Рис. 1.14. Сельсинные командоаппараты:  
 а — SKAA-111; б — SKAP-112

$U_{\max}$  — максимальное значение вторичного напряжения;  $\delta$  — угол поворота ротора.

ВНИИЭлектроприводом разработаны сельсинные командоаппараты SKAP-112 и SKAA-111 (рис. 1.14). Первый предназначен для ручного управления электроприводом, а второй используется в аппаратах программного управления АКХ и АЗК шахтными подъемными машинами. Кинематические и электрические схемы сельсинного командоаппарата SKAA-111 приведены на рис. 1.14 а и б, а сельсинного командоаппарата SKAP-112 — на рис. 1.14 в и г.

В сельсинном командоаппарате СКАР ротор сельсина 4 приводится в движение рукояткой 1 через редуктор 3 с передаточным отношением 2:1. Это вызвано тем, что угол поворота рычага командоаппарата ограничивается углом в  $30^\circ$  для удобства оператора. Сельсин же используется только в линейной части своей характеристики, и поэтому его ротор поворачивается лишь на  $60^\circ$ . Этим и вызвана установка редуктора с передаточным отношением 2:1.

Конструкцией командоаппарата предусмотрена также «растяжка нуля» в пределах  $5^\circ$ . Перемещение рукоятки в этом пределе обеспечивает срабатывание контакта нулевого положения и контакторов выбора направления движения. Момент срабатывания микропереключателей 2 регулируется перемещением плат, на которых они закреплены.

Вал рукоятки в нулевом положении стопорится фиксатором, а при отклонениях — фрикционной тарельчатой пружиной с регулировочной гайкой. У аппаратов с самовозвратом рукоятки в нулевое положение фрикционная пружина не ставится. Ротор сельсина устанавливается в нулевое положение возвратной пружиной 5, действующей на привод, закрепленный на валу ротора. Угол поворота рукоятки ограничивается упором и составляет  $55^\circ$ .

Основной режим работы приводов постоянного тока шахтных подъемных машин автоматический. При этом командоаппарат ручного управления должен находиться в положении, соответствующем максимальному напряжению на выходе сель-

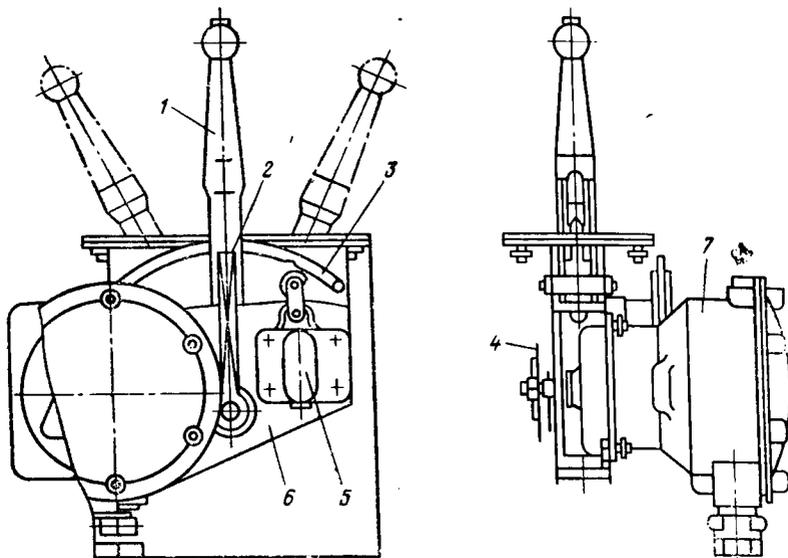


Рис. 1.15. Взрывобезопасный командоаппарат ТКВ

сина (рукоятка управления находится в одном из крайних положений). Регулирование же скорости электропривода подъемной машины осуществляется только программным сельсинным командоаппаратом автоматического управления, связанным с АЗК или АКХ.

Взрывобезопасный командоаппарат ТКВ (рис. 1.15) применяется в комплекте аппаратуры управления гидротормозом АУГТ. Ротор сельсина приводится во вращение рукояткой 1 через зубчатую передачу 4. Рукоятка управления имеет паз, в который вмонтирована дуга 3 с впадиной для фиксации рукоятки в положении «На себя», т. е. «Заторможено». Сельсин закреплен в корпусе 6, имеющем взрывобезопасную оболочку 7.

Если рукоятку командоаппарата поставить в крайнее положение «На себя», то напряжение на выходе сельсина минимальное. В этом положении подъемная машина заторможена, а толкатель 2 нажимает на блокировочный выключатель 5 рабочего тормоза, включенный либо в цепь обмотки предварительного торможения электрического регулятора давления малых машин, либо в цепь промежуточного реле управления тормозом крупных подъемных машин.

### 1.7. РЕЛЕЙНО-КОНТАКТОРНАЯ АППАРАТУРА

В релейно-контакторную аппаратуру входят контакторы и различного рода реле, предназначенные для замыкания и размыкания цепи электрического тока электромагнитами.

Контакторы используются для подсоединения электродвигателей к питающей сети, шунтирования пусковых резисторов, включения электромагнитов рабочего и предохранительных тормозов и других устройств. Управление контакторами ведется командоаппаратами при ручном управлении либо реле при автоматическом управлении. Электрические реле выполняют функции управления и защиты.

Реле управления замыкают и размыкают цепи контакторов в определенной, наперед заданной последовательности, производя необходимые переключения в цепях электродвигателя и обеспечивая необходимый закон изменения их частоты вращения или других параметров в периоды пуска, торможения и установившегося движения.

Реле защиты воздействуют также на цепи контакторов, вызывая с их помощью отключение электродвигателя или других электрических устройств от питающей сети при возникновении недопустимых в них отклонений от нормального режима.

Реле в зависимости от назначения делятся на реле тока, напряжения, времени, частоты, мощности и промежуточные. Промежуточное реле используется тогда, когда целенаправленное реле, имеющее только одну управляющую цепь, должно воздействовать на несколько независимых цепей.

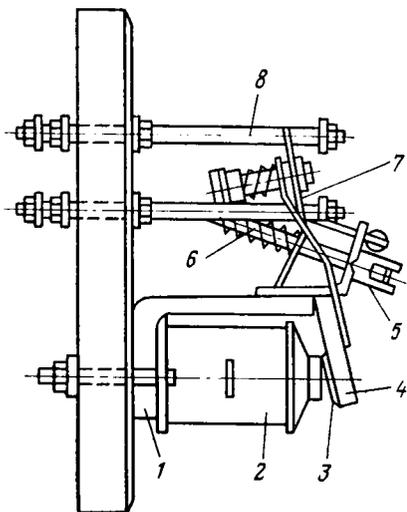


Рис. 1.16. Электромагнитное реле

листов, изолированных друг от друга лаком или бумагой для уменьшения потерь от вихревых токов. Катушки контакторов получают питание от однофазной сети переменного тока напряжением 127, 220 и 380 В. Возникающая вибрация при работе контактора устраняется установкой на сердечнике короткозамкнутого витка.

В качестве реле времени, реле контроля напряжения, реле дуговой блокировки, реле тока, реле опасной скорости и промежуточного реле применяются электромагнитные реле постоянного тока.

Электромагнитное реле (рис. 1.16) состоит из магнитной системы 1, изготовленной из специальной электротехнической стали, представляет собой угольник с прикрепленным к нему сердечником; втягивающей катушки 2 с демпфером в виде медной гильзы, надетой на сердечник или без него; якоря 4 с немагнитной прокладкой 3; подвижного контакта 7; регулировочной гайки 5; пружины 6; неподвижного контакта 8. Контакты могут быть замыкающими и размыкающими.

Выдержка времени реле регулируется изменением толщины немагнитной прокладки 3 или натяжением пружины 6. Реле времени имеют выдержку от 0,25 до 5 с.

## 1.8. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Современные системы автоматизированного электропривода включают в себя электродвигатели, преобразователи, различного рода усилители, датчики механических и электрических величин и корректирующие устройства.

Коммутация силовых цепей постоянного и переменного токов ведется контакторами постоянного тока при тяжелых режимах работы с числом включений в 1 ч до 1500 и контакторами переменного тока с числом включений в 1 ч до 600.

Контакторы постоянного тока имеют магнитную систему, состоящую из сплошной стали. Главные контакты снабжены дугогасительными устройствами. Питание электромагнитных катушек осуществляется напряжением постоянного тока 110 и 220 В.

Магнитопроводы контакторов переменного тока изготовляются из тонких стальных

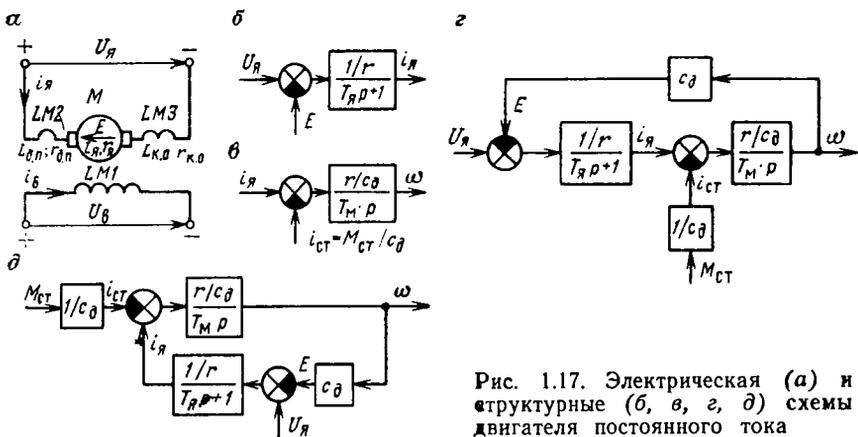


Рис. 1.17. Электрическая (а) и структурные (б, в, г, д) схемы двигателя постоянного тока

Каждый из элементов системы автоматического управления электроприводом обладает различными параметрами, определяющими его свойства: массой движущихся частей, индуктивностью, емкостью, активным сопротивлением цепей и др. Эти параметры могут быть постоянными и переменными. Отношение выходной величины к входной величине элемента в установившемся режиме представляет собой передаточный коэффициент или коэффициент усиления  $K = X_{\text{вых}}/X_{\text{вх}}$ .

Отношение изображения выходной величины  $X_{\text{вых}}(p)$  к изображению входной величины  $X_{\text{вх}}(p)$  при нулевых начальных условиях для каждого элемента или всей системы представляет собой передаточную функцию элемента или системы:

$$W(p) = X_{\text{вых}}(p)/X_{\text{вх}}(p).$$

Передаточная функция элемента или системы позволяет оценить поведение их в переходном или установившемся режиме.

Рассмотрим наиболее распространенные элементы типовых электроприводов машин и установок шахт и рудников.

**Электродвигатели постоянного тока.** На рис. 1.17 показана электрическая схема электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения, в которой *LM1* — независимая обмотка возбуждения, *LM2* — обмотка дополнительных полюсов, *LM3* — компенсационная обмотка двигателя *M*. Управление электродвигателем постоянного тока, как правило, осуществляется изменением подводимого к якорю двигателя напряжения  $U_a$ . Поэтому эта величина в дальнейшем будет рассматриваться как управляющее воздействие для двигателя. В данном случае независимая обмотка возбуждения получает питание от неуправляемого преобразователя, а магнитное состояние машины зависит от тока возбуждения  $i_b$ , определяемого по кривой намагничивания.

Полагая, что реакция двигателя полностью скомпенсирована, вихревые токи в станине и полюсах двигателя пренебрежимо малы, а сопротивления цепей постоянны, для двигателя постоянного тока в переходном режиме можно записать следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} U_{я} - c_{д}\omega &= r i_{я} + L di_{я}/dt; \\ M - M_{ст} &= J d\omega/dt; \\ M &= c_{д} i_{я}; \\ M_{ст} &= c_{д} i_{ст}, \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

где  $U_{я}$ ,  $i_{я}$  — соответственно напряжение и ток якоря двигателя;  $c_{д}\omega = k\Phi\omega = E$  — э.д.с. якоря, В;  $r = r_{я} + r_{д.п} + r_{к.о}$  — полное активное сопротивление якорной цепи, состоящей из активных сопротивлений обмотки якоря  $r_{я}$ , дополнительных полюсов  $r_{д.п}$ , компенсационной обмотки  $r_{к.о}$ , Ом;  $L = L_{я} + L_{д.п} + L_{к.о}$  — полная индуктивность якорной цепи, Гн;  $k = p_n N / 2\pi a$  — конструктивный коэффициент двигателя;  $p_n$ ,  $N$ ,  $a$  — соответственно число пар полюсов, активных проводников и параллельных ветвей якоря;  $\omega$  — угловая скорость двигателя, рад/с;  $\Phi$  — магнитный поток двигателя, Вб;  $M$ ,  $M_{ст}$  — соответственно момент, развиваемый двигателем, и момент статического сопротивления, Н·м;  $J$  — момент инерции привода, включающий в себя момент инерции двигателя и приведенный к валу двигателя момент инерции механизма, кг·м<sup>2</sup>;  $t$  — время, с.

Значения активных сопротивлений двигателя находятся в каталогах, а индуктивность якоря ориентировочно рассчитывается по формуле

$$L_{я} = \gamma \frac{U_{я.ном}}{I_{я.ном} p_n \omega_{ном}},$$

где  $\gamma$  — коэффициент, равный 0,25 для компенсированного и 0,6 для некомпенсированного двигателя.

Переходя к операторной форме записи, когда  $d/dt = p$ , уравнения (1.1) примут вид

$$\left. \begin{aligned} U(p) - c_{д}\omega(p) &= r i_{я}(p) + L p i_{я}(p); \\ M(p) - M_{ст}(p) &= J p \omega(p); \\ M(p) &= c_{д} i_{я}(p); \\ M_{ст}(p) &= c_{д} i_{ст}(p). \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

Из первого уравнения системы (1.2) может быть получена передаточная функция по управляющему воздействию для якорной цепи двигателя:

$$W_1(p) = \frac{i_{я}(p)}{U(p) - c_{д}\omega(p)} = \frac{1/r}{T_{я} p + 1}, \quad (1.3)$$

где  $T_{я} = L/r$  — электромагнитная постоянная времени якорной цепи, с.

Передаточная функция (1.3) представляет собой апериодическое звено, а ее структурная схема показана на рис. 1.17, б.

Из второго уравнения системы (1.2) можно получить передаточную функцию для механической части двигателя:

$$W_2(p) = \frac{\omega(p)}{i_{я}(p) - \frac{M_{ст}(p)}{c_d}} = \frac{r/c_d}{T_m p}, \quad (1.4)$$

где  $T_m = Jr/c_d^2$  — электромеханическая постоянная времени, с.

Передаточная функция (1.4) представляет собой интегрирующее звено, а ее структурная схема показана на рис. 1.17, в.

Совместное решение уравнений системы (1.2) относительно угловой скорости  $\omega$  при  $c_d = \text{const}$  и  $M_{ст} = \text{const}$  приводит к уравнению

$$T_m T_{я} p^2 \omega(p) + T_m p \omega(p) + \omega(p) = \frac{U(p)}{c_d} - \frac{r}{c_d^2} M_{ст}(p). \quad (1.5)$$

Из выражения (1.5) могут быть получены передаточные функции двигателя:

по управляющему воздействию

$$W_y(p) = \frac{\omega(p)}{U(p)} = \frac{1/c_d}{T_m T_{я} p^2 + T_m p + 1}; \quad (1.6)$$

и по возмущающему воздействию

$$W_b(p) = -\frac{\omega(p)}{M_{ст}(p)} = -\frac{r/c_d^2 (T_{я} p + 1)}{T_m T_{я} p^2 + T_m p + 1}. \quad (1.7)$$

Структурные схемы двигателя постоянного тока по управляющему и по возмущающему воздействиям показаны соответственно на рис. 1.17, г и д.

Из выражений (1.6) и (1.7) следует, что характер переходного процесса зависит от соотношения между постоянными времени  $T_m$  и  $T_{я}$ . При скачкообразном изменении подводимого напряжения к якорю двигателя или нагрузки на его валу переходный процесс для частоты вращения двигателя может иметь апериодический или колебательный характер. Если  $T_m < 4T_{я}$ , то переходный процесс является колебательным (кривая 1 на рис. 1.18). При  $T_m \geq 4T_{я}$  переходный процесс приобретает апериодический характер (кривая 2). В последнем случае двигатель можно представить как инерционное звено второго порядка, состоящее из двух последовательно включенных инерционных звеньев первого порядка. Передаточные функции звеньев в этом случае имеют вид:

$$W_{д1}(p) = 1/(T_1 p + 1); \quad W_{д2}(p) = 1/(T_2 p + 1), \quad (1.8)$$

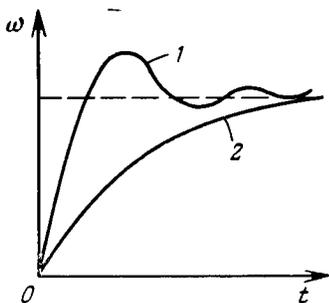
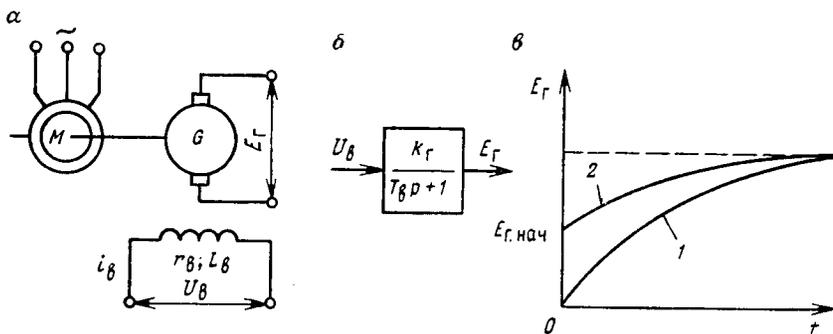


Рис. 1.18. Графики переходных процессов двигателя постоянного тока

Рис. 1.19. Электрическая (а) и структурная (б) схемы и графики переходных процессов (в) генератора постоянного тока



где постоянные времени  $T_1$  и  $T_2$  определены по формулам:

$$T_1 = -\frac{1}{2T_{я}} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{4T_{я}}{T_M}} \right);$$

$$T_2 = -\frac{1}{2T_{я}} \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{4T_{я}}{T_M}} \right). \quad (1.9)$$

Из выражения (1.5) можно найти уравнение установившегося движения двигателя:

$$\omega = \frac{U}{c_d} - \frac{r}{c_d^2} M_{ст}. \quad (1.10)$$

*Генераторы постоянного тока.* Исследование динамических свойств генератора постоянного тока с независимым возбуждением — это установление характера изменения его э.д.с. в переходном режиме. Для этого рассмотрим сначала переходный процесс в обмотке возбуждения, который описывается дифференциальным уравнением:

$$U_B = r_B i_B + L_B \frac{di_B}{dt}, \quad (1.11)$$

где  $U_B$ ,  $i_B$  — соответственно напряжение и ток в обмотке воз-

буждения генератора;  $r_B$ ,  $L_B$  — соответственно активное сопротивление и индуктивность обмотки возбуждения.

Как правило, генераторы постоянного тока работают на ненасыщенной части кривой намагничивания, которую можно считать, пренебрегая незначительным явлением гистерезиса и потоков рассеяния, линейной, а э.д.с. генератора — пропорциональной току возбуждения, т. е.:

$$E_G = k_{G1} i_B, \quad (1.12)$$

где  $k_{G1}$  — коэффициент пропорциональности.

Решив выражение (1.12) относительно  $i_B$ , подставив его в уравнение (1.11) и осуществив переход к операторной форме записи, можно получить передаточную функцию генератора:

$$W_G(p) = E_G(p)/U_B(p) = k_G/(T_B p + 1), \quad (1.13)$$

где  $k_G = k_{G1}/r_B$  — коэффициент усиления генератора по напряжению;  $T_B = L_B/r_B$  — электромагнитная постоянная времени обмотки возбуждения, с.

Из выражения (1.13) следует, что генератор постоянного тока с независимым возбуждением (рис. 1.19, а) представляет собой апериодическое звено первого порядка с постоянной времени  $T_B$ , структурная схема которого показана на рис. 1.19, б, а переходные процессы — на рис. 1.19, в. Кривая 1 соответствует  $E_{G,нач} = 0$ , а кривая 2 —  $E_{G,нач}$ . Индуктивность обмотки возбуждения, необходимая для нахождения ее электромагнитной постоянной времени,

$$L_B = 2p_n \omega_B^2 d\Phi/dF, \quad (1.14)$$

где  $\omega_B$  — число витков обмотки возбуждения;  $\Phi$  и  $F$  — соответственно магнитный поток и намагничивающая сила генератора.

*Асинхронные двигатели.* Асинхронный двигатель в динамике описывается системой трансцендентных дифференциальных уравнений, решение которых возможно лишь с использованием вычислительных машин. Однако в некоторых случаях исследование переходных процессов в асинхронном двигателе ведется по упрощенным дифференциальным уравнениям, полученным введением некоторых допущений. К ним относятся: неучет потерь в стали статора и ротора и активного сопротивления статора, пренебрежение насыщением магнитной цепи. Полученная в этом случае упрощенная модель асинхронного двигателя позволяет исследовать его переходные процессы лишь при малых отклонениях относительно начальных значений координат двигателя. Следовательно, такие модели позволяют анализировать поведение асинхронных двигателей средней и большой мощностей в переходных режимах с незначительным диапазоном регулирования частоты вращения. Во всех остальных случаях модель асинхронного двигателя должна быть уточнена.

Передаточная функция упрощенной модели асинхронного двигателя имеет вид [8]:

$$\frac{\Delta M(p)}{\Delta s(p)} = \frac{\frac{3}{2} p_{\text{п}} k_1^2 \frac{U_{1\alpha}^2}{\Omega_1 R_2'} (T_{\text{эл}} p + 1) - M_{\text{нач}} \frac{s}{s_{\text{кр}}} (T_{\text{эл}} p + 2)}{(T_{\text{эл}} p + 1)^2 + \left(\frac{s}{s_{\text{кр}}}\right)^2}, \quad (1.15)$$

где  $p_{\text{п}}$  — число пар полюсов;  $k_1 = L_m/L_1$  — коэффициент электромагнитной связи статора;  $L_m = 3L_{12}/2$  — индуктивность главного полюса;  $L_1$  — полная эквивалентная индуктивность фазы статора;  $L_{12}$  — максимальная взаимная индуктивность между любыми обмотками статора и ротора, которая имеет место при совпадении их осей;  $U_{1\alpha}$  — напряжение статора;  $\Omega_1$  — угловая частота напряжения статора;  $R_2'$  — приведенное активное сопротивление ротора;  $T_{\text{эл}} = L_2''/R_2'$  — электромагнитная постоянная времени двигателя;  $L_2'' = L_2' - L_m^2/L_1$  — эквивалентная приведенная индуктивность обмотки ротора;  $L_2'$  — полная эквивалентная индуктивность фазы ротора;  $M_{\text{нач}}$  — начальный момент двигателя;  $s$  — текущее скольжение;  $s_{\text{кр}}$  — критическое скольжение.

В уравнении (1.15) выражение  $\frac{3}{2} p_{\text{п}} k_1^2 \frac{U_{1\alpha}^2}{\Omega_1 R_2'}$  представляет собой значение фиктивного пускового момента  $M_{\text{п. ф}}$ , полученного для линеаризованной рабочей части механической характеристики двигателя при принятых значениях напряжения  $U_{1\alpha}$  и угловой частоты  $\Omega_1$  напряжения статора. При линеаризации рабочей части механической характеристики зависимости момента от скольжения имеет вид:

$$M = 2M_{\text{кр}} s / s_{\text{кр}} \quad (1.16)$$

и при скольжении  $s=1$  получаем фиктивное значение пускового момента:

$$M_{\text{п. ф}} = 2M_{\text{кр}} / s_{\text{кр}}. \quad (1.17)$$

С другой стороны, значение начального момента для тех же условий находится из выражения (1.16):

$$M_{\text{нач}} = \frac{2M_{\text{кр}} s_{\text{нач}}}{s_{\text{кр}}} = M_{\text{п. ф}} s_{\text{нач}}. \quad (1.18)$$

Подставляя формулу (1.18) в выражение (1.15) и учитывая, что  $(s/s_{\text{кр}})^2 \ll 1$ , получаем новое выражение для передаточной функции асинхронного двигателя:

$$\Delta M(p) / \Delta s(p) = M_{\text{п. ф}} / (T_{\text{эл}} p + 1). \quad (1.19)$$

Рассмотрим передаточную функцию асинхронного двигателя по управляющему воздействию, которым служит частота

напряжения статора при постоянстве потокосцепления. Для этого зависимость скольжения двигателя от частоты напряжения статора в приращениях представим в виде

$$\Delta s = (\Delta \omega_1 - p\omega) / \Omega_1. \quad (1.20)$$

Совместное решение уравнений (1.19) и (1.20) позволяет получить передаточную функцию, устанавливающую зависимость между приращениями электромагнитного момента  $\Delta \bar{M}$  и угловой частоты напряжения статора  $\Delta \bar{\omega}_1$  в относительных единицах:

$$\frac{\Delta \bar{M}(p)}{\Delta \bar{\omega}_1(p) - \Delta \omega(p)} = \left( \frac{\gamma}{\nu} \right)^2 \frac{1}{T_{эл} p + 1}, \quad (1.21)$$

где  $\Delta \bar{M} = \Delta M / M_{п. ф. ном}$ ;  $\Delta \bar{\omega}_1 = \Delta \omega_1 / \Omega_{1 ном}$ ;  $\Delta \bar{\omega} = \Delta \omega / \Omega_{0 ном}$ ;  $\gamma = U_{1 \alpha} / U_{1 \alpha ном}$ ;  $\nu = \Omega_1 / \Omega_{0 ном}$  — базовые значения координат в номинальном режиме.

Используя уравнение движения в приращениях

$$\Delta M - \Delta M_{ст} = J p \Delta \omega, \quad (1.22)$$

находят передаточную функцию, устанавливающую зависимость между приращениями угловой скорости  $\Delta \bar{\omega}$  и электромагнитного момента  $\Delta \bar{M}$  в относительных единицах:

$$\Delta \bar{\omega}(p) / \Delta \bar{M}(p) - \Delta \bar{M}_{ст}(p) = 1 / (T_m p + 1), \quad (1.23)$$

где  $\Delta \bar{M}_{ст} = \Delta M_{ст} / M_{п. ф. ном}$ ;  $T_m = J \Omega_{0 ном} / M_{п. ф. ном}$  — механическая постоянная времени двигателя;  $\Omega_{0 ном}$  — синхронная угловая скорость двигателя в номинальном режиме.

Структурная схема асинхронного двигателя при управлении частотой напряжения статора и при постоянстве потокосцепления, построенная по выражениям (1.21) и (1.23), показана на рис. 1.20.

Рассмотренный способ управления позволяет регулировать частоту вращения асинхронного двигателя как вниз, так и вверх от синхронной. В установках, требующих регулирования частоты вращения асинхронного двигателя только вниз от синхронной, наиболее простой служит система асинхронного вентильного каскада (АВК).

На рис. 1.21, а приведена схема замещения АВК, на основании которой можно записать следующую систему уравнений, описывающих переходные электромеханические процессы:

$$\left. \begin{aligned} E_{d2} - E_{d1} &= R_s i_d + L_s di_d/dt; \\ M &= k_1 / \omega_0 (E_{2 ном} i_d - x_{дв} i_d^2 / \sqrt{2}); \\ M - M_{ст} &= J d\omega/dt; \\ E_{d2} &= k_1 E_{2 ном} s, \end{aligned} \right\} \quad (1.24)$$

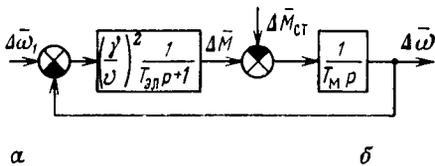


Рис. 1.20. Структурная схема асинхронного двигателя при управлении угловой частотой напряжения статора

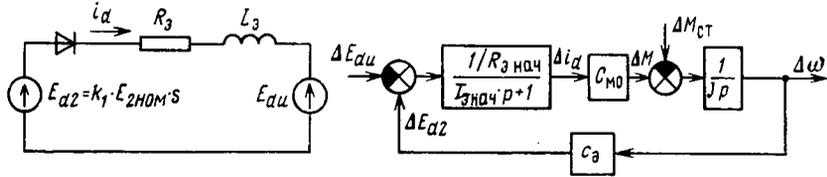


Рис. 1.21. Схема замещения (а) и структурная (б) схема асинхронного вентильного каскада

где  $E_{d2}$ ,  $E_{dн}$  — соответственно выпрямленная э. д. с. ротора и э.д.с. инвертора;  $i_d$  — выпрямленный ток ротора;  $R_3$ ,  $L_3$  — соответственно эквивалентные активное сопротивление и индуктивность цепи выпрямленного тока;  $k_1$  — коэффициент схемы выпрямления в цепи ротора,  $x_{дв}$  — приведенное к цепи ротора индуктивное сопротивление фазы двигателя.

Произведем линеаризацию уравнения электромагнитного момента двигателя и записав уравнения системы (1.24) в приращениях, получаем новую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \Delta E_{d2} - \Delta E_{dн} &= R_3 \Delta i_d + L_3 \frac{d\Delta i_d}{dt}; \\ \Delta M &= \frac{k_1}{\omega_1} (E_{2ном} - \sqrt{2} I_{d0} x_{дв}) \Delta i_d; \\ \Delta M - \Delta M_{ст} &= J \frac{d\Delta \omega}{dt}; \\ \Delta E_{d2} &= - \frac{k_1 E_{2ном}}{\omega_0} \Delta \omega, \end{aligned} \right\} \quad (1.25)$$

где  $\omega_0$  — синхронная угловая скорость двигателя;  $I_{d0}$  — начальное значение выпрямленного тока ротора.

Система уравнений (1.25) позволяет получить передаточные функции для каждого звена АВК

$$\begin{aligned} \frac{\Delta i_d(p)}{\Delta E_{d2}(p) - \Delta E_{dн}(p)} &= \frac{1}{R_{3,нач} (T_{3,нач} p + 1)}; \\ \frac{\Delta \omega(p)}{\Delta M(p) - \Delta M_{ст}(p)} &= \frac{1}{J p}; \\ \frac{\Delta M_{ст}(p)}{\Delta i_d(p)} &= C_{м0}; \end{aligned} \quad (1.26)$$

$$\frac{\Delta E_{d2}(p)}{\Delta \omega(p)} = - \frac{k_1}{\omega_0} E_{2 \text{ ном}},$$

где  $T_{э. \text{ нач}} = L_{э. \text{ нач}} / R_{э. \text{ нач}}$  — электромагнитная постоянная времени цепи выпрямленного тока;  $T_{э. \text{ нач}}$ ,  $R_{э. \text{ нач}}$  — соответственно постоянная времени и эквивалентное сопротивление, соответствующие начальному значению скольжения;  $c_{мо} = \frac{k_1}{\omega_0} (E_{2 \text{ ном}} - \sqrt{2} I_{d0} x_{дв})$ .

Структурная схема АВК, показанная на рис. 1.21, б, получена на основании передаточных функций (1.26).

**Вентильные преобразователи.** Управляемые вентильные преобразователи позволяют осуществлять не только выпрямление переменного тока в постоянный и управление выпрямленным напряжением, но также преобразование постоянного тока в переменный нужной частоты или переменный ток одной частоты в переменный ток другой частоты.

Регулирование выходного параметра преобразователей осуществляется сдвигом момента отпирания вентиля по отношению к моменту естественного отпирания. Такое управление обеспечивается системой импульсно-фазового управления (СИФУ). Из современных СИФУ наибольшее распространение получили полупроводниковые с «вертикальным» принципом управления.

«Вертикальный» принцип управления (рис. 1.22, а) основан на том, что на входе генератора импульсов производится сравнение опорного напряжения  $U_{оп}$  с напряжением управления  $U_y$  (рис. 1.22, б). В момент равенства этих напряжений, когда их разность изменяет знак, на генератор импульсов ГИ (см. рис. 1.22, а) подается сигнал. При этом ГИ формирует управляющий импульс, подаваемый на вентиль VS. Изменяя напряжение управления  $U_y$ , можно регулировать фазу управляющего импульса.

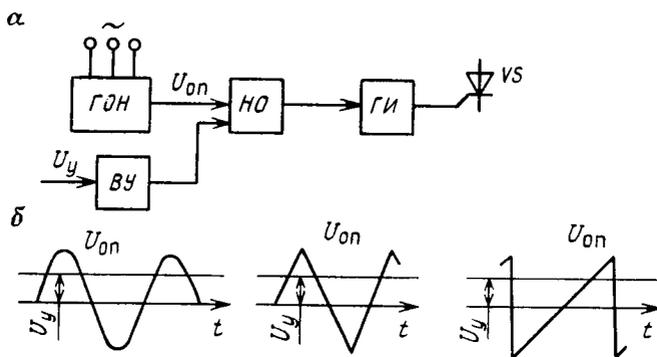


Рис. 1.22. «Вертикальное» управление:

а — блок-схема; б — диаграммы опорного и управляющего напряжений

Фазосдвигающее устройство при «вертикальном» принципе управления состоит из трех основных частей: генератора опорного напряжения ГОН (синусоидальной, трапецеидальной или пилообразной формы), синхронизированного с напряжением питающей сети, входного устройства ВУ и нуля-органа НО. Многоканальные СИФУ содержат в каждом канале генератор опорного напряжения и нуля-орган. Входное управляющее напряжение  $U_y$  общее для всех каналов СИФУ. В качестве входного устройства ВУ обычно служит эмиттерный повторитель, имеющий один или несколько каскадов.

Управляемый вентильный преобразователь, благодаря использованию в нем элементов односторонней проводимости и дискретного импульсно-фазового способа управления, является дискретным устройством. Поэтому собственно вентильный преобразователь представляет собой с точки зрения динамики звено с чистым запаздыванием  $\tau$ . СИФУ обладает инерционностью, вызванной наличием на ее входе фильтра. Таким образом, СИФУ имеет передаточную функцию аperiодического звена с постоянной времени  $T_y$ . Передаточная функция вентильного преобразователя по управляющему воздействию имеет вид

$$W_{\text{пр}}(p) = \frac{\Delta E_{\text{пр}}(p)}{\Delta U_y(p)} = k_{\text{пр}} \frac{e^{-\tau p}}{T_y p + 1}, \quad (1.27)$$

где  $k_{\text{пр}}$  — статический коэффициент усиления преобразователя;  $T_y = 0,006 \div 0,008$  — постоянная времени системы фазового управления;  $\tau = 1/(2mf)$ ;  $m$  — фазность пульсаций выпрямленного напряжения;  $f$  — частота питающей сети.

Для практических расчетов передаточную функцию вентильного преобразователя можно с достаточной точностью представить в виде

$$W_{\text{пр}}(p) = k_{\text{пр}} / (T_{\text{пр}} p + 1), \quad (1.28)$$

где  $T_{\text{пр}} = T_y + 1/(2mf)$  — постоянная времени преобразователя.

Постоянная времени составляет для полупроводниковых СИФУ  $T_{\text{пр}} \approx 0,01$  с и для СИФУ с магнитными усилителями и дросселями насыщения  $T_{\text{пр}} \approx 0,01 \div 0,05$  с. В некоторых случаях из-за большого быстродействия вентильного преобразователя его можно рассматривать как безынерционное звено.

**Усилители.** В электроприводе горных машин нашли применение магнитные, электронные и полупроводниковые усилители. Они служат как для усиления, так и суммирования различных сигналов измерительных и задающих элементов.

Магнитные усилители (МУ) применяются в системах автоматического управления электроприводами как промежуточные, так и силовые.

Инерционность МУ определяется в основном инерционностью обмоток управления, обладающих значительной индуктивностью.

В соответствии с этим МУ может рассматриваться как инерционное звено с передаточной функцией

$$W_{м.у}(p) = k_{м.у} / (T_{м.у} p + 1), \quad (1.29)$$

где  $k_{м.у} = \frac{R_y}{R_y + R_d} k_U$  — передаточный коэффициент;  $R_y$  — активное сопротивление обмотки управления;  $R_d$  — дополнительное сопротивление в цепи управления;  $k_U$  — коэффициент усиления по напряжению;  $T_{м.у}$  — электромагнитная постоянная времени обмотки управления.

Электронные и полупроводниковые усилители обладают малой инерционностью и большим коэффициентом усиления. Обычно их представляют безынерционными усилителями с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{\Delta U_{вых}(p)}{\Delta U_{вх}(p)} = k, \quad (1.30)$$

где  $k$  — коэффициент усиления.

В системах автоматического управления электроприводами широко используются различного рода регуляторы тока, напряжения, скорости. Основой этих регуляторов служит полупроводниковый операционный усилитель [16]. Операционный усилитель (рис. 1.23, а) — это усилитель постоянного тока с высоким коэффициентом усиления по напряжению ( $10^4$ — $10^8$ ), малой собственной постоянной времени. Связь между входным и выходным напряжениями операционного усилителя определяется отношением сопротивления цепи обратной связи и входным сопротивлением [16]:

$$U_{вых}(p) = - \sum_{j=1}^n \frac{Z_{о.с}}{Z_j} U_{вх j}(p). \quad (1.31)$$

В зависимости от характера сопротивлений  $Z_{о.с}$  и  $Z_j$  операционный усилитель может выполнять различные функции. Рас-

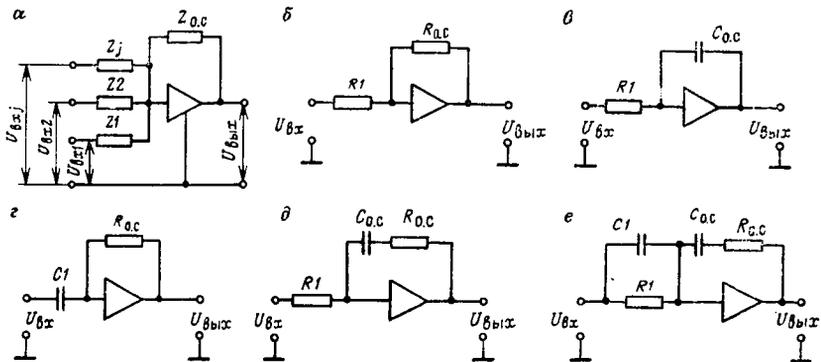


Рис. 1.23. Схемы операционного усилителя (а) и регуляторов (б—е)

смотрим основные из них при  $n=1$ , тогда передаточная функция операционного усилителя примет вид

$$W(p) = - \frac{Z_{o.c}(p)}{Z_1(p)}. \quad (1.32)$$

Если в цепь обратной связи усилителя включить резистор  $R_{o.c}$ , а во входную цепь — резистор  $R1$ , тогда  $Z_{o.c} = R_{o.c}$ , а  $Z_1 = R1$  и передаточная функция усилителя согласно (1.32) будет иметь вид

$$W(p) = -R_{o.c}/R1 = -k. \quad (1.33)$$

В этом случае операционный усилитель выполняет масштабное преобразование входного напряжения с коэффициентом  $k$  и называется пропорциональным или П-регулятором (рис. 1.23, б).

Если в цепи обратной связи операционного усилителя включен конденсатор  $C_{o.c}$ , а во входную цепь — резистор  $R1$ , тогда  $Z_{o.c} = 1/(C_{o.c}p)$ , а  $Z_1 = R1$  и передаточная функция усилителя

$$W(p) = 1/(R1C_{o.c}p) = -1/(Tp), \quad (1.34)$$

где  $T = R1C_{o.c}$  — постоянная времени.

В данном случае операционный усилитель выполняет операцию интегрирования и называется интегральным или И-регулятором (рис. 1.23, в).

Если в цепь обратной связи включен резистор  $R_{o.c}$ , а во входную цепь — конденсатор  $C1$ , тогда  $Z_{o.c} = R_{o.c}$ ,  $Z_1 = 1/(C1p)$  и передаточная функция усилителя

$$W(p) = -R_{o.c}C1p = -Tp, \quad (1.35)$$

где  $T = R_{o.c}C1$  — постоянная времени.

Операционный усилитель выполняет операцию дифференцирования и называется дифференциальным или Д-регулятором (рис. 1.23, г).

Если в цепь обратной связи включены последовательно резистор  $R_{o.c}$  и конденсатор  $C_{o.c}$ , во входную цепь — резистор  $R1$ , тогда  $Z_{o.c} = R_{o.c} + 1/(C_{o.c}p)$ , а  $Z_1 = R1$  и передаточная функция усилителя

$$W(p) = - \left( \frac{R_{o.c}}{R1} + \frac{1}{R1C_{o.c}p} \right) = - \left( k + \frac{1}{Tp} \right), \quad (1.36)$$

где  $T = R1C_{o.c}$  — постоянная времени;  $k = \frac{R_{o.c}}{R1}$  — коэффициент усиления.

Операционный усилитель выполняет одновременно масштабное преобразование и операцию интегрирования и называется пропорционально-интегральным или ПИ-регулятором (рис. 1.23, д).

Если в цепь обратной связи включить последовательно резистор  $R_{o.c}$  и конденсатор  $C_{o.c}$ , а во входную цепь — парал-

лельно соединенные резистор  $R1$  и конденсатор  $C1$ , тогда  $Z_{o.c.} = 1 + T/(C_{o.c.}p)$ , а  $ZI = R1/(T_1p + 1)$  и передаточная функция операционного усилителя примет вид

$$W(p) = \frac{(T_1p + 1)(T_{o.c.}p + 1)}{T_{o1}p} = - \left( \frac{1}{T_{o1}p} + \frac{T_1 + T_{o.c.}}{T_{o1}p} + \frac{T_1T_{o.c.}}{T_{o1}} p \right), \quad (1.37)$$

где  $T_{o.c.} = R_{o.c.}C_{o.c.}$ ;  $T_1 = R1C1$ ;  $T_{o1} = R1C_{o.c.}$ .

Операционный усилитель выполняет одновременно масштабное преобразование, операции интегрирования и дифференцирования и называется пропорционально-интегрально-дифференциальным или ПИД-регулятором (рис. 1.23, *e*).

## 1.9. РАЦИОНАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

### 1.9.1. Особенности электропривода машин и установок циклического действия

Режим работы установок циклического действия характеризуется рядом последовательно повторяющихся однотипных циклов. Каждый рабочий цикл представляет собой чередование неустановившегося режима работы с установившимся. К неустановившемуся режиму работы относятся режимы пуска, торможения и реверсирования. Установившийся режим работы электропривода характеризуется постоянством скорости.

К установкам циклического действия относятся подъемные машины и лебедки, опрокидыватели, погрузочные машины. Большинство таких установок имеют реверсивный электропривод. К ним относятся электроприводы подъемных машин и лебедок, электропривод ковша погрузочной машины. Ряд установок циклического действия имеет нереверсивный электропривод — это электропривод опрокидывателя.

Реверсивный электропривод, работающий в интенсивном повторно-кратковременном режиме работы, существенно влияет на производительность установки, нагрузку электрических машин и трансмиссию, энергетические и другие показатели его работы. Все это усложняет требования к системам электроприводов установок циклического действия.

Все перечисленные установки, имеющие циклический режим работы, связаны с перемещением груза. Поэтому производительность таких установок зависит как от величины перемещаемого за один цикл груза  $Q_{гр}$ , так и от продолжительности цикла  $T_{ц}$ :

$$A_{ц} = \frac{Q_{гр}}{T_{ц}} T_{ц} = \frac{Q_{гр}}{t_p + t_0} T_{ц}, \quad (1.38)$$

где  $A_ч$  — часовая производительность установки;  $t_p$  и  $t_0$  — соответственно время работы и время паузы между циклами;  $T_ч/\times \times/T_ц$  — число циклов за 1 ч.

Следовательно, необходимая производительность установки может быть обеспечена различными сочетаниями  $Q_{гр}$  и  $T_ц$ . Таким образом, чтобы обеспечить заданную производительность установки, необходимо либо увеличивать величину перемещаемого за цикл груза, либо снижать время цикла, необходимого для перемещения этого груза. В первом случае увеличение величины груза приведет к усложнению установки за счет увеличения ее габаритов и стоимости. Во втором случае потребуются повышение скорости, что приведет к увеличению установленной мощности электродвигателя и, как следствие, к повышению стоимости двигателя и к эксплуатационным расходам, обусловленным возрастанием затрат на электроэнергию. Увеличение производительности установок, работающих в циклическом режиме, возможно также за счет сокращения периодов пуска и торможения. Но это может повлечь за собой также увеличение габаритов установки с сохранением при этом прежней мощности двигателя. Окончательно принимается установка с такими  $Q_{гр}$  и  $T_ц$ , при которых капитальные и эксплуатационные затраты на механическое и электрическое оборудование будут минимальными.

Заданная производительность установки, работающей в циклическом режиме, может быть обеспечена лишь строгим выполнением продолжительности цикла и максимальным заполнением сосудов, перемещающих груз. Для обеспечения заданной продолжительности цикла электропривод должен строго выполнять диаграмму скорости, представляющую собой зависимость скорости движения перемещаемого сосуда с грузом в функции времени. Электропривод в этом случае должен иметь такую систему управления, которая обеспечивала бы необходимый закон изменения скорости в функции перемещения сосуда с грузом. С этой целью применяются специальные программные устройства, задающие требуемую скорость движения сосудов с грузом в функции пути. Возможна также стабилизация величины ускорения или замедления в период пуска или торможения. Это достигается стабилизацией момента двигателя, работающего в этих режимах. Однако максимальная производительность установки может быть обеспечена лишь при полном заполнении сосудов грузом.

Из большого разнообразия схем управления электроприводом необходимо выбирать такую схему управления, которая обеспечивала бы регулирование как момента двигателя, так и его частоты вращения с высокими технико-экономическими показателями, т. е. с минимальными капитальными затратами, эксплуатационными расходами и высокой надежностью.

Электродвигатель, работающий в повторно-кратковременном режиме, находится в более тяжелых условиях с точки зре-

ния его нагрева, чем двигатель, работающий в продолжительном режиме. Это объясняется повышенными моментами, которые должен развивать двигатель в периоды пуска и торможения. Особенно это относится к двигателям с самовентиляцией, так как теплоотдача для них зависит от частоты вращения и в период паузы охлаждение его резко ухудшается. Это обстоятельство должно учитываться при определении мощности и выборе двигателя по каталогу.

### **1.9.2. Особенности режимов работы машин и установок непрерывного действия**

К машинам и установкам непрерывного действия относятся вентиляторы, насосы, компрессоры, конвейеры. Они работают в продолжительном режиме с малым числом пусков и торможений. Нагрузка таких установок в процессе работы, как правило, постоянная. В этом случае электродвигатель работает на естественной характеристике, обеспечивая высокие энергетические показатели электропривода. Электропривод выбирается регулируемым, а в качестве электродвигательного устройства используются двигатели переменного тока (асинхронный или синхронный). Для повышения средневзвешенного коэффициента мощности шахты или рудника в качестве электропривода вентилятора главного проветривания, компрессора чаще применяют синхронные двигатели, так как они, работая с перевозбуждением (с опережающим током), компенсируют реактивную мощность приемников.

Такая же установка, как скребковый конвейер, работает с переменной нагрузкой, причем нагрузка колеблется в широких пределах от номинальной до холостого хода и зависит от местоположения очистного комбайна. Недогрузка скребкового конвейера влечет за собой снижение энергетических показателей электропривода и, как следствие, перерасход электроэнергии. Для повышения энергетических показателей в этом случае система управления электроприводом должна обеспечивать его работу с минимальным расходом электроэнергии посредством регулирования напряжения на статоре двигателя в функции нагрузки установки.

Для ленточных конвейеров также возможна их работа с недогрузкой. В этом случае может оказаться более целесообразным применение электропривода с регулируемой скоростью. Это позволит обеспечить постоянную загрузку ленты и повысить энергетические показатели. Одновременно с этим снижается пробег ленты, что приводит к увеличению срока ее службы и к снижению затрат на ее эксплуатацию.

Несмотря на то, что вентиляторы главного проветривания работают, как правило, с постоянной нагрузкой, время от времени нагрузка на электропривод меняется, так как меняется расход подаваемого в шахту воздуха. Регулирование произво-

длительности вентилятора можно вести за счет изменения частоты его вращения, что обеспечивает значительный экономический эффект. Типовые схемы регулирования частоты вращения вентиляторов главного проветривания разработаны и выпускаются промышленностью.

### **1.9.3. Динамические нагрузки в машинах и установках с упругими и гибкими механическими связями**

Все применяемые на шахтах и рудниках машины и установки представляют собой сложные электромеханические системы, состоящие из инерционных тел (электродвигатели, редукторы, барабаны и др.), связанных между собой упругими элементами (валопроводы, канаты, ленты). Поэтому при всяком изменении возмущающих или управляющих воздействий (внезапное их приложение или снятие, скачкообразное изменение момента электродвигателя) в элементах таких систем возникают колебательные переходные процессы, вызывающие появление дополнительных динамических нагрузок в упругих звеньях. Для определения этих нагрузок сложные электромеханические системы рассматриваются как многомассовые, состоящие из дискретных (сосредоточенных) масс, соединенных между собой упругими связями.

Знание действительных нагрузок, возникающих в элементах электропривода, позволит правильно спроектировать рабочую машину, а следовательно, увеличить ее надежность и долговечность. Это особенно важно для машин и установок, работающих в интенсивном повторно-кратковременном режиме, что приводит к увеличению ускорений и замедлений, а следовательно, к увеличению дополнительных динамических нагрузок.

Исследование переходных процессов реальных машин обычно заменяют исследованием их динамически эквивалентных, идеализированных систем. При составлении эквивалентных схем электроприводов рабочих машин руководствуются следующими допущениями:

кинематическая схема любого механизма представляется расчетной механической схемой, состоящей из нескольких сосредоточенных масс, обладающих моментом инерции и соединенных упругими элементами;

валы, канаты, цепи принимаются невесомыми упругими элементами, обладающими податливостью, характеризуемой постоянным значением коэффициента жесткости;

ротор (якорь) двигателя, соединительные муфты, шестерни, колеса, барабаны и режущие органы рабочих машин принимаются дискретными массами;

деформация упругих звеньев линейна и подчиняется закону Гука, т. е. не выходит за пределы упругости.

Исследование переходных процессов с одновременным учетом упругостей валов двигателя, редуктора, канатов (ленты)

рабочего механизма и кинематических зазоров представляет собой сложную математическую задачу. Поэтому ограничимся рассмотрением лишь влияния упругости валов или каната (ленты) на механические переходные процессы.

Электропривод рабочих машин и установок — это, как правило, многомассовые системы. Однако большинство из них могут быть представлены как двухмассовые. Такая замена допустима, когда основные массы (моменты инерции) расположены по концам трансмиссии, а моменты инерции элементов трансмиссии незначительны. Такая двухмассовая система с упругой связью показана на рис. 1.24.

Коэффициент жесткости  $c$  при растяжении или сжатии элемента определяется из выражения

$$c = SE/l, \quad (1.39)$$

где  $S$  — площадь поперечного сечения,  $\text{м}^2$ ;  $E$  — модуль упругости растяжения или сжатия, Па;  $l$  — длина, подверженная растяжению или сжатию, м.

Коэффициент жесткости при кручении

$$c_k = J_p G/l, \quad (1.40)$$

где  $l$  — длина вала, м;  $J_p = \pi d^4/32$  — момент инерции поперечного сечения вала,  $\text{м}^4$ ;  $G$  — модуль упругости при сдвиге, Па;  $d$  — диаметр поперечного сечения, м.

Коэффициент жесткости при растяжении, приведенный к вращательному движению вала двигателя,

$$c_{\text{пр. р}} = c\rho^2, \quad (1.41)$$

где  $\rho = v/\omega_d$  — радиус приведения, м;  $v$  — линейная скорость поступательно движущегося элемента, м/с;  $\omega_d$  — угловая скорость двигателя, рад/с.

Коэффициент жесткости при кручении, приведенный к валу двигателя,

$$c_{\text{пр. к}} = c_k/i_p^2, \quad (1.42)$$

где  $i_p$  — передаточное отношение редуктора.

Для вывода дифференциальных уравнений, характеризующих переходный режим в рассматриваемой системе электропривода, воспользуемся уравнением Лагранжа второго рода:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial \varphi_i} = Q(t), \quad (1.43)$$

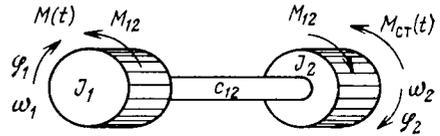


Рис. 1.24. Система с упругой связью:  $J_1$  — момент инерции двигателя;  $c_{12}$  — эквивалентная приведенная к валу двигателя жесткость механических связей;  $J_2$  — момент инерции рабочей машины, приведенный к валу двигателя;  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  — соответственно углы поворота дискретных масс;  $M(t)$  и  $M_{\text{ст}}(t)$  — моменты соответственно двигателя и нагрузки, приведенные к валу двигателя;  $M_{12}$  — момент упругих сил

где  $T$  — кинетическая энергия:

$$T = \frac{1}{2} J_1 \dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2} J_2 \dot{\varphi}_2^2, \quad (1.44)$$

$\Pi$  — потенциальная энергия:

$$\Pi = \frac{1}{2} c_{12} (\varphi_1 - \varphi_2)^2; \quad (1.45)$$

$\Phi$  — функция рассеяния или диссипативная функция Релея:

$$\Phi = \frac{1}{2} k_{12} (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2)^2, \quad (1.46)$$

где  $k_{12}$  — коэффициент диссипации;  $Q(t)$  — моменты внешних сил:

$$\left. \begin{aligned} Q_1(t) &= M(t); \\ Q_2(t) &= M_{\text{ст}}(t). \end{aligned} \right\} \quad (1.47)$$

Взяв частные производные от выражения (1.44) по угловой скорости, а также от выражений (1.44) — (1.46) по угловому перемещению и подставив их в уравнение (1.43), получим:

$$\left. \begin{aligned} M(t) - c_{12} (\varphi_1 - \varphi_2) - k_{12} (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) &= J_1 \ddot{\varphi}_1; \\ c_{12} (\varphi_1 - \varphi_2) + k_{12} (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) - M_{\text{ст}}(t) &= J_2 \ddot{\varphi}_2. \end{aligned} \right\} \quad (1.48)$$

Момент упругих сил —  $c_{12} (\varphi_1 - \varphi_2) = M_{12}$ , взяв от него первую и вторую производные по времени, получим новую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} M(t) - M_{12} - \frac{k_{12}}{c_{12}} \dot{M}_{12} &= J_1 \ddot{\varphi}_1; \\ M_{12} + \frac{k_{12}}{c_{12}} \dot{M}_{12} - M_{\text{ст}}(t) &= J_2 \ddot{\varphi}_2. \end{aligned} \right\} \quad (1.49)$$

Находим

$$\ddot{M}_{12} = c_{12} (\ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_2). \quad (1.50)$$

Решая систему уравнений (1.49) относительно  $\ddot{\varphi}_1$  и  $\ddot{\varphi}_2$  и подставляя их в уравнение (1.50), получаем:

$$\ddot{M}_{12} + k_{12} \left( \frac{1}{J_1} + \frac{1}{J_2} \right) \dot{M}_{12} + \Omega_{12}^2 M_{12} = \frac{c_{12}}{J_1} M(t) + \frac{c_{12}}{J_2} M_{\text{ст}}(t), \quad (1.51)$$

где  $\Omega_{12} = \sqrt{c_{12}(1/J_1 + 1/J_2)}$  — частота собственных колебаний двухмассовой механической системы.

Рассмотрим изменение упругого момента  $M_{12}$  в период пуска при внезапном приложении постоянных моментов  $M$  и

$M_{\text{ст}}$  без учета диссипативных сил. В этом случае дифференциальное уравнение (1.51) примет вид:

$$T^2 \frac{d^2 M_{12}}{dt^2} + M_{12} = \frac{J_2 M + J_1 M_{\text{ст}}}{J_1 + J_2}, \quad (1.52)$$

где  $T = 1/\Omega_{12}$ .

Поскольку корни характеристического уравнения мнимые и сопряженные  $p_{1,2} = \pm j\Omega_{12}$ , то полное решение уравнения (1.52) будет иметь вид:

$$M_{12} = M_{12 \text{ уст}} + B_1 \cos \Omega_{12} t + B_2 \sin \Omega_{12} t, \quad (1.53)$$

где  $M_{12 \text{ уст}} = \frac{J_2 M + J_1 M_{\text{ст}}}{J_1 + J_2}$  — упругий момент при установившемся движении;  $B_1, B_2$  — постоянные интегрирования.

Для нахождения постоянных интегрирования определяем первую производную упругого момента:

$$\dot{M}_{12} = -\Omega_{12} B_1 \sin \Omega_{12} t + \Omega_{12} B_2 \cos \Omega_{12} t. \quad (1.54)$$

Согласно уравнениям (1.53) и (1.54) для момента времени  $t=0$  получаем

$$\left. \begin{aligned} M_{12 \text{ нач}} &= M_{12 \text{ уст}} + B_1; \\ \dot{M}_{12 \text{ нач}} &= B_2 \Omega_{12}, \end{aligned} \right\} \quad (1.55)$$

откуда

$$\left. \begin{aligned} B_1 &= M_{12 \text{ нач}} - M_{12 \text{ уст}}; \\ B_2 &= \frac{1}{\Omega_{12}} \dot{M}_{12 \text{ нач}}. \end{aligned} \right\} \quad (1.56)$$

Подставив в уравнение (1.53) значения  $B_1$  и  $B_2$  из (1.56), находим

$$M_{12} = M_{12 \text{ нач}} \cos \Omega_{12} t - M_{12 \text{ уст}} \cos \Omega_{12} t + \frac{\dot{M}_{12 \text{ нач}}}{\Omega_{12}} \sin \Omega_{12} t + M_{12 \text{ уст}}. \quad (1.57)$$

Преобразуем уравнение (1.57) в более удобную для анализа форму, принимая

$$M_{12 \text{ нач}} - M_{12 \text{ уст}} = A \sin \Omega_{12} t; \quad \frac{\dot{M}_{12 \text{ нач}}}{\Omega_{12}} = \cos \Omega_{12} t A.$$

Окончательно уравнение (1.57) примет вид

$$M_{12} = A \sin (\Omega_{12} t + \rho) + M_{12 \text{ уст}}, \quad (1.58)$$

где  $A = \sqrt{(M_{12(0)} - M_{12 \text{ уст}})^2 + \dot{M}_{12 \text{ нач}}^2 / \Omega_{12}^2}$  — амплитуда колебаний;  $\rho = \text{arctg } \Omega_{12} (M_{12 \text{ нач}} - M_{12 \text{ уст}}) / \dot{M}_{12 \text{ нач}}$  — начальная фаза колебаний.

Из уравнения (1.58) следует, что амплитуда упругого момента зависит как от параметров механической системы, опре-

деляемых величиной  $\Omega_{12}$ , так и от начальных значений момента  $M_{12 \text{ нач}}$  и от скорости его изменения  $M_{12 \text{ нач}}$ .

Максимальное значение момента упругих сил имеет место при нулевых начальных условиях:

$$M_{12} = M_{12 \text{ уст}} \sin(\Omega_{12}t + \rho) + M_{12 \text{ уст}}. \quad (1.59)$$

Тогда при  $\sin(\Omega_{12}t + \rho) = 1$  получим

$$M_{12 \text{ max}} = 2M_{12 \text{ уст}}. \quad (1.60)$$

Взяв отношение максимального момента упругих сил к моменту упругих сил в установившемся режиме, найдем так называемый коэффициент динамичности, который характеризует динамическую добавку в упругой связи, вызванной колебательным процессом в механической системе:

$$k_{\text{дин}} = M_{12 \text{ max}}/M_{12 \text{ уст}} = 2M_{12 \text{ уст}}/M_{12 \text{ уст}} = 2.$$

Коэффициент динамичности может быть уменьшен, во-первых, уменьшением скорости изменения упругого момента, т. е. уменьшением ускорения электропривода, во-вторых, за счет приложения движущего момента к механической системе не скачком, а, например, по экспоненциальному закону.

#### 1.10. СПОСОБЫ ОГРАНИЧЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ МАШИН И УСТАНОВОК ДЛЯ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ РАБОТ

Большинство машин и установок, применяющихся на шахтах и рудниках, подвержены механическим перегрузкам. Механическим перегрузкам могут быть подвержены также механизмы резания и подачи очистных комбайнов, механизмы резания и поворота проходческих комбайнов в связи со значительным увеличением сил сопротивления резанию или разрушению разрабатываемых забоев при повышении крепости полезного ископаемого или породы. В этом случае нагрузки возрастают сравнительно плавно во времени и в ряде случаев могут привести к стопорению рабочего органа. Стопорение рабочего органа может быть и резким, когда последний встречается с непреодолимым препятствием. Такой режим имеет место не только у механизмов резания очистных и проходческих комбайнов, но и при заклинивании тяговой цепи скребкового конвейера.

При стопорении рабочего органа кинетическая энергия, запасенная в движущихся частях механизма, переходит в потенциальную энергию деформации его элементов, что может вызвать поломки узлов и деталей трансмиссии и тягового органа. При этом динамические нагрузки пропорциональны времени торможения и моменту инерции системы.

Поэтому для защиты механизма и электродвигателя от возможных перегрузок должны приниматься меры по их ограничению на предельно допустимом уровне.

Возможны следующие способы снижения уровня динамических нагрузок в электромеханических системах горных машин при резком стопорении рабочего органа: 1) отключение электродвигателя от сети; 2) ввод в трансмиссию дополнительных упругих элементов; 3) механическое разъединение приводного двигателя от трансмиссии; 4) торможение привода.

Первый способ применяется для установок, у которых недопустимые перегрузки являются аварийными. Такой способ не обеспечивает значительного снижения нагрузок в электромеханической системе, особенно при высоких темпах стопорения. Однако в соединении с другими способами он может содействовать снижению максимальных нагрузок.

При втором способе снижается приведенная жесткость элементов соединения привода, что достигается применением упругой муфты. Однако невозможность реализации значительной упругости полумуфт не позволяет уменьшить жесткость трансмиссии настолько, чтобы гарантировать снижение динамических нагрузок в значительной степени.

При третьем способе снижение нагрузок достигается уменьшением момента инерции системы электропривода, а следовательно, и запасенной кинетической энергии, расходуемой на деформацию трансмиссии и узлов рабочего органа. Для этого применяются предохранительные муфты, которые при возникновении динамических перегрузок отсоединяют ротор приводного двигателя, имеющего наибольший запас кинетической энергии, от трансмиссии. В качестве предохранительных муфт могут быть использованы как управляемые, так и неуправляемые муфты. Наиболее перспективными являются управляемые, так как они обеспечивают многократное срабатывание муфты с автоматическим восстановлением ее работоспособности.

Однако применение предохранительной муфты для ограничения нагрузок влечет за собой усложнение конструкции машины и увеличение размеров привода, что крайне нежелательно для горных машин, работающих в стесненных условиях.

При четвертом способе динамические нагрузки в трансмиссии и рабочем органе снижаются применением системы электрического торможения привода, который заключается в том, что запасенная кинетическая энергия при стопорении не расходуется на их деформацию, а гасится внутри самого двигателя. Такой способ снижения динамических нагрузок значительно упрощает механическую часть электропривода (отпадает необходимость в применении предохранительной муфты) при незначительном усложнении его электрической части. Для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором — это тиристорный коммутатор в цепи статора.

Наиболее распространенный способ ограничения электромагнитного момента двигателя — реализация системы электропривода с экскаваторной механической характеристикой. По-

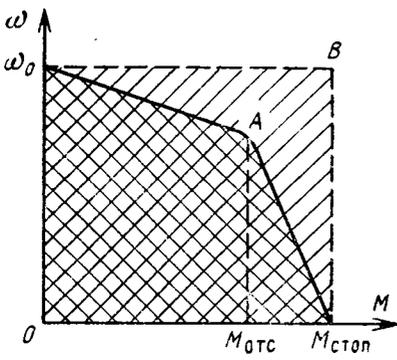
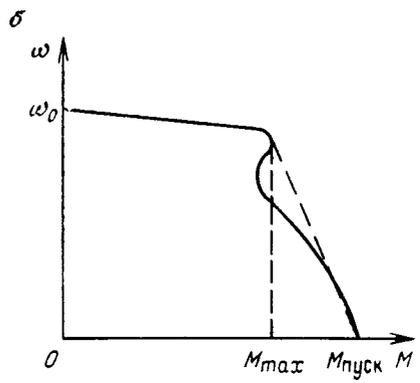
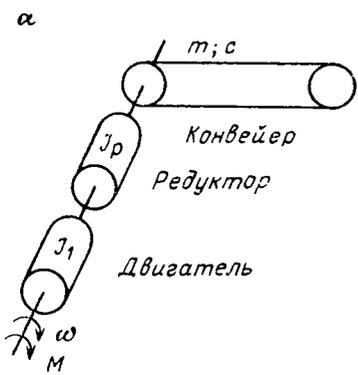


Рис. 1.25. Экскаваторная механическая характеристика

Рис. 1.26. Электромеханическая система (а) скребкового конвейера и механическая характеристика двигателя (б)



следняя позволяет не только ограничивать механические перегрузки, но и формировать переходные процессы пуска, реверса и торможения. Качество ограничения момента характеризуется заполнением экскаваторной характеристики по коэффициенту заполнения  $k_{зап} = S_p / S_{и}$ , представляющему собой отношение площади реальной механической характеристики  $S_p$  (рис. 1.25,  $O\omega_0AM_{стоп}$ ) к площади идеальной характеристики  $S_{и}$  ( $O\omega_0BM_{стоп}$ ), или по коэффициенту отсечки  $k_{отс} = M_{отс} / M_{стоп}$ .

Рассмотрим эффективность применения экскаваторной механической характеристики для ограничения нагрузок в элементах скребкового конвейера при резком стопорении цепи, вызванном ее заклиниванием.

Для электромеханической системы, изображенной на рис. 1.26, а, уравнение движения тягового органа скребкового конвейера в режиме резкого стопорения имеет вид

$$M(\omega) - J \frac{d\omega}{dt} - M_y = 0, \tag{1.61}$$

где  $J$  — приведенный к валу двигателя момент инерции электропривода;  $M_y = c\varphi$  — момент упругих сил, создаваемый на звезд

дочке натяжением скребковой цепи;  $c$  — приведенная к валу двигателя жесткость скребковой цепи.

Момент, развиваемый асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором, — сложная функция частоты вращения ротора; обычно эта зависимость задается в виде графика  $M\omega$  (рис. 1.26, б). Заменяя участок механической характеристики (при изменении момента электродвигателя от  $M_{\max}$  до  $M_{\text{пуск}}$ ) наклонной прямой, соединяющей точку механической характеристики, соответствующей максимальному моменту двигателя, с точкой на оси абсцисс, соответствующей пусковому моменту, получим

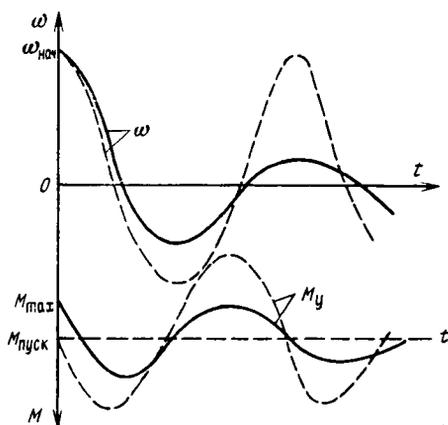


Рис. 1.27. Графики переходных процессов при стопорении скребковой цепи конвейера

где  $\beta = (M_{\text{пуск}} - M_{\max}) / \omega_{\max}$  — модуль жесткости падающего участка механической характеристики.

$$M = M_{\text{пуск}} - (M_{\text{пуск}} - M_{\max}) \omega / \omega_{\max} = M_{\text{пуск}} - \beta \omega, \quad (1.62)$$

где  $\beta = (M_{\text{пуск}} - M_{\max}) / \omega_{\max}$  — модуль жесткости падающего участка механической характеристики.

Заменяв в уравнении (1.61)  $M_y$  через  $c\varphi$  и  $M$  выражением (1.62) и взяв производную по времени, получим следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{d^2\omega}{dt^2} + \frac{\beta}{J} \frac{d\omega}{dt} + \frac{c}{J} \omega = 0. \quad (1.63)$$

Решение уравнения (1.63) имеет вид

$$\omega = (A \sin \Omega t + B \cos \Omega t) e^{-\alpha t}, \quad (1.64)$$

так как корни характеристического уравнения мнимые и сопряженные, ибо  $\beta^2/4J^2 < cJ$ .

Для нахождения постоянных интегрирования за начальные условия принимаем  $\omega_{\text{нач}} = \omega_{\max}$ ,  $M = M_y = M_{\max}$ ,  $(d\omega/dt)_0 = 0$  при  $t=0$ . Определив постоянные интегрирования и подставив их в уравнение (1.64), окончательно получим

$$\omega = \omega_{\max} \sqrt{1 - (\alpha/\Omega)^2} e^{-\alpha t} \sin(\Omega t + \psi_1), \quad (1.65)$$

где  $\alpha = \beta/2J$ ;  $\Omega = \sqrt{\beta^2/4J^2 - c/J}$  и  $\psi_1 = \arctg(\Omega/\alpha)$ .

Подставив выражение (1.65) в уравнение (1.63) и решив его относительно упругого момента  $M_y$ , после использования постоянных интегрирования получим

$$M_y = M_{\text{пуск}} + \omega_{\text{max}} \beta \sqrt{1 + \frac{c - \alpha \beta^2}{\beta \Omega}} e^{-\alpha t} \sin(\Omega t + \psi_2), \quad (1.66)$$

где  $\psi_2 = \text{arctg} \frac{\beta \Omega}{c - \alpha \beta}$ .

Графики переходных процессов представлены на рис. 1.27, из которых следует, что процесс стопорения имеет колебательный характер, так как при  $\omega_{\text{max}}$  запасенная в период замедления инерционных масс кинетическая энергия, разряжаясь, переходит в потенциальную энергию упругих деформаций и вызывает разгон звездочки в противоположную сторону. Упругие деформации в скребковой цепи будут тем больше, чем больше начальная угловая скорость  $\omega_{\text{нач}}$ , момент инерции системы  $J$  и жесткость скребковой цепи.

При идеальной экскаваторной механической характеристике процесс стопорения протекает при  $M = M_{\text{пуск}} = \text{const}$  и  $\beta = 0$ , а уравнение (1.66) примет вид

$$M_y = M_{\text{пуск}} + \frac{c}{\Omega} \omega_{\text{нач}} \sin \Omega t. \quad (1.67)$$

Отсюда следует, что нагрузка в упругом элементе имеет теоретически незатухающий характер (пунктирные линии на рис. 1.27).

### 1.11. ЗАМКНУТЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Для машин и установок циклического действия поддержание максимальной производительности может быть достигнуто системами управления электроприводом, которые позволяют обеспечивать автоматическую обработку требуемых законов регулирования без вмешательства оператора. К таким электроприводам относятся системы Г—Д, УВ—Д, ПЧ—АД с замкнутыми системами управления, разновидностями которых являются: система регулирования с параллельной коррекцией или с суммирующим усилителем и система с последовательной коррекцией и подчиненным регулированием координат [36, 44].

Отличительной особенностью систем с параллельной коррекцией является наличие одного суммирующего усилителя, на входы которого подается алгебраическая сумма сигналов задающего и всех обратных жестких и гибких связей (суммирование возможно как электрическое, так и магнитное). Выходной сигнал усилителя зависит сразу от нескольких переменных, что делает практически невозможным независимое регулирование их друг от друга. Придание системе требуемых динамических свойств при данном построении обычно достигается применением сложных корректирующих устройств.

Однако системы с параллельной коррекцией еще находят применение из-за простоты реализации корректирующих обратных связей на пассивных элементах при использовании электромашинных, магнитных усилителей, когда не предъявляются жесткие требования к качеству переходных процессов электропривода или не требуется раздельное регулирование переменных.

Наиболее распространенный регулируемый электропривод на шахтах и рудниках — привод грузовых подъемных машин по системе Г—Д. Основной режим электропривода — отработка заданной диаграммы движения подъемной машины с необходимой точностью для выдачи на поверхность полезного ископаемого. Возбуждение подъемного двигателя в течение цикла подъема остается неизменным. Поэтому для питания его обмотки возбуждения используются простые возбудители, позволяющие регулировать ток подъемного двигателя в небольших пределах без соблюдения высокой точности.

Скорость подъемного двигателя регулируется изменением напряжения, подаваемого на его якорь от генератора постоянного тока. Таким образом, регулирование частоты вращения подъемного двигателя осуществляется изменением э. д. с. генератора, которая зависит от тока в его обмотке возбуждения. Система Г—Д позволяет регулировать скорость в довольно широких пределах, но при низких скоростях из-за большого наклона механических характеристик работа двигателя становится неустойчивой и значительно изменяется от момента нагрузки. Нижний предел регулирования скорости ограничивается также и остаточным намагничиванием. Э. д. с. от остаточного намагничивания составляет в среднем 3—6 % номинального напряжения генератора, и скорость двигателя становится практически неуправляемой. Это ограничивает возможность регулирования напряжения генератора, а диапазон регулирования при этом не превышает 10 : 1. Такой диапазон крайне недостаточен для привода шахтного подъема, поэтому система Г—Д при ее применении в шахтном подъеме оснащается замкнутой системой управления, в структуру которой для питания обмотки возбуждения генератора входит кроме основного усилителя еще и промежуточный усилитель.

Один из вариантов регулирования тока в обмотке возбуждения генератора — применение каскада усилителей, состоящего из электромашинного усилителя с поперечным полем (ЭМУ), включенного на обмотку возбуждения генератора  $LG$  и промежуточного магнитного усилителя (ПМУ). Обмотка возбуждения генератора получает питание с выхода ЭМУ, а обмотка управления ЭМУ подключается к выходу ПМУ. Таким образом, ток в обмотке возбуждения генератора системы Г—Д регулируется изменением тока в обмотке управления ПМУ. Упрощенная принципиальная схема системы Г—Д с ЭМУ и ПМУ приведена на рис. 1.28. Основной регулирующей обратной

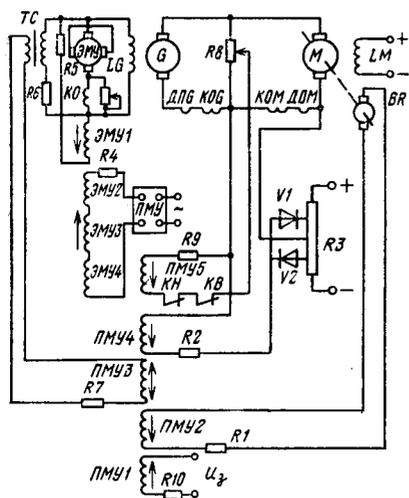


Рис. 1.28. Упрощенная принципиальная схема системы Г—Д с ЭМУ и ПМУ

ПМУ2. На выход ПМУ, как правило, подключаются три последовательно соединенные обмотки управления ЭМУ2—ЭМУ4. Использование трех обмоток дает возможность получить высокий коэффициент усиления ПМУ—ЭМУ. Обмотки управления и резистор  $R_4$  подключаются последовательно, и их суммарное сопротивление должно равняться выходному сопротивлению ПМУ, которое указывается в техническом паспорте.

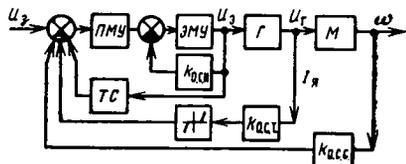
Как известно, основным недостатком ЭМУ является наличие значительной остаточной э. д. с. Для снижения ее до 2—3 В ЭМУ охватывается жесткой отрицательной обратной связью, осуществляемой включением обмотки ЭМУ1 через резистор  $R_5$  на выходное напряжение ЭМУ.

При большом коэффициенте усиления в зависимости от динамических характеристик звеньев система электропривода может быть неустойчивой. Для обеспечения устойчивости и требуемого качества регулирования каскад ПМУ—ЭМУ охватывается гибкой стабилизирующей связью с помощью стабилизирующего трансформатора ТС. Первичная обмотка ТС через ограничивающий резистор  $R_6$  подключается к выходу ЭМУ, а сигнал вторичной обмотки через  $R_7$  поступает на обмотку управления ПМУ3.

Для получения требуемого качества управления в широком диапазоне регулирования скорости с ограничением тока якорной цепи двигателя по перегрузочной способности в систему Г—Д вводится отрицательная задержанная обратная связь по току двигателя. В нормальных режимах обратная связь не дей-

связью служит отрицательная обратная связь по частоте вращения двигателя. Сигнал задания  $U_3$  и сигналы обратных связей поступают на входы ПМУ. На обмотку ПМУ1 подается сигнал, пропорциональный заданной скорости. При ручном управлении задание формируется бесконтактным сельсинным командоаппаратом, в программном режиме — устройством программирования. Сигнал, пропорциональный действительной скорости, снимается с тахогенератора BR и подается на обмотку ПМУ2. Сравнение сигналов магнитное. Выходной ток ПМУ будет пропорционален разности ампер-витков обмоток ПМУ1 и

Рис. 1.29. Структурная схема управления приводом по системе Г—Д шахтной подъемной машины



ствует, а при токе якорной цепи, превышающем ток отсечки ( $1,7 \div 1,8$ )  $I_{я. ном.}$ , вступает в действие и ограничивает ток при стопорении двигателя до ( $2 \div 2,1$ )  $I_{я. ном.}$ . Сигналом, пропорциональным току якорной цепи, служит падение напряжения на компенсационной обмотке и обмотке добавочных полюсов двигателя. Это напряжение сравнивается с опорным напряжением потенциометра  $R3$ . При токе якорной цепи большем ( $1,7 \div 1,8$ )  $I_{я. ном}$  напряжение сигнала обратной связи превышает опорное и по обмотке  $ПМУ4$  начинает протекать размагничивающий ток. Появление тока в обмотке  $ПМУ4$  уменьшает число результирующих ампер-витков управления, что приводит к снижению напряжения на выходе генератора и поддержанию тока в главной цепи на допустимом уровне.

В периоды пауз подъемной машины при снятом с задающей обмотки сигнале в якорной цепи может протекать ток за счет остаточной э. д. с. генератора. Это нежелательно, так как происходит дополнительный нагрев генератора и двигателя, а в некоторых случаях возможно самовозбуждение генератора, что приводит к резкому возрастанию тока и, как следствие, к выходу из строя двигателя или генератора. Для предотвращения этого явления в систему управления вводится отрицательная обратная связь по напряжению генератора, служащая для гашения остаточного поля. Данная связь действует только в периоды пауз. Сигнал обратной связи снимается с потенциометра  $R8$  и через контакты контакторов выбора направления движения ( $КН$ ,  $КВ$ ) подается на обмотку  $ПМУ5$ . При работе привода один из этих контакторов в зависимости от заданного направления вращения подъемного двигателя разомкнут и цепь обратной связи также разомкнута. После остановки подъемной машины связь восстанавливается.

Структурная схема управления приводом по системе Г—Д шахтной подъемной машины показана на рис. 1.29. Передаточные функции системы управления по управляющему и возмущающему воздействиям могут быть получены на основании дифференциальных уравнений, описывающих процессы в основных элементах привода. Исходя из желаемого качества управления, рассчитываются параметры элементов цепей обратных связей и устройств стабилизации, обеспечивающие требуемые статические и динамические показатели системы электропривода.

Основным направлением в последние годы является применение схем управления электроприводами по системе Г—Д или

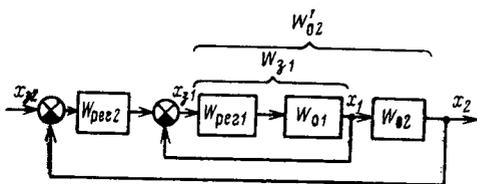


Рис. 1.30. Обобщенная структурная схема системы подчиненного регулирования

УВ—Д с последовательной коррекцией. Отличительная особенность этих систем — подчиненное регулирование основных параметров привода.

Системы подчиненного регулирования (рис. 1.30) состоят из ряда контуров, число которых равно числу регулируемых переменных. На входе регулятора каждого контура сравниваются сигналы, пропорциональные заданному  $x_{z2}$  и действительному  $x_2$  значениям выходной координаты данного контура, а выходное напряжение регулятора  $x_{z1}$  служит заданием для последующего внутреннего контура. В результате все внутренние контуры работают как подчиненные задаче регулирования выходной величины системы.

Характерным направлением в настоящее время является создание унифицированных систем подчиненного регулирования с регуляторами, построенными на операционных усилителях постоянного тока. Отечественные унифицированные блочные системы регулирования (УБСР) и комплектные устройства управления электроприводами на ее основе разработаны во ВНИИЭлектроприводе под руководством д-ра техн. наук О. В. Слежановского. В состав УБСР входят, кроме операционных усилителей, блоки питания, датчики тока и напряжения, задатчики интенсивности, нелинейные элементы и др. Элементная база УБСР — полупроводники и интегральные схемы.

Двухконтурные системы регулирования, построенные по принципу параллельного и последовательного корректирования, имеют равноценные динамические показатели при изменении задающего воздействия. При изменении нагрузки система с параллельной коррекцией дает лучшие результаты. Однако выигрыш в показателях переходного процесса оказывается практически несущественным. К основным достоинствам систем подчиненного регулирования следует отнести: реализацию с высокой точностью желаемых передаточных функций для обеспечения требуемого качества управления; возможность раздельного регулирования переменных и раздельной настройки контуров (начиная с первого, самого внутреннего контура), что существенно упрощает расчет; реализацию и наладку системы; малую мощность управления усилителей, что позволяет применять датчики и задатчики регулируемых параметров с небольшим потреблением энергии. Кроме того, важным достоинством системы подчиненного регулирования является возможность простыми средствами осуществлять ограничение любой из регулируемых координат системы. Для этого достаточно ограни-

чить выходное напряжение регулятора, служащее заданием данной координаты.

Каждый контур системы регулирования, показанной на рис. 1.30, может быть структурно разделен на два звена: регулятор  $W_{\text{рег}2}$  и объект регулирования  $W'_{o2}$ . Необходимо отметить, что объект регулирования включает в себя выходное звено данного контура, т. е. собственно объект  $W_{o2}$  и замкнутый контур регулирования  $W_{z1}$ , внутренний по отношению к рассматриваемому контуру.

Расчет системы подчиненного управления заключается в определении типа регуляторов и параметров элементов данных регуляторов и производится последовательной оптимизацией отдельных контуров, начиная с самого внутреннего. Под оптимизацией понимается приведение передаточной функции замкнутого контура в соответствие с поставленными требованиями. Требования к системам управления и к конкретным регулируемым параметрам обусловлены технологическим процессом, который обеспечивается работой данного регулируемого электропривода.

Оптимизация замкнутого контура будет достигнута, если переходный процесс регулируемой величины при скачкообразном задающем воздействии не зависит от параметров объекта управления и цепи обратной связи. Это возможно, если регулятор контура имеет передаточную функцию, обратную передаточной функции объекта и цепи обратной связи. Регулятор должен осуществить абсолютную компенсацию инерционных свойств объекта регулирования и цепи обратной связи. Так, если объект регулирования внутреннего контура — апериодическое звено с постоянной времени  $T$ :

$$W_{o1}(p) = 1/(Tp + 1), \quad (1.68)$$

то регулятор контура при единичной обратной связи должен иметь передаточную функцию идеального форсирующего звена

$$W_{\text{рег}1}(p) = Tp + 1. \quad (1.69)$$

Физический это означает, что для мгновенного изменения выходного параметра  $x_1$  инерционного звена на его вход необходимо подать импульс напряжения бесконечной амплитуды. Поэтому в реальных системах, имеющих ограниченные ресурсы управления, абсолютная компенсация неосуществима. Кроме того, в реальных системах управления имеются инерционности, действие которых принципиально не может быть скомпенсировано, и звенья, компенсация действия которых нецелесообразна (инерционность операционных усилителей, датчиков, фазового управления тиристорных преобразователей, их дискретный характер работы с запаздыванием и т. п.). Обычно данные инерционности или их сумма малы по сравнению с постоянными времени объектов управления. Поэтому некомпенсируемые постоянные системы электропривода принято называть малыми,

а компенсируемые — большими постоянными времени. При расчете системы подчиненного управления некомпенсируемые постоянные времени вводят в самый внутренний контур регулирования.

Тогда передаточная функция объекта внутреннего оптимизируемого контура (см. рис. 1.30).

$$W_{o1}(p) = W_{o.k}(p) \frac{1}{T_{\mu}p + 1}, \quad (1.70)$$

где  $W_{o.k}(p)$  — передаточная функция звена, действие которого компенсируется регулятором данного контура;  $T_{\mu}$  — эквивалентная малая постоянная времени, не компенсируемая регулятором.

Передаточная функция регулятора

$$W_{per1}(p) = \frac{1}{W_{o.k}(p) a_1 T_{\mu} p}, \quad (1.71)$$

где  $a_1$  — коэффициент настройки первого контура, определяющий степень его демпфирования.

В соответствии с (1.70) и (1.71) передаточные функции разомкнутого и замкнутого оптимизированного контуров

$$W_{раз1}(p) = W_{per1}(p) W_{o1}(p) = \frac{1}{a_1 T_{\mu} p (T_{\mu} p + 1)}; \quad (1.72)$$

$$W_{з1}(p) = \frac{x_1(p)}{x_{з1}(p)} = \frac{W_{per1}(p) W_{o1}(p)}{W_{per1}(p) W_{o1}(p) + 1} = \frac{1}{a_1 T_{\mu} p (T_{\mu} p + 1) + 1}. \quad (1.73)$$

Следовательно, оптимизация контура свелась к замене разомкнутой цепи управления с большой постоянной времени замкнутым контуром, описываемым дифференциальным уравнением того же порядка, но с меньшей постоянной времени  $a_1 T_{\mu}$ , которая определяется суммой некомпенсируемых постоянных  $T_{\mu}$  и выбранной степенью демпфирования.

При оптимизации следующего, внешнего контура определяется передаточная функция его объекта регулирования. Она представляет последовательно соединенные замкнутый внутренний контур и собственно объект управления внешнего контура:

$$W'_{o2}(p) = W_{з1}(p) W_{o2}(p). \quad (1.74)$$

В данном объекте компенсации подлежит постоянная времени собственно объекта управления  $W_{o2}(p)$ , а передаточная функция, инерционность которой не компенсируется, равна передаточной функции оптимизированного внутреннего замкнутого контура  $W_{з1}(p)$  без учета слагаемого при  $p^2$  в знаменателе (1.73).

Регулятор для объекта по (1.74) определяется аналогично внутреннему контуру в соответствии с выражением (1.71):

$$W_{per2}(p) = \frac{1}{W_{o2}(p) a_2 a_1 T_{\mu} p}. \quad (1.75)$$

Передаточные функции разомкнутого и замкнутого внешнего контуров соответственно равны:

$$W_{\text{раз } 2}(p) = W_{\text{пер } 2}(p) W'_{o 2}(p) = \frac{1}{a_1 a_2 T_{\mu} p [a_1 T_{\mu} p (T_{\mu} p + 1) + 1]}; \quad (1.76)$$

$$W_{3 2}^{* *}(p) = \frac{x_2(p)}{x_3 2(p)} = \frac{W_{\text{раз } 2}(p)}{1 + W_{\text{раз } 2}(p)} = \frac{1}{a_1 a_2 T_{\mu} p [a_1 T_{\mu} p (T_{\mu} p + 1) + 1] + 1}. \quad (1.77)$$

Изменяя в выражениях (1.73) и (1.77) коэффициенты настройки контуров  $a_1$ ,  $a_2$ , можно получить различные переходные процессы, в том числе и неустойчивые колебательные. Практически необходимо обеспечить технически оптимальный переходный процесс, который характеризуется определенным временем регулирования, если перерегулирование не превышает 4—10%. Этот процесс обеспечивается при параметрах настройки  $a_1 = a_2 = 2$ . Такая настройка называется модульным или техническим оптимумом. Технический оптимум существует и при более высоком порядке характеристического уравнения, получаемого по знаменателю передаточной функции замкнутых оптимизируемых контуров. Быстродействие оптимальных систем не зависит от параметров объекта регулирования, а определяется только порядком системы и малой постоянной времени  $T_{\mu}$ . Характерной особенностью этих оптимальных систем является одинаковый коэффициент затухания характеристического уравнения, приведенного ко второму порядку (для любого порядка полного уравнения), равный  $\sqrt{2}/2$ . Это соответствует нарастанию регулируемой величины  $x$  до установившегося значения, при скачке задающего воздействия за время  $t = 4,71 T_{\mu}$  перерегулирование составляет  $\sigma = 4,3\%$  (рис. 1.31).

В качестве примера построения систем подчиненного регулирования рассмотрим систему управляемый выпрямитель — двигатель постоянного тока, структурная схема которой показана на рис. 1.32. Объект регулирования в данном случае — двигатель, который представлен последовательным соединением инерционного и интегрирующего звеньев, охваченных обратной связью по э. д. с. Во многих случаях, когда электро-механическая постоянная времени  $T_m \geq 4 T_{\mu}$ , обратной связью по э. д. с. можно пренебречь. Исходя из структуры объекта, система двухконтурная, с внешним контуром скорости и подчиненным ему контуром тока якоря. Некомпенсируемые постоянные времени привода  $T_{\mu}$  входят в передаточную функцию тиристорного преобразователя  $U$ . Объектом управления внутреннего контура служит тиристорный преобразователь, а объектом регулирования — двигатель с входом по напряжению якорной цепи и выходом по току. Передаточная функция звена внутрен-

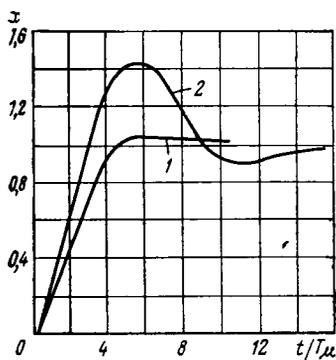
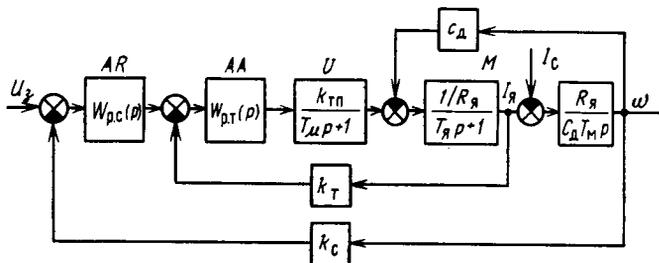


Рис. 1.31. Переходная функция контура с настройкой:

1 — на оптимум по модулю; 2 — на симметричный оптимум

Рис. 1.32. Структурная схема системы УВ—Д с подчиненным регулированием



него контура, действие которого компенсируется регулятором, имеет вид

$$W_{o.к.т}(p) = \frac{k_{т.п} k_T / R_{я}}{T_{я} p + 1}, \quad (1.78)$$

где  $k_{т.п}$  — коэффициент усиления тиристорного преобразователя;  $k_T$  — коэффициент обратной связи по току якоря;  $R_{я}$  — сопротивление якорной цепи;  $T_{я}$  — электромагнитная постоянная времени якорной цепи.

Передаточная функция регулятора тока  $AA$  согласно (1.71) равна

$$W_{p.т}(p) = \frac{(T_{я} p + 1) R_{я}}{a_T T_{\mu} p k_T k_{т.п}}, \quad (1.79)$$

где  $a_T$  — параметр настройки контура тока.

Регулятор тока получен с пропорционально-интегральной зависимостью выходного сигнала от входа (ПИ-регулятор).

Объект регулирования внешнего контура скорости — двигатель с входом по току якоря, а выход по скорости — замкнутый контур тока с передаточной функцией согласно (1.70), (1.72), (1.73):

$$W_{з.к.т}(p) = \frac{1/k_T}{a_T T_{\mu} p (T_{\mu} p + 1) + 1}. \quad (1.80)$$

Передаточная функция замкнутого контура тока, приведенная к первому порядку, имеет вид

$$W_{з.к.т}(p) = \frac{1/k_T}{a_T T_{\mu p} + 1}. \quad (1.81)$$

Из (1.81) постоянная времени  $a_T T_{\mu}$  для контура скорости мала, ее действие регулятором не компенсируется. Компенсации подлежит звено, передаточная функция которого имеет вид

$$W_{o.2}(p) = \frac{R_{я} k_c}{c_d T_{\mu p} k_T}, \quad (1.82)$$

а регулятор скорости  $AR$  определится из выражения (1.75)

$$W_{p.c}(p) = \frac{k_T T_{\mu} c_d}{a_{\#} a_T T_{\mu} k_c R_{я}}, \quad (1.83)$$

где  $c_d$  — конструктивная постоянная двигателя;  $a_c$  — параметр настройки контура скорости;  $k_c$  — коэффициент обратной связи по скорости.

Передаточная функция замкнутого контура скорости определяется выражением

$$W_{з.к.с}(p) = \frac{1/k_c}{a_c a_T T_{\mu p} [a_T T_{\mu p} (T_{\mu p} + 1) + 1] + 1}. \quad (1.84)$$

Формулы (1.80), (1.84) показывают, что оптимизируемые контуры тока и скорости не зависят от параметров привода, при  $a_T = a_c = 2$  может быть обеспечена оптимальная настройка на модульный оптимум. Коэффициенты  $k_T$ ,  $k_c$  в (1.80), (1.84) являются масштабными и не влияют на характеристики системы электропривода.

Таким образом, техническая оптимальность двухконтурной системы привода УВ—Д достигается использованием ПИ-регулятора во внутреннем токовом контуре и П-регулятора во внешнем контуре скорости. Основная регулируемая переменная системы — частота вращения двигателя изменяется как результат однократного интегрирования задания на входе регулятора скорости. Другими словами, в контуре скорости, состоящем из пропорционального регулятора скорости, замкнутого контура тока в виде колебательного звена второго порядка с коэффициентом затухания  $\sqrt{2}/2 = 0,707$  и собственно объекта регулирования, имеется одно интегрирующее звено, входящее в объект регулирования.

Систему управления с П-регулятором скорости на практике называют однократно интегрирующей системой с обратной связью по скорости.

Упрощенная схема однократно интегрирующей системы управления УВ—Д приведена на рис. 1.33. Здесь  $B$  и  $H$  — тиристорные группы, соответствующие направлению вращения двига-

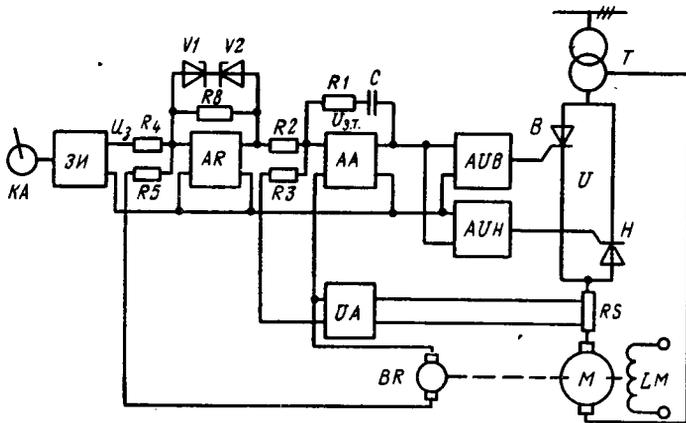


Рис. 1.33. Схема однократно интегрирующей системы управления УВ—Д

теля «Вперед» и «Назад» и образующие реверсивный силовой преобразователь для питания якорной цепи двигателя.

Тиристорные группы управляются своими системами импульсно-фазового управления. Питание преобразователя осуществляется от сети через согласующий или понижающий трансформатор  $T$ . Сигнал управления на  $AUB$  или  $AUH$  поступает с выхода регулятора тока  $AA$ . Заданный ток определяет выходное напряжение регулятора скорости  $AR$ . Сигнал управления на регулятор  $AR$  подается от командоаппарата  $KA$  через задатчик интенсивности  $ЗИ$ . Обратная связь по току снимается в виде падения напряжения на шунте  $RS$  силовой цепи двигателя и, усиленная датчиком тока  $UA$ , поступает на вход регулятора тока. В качестве датчика скорости используется тахогенератор  $BR$ , выходной сигнал которого сравнивается с напряжением, пропорциональным заданному значению скорости на входе регулятора скорости. Ограничение тока якоря осуществляется ограничением его максимального значения с помощью стабилитронов  $V1$  и  $V2$  в цепи обратной связи регулятора скорости. Для реализации системы по выбранному критерию оптимальности необходимо рассчитать параметры регуляторов цепей задания и обратных связей.

Передаточная функция ПИ-регулятора тока

$$W_{p, \tau}(p) = \frac{R_{я}(T_{я}p + 1)}{a_{\tau} T_{\mu} p k_{\tau} k_{r, \mu}} \quad (1.85)$$

через параметры операционного усилителя (рис. 1.33) реализуется в виде

$$W_{p, \tau}(p) = \frac{1 + CR1p}{CR2p} \quad (1.86)$$

Параметры регулятора тока определяют из соотношений

$$T_0 = R1C = T_{я}; \quad (1.87)$$

$$T_{я} = R2C = \frac{a_{\tau} T_{\mu} k_{\tau} k_{\tau. п.}}{R_{я}}; \quad (1.88)$$

$$k_{\tau} = k_{ш} k_{д. \tau} \frac{R2}{R3}, \quad (1.89)$$

где  $T_0$  — постоянная времени регулятора тока;  $T_{я}$  — постоянная времени интегрирующего регулятора;  $k_{ш} = U_{ш}/I_{я}$  — передаточный коэффициент шунта;  $k_{д. \tau} = U_{д. \tau}/U_{ш}$  — коэффициент усиления датчика тока.

Из совместного решения уравнений (1.88) и (1.89)

$$R3 = \frac{k_{\tau. п} k_{ш} k_{д. \tau}}{R_{я} C} a_{\tau} T_{\mu}. \quad (1.90)$$

Обычно при определении регулятора задаются значением  $C$  от единицы до десятков микрофард, после чего находят сопротивление резисторов. Сопротивление  $R2$  определяется из условия ограничения тока двигателя, осуществляемого регламентацией выходного напряжения  $U_{з. \tau}$  регулятора скорости:

$$U_{з. \tau \max} = k_{\tau} I_{я \max}, \quad (1.91)$$

где  $U_{з. \tau \max}$  — максимальное выходное напряжение регулятора скорости (принимается, как правило, равным номинальному выходному напряжению операционного усилителя);  $I_{я \max}$  — ток максимальной рабочей перегрузки двигателя.

Из (1.89) и (1.91) находят

$$R2 = \frac{U_{з. \tau \max}}{k_{ш} k_{д. \tau} I_{я \max}} R3. \quad (1.92)$$

На практике часто для ограничения сигнала  $U_{з. \tau}$  используют регулируемый источник опорного напряжения. В этих случаях удобно применять  $R2 = R3$ , и тогда

$$U_{з. \tau \max} = U_{д. \tau \max} = k_{ш} k_{д. \tau} I_{я \max}. \quad (1.93)$$

Для расчета параметров П-регулятора скорости

$$W_{р. с}(p) = \frac{k_{\tau} T_{\mu} c_{д}}{a_{с} a_{\tau} T_{\mu} k_{с} R_{я}} \quad (1.94)$$

воспользуемся его выражением через параметры операционного усилителя:

$$W_{р. с}(p) = R6/R4. \quad (1.95)$$

Параметры регулятора могут быть определены из следующих соотношений:

$$k_{р. с} = \frac{R6}{R4} = \frac{k_{\tau} T_{\mu} c_{д}}{a_{с} a_{\tau} T_{\mu} k_{с} R_{я}}; \quad (1.96)$$

$$k_{с} = k_{\tau} R4/R5, \quad (1.97)$$

где  $k_{\tau} = U_{\tau} / \omega$  — передаточный коэффициент тахогенератора.

Из совместного решения этих уравнений

$$\frac{R6}{R5} = \frac{T_m k_{\tau} c_d}{a_c a_{\tau} T_{\mu} k_{\tau} R_{\gamma}}. \quad (1.98)$$

Отношение  $R4/R5$  находят из уравнения

$$U_{з.с \max} = k_c \omega_{\max} = k_{\tau} \frac{R4}{R5} \omega_{\max}, \quad (1.99)$$

откуда

$$\frac{R4}{R5} = \frac{U_{з.с \max}}{k_{\tau} \omega_{з \max}}, \quad (1.100)$$

где  $\omega_{з \max}$  — максимальная заданная величина частоты вращения двигателя;  $U_{з.с \max}$  — выходное напряжение задатчика или командоаппарата, соответствующее  $\omega_{з \max}$ .

При определении параметров П-регулятора скорости один из параметров в (1.96), (1.97) обычно задается.

Технически оптимальный переходный процесс в системе управления по скорости при модульной настройке обеспечивается при отработке скачкообразного задающего воздействия. При этом жесткость механических характеристик привода оказывается неконтролируемой и обычно невысокой. Величина ошибки по скорости при изменении нагрузки  $I_c$  определяется соотношением  $T_m$  и  $T_{\mu}$  привода. При  $T_m < 4T_{\mu}$  статический перепад угловой скорости в системе подчиненного регулирования с П-регулятором скорости будет даже больше, чем в разомкнутой системе. Зависимость статической ошибки от электромеханической постоянной времени  $T_m$  очевидна, поскольку она определяет коэффициент передачи пропорционального регулятора скорости.

Действие системы управления с П-регулятором скорости в установившемся режиме сводится к следующему. При увеличении момента нагрузки на валу двигателя снижается его скорость. Это ведет к уменьшению сигнала обратной связи по скорости, а при постоянстве задания по регулятору скорости — к увеличению сигнала на выходе регулятора скорости  $AR$ . Возрастает задание тока  $U_{з.т}$  контуру тока, увеличивается э. д. с. тиристорного преобразователя, увеличивается ток якоря соответственно значению  $U_{з.т}$ , создавая движущий момент, равный моменту статической нагрузки.

При постоянной нагрузке должно быть постоянное задание по току  $U_{з.т}$ , т. е. постоянная величина выходного сигнала регулятора  $AR$ . Чем меньше коэффициент передачи по регулятору скорости  $AR$ , тем больше должен быть входной сигнал регулятора. При постоянном задании по скорости это можно обеспечить лишь увеличением ошибки по скорости. Таким образом, однократно интегрирующая система управления — статическая по нагрузке, величина ошибки которой зависит от параметров привода, что в большинстве случаев при значительном диа-

пазоне регулирования не может быть использована. В этом случае применяют другой тип регулятора, например ПИ-регулятор. При этом система становится астатической не только по управлению, но и по нагрузке. Такая система называется двукратно интегрирующей (содержащая интегратор в регуляторе и объекте).

Передаточная функция ПИ-регулятора скорости имеет вид

$$W_{p.c}(p) = \frac{k_T T_m c_d}{k_c R_{я} a_c a_T T_m} \frac{(a_c b_c a_T T_m p + 1)}{a_c a_T b_c T_m p}, \quad (1.101)$$

где  $b_c$  — дополнительный параметр настройки контура.

При коэффициентах настройки

$$b_c = a_c = a_T = 2 \quad (1.102)$$

получается еще одна типовая настройка, так называемый симметричный оптимум.

При таком регуляторе при скачке входного задающего сигнала перерегулирование по скорости составляет 43%. Кривая переходного процесса 2 приведена на рис. 1.31 и отличается повышенным быстродействием. Величину перерегулирования можно уменьшить до 6,2%, что будет соответствовать технически оптимальным системам.

Реализация двукратно интегрирующей системы возможна в виде двух контуров с ПИ-регулятором или в виде трех контуров, два из них по скорости  $AR1$  и  $AR2$  (рис. 1.34). Регулятор  $AR1$  является пропорциональным, как и при модульном оптимуме, а  $AR2$  — интегрального типа с передаточной функцией

$$W_{p.c2}(p) = \frac{1}{a_c b_c a_T T_m p}. \quad (1.103)$$

В отличие от двукратно интегрирующей САУ с ПИ-регулятором в трехконтурной используется модульная настройка.

Следует отметить, что унифицированные элементы управления как силовые, так и регулирования, позволяют успешно решать задачи регулирования и приводом переменного тока. Все большее внимание находят цифровые управления, в частности, микропроцессорные.

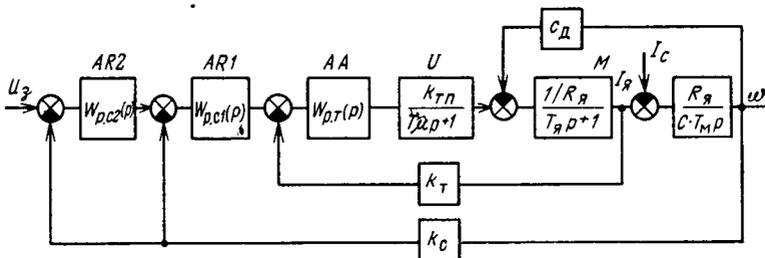


Рис. 1.34. Двукратно интегрирующая система регулирования УВ—Д

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ПОДЪЕМНЫХ МАШИН И ЛЕБЕДОК

---

### 2.1. РЕЖИМЫ РАБОТЫ ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ И ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К АВТОМАТИЗИРОВАННОМУ ЭЛЕКТРОПРИВОДУ

Работа подъемной установки характеризуется цикличностью, т. е. рядом сменяющихся циклов, следующих друг за другом. В свою очередь каждый цикл можно разбить на четыре основных периода: разгон, равномерное движение, замедление до полной остановки и пауза.

Таким образом, чтобы обеспечить требуемую производительность рудничного подъема, каждый цикл должен укладываться в определенное, наперед заданное время. Для этого необходимо выдерживать расчетные значения ускорения и замедления, максимальной скорости и продолжительности паузы, т. е. выдерживать принятую диаграмму скорости. Диаграмма скорости подъема — это зависимость скорости движения подъемных сосудов от времени.

При осуществлении подъемных операций скорость подъемного двигателя должна изменяться по определенному закону, характеризующемуся диаграммой скорости.

В зависимости от назначения и высоты подъема, вида и грузоподъемности подъемных сосудов, числа горизонтов и расстояния между ними диаграммы скорости могут быть трех-, пяти-, шести- и семипериодными (рис. 2.1). Наиболее простые трехпериодные диаграммы скорости целесообразно применять для клетевых подъемных установок с одноэтажными неопрокидными клетями при качающихся приемных площадках. Наиболее сложные шести- и семипериодные диаграммы скорости необходимы при грузовом подъеме с опрокидными скипами или клетями. Это объясняется необходимостью ограничения скорости движения подъемных сосудов в разгрузочных кривых. Поэтому период разгона разбивается на два участка с различными ускорениями. То же относится и к периоду замедления.

Рассмотрим шестипериодную диаграмму скорости, проектируемую обычно для скиповых подъемов, оборудованных опрокидными скипами. На первом участке  $0-1$  (рис. 2.1, *в*) осуществляется движение опускающегося подъемного сосуда в разгрузочных кривых. Причем ускорение на этом участке должно быть таким, чтобы скорость схода с кривых (точка *1*) не превышала для скипа 1,5 м/с, а для опрокидной клетки — 2,5 м/с. На участке  $1-2$  после выхода подъемного сосуда из разгрузоч-

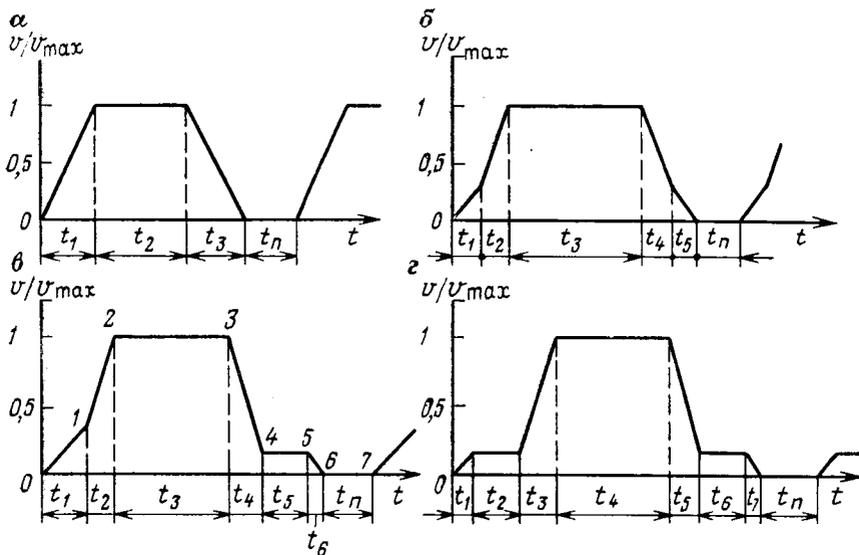


Рис. 2.1. Диаграммы скорости шахтной подъемной машины:  
 а — трехпериодная; б — пятипериодная; в — шестипериодная; г — семипериодная

ных кривых машина движется с ускорением, которое ограничивается допустимыми напряжениями в узлах подъемной машины и определяет перегрузочную способность подъемного двигателя. Это ускорение по действующим нормам не должно превышать для вертикального грузового подъема  $1,2 \text{ м/с}^2$ , а также наклонного подъема (свыше  $30^\circ$ ). Для многоканатных подъемных машин критерием величины ускорения служит исключение проскальзывания канатов по футеровке.

На участке 2—3 подъемные сосуды движутся с максимальной скоростью, а на участке 3—4 — с замедлением, пока скорость не достигнет величины, допустимой для входа в разгрузочные кривые (точка 4). Эта скорость также нормируется и не должна превышать  $1,5 \text{ м/с}$ .

Участок 4—5 соответствует движению скипа, опрокидной клетки в разгрузочных кривых. Это движение должно происходить со скоростью  $v_{р.к} = 0,6 \pm 0,3 \text{ м/с}$ . Скорость дотягивания используется и в неопрокидных клетях для компенсации погрешности системы управления.

На участке 5—6 происходит процесс окончательного останова. Участок 6—7 соответствует паузе между двумя соседними периодами подъема. Пауза определяется конструкцией загрузочно-разгрузочных устройств при спуске-подъеме грузов, а при спуске-подъеме людей — нормативами времени на посадку людей в клеть. Эти нормативы следующие: время на посадку в клеть одноэтажную определяется из расчета 1 с на посадку

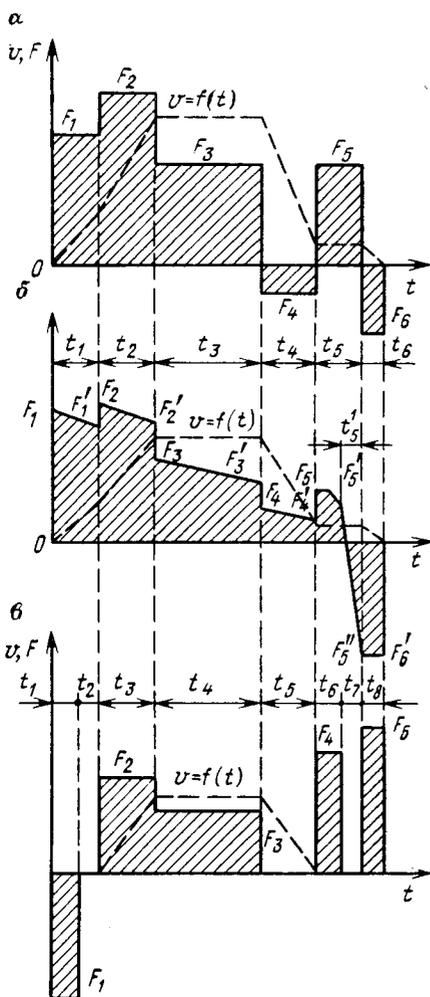


Рис. 2.2. Диаграммы усилий уравновешенной двухконцевой (а), неуравновешенной с опрокидными скипами (б) и одноконцевой (в) подъемной установки

одного человека плюс 10 с и плюс 25 с при посадке в двухэтажную клеть. Для скиповых подъемов определяющей для паузы является грузоподъемность скипа, т—до 6—8 с, 9—10 с, 12—12 с, 15—15 с, 20—30 с.

На рис. 2.2, а, б приведены диаграммы движущих усилий на ободе барабана (шквива трения) уравновешенной двухконцевой подъемной установки с опрокидными скипами при нормальной работе по выдаче груза и для статически неуравновешенной подъемной установки, оборудованной опрокидными клетями или скипами. Из диаграмм усилий следует, что установки с опрокидными клетями или скипами имеют в период пуска меньшие усилия на валу двигателя по сравнению с опрокидными. Это объясняется тем, что при опрокидывании подъемного сосуда часть его веса при-

ходит на разгрузочные кривые и этим создается еще большая неуравновешенность системы, нарастающая в конце дотягивания при разгрузке сосуда. Поэтому в момент опрокидывания необходимо создание значительного тормозного момента на валу подъемной машины. Там же представлены диаграммы скорости движения подъемных сосудов  $v=f(t)$ .

В статически неуравновешенных системах подъема неуравновешенность зависит от веса каната, а следовательно, от глубины подъема. Разница статических натяжений в верхних точках поднимающейся и опускающейся ветвей во время подъема непрерывно меняется, достигая наибольшего значения в начале и наименьшего — в конце подъема. Она может оказаться не

только равной по величине весу полезного груза, но даже получать отрицательные значения.

Диаграмма усилий клетевой подъемной установки (рис. 2.2, в) существенно отличается от диаграмм усилий скипового подъема. Объясняется это сложностью маневров при посадке клеток на посадочные кулаки или качающиеся площадки.

В процессе эксплуатации подъемной установки величина поднимаемого груза может меняться в широких пределах (даже на скиповой подъемной установке, оборудованной автоматической загрузкой, на  $\pm 30\%$  от расчетной, а при перегоне порожнего скипа это отклонение достигает  $100\%$ ), что автоматически приводит к снижению или увеличению ускорения, а следовательно, либо к снижению производительности, либо к чрезмерным ускорениям. Поэтому электропривод должен обеспечивать разное значение момента в зависимости от загрузки подъемного сосуда.

Максимальная скорость движения сосудов чисто грузовых подъемных установок вертикальных шахт и рудников не должна превышать значения [21]

$$v_{\max} = (0,4 \div 0,5) \sqrt{H}, \quad (2.1)$$

где  $v_{\max}$  — максимальная скорость движения подъемных сосудов, м/с;  $H$  — высота подъема, м.

Причем эта скорость должна быть не более 20 м/с. Максимальная частота вращения двигателя должна оставаться неизменной при изменении нагрузки на валу барабана подъемной машины, т. е. механическая характеристика двигателя должна быть жесткой.

Повышение предельных скоростей требует и увеличения ускорений. Однако повышение ускорения создает дополнительные динамические усилия на механическую часть подъемной машины и канаты, отрицательное воздействие на людей, опасность проскальзывания каната по шкиву у подъемных установок со шкивами трения.

Наиболее эффективный способ снижения динамических усилий в упругих элементах подъемной машины и канатах, снижения физиологического воздействия на людей — плавное изменение движущего момента, т. е. ограничение производной ускорения — рывка.

На рис. 2.3 приведена унифицированная пятипериодная диаграмма скорости (а), ускорения (б) и рывка (в), в которой в периоды разгона и замедления рывок  $\rho$  изменяется скачкообразно, ускорение  $a$  — по трапецеидальному закону, скорость  $v$  имеет параболические участки («скругления») при изменении ускорения движения. Значения скорости  $v$ , ускорения  $a$ , рывка  $\rho$  определяются требованиями технологии и ограничиваются правилами безопасности.

В период останова подъемной машины необходимо также развивать постоянное по величине замедление, которое изменя-

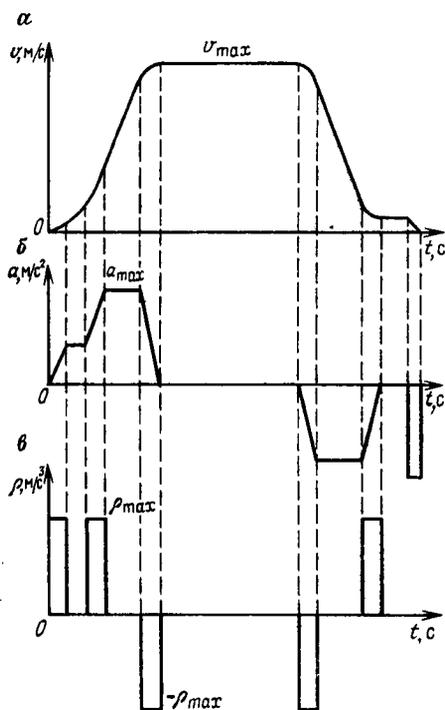


Рис. 2.3. Унифицированная пяти-  
периодная диаграмма скорости  
(а), ускорения (б) и рывка (в)

ется в зависимости от величины конечной нагрузки. Таким образом, электродвигатель должен в период останова создавать тормозной момент, значения которого для поддержания постоянной величины замедления должны адаптироваться к изменению конечной нагрузки.

В процессе работы подъемной машины необходимо производить ревизию ствoла, канатов, а также спуск взрывчатых веществ, рельсов или других длинномерных материалов.

Выполнение таких операций производится на пониженных скоростях (0,3 м/с) и широко меняю-

щихся по величине и знаку усилия. Поэтому к электроприводу предъявляются дополнительные требования.

Наиболее полно диаграмма подъема выполняется при автоматическом управлении подъемной машиной. Это в первую очередь относится к скиповым и грузолюдским подъемным установкам при работе по выдаче груза. Автоматизация в этом случае должна предусматривать:

систему регулирования хода подъемной машины, обеспечивающую программное выполнение требуемой диаграммы скорости, независимо от изменения нагрузки в заданных пределах, при этом отклонение скорости не должно отличаться более чем на  $1 \div 2\%$  без вмешательства обслуживающего персонала;

выбор зазоров в зубчатой передаче и плавное натяжение подъемного каната;

три вида управления: автоматическое, полуавтоматическое и ручное;

перевод подъемной машины с одного вида управления на другой лишь при заторможенной машине и при установке всех рукояток управления на пульте в исходном (нулевом) положении;

аварийный останов подъема с мест загрузки и разгрузки скипов, а также с пульта управления машиниста подъема;

наложение предохранительного тормоза при аварийном отключении подъемного двигателя от сети;

контроль за исправностью отдельных элементов оборудования и защиту от нарушений нормального режима работы подъемной машины в соответствии с требованиями ПБ и технологическими требованиями.

Кроме вышеперечисленных требований, электропривод подъемной установки должен удовлетворять условиям возможно большего к. п. д. установки при регулировании скорости и минимального потребления электроэнергии в период пауз, так как мощность подъемного двигателя достигает нескольких тысяч киловатт, минимального веса и стоимости.

В основном указанным выше требованиям удовлетворяют два типа привода. Это электропривод от асинхронного двигателя с фазным ротором и от двигателя постоянного тока с независимым возбуждением. Наибольшее распространение в Советском Союзе для привода рудничных подъемных установок получил асинхронный двигатель с фазным ротором, что объясняется следующими его преимуществами перед электроприводом постоянного тока: простота конструкции, меньшая стоимость, меньшая площадь для размещения электрооборудования, отсутствие преобразователя электроэнергии. Присущие же асинхронному двигателю недостатки, такие как неблагоприятные механические характеристики и большие потери электроэнергии при регулировании скорости введением в цепь его ротора активного сопротивления, который является в настоящее время основным способом регулирования, могут быть ликвидированы применением новых систем электропривода с частотным регулированием, каскадных схем включения асинхронного двигателя. Это стало возможным с развитием силовой полупроводниковой техники.

## **2.2. АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПУСКОМ ПОДЪЕМНОЙ МАШИНЫ С АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ**

Рассмотрим управление пуском асинхронного двигателя с фазным ротором. Наибольшее распространение нашло управление пуском асинхронного двигателя введением в цепь ротора активного сопротивления. Диаграммы угловой скорости и момента двигателя в период пуска приведены на рис. 2.4. Для выполнения такой диаграммы угловой скорости машинист-оператор подъемной машины должен через определенные промежутки времени  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  и т. д. передвигать рукоятку командоаппарата, включая тем самым контакторные катушки, срабатывание которых вызывает шунтирование ступеней пускового резистора в роторной цепи. В связи с тем что машинисту-оператору трудно обеспечить необходимые выдержки времени на различных пусковых ступенях, производительность подъемной уста-

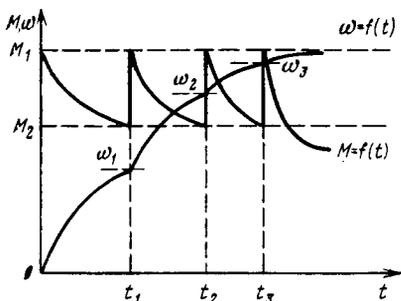


Рис. 2.4. Кривые изменения угловой скорости и момента при резисторном пуске

новки будет всецело зависеть от его морально-психологических качеств. Для ликвидации этих недостатков применяют автоматическое управление подъемной машиной, что обеспечивает надежность и безопасность работы установки, повышает ее производительность на 10—15 % из-за строгого выполнения заданной диаграммы скорости и выдерживания пауз между циклами подъема.

Автоматизировать процесс пуска асинхронного двигателя, т. е. выводить пусковые резисторы последовательным замыканием роторных контакторов, можно в зависимости от различных параметров, характеризующих режим работы подъемной машины. Такие параметры: время, момент, скорость, ускорение, путь или комбинация этих параметров (например, время и ток).

Наибольшее распространение на подъемных машинах нашли схемы автоматизации процесса пуска в зависимости от времени, тока с корректировкой по времени, времени с корректировкой по току, а также по ускорению. Преимущества и недостатки вышперечисленных схем подробно изложены в [26], и поэтому рассмотрим только схемы автоматизации периода пуска асинхронного двигателя в функции времени с корректировкой по току.

### 2.3. АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПУСКОМ ПО ВРЕМЕНИ С КОРРЕКТИРОВКОЙ ПО ТОКУ

В схемах автоматического управления пуском асинхронного двигателя по времени с корректировкой по току используется электромагнитное реле времени постоянного тока РЭ-500 с обмотками управления: втягивающей, размагничивающей и токовой.

Принцип работы трехобмоточного реле следующий. При подаче напряжения в цепь управления под напряжением оказываются лишь втягивающие обмотки, которые создают намагничивающие силы (н. с.)  $F_{вт} = a\omega_{вт}$ , приводящие к срабатыванию реле. При снятии напряжения с одной из обмоток н. с. в ней изменяется по экспоненциальному закону (рис. 2.5). Для ускорения затухания магнитного потока втягивающей обмотки и для уменьшения остаточной н. с. используется размагничивающая обмотка, которая создает н. с.  $F_p = a\omega_p$ , направленную встречно н. с. втягивающей обмотки  $F_{вт}$ .

Размагничивающая обмотка подключается одновременно с отключением втягивающей обмотки. Поэтому суммарная н. с.

определяется выражением  $F_{\Sigma} = F_{вт} - F_p$ . Но одновременно с размагничивающей обмоткой вступает в действие и токовая обмотка н. с, которой  $F_T = a\omega_T$  пропорциональна току подъемного двигателя, т. е. величине поднимаемого груза. Н.с токовой обмотки направлена согласно с н.с втягивающей обмотки, т. е. результирующая н.с

$$F_{\Sigma} = F_{вт} + F_T - F_p.$$

Кривые изменения н.с всех трех обмоток во времени показаны на рис. 2.5. Выдержка времени реле определяется условием  $F_{\Sigma} < F_{пр}$ , когда усилие притягивания якоря реле, создаваемое результирующей н.с, станет меньше усилия, создаваемого пружиной  $F_{пр}$ , т. е. в данном случае времени  $t_1$ . Это случай, когда осуществляется подъем нормального груза ( $M_{ст} = M_{ном}$ ). При подъеме более легкого груза ( $M_{ст} < M_{ном}$ ) кривая изменения н.с токовой обмотки  $F_T$  примет вид, показанный на рис. 2.5 пунктирной линией. Это вызывает изменение результирующей н.с, а следовательно, и выдержки времени реле, которая станет равной  $t_2$ . При подъеме тяжелых грузов ( $M_{ст} > M_{ном}$ ) изменение кривой н.с токовой обмотки  $F_T$  (штрих-пунктирная линия) автоматически увеличивает время срабатывания реле до величины  $t_3$ . Таким образом, применение в схеме автоматического пуска асинхронного двигателя трехобмоточного реле приводит к автоматическому слежению за нагрузкой на валу подъемного двигателя.

Принципиальная схема пуска асинхронного двигателя по времени с корректировкой по току с использованием трехобмоточного реле показана на рис. 2.6. Рассмотрим ее работу.

После подачи напряжения постоянного тока в цепь управления подъемным двигателем получают питание втягивающие обмотки реле времени  $KT1.1-KT3.1$  через размыкающие контакты  $РДБ$  и  $КМ4, КМ5$ . Их срабатывание приводит к размыканию контактов  $КТ1-KТ3$  в цепях контакторных катушек ускорения  $КМ4-KМ6$  и замыканию контактов  $КТ1-KТ3$  в цепях размагничивающих обмоток  $КТ1.2-KТ3.2$  и токовых обмоток  $КТ1.3-KТ3.3$ . Перевод рукоятки командоаппарата в крайнее левое (закрывается контакт  $КК-В$ ) или правое положение (закрывается контакт  $КК-Н$ ) приводит к подключению катушек контакторов  $КМ3$  ( $КМ2$ ) и  $КМ1$  и к замыканию главных контактов  $КМ3$  ( $КМ2$ ) и  $КМ1$  в цепи статора асинхронного двигателя.

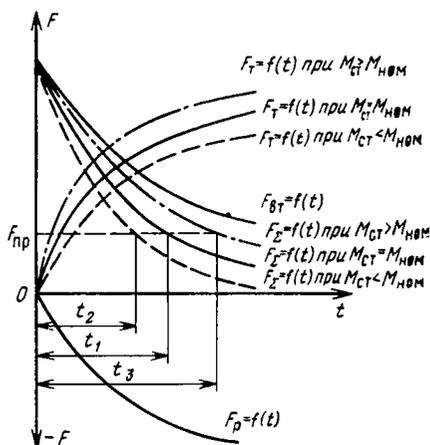


Рис. 2.5. Кривые намагничивающих сил трехобмоточного реле времени

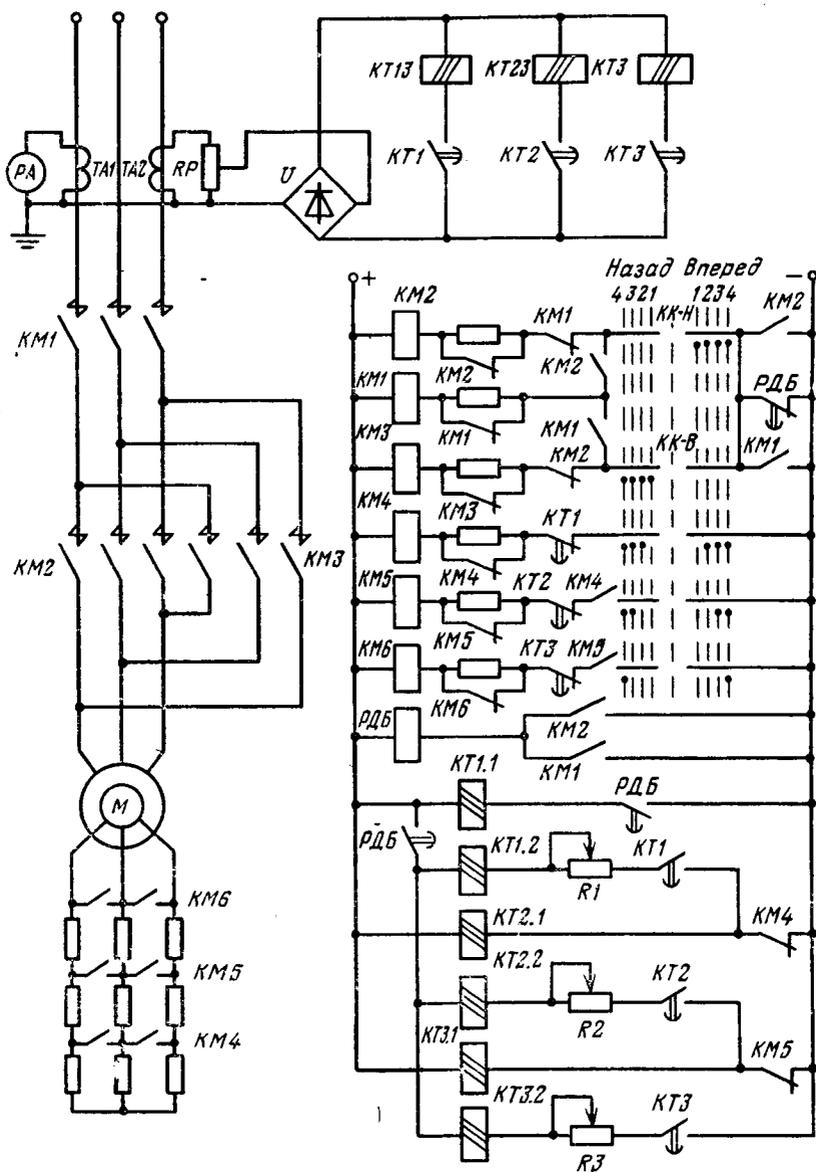
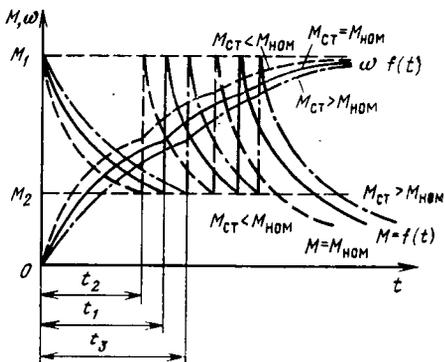


Рис. 2.6. Принципиальная схема пуска асинхронного двигателя в функции времени с корректровкой по току

теля, подключая его к сети переменного тока, а токовые обмотки  $KT1.3$ — $KT3.3$  через выпрямитель  $U$  и потенциометр  $RP$  — к трансформатору тока  $TA2$ . Одновременно с этим происходит включение реле дуговой блокировки  $РДБ$ , которое сво-

Рис. 2.7. Кривые изменения момента и угловой скорости асинхронного двигателя при пуске в функции времени с корректировкой по току



ими контактами обесточивает стягивающую обмотку  $KT1.1$  и подключает размагничивающую обмотку  $KT1.2$  к источнику питания постоянным током. После снижения результирующей н. с  $F_{\Sigma}$  реле времени до величины меньшей  $F_{пр}$  происходит ее срабатывание, сопровождающееся замыканием контакта  $KT1$  в цепи контактора ускорения  $KM4$ , вызывая ее срабатывание, и своими контактами он производит шунтирование первой ступени пускового резистора в цепи ротора асинхронного двигателя и размыкание замыкающего контакта  $KT1$  в цепях размагничивающей обмотки  $KT1.2$  и токовой обмотки  $KT1.3$ . Размыкание контакта  $KM4$  после срабатывания контактора ускорения  $KM4$  приводит к обесточиванию стягивающей обмотки  $KT2.1$ , и процесс разгона подъемного двигателя на второй пусковой ступени протекает аналогично.

Кривые изменения угловой скорости, момента асинхронного двигателя при пуске в функции времени с корректировкой по току нагрузки приведены на рис. 2.7. Сплошными линиями показан пуск при нормальной нагрузке, пунктирными — при подъеме легкого груза, штрих-пунктирными линиями — при подъеме тяжелого груза. Из графиков следует, что в зависимости от величины поднимаемого груза автоматически изменяется время пуска. Оно тем больше, чем больше нагрузка, и наоборот. Защита от застревания двигателя на промежуточных ступенях обеспечивается таким подбором результирующей н. с  $F_{\Sigma}$ , чтобы она была меньше  $F_{пр}$ , при возможной перегрузке двигателя.

Установочные резисторы  $R1$ ,  $R2$ ,  $R3$  и потенциометр  $R$  служат для настройки соответственно размагничивающих  $KT1.2$ — $KT3.2$  и токовых обмоток  $KT1.3$ — $KT3.3$  на необходимые намагничивающие силы.

В рассмотренной выше схеме управления пуском асинхронного двигателя используются 5—8 пусковых ступеней металлических резисторов, включение и выключение которых в цепь ротора ведется с помощью релейно-контакторной аппаратуры.

#### 2.4. УПРАВЛЕНИЕ ПУСКОМ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ЖИДКОСТНЫМ РЕОСТАТОМ

Ступенчатое изменение пускового момента при релейно-контакторной схеме управления вызывает значительные динамические нагрузки в элементах подъемной машины, что ускоряет износ канатов и редукторов.

Недостатки, присущие релейно-контакторному способу управления, могут быть ликвидированы применением жидкостного резистора, нашедшего широкое применение в зарубежной практике. Это достигается тем, что жидкостный резистор обеспечивает возможность более плавного разгона подъемного двигателя, уменьшение пусковых токов, требует меньших рабочих площадей, незначительной мощности управления и более прост в эксплуатации.

При управлении асинхронным двигателем подъемной машины с использованием жидкостного резистора в период пуска для поддержания постоянства момента двигателя и ускорения необходимо плавное перемещение его электродов. Перемещение электродов можно производить вручную, что и предусмотрено в пульте управления подземных подъемных лебедок и машин (ППМ). В установках с более мощным приводом управления перемещением электродов жидкостного резистора ведется дистанционно и автоматически, с минимальным приложением мускульных усилий.

Следящий электропривод, используемый для этих целей, должен удовлетворять следующим требованиям: достаточное быстродействие, приемлемое число промежуточных положений электродов, удержание электродов в любом положении при отсутствии сигнала рассогласования, простота, надежность, экономичность и удобство в эксплуатации.

В качестве следящего привода жидкостного резистора может быть использована одна из перечисленных ниже систем: электрогидравлическая, электропневматическая; электромеханическая с двигателем постоянного или переменного тока и с контактным или бесконтактным управлением.

*Следящий электропривод с двигателем постоянного тока.* В рассматриваемом приводе в качестве передачи вращающего момента от двигателя к электродам жидкостного резистора применяется червячный редуктор — большое передаточное число при малом собственном моменте инерции, что очень важно для быстродействующих приводов.

Принципиальная схема управления асинхронным двигателем с жидкостным резистором приведена на рис. 2.8. Электроды жидкостного резистора приводятся в движение через редуктор  $P$  двигателем постоянного тока с независимым возбуждением  $M2$ . Управление  $M2$  ведется блоком магнитных усилителей  $БМУ$ , имеющим четыре обмотки управления. Обмотка смещения  $ОУЗ$  включена на тот же источник питания, что и

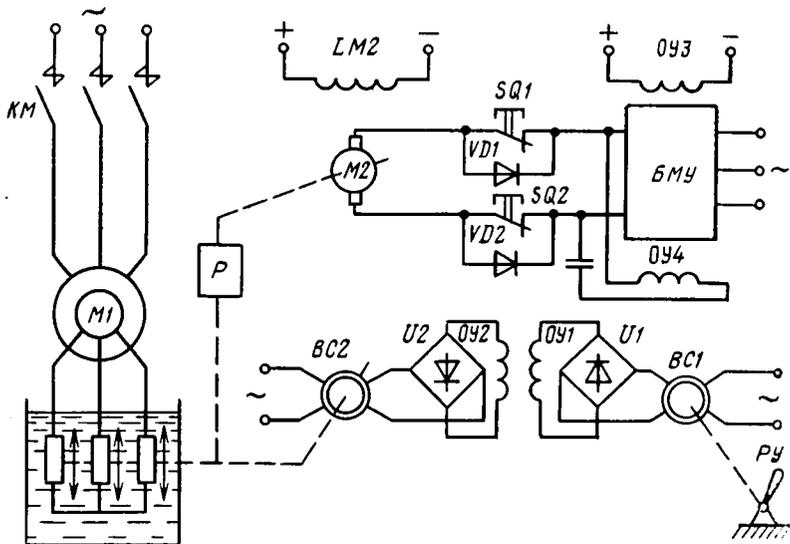


Рис. 2.8. Принципиальная схема асинхронного двигателя с жидкостным резистором

обмотка возбуждения двигателя  $LM2$ . Обмотки управления  $OY1$  и  $OY2$  подключены на выходы сельсинов  $BC1$  и  $BC2$  через выпрямители  $U1$  и  $U2$ . Намагничивающие силы этих обмоток направлены встречно, так что при равенстве токов в этих обмотках результирующая н. с. равна нулю. В этом случае нет рассогласования и напряжение на выходе  $БМУ$  отсутствует. При разных токах в обмотках управления на выходе  $БМУ$  появляется напряжение, вызывающее вращение двигателя  $M2$ . Последний через редуктор  $P$  перемещает электроды жидкостного резистора и ротор сельсина обратной связи  $BC2$  до тех пор, пока рассогласование не уменьшится до нуля. Одно из крайних положений рукоятки управления соответствует полностью выведенному резистору, а другое — полностью введенному.

Для ограничения движения электродов жидкостного резистора сверх допустимого и устранения в связи с этим поломок в механической части в конечных положениях устанавливаются конечные выключатели: верхнего  $SQ1$  и нижнего  $SQ2$  положений. Контакты конечных выключателей зашунтированы диодами  $VD1$  и  $VD2$ , пропускающими ток только в одном направлении и обеспечивающими включение двигателя  $M2$  для другого направления вращения при размыкании одного из конечных выключателей.

Обмотка управления  $OY4$  включена на выход  $БМУ$  и осуществляет гибкую обратную связь по первой производной от сигнала рассогласования, обеспечивающей благоприятное протекание переходных процессов.

## 2.5. АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЗАМЕДЛЕНИЕМ ПОДЪЕМНОЙ МАШИНЫ

Завершающий период работы подъемной машины — период замедления.

Рассмотрим наиболее простой метод замедления подъемной машины с использованием механического тормоза. При таком виде замедления двигатель отключается от сети и накладывается механический тормоз, создаваемое при этом тормозное усилие  $F_T$  обеспечивает заданное замедление подъемной машины  $a_3$  при номинальной статической нагрузке  $F_{с. ном}$ . Величина замедления определяется из выражения

$$a_3 = -(F_{с. ном} + F_T)/m, \quad (2.2)$$

где  $m$  — приведенная масса подъемной установки.

При постоянстве значения замедления изменение скорости движения подъемных сосудов показано прямой линией 1—2 (рис. 2.9).

В действительности же статическая нагрузка на валу подъемной машины при различных циклах подъема неодинакова из-за неравномерной загрузки скипа или клетки. Помимо этого тормоз не может обеспечить постоянства тормозного усилия из-за нестабильности коэффициента трения между колодками и тормозным ободом. Поэтому действительное замедление подъемной машины будет отличаться от заданного его значения  $a_3$ , т. е. в этом случае изменение скорости движения сосудов в период замедления будет происходить по линиям 1—3 или 1—4 (рис. 2.9).

В связи с этим в процессе замедления подъемные сосуды проходят разный путь, из-за чего наблюдается неточность их остановки относительно приемной площадки. Неточность остановки зависит также от погрешности срабатывания конечных или путевых выключателей релейно-контакторной аппаратуры, от колебания напряжения и частоты питающей сети при двигательном режиме замедления и от других факторов. Поэтому неточная остановка подъемных сосудов приводит к излишнему маневрированию, т. е. к необходимости повторного включения двигателя, что влечет за собой потери времени на эти опера-

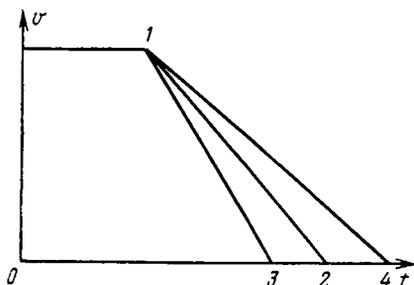


Рис. 2.9. Диаграммы скорости при замедлении подъемных сосудов

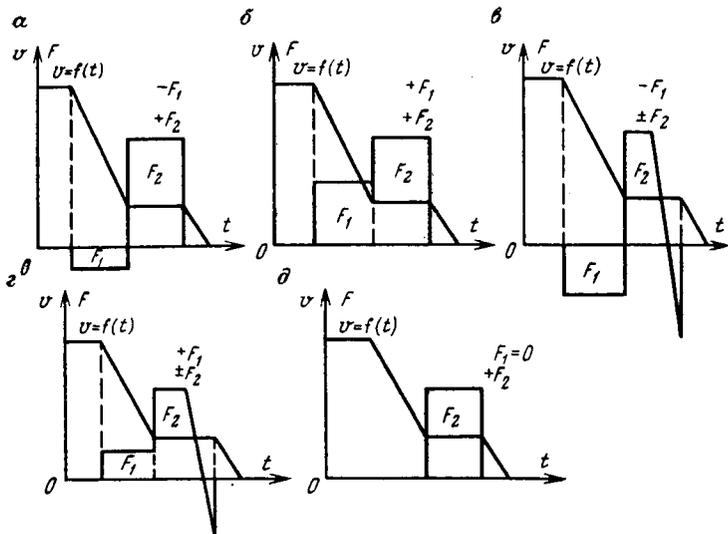


Рис. 2.10. Диаграммы усилий в режимах замедления и дотягивания подъемного сосуда

ции, повышенный нагрев двигателя и преждевременный износ оборудования.

Большинство подъемных машин в процессе замедления имеют три периода: основное замедление; движение с постоянной малой скоростью (дотягивание); стопорение машины в конце подъема.

Неточность выполнения графика скорости в режиме основного замедления, предшествующего дотягиванию, приводит к входу скипа или опрокидной клетки в разгрузочные кривые с повышенной скоростью, что вызывает удар роликов о направляющие, либо к удлинению пути, проходимого подъемным сосудом с пониженной скоростью дотягивания. Первое обстоятельство может привести к выходу из строя механического оборудования, второе — к снижению производительности. Следовательно, период замедления является наиболее ответственным и к нему предъявляются весьма высокие требования при автоматизации этого режима.

На рис. 2.10 приведены наиболее характерные диаграммы усилий  $F = (f)t$  в период замедления рудничных подъемных машин. В период основного замедления необходимо приложение тормозного усилия  $F_1$  (см. рис. 2.10, а, в), двигательного усилия  $F_2$  (см. рис. 2.10, б, г) или отсутствие двигательного и тормозного усилий, т. е. в этом случае подъемная машина работает в режиме свободного выбега  $F_1 = 0$  (см. рис. 2.10, д). Из графиков следует, что подъемная установка характеризуется большим разнообразием режимов замедления. Поэтому при выборе системы регулирования и воздействия на подъемную машину

необходим их тщательный анализ и индивидуальный подход. При выборе системы автоматического управления режимом замедления подъемной машины необходимо стремиться к максимальной ее простоте, надежности и возможности регулирования во всех периодах диаграммы скорости.

Согласно рис. 2.10 необходимые диаграммы усилий могут быть обеспечены следующими системами: двигатель — механический тормоз; двигатель — динамическое торможение — питание током низкой частоты; двигатель — динамическое торможение — механический тормоз.

При ненапряженном режиме работы подъемной машины, когда  $F_T < 0,3F_{ном}$ , или при двигательном режиме замедления целесообразно применять регулируемый механический тормоз, или двигательный режим асинхронного двигателя в сочетании с регулируемым механическим торможением.

При тяжелых режимах работы, когда  $F_T > 0,3F_{ном}$ , целесообразно использовать в период замедления режим динамического торможения асинхронного двигателя и механический тормоз. При этом если тяжелые тормозные режимы являются систематическими для данной подъемной установки, то следует применять регулируемое динамическое торможение и регулируемый механический тормоз, который вступает в работу только при недостаточности тормозного момента, создаваемого асинхронным двигателем, работающим в режиме динамического торможения. На подъемных установках, где тяжелые тормозные режимы относительно редки, возможно применение нерегулируемого динамического торможения, рассчитанного на подъем максимального груза, и регулируемого механического тормоза.

Период дотягивания подъемных сосудов может быть осуществлен системой асинхронного двигателя, работающего в двигательном режиме в сочетании с регулируемым механическим тормозом или работающего в импульсном режиме. Для подъемных установок, характеризующихся резким изменением нагрузки в период дотягивания сосудов в разгрузочных кривых, применима система асинхронного двигателя с питанием его от преобразователя низкой частоты или система с регулируемым механическим тормозом.

*Механическое торможение.* Наиболее надежную работу подъемной машины (при минимальных капитальных затратах) обеспечивает автоматическое управление ею в период замедления с применением регулируемых механических тормозов. В этом случае отсутствует громоздкое дополнительное оборудование и автоматизация осуществляется в основном с помощью оборудования, применяющегося на неавтоматизированной подъемной установке.

Разработано несколько типов дистанционно управляемых регуляторов давления ЭРДП и РДБВ или РДБГ. Наиболее совершенен электропневматический регулятор давления РДБВ или РДБГ. Эти регуляторы позволяют дистанционно регулиро-

вать тормозное усилие на ободе барабана подъемной машины изменением тока в катушке соленоида.

Регулятор РДБВ (рис. 2.11) состоит из корпуса 11, золотника 10, пружин 5, 7, якоря 4 и магнитной системы, в которую входят три обмотки управления (ОУ1—ОУ3), предназначенные: ОУ1 и ОУ2 — для дистанционного управления, ОУ3 — для получения первой ступени давления при предохранительном торможении. Каналы 2, 12 и 1 соединяют регулятор соответственно с атмосферой, цилиндром рабочего тормоза и воздухохраником.

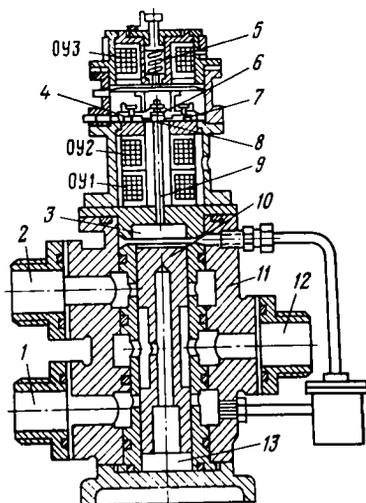


Рис. 2.11. Конструкция РДБВ

Принцип действия регулятора РДБВ основан на изменении давления воздуха в камере 3 проточного регулирования, в связи с чем изменяется положение золотника 10 относительно каналов 1, 2 и 12. Давление в проточной камере 3 регулируется изменением давления сжатого воздуха в канале 9 и отверстия 8. Степень открытия отверстия 8 регулируется клапаном 6 и определяется намагничивающими силами катушек ОУ1—ОУ3, действующих на якорь 4, подвешенный на пружинах 5, 7.

При увеличении намагничивающей силы одной из катушек управления (например, ОУ1) клапан 6 уменьшает отверстие 8. Это вызывает повышение давления в камере 3 проточного регулирования, пружины 5 и 7 сжимаются, а золотник 10 опускается вниз, и происходит поступление сжатого воздуха из воздухохраника по каналу 1 в канал 12 рабочего цилиндра. Поступление сжатого воздуха продолжается до тех пор, пока давление в рабочем цилиндре и, следовательно, в подзолотниковой камере 13 не возрастет до величины, при которой под действием незначительно большего давления (на величину сил трения) золотник 10 не вернется в нейтральное положение равновесия. Впуск сжатого воздуха в рабочий цилиндр прекращается.

При уменьшении тока в обмотке управления, а следовательно, и намагничивающей силы клапан 6 откроет отверстие 8. Давление в камере 3 проточного регулирования при этом уменьшается, а золотник 10 под действием давления со стороны подзолотниковой камеры 13 пойдет вверх, и начнется выпуск сжатого воздуха из цилиндра рабочего тормоза (канал 12) в атмосферу (канал 2). Выпуск будет происходить до тех пор, пока давление в цилиндре и под золотником не упадет до величины,

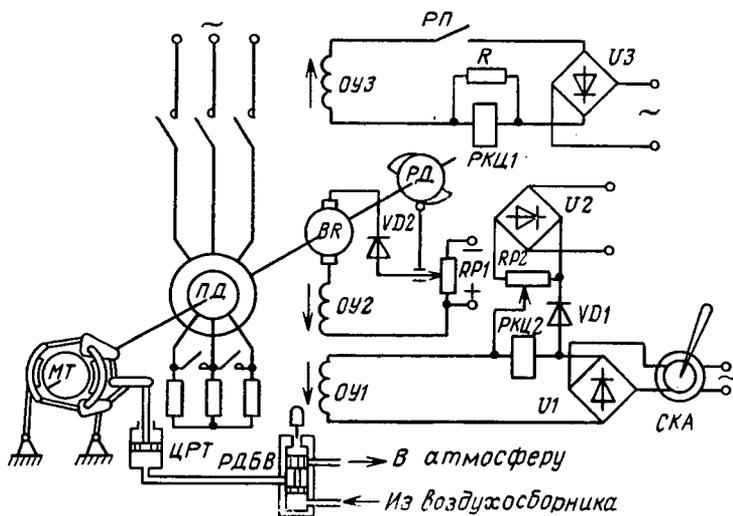


Рис. 2.12. Электрическая схема электропневматического регулятора давления

при которой золотник под действием давления в камере 3 проточного регулирования вернется в положение равновесия. Таким образом, при нейтральном положении золотника давления в рабочем цилиндре, под золотником и в камере проточного регулирования практически всегда равны.

Электрическая схема управления регулятором давления приведена на рис. 2.12. Обмотка управления  $ОУ1$  электромагнита электропневматического регулятора давления получает питание от сельсинного командоаппарата  $СКА$  через выпрямитель  $U1$ . Изменение положения рукоятки сельсинного командоаппарата вручную или программным устройством приводит к изменению угла поворота ротора и тока в обмотке управления  $ОУ1$ . Это вызывает увеличение н. с. соленоида, изменение положения золотника и подачу сжатого воздуха в цилиндр рабочего тормоза  $ЦРТ$ . При уменьшении тока в обмотке  $ОУ1$  сжатый воздух выпускается из рабочего цилиндра в атмосферу и тормоз растормаживается.

Обмотка управления  $ОУ2$  электромагнита включена в цепь сравнения действительной и заданной скоростей. Роль первой выполняет тахогенератор  $BR$ , напряжение которого пропорционально действительной частоте вращения подъемного двигателя  $ПД$ . Заданная скорость представлена напряжением, снимаемым с потенциометра  $RP1$ , регулирование величины которого осуществляется ползунком, жестко связанным с ретардирующим диском  $РД$ . Напряжение  $U_{BR}$  направлено встречно напряжению, снимаемому с потенциометра  $RP1$ . Ток через обмотку управле-

ния  $OU2$  пойдет только тогда, когда действительная частота вращения подъемного двигателя  $ПД$  превысит заданную. Н. с. этой обмотки направлена согласно с н. с. обмотки управления  $OU1$ . Результирующая н. с. возрастет и приведет к увеличению тормозного усилия рабочего тормоза  $MT$ .

В цепь обратной связи по скорости включен диод  $VD2$ , предназначенный для исключения обратного направления тока в обмотке управления  $OU2$ , так как при слишком быстром замедлении машины в обмотке  $OU2$  мог бы появиться ток обратного направления, который вызвал бы растормаживание подъемной машины вместо того, чтобы затормозить ее.

Обмотка управления  $OU3$  получает питание от выпрямителя  $U3$  и служит для создания предварительного торможения при обрыве цепи управления  $OU1$  или собственной цепи  $OU3$ . В нормальном положении, когда цепи катушек  $OU1$  и  $OU3$  целы, обмотка  $OU3$  включена и якорь 4 (см. рис. 2.11) притянут вверх. При обрыве цепи обмотки  $OU1$  давление в рабочем цилиндре падает до нуля, так как клапан 6 не перекрывает отверстия 8 камеры проточного регулирования. Но этого не произойдет, поскольку одновременно с разрывом цепи  $OU1$  (см. рис. 2.12) размыкается контакт  $PP$  и обесточивается обмотка  $OU3$ , вызывающая опускание якоря 4 (см. рис. 2.11), перекрытие отверстия 8 и опускание золотника 10. Этим обеспечивается получение первой ступени предварительного торможения. Величина давления этой ступени определяется предварительным сжатием пружины 7.

Для контроля целостности цепи обмоток управления  $OU1$  и  $OU3$  (см. рис. 2.12) регулятора давления в схеме предусмотрены токовые реле  $PKЦ1$  и  $PKЦ2$  с шунтирующими резисторами  $RP2, R$ . Так как ток в обмотке  $OU1$  меняется от 25 до 300 мА, а ток срабатывания реле равен 8—10 мА, то кроме шунтирующего резистора  $RP2$  для защиты реле  $PKЦ2$  от перегрева установлены выпрямитель  $U2$  и диод  $VD1$ . При малом напряжении сельсина  $СКА$  диод  $VD1$  заперт напряжением, снимаемым с потенциометра  $RP2$ , ток идет через реле  $PKЦ2$ . При увеличении напряжения на выходе сельсина из-за поворота его ротора оно становится выше подпирającego напряжения, диод  $VD1$  открывается и ток обмотки  $OU1$  начинает частично проходить через шунтирующий резистор  $RP2$ , защищая реле  $PKЦ2$  от перегрева.

*Динамическое торможение.* Отрицательные усилия в период основного замедления, когда происходит изменение скорости от номинальной до скорости дотягивания, могут создаваться асинхронным двигателем, работающим в генераторном или тормозном режиме. Из электрических способов торможения асинхронного двигателя подъемной машины наибольшее распространение получил режим динамического торможения. Основные преимущества этого режима:

широкий диапазон изменения скорости движения подъемных сосудов (от номинальной до  $0,05 V_{ном}$ );

возможность создания постоянства тормозного момента в период замедления;

увеличение срока службы канатов, редуктора, подшипников и других механических частей подъемной установки благодаря возможности плавного изменения тормозного момента и скорости;

простота электрических схем автоматического управления режимом замедления подъемной машины, а следовательно, высокая надежность.

Для создания режима динамического торможения необходимо в цепь статора асинхронного двигателя подать постоянный ток возбуждения, предварительно отключив его обмотки от сети переменного тока. При этом обмотки статора могут иметь различные схемы соединения. Наиболее распространенной является схема соединения обмоток статора в звезду.

Для этой схемы соединения найдем соотношение между постоянным и переменным токами асинхронного двигателя. Это соотношение можно получить из выражений результирующих н. с. переменного трехфазного тока и от постоянного тока возбуждения. Н. с. от трехфазного тока равна 1,5-кратной величине амплитудного значения н. с. одной фазы:

$$F_{\text{трех. ф}} = 1,5 \sqrt{2} I_{\text{л}} \omega_1. \quad (2.3)$$

Результирующая н. с. от постоянного тока возбуждения определяется из диаграммы, н. с. для которой

$$F_{\text{пост}} = 2I_{\text{п}} \omega_1 \cos 30^\circ = \sqrt{3} I_{\text{п}} \omega_1. \quad (2.4)$$

Приравнявая н. с. от постоянного и переменного трехфазного токов, получим

$$I_{\text{п}} = 1,23I_{\text{л}}. \quad (2.5)$$

Аналогично могут быть получены соотношения между постоянным и переменным токами асинхронного двигателя при других схемах соединения обмоток статора. Для создания одного и того же значения магнитного поля статора для различных схем соединения его обмоток потребуются различные значения постоянного тока  $I_{\text{п}}$  и различное число силовых контактов. При окончательном выборе схемы соединения обмотки статора асинхронного двигателя, работающего в режиме динамического торможения, руководствуются следующими показателями: простотой, минимальными капитальными затратами, надежностью и минимальным числом силовых контактов.

Мощность источника постоянного тока, необходимая для реализации режима динамического торможения, определяется напряжением и током. В свою очередь напряжение постоянного тока зависит от схемы соединения обмоток статора. При подаче постоянного тока в две фазы статора, соединенных в звезду,

что служит наиболее распространенной схемой, напряжение питания определяется по формуле

$$U_{\text{п}} = 2I_{\text{п}}Rl k_3, \quad (2.6)$$

где  $I_{\text{п}}$  — постоянный ток возбуждения асинхронного двигателя, работающего в режиме динамического торможения;  $Rl$  — сопротивление фазы статора АД;  $k_3 = 1,5 \div 2$  — коэффициент запаса по напряжению, учитывающий необходимость форсирования напряжения при переходных процессах.

Значение постоянного тока возбуждения, нужное для получения требуемого тормозного момента, определяется по формуле

$$I_{\text{п}} = \sqrt{\frac{\eta_{\text{р}} \rho n_0}{U_{2\text{н}} I_{2\text{н}} m^2} \left[ I_{1\text{н}}^2 - I_{2\text{н}}^2 \left( \frac{U_{2\text{н}}}{U_{1\text{н}}} \right)^2 \right] \left( a_3 i \frac{J}{R_6} + M_{\text{ст}} \right)}, \quad (2.7)$$

где  $\eta_{\text{р}}$  — к. п. д. редуктора;  $\rho = r/R_{\text{н}}$  — сопротивление роторной цепи в относительных единицах, соответствующее работе АД на второй предварительной ступени;  $n_0$  — синхронная скорость вращения АД;  $U_{1\text{н}}$ ,  $U_{2\text{н}}$ ,  $I_{1\text{н}}$ ,  $I_{2\text{н}}$  — соответственно номинальные напряжения и токи статора и ротора;  $m$  — поправочный коэффициент ( $m = 0,7$  — для клетевых и  $m = 1,0$  — для скиповых подъемов);  $a_3$  — заданное замедление;  $i$  — передаточное отношение редуктора;  $J$  — момент инерции движущихся частей подъемной установки;  $R_6$  — радиус барабана.

Итак, мощность источника постоянного тока должна быть

$$P_{\text{п}} \geq U_{\text{п}} I_{\text{п}}.$$

В качестве источника постоянного тока применяются генераторы постоянного тока, электромашинные, магнитные или полупроводниковые усилители. Все эти установки имеют регулируемый источник постоянного тока, но известны также установки с нерегулируемым источником постоянного тока. К ним относятся неуправляемые полупроводниковые выпрямители. Мощность источника постоянного тока незначительна и составляет 3—5 % мощности подъемного двигателя.

Режим динамического торможения можно использовать не только в период основного замедления, но и при спуске людей или груза. В первом случае до наступления периода замедления двигатель работает в двигательном режиме. Затем для перевода его в режим динамического торможения необходимо отключить двигатель от сети переменного тока и в обмотки статора подать постоянный ток. При этом в статоре создается неподвижное в пространстве поле, которое во вращающемся по инерции роторе наводит э. д. с. А так как обмотки ротора замкнуты накоротко или на внешнее сопротивление, то в них появится ток, который, взаимодействуя с полем статора, создает тормозной момент. Во втором случае постоянный ток в обмотки

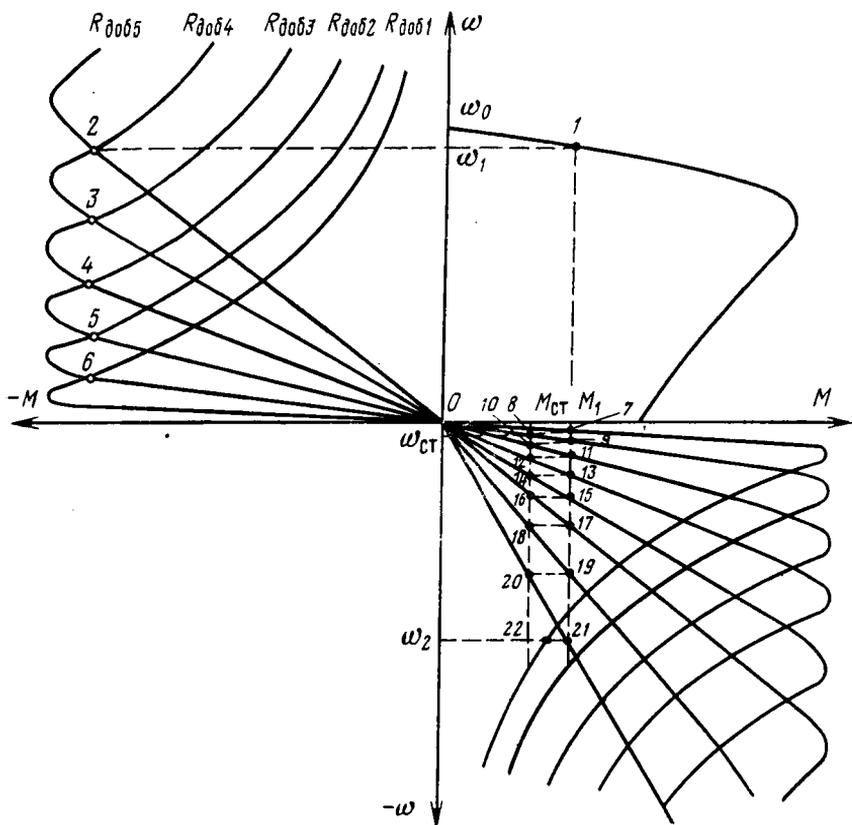


Рис. 2.13. Механические характеристики асинхронного двигателя в режиме динамического торможения

статора подается сразу же, а ротор двигателя приводится во вращение под действием опускающегося груза. Далее процесс создания тормозного момента протекает аналогично.

Характеристики асинхронного двигателя, работающего в режиме динамического торможения, приведены на рис. 2.13. Там же показан переход из двигательного режима в режим динамического торможения в период основного замедления подъемной машины при подъеме груза. До начала замедления двигатель работал в двигательном режиме с угловой скоростью  $\omega_1$  и развивал движущий момент  $M_1$  (точка 1). При переходе в режим динамического торможения асинхронный двигатель не только отключается от сети переменного тока и в его обмотки подается постоянный ток, но и в цепь ротора вводится добавочное активное сопротивление  $R_{доб5}$  для получения максимального тормозного момента. Тормозной момент в этом случае соответствует точке 2. По мере снижения скорости необхо-

димо переходить с одной механической характеристики на другую для поддержания постоянства тормозного момента, целесообразнее это делать в точках 3—6. При этом исключаются броски тока и момента, изменение момента в период замедления незначительно, что обеспечивает равномерный ход подъемной машины. Вручную обеспечить такой переход практически невозможно, поэтому он осуществляется автоматически в функции скорости. Окончательное торможение подъемной машины производится механическим тормозом, так как при скорости равной нулю тормозной момент асинхронного двигателя, работающего в режиме динамического торможения, также равен нулю. При спуске людей и груза работа асинхронного двигателя в режиме динамического торможения протекает следующим образом. Сначала двигатель работает как короткозамкнутый с моментом нагрузки  $M_{ст}$  и развивает угловую скорость  $\omega_{ст}$ . Для увеличения скорости подъемного сосуда в цепь ротора вводится добавочное активное сопротивление. Угловая скорость увеличивается по ломаной линии 7—21. В точке 21 угловая скорость двигателя  $\omega_2$  наибольшая, а тормозной момент соответствует моменту нагрузки  $M_{ст}$ . Но работа двигателя в точке 21 неустойчива, так как механическая характеристика мягкая и незначительные изменения нагрузки вызывают значительные изменения угловой скорости.

Замедление подъемной машины, осуществляющей спуск людей или груза, ведется в обратном порядке, т. е. вновь выводятся добавочные резисторы. При этом выключение их необходимо вести с выдержкой по времени, так как быстрый их вывод может привести к переходу двигателя на неустойчивую часть механической характеристики. Например, резкий вывод пускового резистора, т. е. закорачивание ротора при  $\omega_2$ , приводит к тому, что тормозной момент станет меньше момента нагрузки  $M_{ст}$  (точка 22) и вместо уменьшения произойдет увеличение скорости. А с увеличением угловой скорости тормозной момент двигателя еще больше уменьшится и подъемная машина пойдет вразнос.

Неустойчивая часть механической характеристики динамического торможения может быть устранена автоматическим увеличением тока возбуждения статора при возрастании момента нагрузки. Это обстоятельство позволяет увеличить тормозной момент на неустойчивой части механической характеристики, т. е. увеличить площадь, заключенную между неустойчивой частью механической характеристики и осью ординат. При эффективной компенсации поля ротора неустойчивая часть механических характеристик в пределах тормозных моментов совсем исчезает или обладает столь высокими тормозными моментами, что переход в режим динамического торможения при любой ступени резистора не вызывает опрокидывания двигателя.

Автоматическое управление режимом замедления подъемной машины обычно заключается в регулировании как постоянного

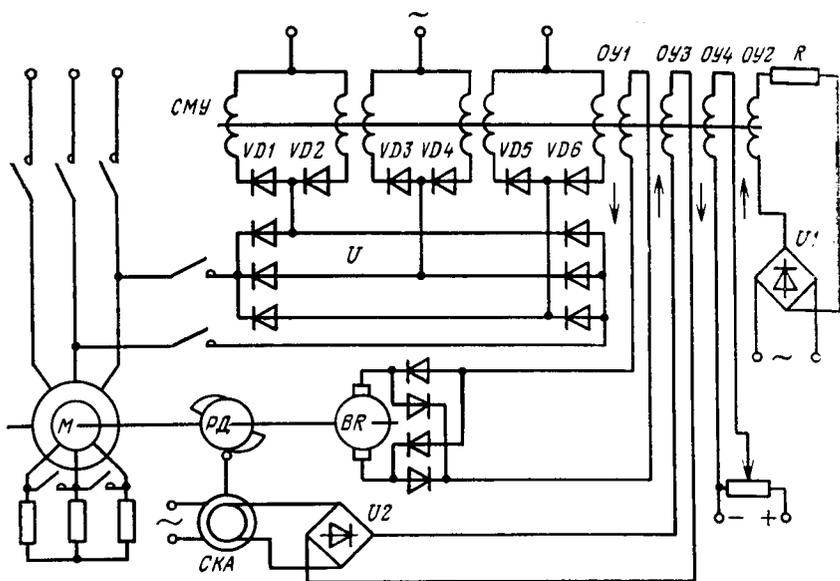


Рис. 2.14. Принципиальная схема автоматизированной подъемной машины с динамическим торможением

тока возбуждения статора, так и добавочного активного сопротивления в цепи ротора.

Принципиальная схема автоматизированной подъемной машины с динамическим торможением приведена на рис. 2.14. В качестве источника постоянного тока служит силовой магнитный усилитель с неуправляемым выпрямителем  $U$ . В схеме применен трехфазный магнитный усилитель  $СМУ$ , каждая фаза которого имеет две соединенные параллельно силовые обмотки переменного тока. Последовательно в каждой обмотке включены диоды  $VD1—VD6$ , с помощью которых осуществляется внутренняя обратная связь по току. На обмотки статора выпрямленное напряжение подается от  $СМУ$  через выпрямитель  $U$ , собранный по трехфазной мостовой схеме. Магнитный усилитель  $СМУ$  имеет несколько обмоток управления. Обмотка управления  $OU2$  выполняет роль смещения и получает питание от выпрямителя  $U1$  через установочный резистор  $R$ . Обмотка управления  $OU1$  получает питание от якоря тахогенератора  $БР$ , напряжение которого пропорционально скорости подъемного сосуда. Напряжение, пропорциональное заданной скорости, подается от сельсинного командоаппарата  $СКА$  через выпрямитель  $U2$  на обмотку управления  $OU3$ . Сельсин связан с профилем ретардирующего диска  $РД$ . Обмотка управления  $OU4$  предназначена для создания первоначального намагничивания. Результирующая н. с обмоток управления

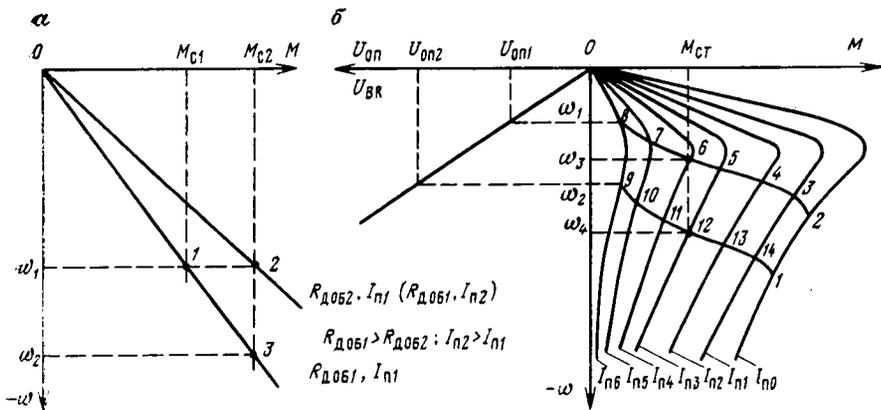


Рис. 2.15. Механические характеристики асинхронного двигателя в режиме динамического торможения в разомкнутой (а) и замкнутой (б) системах

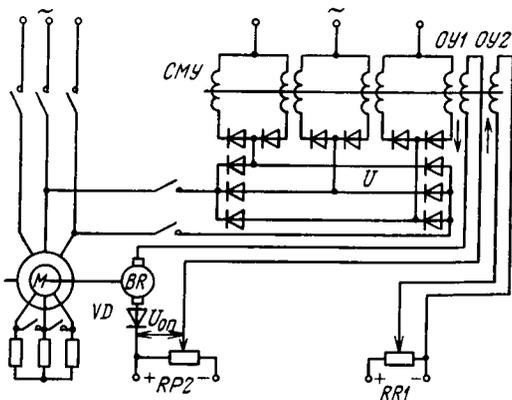


Рис. 2.16. Принципиальная схема асинхронного двигателя с динамическим торможением в режиме спуска

$$F_{\Sigma} = -F_{OY2} - F_{OY3} + F_{OY1} + F_{OY4} \quad (2.9)$$

Если действительная скорость движения подъемных сосудов больше заданной, то результирующая н. с. возрастает, в результате чего увеличивается тормозной момент асинхронного двигателя, а скорость снижается.

Поддержание постоянства тормозного момента в период замедления осуществляется постепенным шунтированием пусковых резисторов. Это достигается автоматически по скорости, для чего в цепь якоря тахогенератора включаются несколько реле скорости (напряжения). С уменьшением скорости происходит последовательное срабатывание этих реле, которые приводят к последовательному включению контакторов ускорения и шунтированию резисторов. Этим достигается постоянство тормозного момента.

Рассмотрим принцип действия системы автоматического поддержания скорости в режиме динамического торможения при спуске груза при изменении нагрузки на валу двигателя, т. е. получение жестких механических характеристик. Предположим, идет спуск груза с угловой скоростью  $\omega_1$  и моментом нагрузки  $M_{с1}$ . Двигатель работает в режиме динамического торможения на характеристике (точка 1), характеризуемой добавочным резистором  $R_{доб1}$  и током статора  $I_{п1}$  (рис. 2.15). В случае увеличения опускающегося груза до  $M_{с2}$  угловая скорость спуска возрастает до  $\omega_2$  (точка 3). Чтобы этого не произошло, выводится часть добавочного резистора ротора. Механическая характеристика принимает вид, соответствующий  $R_{доб2}$ , а угловая скорость опускания груза сохранится без изменения  $\omega_1$  (точка 2). Аналогичную характеристику можно получить также за счет увеличения тока возбуждения в цепи статора, этот способ обладает большими достоинствами, так как позволяет плавно и бесступенчато регулировать угловую скорость двигателя.

Если в схеме, представленной на рис. 2.14, обеспечивается замедление подъемных сосудов в режиме динамического торможения согласно заданной диаграмме скорости, то на рис. 2.16 представлена схема динамического торможения, обеспечивающая спуск подъемных сосудов с различными скоростями движения.

Обмотка управления  $OU1$  магнитного усилителя получает питание от тахогенератора  $BR$ , напряжение которого  $U_{BR}$  включено встречно опорному напряжению  $U_{оп}$ . Ток в этой обмотке проходит только при условии, если  $U_{BR} > U_{оп}$ . Начальная величина тормозного момента создается обмоткой управления  $OU2$  с помощью потенциометра  $RP1$ .

Механическая характеристика динамического торможения при короткозамкнутом роторе и токе возбуждения  $I_{по}$  имеет вид кривой, показанной на рис. 2.15, б. В обмотку управления  $OU2$  (см. рис. 2.16) подается ток, создающий н. с., направленную на увеличение индуктивного сопротивления рабочих обмоток  $СМУ$ , а следовательно, на уменьшение тока возбуждения асинхронного двигателя. При этом имеем механические характеристики с токами  $I_{п1}, I_{п2}, \dots, I_{п6}$  (см. рис. 2.15, б), где  $I_{п1} > I_{п2} > \dots, I_{п6}$ . Первоначальное значение тока должно соответствовать току возбуждения  $I_{п6}$ . При этом механическая характеристика принимает вид 0—8—9. Вводим задержанную отрицательную обратную связь по скорости, которая реализуется с помощью тахогенератора  $BR$  (см. рис. 2.16), потенциометра  $RP2$  и диода  $VD$ . Напряжение тахогенератора  $U_{BR}$  направлено встречно опорному напряжению  $U_{оп}$ . Ток в обмотке управления  $OU1$  пойдет лишь при условии  $U_{BR} > U_{оп}$ .

Рассмотрим работу привода. При спуске груза с моментом нагрузки  $M_c$  (см. рис. 2.15, б) двигатель сначала имеет механическую характеристику, соответствующую току возбуждения  $I_{п6}$ .

а опорное напряжение равно  $U_{оп1}$ . Ротор двигателя увеличивает угловую скорость до точки 8, работая согласно характеристике 0—8. В этой точке  $U_{BR} = U_{оп}$ . При дальнейшем увеличении угловой скорости напряжение тахогенератора становится выше опорного напряжения  $U_{BR} > U_{оп}$  и в обмотке ОУ1 появляется ток, создающий н. с., направленную встречно н. с. обмотки ОУ2. Результирующая н. с. увеличивается и вызывает уменьшение индуктивного сопротивления СМУ, а это приводит к увеличению тока возбуждения двигателя. Механические характеристики принимают вид, соответствующий токам  $I_{п5}$ ,  $I_{п4}$ . В точке 6 момент двигателя равен моменту нагрузки  $M_{ст}$ , и наступает установившийся режим с постоянной угловой скоростью  $\omega_3$ . Таким образом, при опорном напряжении  $U_{оп1}$  двигатель имеет механическую характеристику 8—7—6—5—4—3—2. Серия подобных характеристик может быть получена лишь изменением опорного напряжения. Так, например, при опорном напряжении  $U_{оп2}$  обратная связь по скорости вступает в действие лишь в точке 9, а механическая характеристика принимает вид 9—10—11—12—13—14—1. Как видно из графиков, механические характеристики обладают достаточно высокой жесткостью.

В настоящее время в качестве источников питания асинхронных двигателей, работающих в режиме динамического торможения, широко используются тиристорные возбудители. В большинстве случаев потребляемая из сети мощность, идущая на создание режима динамического торможения, не превышает 20 кВт, а выпрямленный ток не более 150—200 А. Для

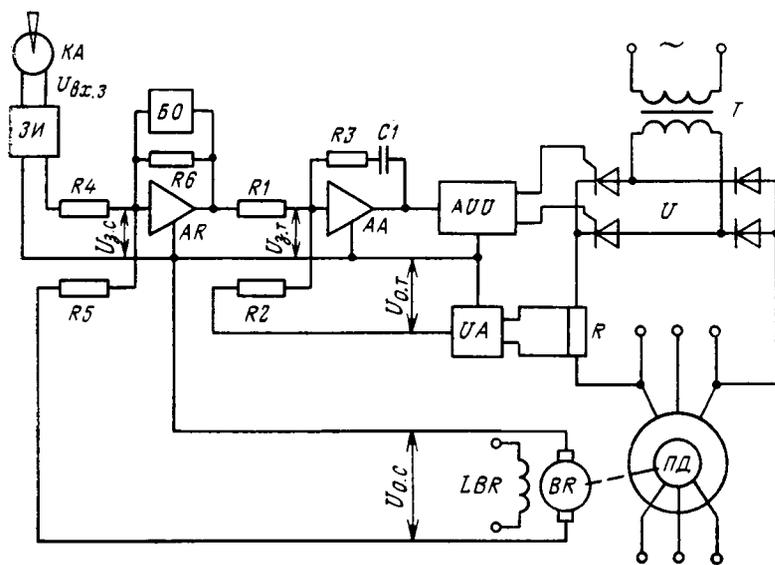


Рис. 2.17. Принципиальная схема однофазного мостового полууправляемого выпрямителя для динамического торможения

этих условий целесообразно применять однофазный мостовой полууправляемый выпрямитель с двухконтурной однократно интегрирующей системой подчиненного регулирования (рис. 2.17).

На вход регулятора тока  $AA$  подаются два сигнала: задающий  $U_{з.т}$  и отрицательный обратной связи по току  $U_{от}$ . Задающий сигнал, который определяет необходимое значение тока, подается с выхода регулятора скорости  $AR$  через резистор  $R1$ . Сигнал, пропорциональный току возбуждения, подается с датчика тока  $UA$  через резистор  $R2$ . Датчик тока  $UA$  усиливает сигнал, снимаемый с шунта  $R$ , и осуществляет гальваническую развязку цепей регулятора и силовой цепи. Выходное напряжение регулятора тока  $AA$  подается на вход СИФУ  $AUU$  управляемого преобразователя  $U$ .

Регулятор тока  $AA$  выполнен на базе операционного усилителя и представляет собой пропорционально-интегрирующее звено. Передаточная функция и параметры регулятора  $R3$  и  $C1$  выбираются так, чтобы контур тока обеспечивал требуемый характер протекания переходного процесса при изменении задающего сигнала на входе  $AA$ .

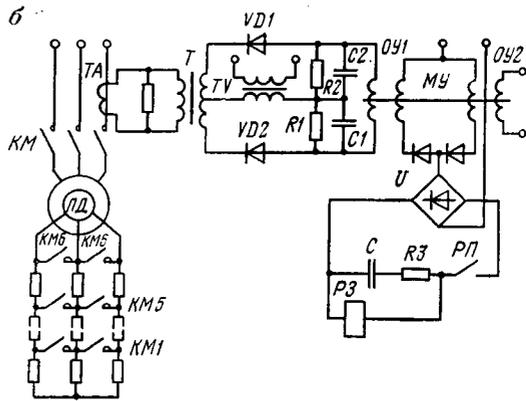
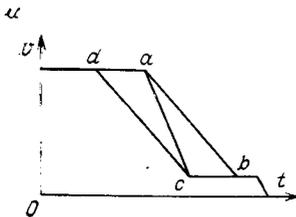
На вход регулятора скорости  $AR$  через резистор  $R4$  подаются задающий сигнал  $U_{з.с}$ , снимаемый с выхода задатчика интенсивности  $ЗИ$ , и сигнал  $U_{о.с}$  обратной связи по частоте вращения подъемного двигателя  $ПД$ . Сигнал, пропорциональный скорости, снимается с тахогенератора  $BR$  и подается на вход  $AR$  через резистор  $R5$ .

Регулятор скорости представляет собой пропорциональное звено, для чего в цепь обратной связи операционного усилителя включен резистор  $R6$ . Передаточная функция и параметры  $AR$  выбираются в зависимости от требований технологического процесса.

При изменении задающего сигнала  $U_{з.с}$  скачком скорость электропривода быстро спадает до заданного значения с небольшим перерегулированием. Быстродействие контура скорости позволяет формировать желаемый переходный процесс за счет изменения сигнала  $U_{з.с}$  во времени. Для этой цели применяется задатчик интенсивности  $ЗИ$ , который устанавливает необходимый темп замедления двигателя. Сигнал  $U_{вх.з}$ , определяющий уровень скорости, подается на  $ЗИ$  от контактного или бесконтактного командоаппарата  $КА$ . Максимальное значение напряжения на выходе регулятора скорости ограничивается блоком ограничения  $БО$ .

*Автоматизация периода замедления в режиме свободного выбега.* На рис. 2.18, *a* приведена диаграмма скорости подъема для периода замедления. Замедление ведется в режиме свободного выбега. В точке *a* подъемный двигатель отключается от сети, и путь или время замедления будет всецело зависеть от запасенной кинетической энергии и момента сопротивления движению. Если груз тяжелый, то после отключения подъемного двигателя в точке *a* замедление идет по прямой *ас*. Если груз

Рис. 2.18. Диаграмма скорости (а) и принципиальная схема (б) управления асинхронным двигателем рудничной подъемной машины в режиме свободного выбега



легкий, то замедление изобразится прямой  $ab$ . В последнем случае замедление идет медленнее и подъемные сосуды подойдут к разгрузочным кривым с большей скоростью, чем скорость дотягивания. Поэтому команду на отключение подъемного двигателя с легким грузом необходимо подавать не в точку  $a$ , а значительно раньше, чтобы подъемные сосуды и в этом случае достигли скорости дотягивания в точке  $c$ . Этой точкой должна быть точка  $d$ , полученная проведением из точки  $c$  прямой параллельной  $ab$ . Выполнение показанных графиков скорости при любой нагрузке позволит снять возможные динамические перегрузки в механических частях подъемной установки.

Автоматизация периода замедления при работе двигателя в режиме свободного выбега ведется с использованием датчика нагрузки. На рис. 2.18, б приведена принципиальная схема управления асинхронным двигателем в режиме свободного выбега с использованием датчика активной составляющей тока двигателя. В начале цикла подъема реле замедления  $PЗ$  обесточено, так как разомкнут контакт промежуточного реле  $PП$ . После выхода скапа или опрокидной клети из разгрузочных кривых контакт  $PП$  замыкается и к выходу магнитного усилителя  $MУ$  подключается реле  $PЗ$  и конденсатор  $C$  с ограничительным резистором  $RЗ$ . Выходной ток датчика активной составляющей тока статора двигателя, пропорциональный весу груза, проходит по обмотке управления  $OУ1$  магнитного усилителя. Усиленный магнитным усилителем сигнал подается одновременно и на конденсатор  $C$ , в результате чего происходит его заряд до выходного напряжения  $MУ$ . В определенной точке пути происходит размыкание конечного выключателя, реле  $PП$  обесточивается и размыкает контакт в цепи реле замедления  $PЗ$ , что также приводит к его обесточиванию. Конденсатор  $C$ , разряжаясь через резистор  $RЗ$  и обмотку реле  $PЗ$ , создает выдержку времени между размыканием контакта  $PП$  и отпаданием якоря реле  $PЗ$ . По истечении этой выдержки реле  $PЗ$

подает импульс на отключение подъемного двигателя  $ПД$  размыканием контактов  $КМ$ .

Таким образом, применение датчика активной составляющей тока статора подъемного двигателя позволяет обеспечить необходимую выдержку времени на отключение последнего от веса поднимаемого груза, при которой подъемный сосуд независимо от его загрузки подходит к разгрузочным кривым всегда с одной и той же заданной скоростью.

В качестве датчика активной составляющей тока подъемного двигателя применен фазочувствительный выпрямитель, значение тока на выходе которого строго пропорционально моменту нагрузки. Работа фазочувствительного выпрямителя состоит в следующем. При отсутствии входного сигнала напряжение на выходе фазочувствительного выпрямителя равно нулю, так как сопротивления резисторов  $R1$  и  $R2$  равны, а параметры диодов  $VD1$  и  $VD2$  одинаковы. Это объясняется тем, что при равенстве сопротивления параллельных ветвей и при положительной полуволне опорного напряжения вторичной обмотки трансформатора  $TV$  по ним протекают одинаковые токи  $I_1$  и  $I_2$ , а следовательно, на сопротивлениях нагрузки  $R1$  и  $R2$  будут иметь место равные по величине, но противоположные по знаку падения напряжений и  $U_{\text{вых}}=0$ . В период отрицательной полуволны напряжения диоды заперты и напряжение на выходе тока равно нулю.

Если входной сигнал  $U_{\text{вх}}$ , снимаемый с трансформатора тока  $ТА$  и усиленный трансформатором  $T$ , по фазе совпадает с опорным напряжением, то приложенное к резистору  $R1$  напряжение переменного тока будет больше напряжения, приложенного к резистору  $R2$ . В этом случае ток  $I_1$  будет больше  $I_2$ . Это вызовет появление тока в обмотке управления  $ОУ1$ . Если фаза входного сигнала фазочувствительного выпрямителя изменится на  $180^\circ$ , то  $U_{\text{вых}}$  изменит свою полярность.

При входном сигнале, не совпадающем по фазе с опорным напряжением, значение выходного напряжения определяется выражением

$$U_{\text{вых}} = kU_{\text{вх}} \cos \varphi, \quad (2.10)$$

где  $k$  — коэффициент, зависящий от сопротивлений нагрузок и выпрямителя.

В связи с тем, что на вход фазочувствительного выпрямителя подается напряжение, пропорциональное статорному току двигателя и находящееся с ним в фазе, а в качестве опорного — напряжение сети, выходное напряжение будет пропорционально активной составляющей тока подъемного двигателя или его момента.

Конденсаторы  $C1$  и  $C2$ , включенные параллельно нагрузке, служат для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения.

## 2.6. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПЕРИОДА ДОТЯГИВАНИЯ ПОДЪЕМНЫХ СОСУДОВ

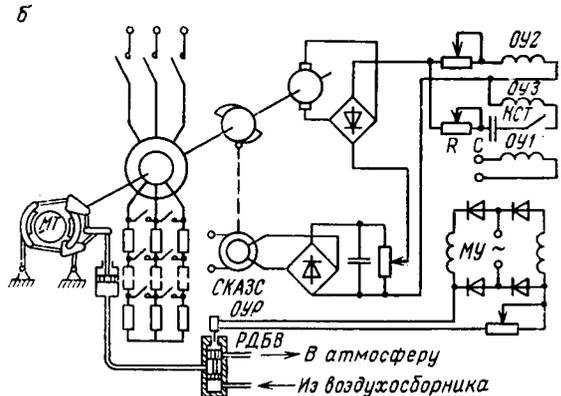
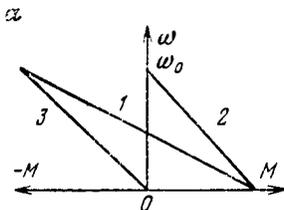
Не менее ответственной и важной частью процесса замедления является период движения подъемных сосудов с малой скоростью. Этот период соответствует движению подъемных сосудов в разгрузочных кривых (дотягивание) и требует от системы регулируемого электропривода стабильной скорости 0,6—0,3 м/с при возможных изменениях величины и знака движущих усилий  $F_2$  (см. рис. 2.10, *в, г*). Особенно резкие изменения движущих усилий возникают при разгрузке подъемных сосудов опрокидыванием. Поэтому чем стабильнее поддерживается скорость дотягивания, тем точнее стопорение подъемных сосудов.

Для решения задачи обеспечения сниженной скорости дотягивания разработаны и внедрены различные системы электропривода и конструкции: асинхронный двигатель с регулируемым механическим тормозом; асинхронный двигатель с микроприводом; двухдвигательный асинхронный привод; асинхронный двигатель с питанием током низкой частоты; асинхронный двигатель с тиристорным коммутатором в цепи ротора.

Наибольшее распространение получил метод дотягивания по системе асинхронный двигатель — механический тормоз. Механическая характеристика 1 (рис. 2.19, *а*) системы асинхронный двигатель — механический тормоз получена сложением механической характеристики двигателя 2 и механической характеристики механического тормоза 3, управляемого регулятором давления.

Получение скорости дотягивания осуществляется совместной работой асинхронного двигателя на второй или третьей ступени роторного резистора и механического тормоза *МТ*. Это достигается с помощью электропневматического регулятора давления *РДБВ* (рис. 2.19, *б*), управление которым производится

Рис. 2.19. Электропривод по системе асинхронный двигатель — регулируемый механический тормоз:  
*а* — механические характеристики; *б* — принципиальная схема



с помощью магнитного усилителя *МУ*. Выход *МУ* включен на обмотку управления соленоидом регулятора давления.

В схеме задействованы три обмотки управления *МУ*. Обмотка смещения *ОУ1* создает начальный ток в обмотке *ОУР* и пропорциональный ему тормозной момент. Напряжение командоаппарата *СКАЗС*, соответствующее заданной скорости, сравнивается с напряжением снимаемым с тахогенератора *ВР* и пропорциональным действительной скорости, и подается на обмотку управления *ОУ2*. Ток по обмотке управления пойдет только при условии, если действительная скорость станет выше заданной. Этот ток увеличивает напряжение на выходе *МУ* и ток в обмотке *ОУР*. Этому соответствует увеличение тормозного момента.

Обмотка управления *ОУ3* с конденсатором *С* и резистором *Р* осуществляет коррекцию по ускорению. Контакт контактора стопорения *КСТ* разрывает цепь этой обмотки при стопорении машины.

Использование в схеме магнитного усилителя для питания обмотки *ОУР* регулятора давления *РДБВ* позволяет увеличить мощность управления электромагнитом электропневматического регулятора давления, уменьшить мощность датчиков и применить различные контуры корректирующих цепей.

Отличаясь простотой и надежностью, этот способ получения малых скоростей ухудшает энергетику привода, так как режим работы двигателя характеризуется потерями в цепи ротора, пропорциональными скольжению. Кроме того, двигатель преодолевает дополнительно момент механического тормоза.

Скорость дотягивания можно получить в схеме двухдвигательного асинхронного привода. Для рудничной подъемной машины двухдвигательный привод — это привод, состоящий из двух асинхронных двигателей с фазным ротором, расположенных на одном валу. При двухдвигательном приводе получение скорости дотягивания достигается совместной их работой: одного — в двигательном режиме (1), другого — в режиме динамического торможения (2). Получаемая при этом совместная механическая характеристика 3 приведена на рис. 2.20. Поддержание постоянства скорости дотягивания достигается автоматическим изменением тока статора двигателя, работающего

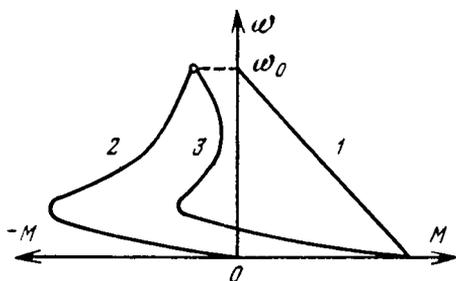


Рис. 2.20. Механические характеристики двухдвигательного привода

в режиме динамического торможения с изменением момента нагрузки на валу подъемного двигателя. В периоды пуска, установившегося движения и замедления электродвигатели работают в двигательном режиме как и в обычной схеме.

Преимущества двухдвигательного асинхронного привода: высокая жесткость механических характеристик при малой скорости подъема, что исключает необходимость в дополнительном управлении в самый ответственный период движения подъемных сосудов со скоростью дотягивания; надежная и простая схема управления приводом; в период движения со скоростью дотягивания не требуется управление статорными или роторными контактами; все управление ведется изменением постоянного тока статора; стоимость двухдвигательного асинхронного привода примерно равна стоимости однодвигательного привода; меньшее значение приведенной массы движущихся частей подъемной установки (как правило, маховой момент асинхронного двигателя полной мощности превышает суммарный маховой момент двух двигателей половинной мощности).

На подъемных установках, оборудованных скипами с донной разгрузкой, в период дотягивания груженого скипа необходимо развивать значительный двигательный момент. Эффективная автоматизация периода дотягивания на этих установках может быть осуществлена бесступенчатым регулированием с помощью тиристорного коммутатора, шунтирующего часть роторных резисторов подъемного двигателя [15].

В настоящее время для подъемных машин находят применение коммутаторы двух типов: с широтно-импульсным управлением на стороне переменного тока и фазовым управлением. Коммутаторы с широтно-импульсным управлением отличаются простотой схемного решения, коммутаторы с фазовым управлением обеспечивают более благоприятное протекание электромагнитных процессов в двигателе и несколько лучшее качество регулирования скорости. Поэтому первые рекомендуется применять на малых подъемных машинах, оборудованных двигателями небольшой мощности, а вторые — на подъемных машинах с двигателями средней и большой мощности.

Силовая часть коммутатора содержит шесть тиристоров, которые объединены в три пары, соединенные между собой в треугольник (рис. 2.21) и подключенные к роторным резисторам подъемного двигателя ПД.

Коммутатор с фазовым управлением содержит усилитель  $U$  сигнала ошибки по скорости  $\Delta U$  и три идентичных канала импульсно-фазового управления  $K1—K3$ , каждый из которых управляет двумя встречно-параллельно включенными тиристорами.

В развернутом виде приведена только схема канала  $K1$ , управляющего тиристорами  $VS1$  и  $VS2$ , а каналы управления  $K2$  и  $K3$  тиристорами  $VS3$ ,  $VS4$  и  $VS5$ ,  $VS6$  изображены в виде блоков.

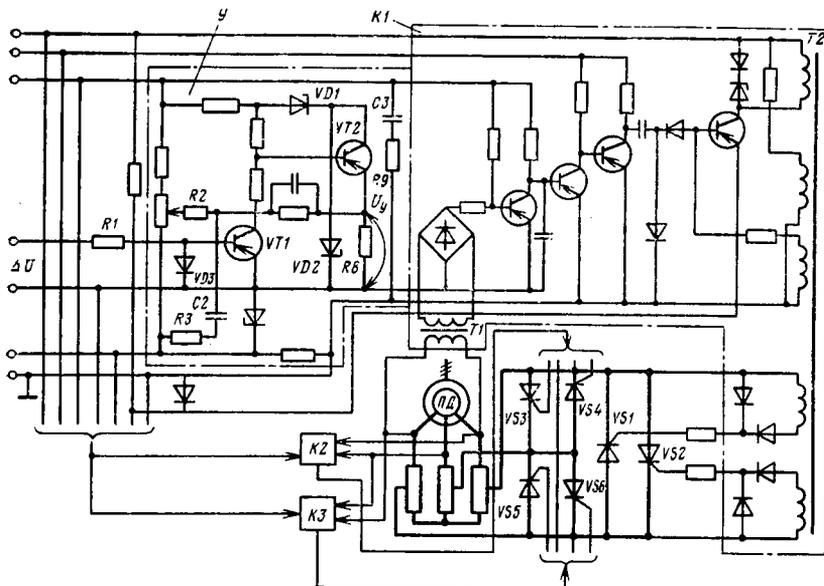


Рис. 2.21. Принципиальная схема тиристорного коммутатора с фазовым управлением

На вход усилителя  $U$ , являющегося общим для всех каналов управления, через резистор  $R1$  подается сигнал  $\Delta U$ , на его выходе формируется сигнал управления  $U_y$ , который связан с углом открывания тиристоров пропорциональной зависимостью. На транзисторе  $VT1$  выполнен усилитель напряжения, на транзисторе  $VT2$  — эмиттерный повторитель. Максимальные значения напряжений коллекторов транзисторов  $VT1$  и  $VT2$  ограничиваются стабилитронами  $VD1$  и  $VD2$ . Переменным резистором  $R2$  устанавливается необходимое смещение на входе усилителя, которое может быть как положительным, так и отрицательным. Поскольку сигнал смещения алгебраически суммируется с сигналом  $\Delta U$ , то движение с требуемой малой скоростью может осуществляться при различных соотношениях между сигналами заданной и действительной скоростей.

Коммутатор вводится в работу подачей напряжения в его схему управления в момент подключения подъемного двигателя к питающей сети. При этом темп нарастания момента двигателя до величины, определяемой сигналом  $\Delta U$ , для снижения динамических нагрузок формируется зарядом емкости  $C2$  через резистор  $R3$  и диод  $VD3$  и емкости  $C3$  — через резисторы  $R8$  и  $R9$ . В результате в момент подачи напряжения в схему управления обеспечивается максимальная величина сигнала  $U_y$ , что соответствует закрытому состоянию тиристоров.

По окончании периода дотягивания напряжение со схемы управления коммутатором снимается с некоторым упреждением,

и поэтому сначала закрываются его тиристоры, а затем происходит отключение подъемного двигателя от сети переменного тока. Это способствует стопорению машины, а разрываемый реверсором ток соответствует полностью введенным роторным резисторам, и поэтому подгорание его контактов минимально.

Если производится дотягивание недогруженного подъемного двигателя, его момент даже при полностью введенных роторных резисторах может оказаться чрезмерно большим и будет происходить увеличение частоты вращения сверх заданной величины. В этом случае в работу вмешивается механический тормоз, компенсирующий избыточную часть двигательного момента. Согласование зон работы коммутатора и механического тормоза происходит переменным резистором  $R_2$ .

## 2.7. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АСИНХРОННОГО ПРИВОДА ПОДЪЕМНЫХ МАШИН

К современному электроприводу подъемных машин предъявляются все более жесткие требования в отношении надежности, экономичности, высокого быстродействия. Получает развитие безредукторный электропривод, а также электропривод больших мощностей. Поэтому на передний план выступает проблема создания надежных и экономичных систем регулируемого электропривода переменного тока.

Наиболее экономичным способом регулирования частоты вращения асинхронного двигателя служит управление на базе преобразователя частоты с непосредственной связью и асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором ПЧН-АД и асинхронного вентильного каскада (АВК).

Реализация частотного управления асинхронным двигателем позволяет создать электропривод шахтной подъемной машины, который будет обладать простотой и надежностью, обусловленной применением асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором; высокими регулировочными свойствами и высокой жесткостью механических характеристик.

Рассмотрим закон регулирования частоты и напряжения преобразователя при регулировании скорости электропривода подъема. Регулирование скорости электропривода с асинхронным двигателем за счет снижения частоты тока статора приводит к снижению магнитного потока двигателя, что следует из выражения

$$\Phi = \frac{1}{c_1 f_{1H}} \left( \frac{\dot{U}}{\alpha} - j I_1 X_1 - I_1 \frac{R_1}{\alpha} \right), \quad (2.11)$$

где  $c_1 = 4,44 k_1 \omega_1$  — конструктивная постоянная статора двигателя;  $k_1$  — обмоточный коэффициент;  $\alpha = f_1 / f_{1 \text{ ном}}$ ;  $I_1$  — ток статора;  $R_1$  и  $X_1$  — соответственно активное и индуктивное сопротивление статора асинхронного двигателя.

Уменьшение магнитного потока асинхронного двигателя приводит и к уменьшению момента, что следует из выражения

$$M = \frac{m_1 c_1^2 f_{1н}^2}{\omega_0} \Phi^2 \frac{R_2'}{\frac{(R_2')^2}{\beta} + (X_2')^2 \beta}, \quad (2.12)$$

где  $m_1$  — число фаз;  $R_2'$  и  $X_2'$  — соответственно активное и индуктивное сопротивление ротора, приведенные к цепи статора;  $\omega_0$  — синхронная угловая скорость магнитного потока статора.

Следовательно, для поддержания постоянного момента двигателя при регулировании частоты вращения и сохранения его перегрузочной способности необходимо постоянство магнитного потока.

С другой стороны, магнитный поток двигателя

$$\Phi = k_w \omega_1 I_0 \sin \varphi_0, \quad (2.13)$$

где  $k_w$  — постоянный коэффициент;  $\varphi_0$  — угол, учитывающий потери в стали.

Ток статора, в свою очередь, определяется намагничивающим током и током ротора:

$$I_1 = I_0 + I_2', \quad (2.14)$$

где  $I_2'$  — ток ротора, проведенный к цепи статора.

А так как ток ротора

$$I_2 = \frac{c_2 \Phi f_2}{R_2 + j X_2 f_2}, \quad (2.15)$$

то для поддержания постоянства магнитного потока отношение  $U/f$  должно иметь определенное значение.

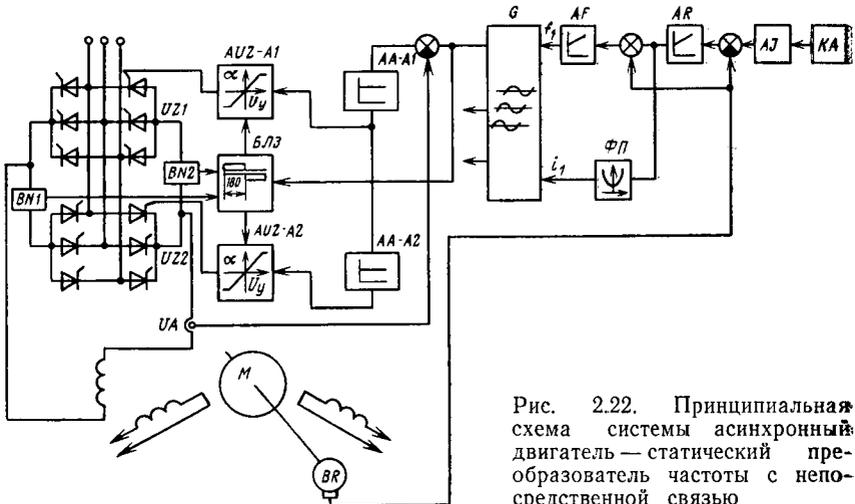


Рис. 2.22. Принципиальная схема системы асинхронный двигатель — статический преобразователь частоты с непосредственной связью

Из уравнения (2.14) видно, что при постоянстве магнитного потока ток намагничивания  $I_0 \approx \text{const}$ , а следовательно, при постоянстве  $f_2$  необходимо иметь для обеспечения  $\Phi = \text{const}$  и  $M = \text{const}$  независимо от  $f_1$  постоянство тока статора  $I_1 = \text{const}$ . Таким образом, в регуляторе преобразователя частоты необходима определенная зависимость между  $I_1$  и  $f_2$ , при которой будут сохранены постоянными ток и момент двигателя.

Каждая фаза статора асинхронного двигателя (рис. 2.22) получает питание от своего преобразователя частоты, выполненного по трехфазной мостовой встречно-параллельной схеме [33].

Система построена по принципу подчиненного регулирования параметров и содержит два контура регулирования: по  $f_1$  и по значению тока статора  $i_1$ . Такое регулирование позволяет реализовать различные законы управления асинхронным двигателем с косвенным поддержанием постоянства потока или получить высокие энергетические показатели при широком изменении нагрузки.

Управление тиристорами преобразователя частоты ведется от задающего генератора  $G$  синусоидальных сигналов с регулируемой частотой и амплитудой. Для регулирования скорости электропривода на регулятор скорости  $AR$  подается сигнал, определяемый разностью напряжений, снимаемых с сельсинного командоаппарата  $KA$  через задатчик интенсивности  $AJ$  и с якоря тахогенератора  $BR$ , пропорционального действительной скорости. Выходной сигнал с регулятора скорости  $AR$ , суммируясь с сигналом действительной скорости, подается на вход регулятора частоты  $AF$ . Таким образом, частота вращения асинхронного двигателя  $f_1 = f \pm f_2$ , где  $f_2$  — частота, соответствующая действительной скорости подъемного двигателя;  $f$  — частота, соответствующая заданной скорости.

Амплитуда задающего генератора  $G$  определяется током  $i_1$ . Этот канал управления реализуется с помощью функционального преобразователя  $\Phi\Pi$ , на вход которого с регулятора скорости  $AR$  подается скольжение, а на выходе получают значение тока  $i_1$ . Трехфазная система синусоидальных сигналов задания токов поступает на входы регуляторов фазных токов  $AA-A1$  и  $AA-A2$ , где они сравниваются с действительными значениями токов фаз, снимаемых с датчиков тока. Для фазы  $A$  это датчик  $UA$ . С выхода регулятора тока сигнал управления подается на СИФУ  $AUZ-A1$  и  $AUZ-A2$ .

В преобразователе частоты использован отдельный способ управления тиристорами. Поэтому снятие и восстановление импульсов в цепях управляющих электродов производится логической схемой блока запирающего  $БЛЗ$  с частотой вторичной сети. Переключения в логической схеме осуществляются датчиками нуля тока  $BN1$  и  $BN2$ , которые устанавливаются в цепях нагрузки каждой группы вентиля и фиксируют прохождение тока нагрузки через нуль.

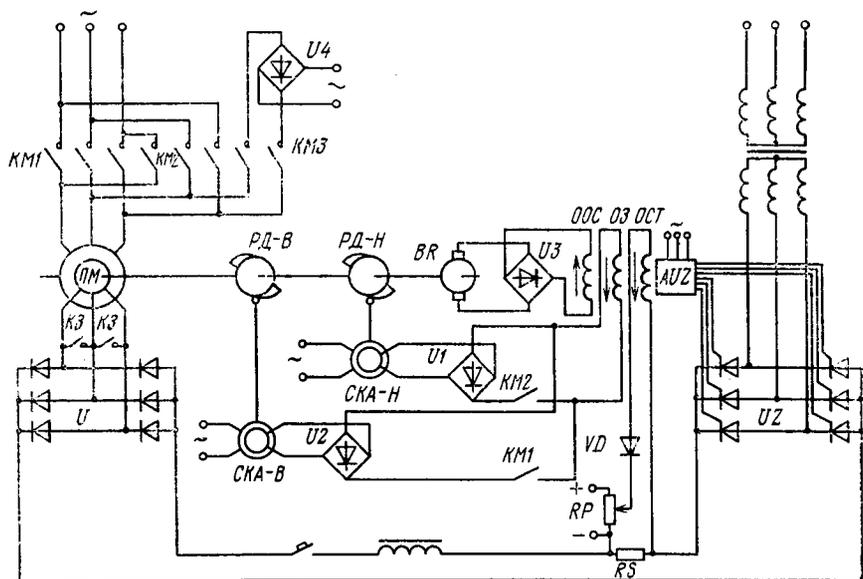


Рис. 2.23. Принципиальная схема асинхронного вентильного каскада

Частота на выходе преобразователя с непосредственной связью регулируется от 0 до 25 Гц, для чего требуется выбирать электродвигатель с двукратным запасом по мощности и частоте вращения.

Одной из разновидностей электропривода с преобразователем частоты служит система асинхронного вентильного каскада (рис. 2.23).

В период разгона подъемной машины изменение скорости электропривода ПМ осуществляется программным устройством в функции пути. Программа управления, соответствующая заданной расчетной диаграмме скорости, задается профилями ретардирующего устройства (РД-В или РД-Н), которое, воздействуя на сельсинный командоаппарат (СКА-В или СКА-Н), обеспечивает требуемую скорость в каждой точке пути подъема. Последний подает управляющий сигнал постоянного тока через выпрямитель U1 или U2 в задающую обмотку O3 суммирующего магнитного усилителя системы управления АУЗ инвертором UZ. Компенсация отклонения скорости от заданной, вызванная различием в нагрузке скипов, осуществляется введением обратной связи по скорости, осуществляемой тахогенератором BR, выпрямителем U3 и обмоткой управления OOC. Для ограничения ускорения, а также защиты подъемной машины от перегрузок введена отрицательная обратная задержанная связь по току двигателя OCT, реализуемая с помощью шунта RS, потенциометра RP и диода VD.

При достижении подсинхронной скорости, близкой к скорости идеального холостого хода, ротор асинхронного двигателя закорачивается контактами  $KЗ$  и в период установившегося движения работает на естественной механической характеристике.

В период замедления применяется свободный выбег или режим динамического торможения. При свободном выбеге двигатель продолжает вращаться оставаясь включенным в сеть, размыкаются контакты  $KЗ$  и в цепь ротора вводится противо-э. д. с., превышающая напряжение ротора. При этом ток ротора становится равным нулю, а двигатель замедляется в режиме свободного выбега.

В период замедления в режиме динамического торможения статор двигателя отключается от сети переменного тока (размыкаются контакты  $KЗ$  и  $KМ1$  или  $KМ2$ ) и замыкаются контакты  $KМЗ$ , после чего в две его фазы подается постоянный ток от неуправляемого выпрямителя  $U4$ . Регулирование величины тормозного момента в режиме динамического торможения также осуществляется изменением угла  $\beta$  управления инвертора в функции пути, что производится воздействием замедляющего профиля ретардирующего диска на сельсинный командоаппарат. В период замедления ток в статоре постояен.

При достижении скорости дотягивания сигнал от сельсинного командоаппарата перестает изменяться, что осуществляется отключением ретардирующего диска от вала подъемной машины, и последняя продолжает движение с постоянной скоростью. Поддержание этой скорости осуществляется обратной связью по скорости. При достижении подъемным сосудом конечного положения срабатывает конечный выключатель и машина стопорится рабочим тормозом.

Несмотря на положительные качества АВК (возможность плавного регулирования скорости и момента, высокие качества автоматического регулирования, отсутствие коммутационной аппаратуры в роторной цепи), он имеет и недостатки: низкий коэффициент мощности и невозможность работы с номинальной скоростью из-за потерь в преобразователях, что потребовало установки короткозамыкателя  $KЗ$ .

## **2.8. ШАХТНЫЕ ПОДЪЕМНЫЕ УСТАНОВКИ С ПРИВОДОМ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

### **2.8.1. Основные разновидности приводов постоянного тока**

В настоящее время для шахтных подъемных машин большой производительности известны две разновидности привода постоянного тока: с электромашинной преобразовательной установкой (система Г—Д); со статическими преобразовательными агрегатами, в качестве которых используется управляемый ртутный выпрямитель (система УРВ—Д) или тиристорный выпрямитель (система УВ—Д).

Достоинства системы Г—Д общеизвестны: отсутствие пусковых и тормозных потерь электроэнергии, хорошие регулировочные свойства, нетребовательность аппаратуры управления к уходу. Однако известен и основной ее недостаток: высокая первоначальная стоимость, обусловленная высокой стоимостью электромашинного преобразователя. Поэтому система Г—Д не получила широкого распространения и применяется только на шахтных подъемных установках, мощность которых более 1000 кВт.

К достоинству системы УРВ—Д относятся высокие регулировочные свойства, высокое быстродействие, незначительные эксплуатационные затраты, меньшие габариты и вес. Однако система УРВ—Д не свободна от некоторых недостатков, к которым необходимо отнести: низкий коэффициент мощности при регулировании скорости, увеличение потерь в двигателе из-за пульсаций выпрямленного напряжения и чувствительность к колебаниям напряжения в сети, низкий к. п. д.

Наиболее совершенна система электропривода на постоянном токе — система управляемый выпрямитель — двигатель (УВ—Д). К достоинствам ее по сравнению с системой УВ—Д можно отнести: более длительный срок службы, простое и оперативное осуществление резервирования и взаимозаменяемость блоков узлов, устройств, меньшие габариты и вес, более высокий к. п. д., меньшая полезная площадь для преобразователя и меньшая мощность управления. К недостаткам тиристорных преобразователей относятся: снижение коэффициента мощности при регулировании выпрямленного напряжения, влияние на питающую сеть, низкая перегрузочная способность и чувствительность к перенапряжениям.

Регулирование скорости электропривода с двигателем постоянного тока независимого возбуждения по системе Г—Д ведется за счет изменения напряжения на якоре генератора при постоянном магнитном потоке обмотки возбуждения двигателя. Возбуждение генератора осуществляется: электромашинными усилителями (ЭМУ) или ЭМУ с промежуточным магнитным усилителем (ПМУ); силовыми магнитными усилителями (СМУ) с ПМУ; тиристорными преобразователями (ТП).

Причина перехода от электромашинных усилителей к магнитным, а затем к тиристорным заключается в следующих достоинствах последних: большая стабильность параметров, высокая надежность и практически неограниченный срок службы из-за отсутствия вращающихся и контактных частей.

### 2.8.2. Система генератор—двигатель с электромашинным усилителем

Якорь электродвигателя  $M$  (рис. 2.24) получает питание от генератора  $G$  с независимым возбуждением. Обмотка возбуждения  $LM$  двигателя  $M$  получает питание от возбудителя постоян-

ного тока  $G1$ , обмотка возбуждения  $LG1$  которого получает питание через резистор управления пуском  $РУП$  и резистор ослабления поля  $РОП$  от возбуждателя  $G2$ . Резисторы  $РУП$  и  $РОП$  шунтируются замыкающими контактами  $КФ$  и  $КОП$ . Первый служит для форсирования электромагнитного переходного процесса в обмотке возбуждения двигателя  $LM$ , а второй — для уменьшения тока в ее обмотке в периоды пауз. Контакт  $КФ$  принадлежит контактору форсировки  $КФ$ , а контакт  $КОП$  относится к реле контроля ослабления поля  $КОП$ .

Обмотка возбуждения генератора  $LG$  получает питание от электромагнитного усилителя  $ЭМУ$ , имеющего следующие обмотки управления: задающую обмотку  $OU_3$ , обмотку  $OU_T$  отрицательной обратной связи по току двигателя; обмотку  $OU_C$  отрицательной обратной связи по скорости или напряжению генератора и стабилизирующую обмотку  $OU_{CT}$ .

Задающая обмотка управления  $OU_3$  служит для задания направления генератора и скорости электропривода. Скорость электропривода определяется значением тока в обмотке  $OU_3$ , а направление — полярностью на ее обмотке. Направление тока в обмотке  $OU_3$  изменяется замыканием контактов  $B$  или  $H$ . Значение тока в ней регулируется с помощью резисторов командоаппаратов  $КАВ$ ,  $КАН$  или  $КАР$ . При работе подъемной машины в автоматическом режиме (универсальный переключатель  $УП1$  устанавливается в положение «А») изменение тока в обмотке  $OU_3$  в период разгона и замедления осуществляется командоаппаратами  $КАВ$  или  $КАН$  (в зависимости от направления движения), приводимых в движение от ретардирующих дисков указателя глубины или аппарата контроля хода. Сопротивление  $КАР$  при этом полностью шунтировано, т. е. рукоятка управления поставлена в крайнее положение. В режиме «Ревизия» управление электродвигателем ведется вручную с помощью командоаппарата  $КАР$ . При этом резисторы командоаппаратов  $КАВ$  и  $КАН$  шунтированы универсальным переключателем  $УП1$ , который находится в положении «Ревизия».

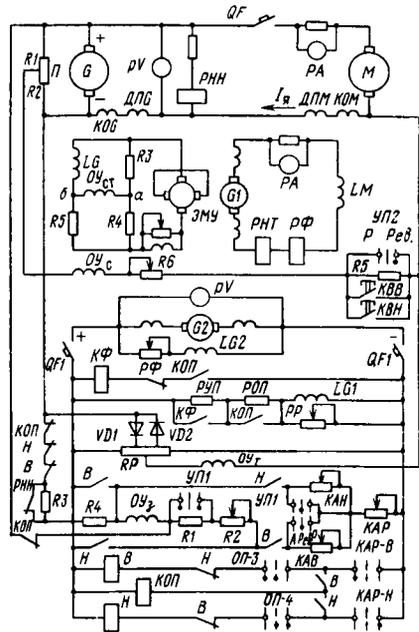


Рис. 2.24. Принципиальная схема электропривода рудничной подъемной машины по системе Г—Д с ЭМУ

Задающая обмотка  $OU_3$  выполняет также функцию снятия остаточного магнитного потока генератора. При постановке командоаппарата в нулевое положение контакторы  $B$  и  $H$  обесточиваются и своими контактами подключают обмотку  $OU_3$  к якору генератора через резисторы  $R3$  и  $R4$ . По обмотке  $OU_3$  протекает ток, противоположный по направлению задающему току. Это вызывает снижение напряжения генератора, а когда напряжение генератора станет равным  $0,1 U_{ном}$ , отпадает якорь реле низкого напряжения  $PНН$  и своим размыкающим контактом шунтирует резистор  $R3$  и тем самым ускоряет снижение и уменьшает величину остаточного напряжения до нуля.

Обмотка управления  $OU_T$  служит для защиты двигателя от чрезмерных токов и выполняет роль отрицательной обратной связи по току двигателя, она действует как в установившемся, так и в переходном режиме при токах больших тока отсечки. Для реализации этой связи обмотка  $OU_T$  включается через потенциометр сравнения  $RP$ , имеющий независимый источник питания, на падение напряжения в сопротивлениях дополнительных полюсов ( $ДПМ—ДПГ$ ) и компенсационных обмоток ( $КОМ$  и  $КОГ$ ) двигателя и генератора. Напряжение, пропорциональное току якоря и снимаемое с дополнительных полюсов и компенсационных обмоток, направлено встречно напряжению, снимаемому с потенциометра сравнения  $RP$ . В этом случае обратная связь вступает в действие только тогда, когда падение напряжения в главной цепи  $\Gamma—Д$  станет больше напряжения сравнения. В противном случае прохождению тока препятствуют диоды  $VD1$  и  $VD2$ . Появление тока в обмотке  $OU_T$  вызывает размагничивание генератора.

Обмотка управления  $OU_c$  выполняет роль отрицательной обратной связи по скорости и предназначена для форсирования переходного процесса и увеличения жесткости механических характеристик системы  $\Gamma—Д$ . Обмотка  $OU_c$  через резисторы  $R5$  и  $R6$  получает питание от тахометрического моста, который представляет собой систему, состоящую из четырех определенным образом подобранных резисторов  $R1, R2, R_{\Sigma}$  и  $R_{ям}$ . Резистор  $R_{\Sigma}$  равен сумме сопротивлений компенсационных обмоток и дополнительных полюсов генератора и двигателя. Резисторы  $R1$  и  $R2$  соединены последовательно и подключены к якору генератора. Сопротивление якоря двигателя  $R_{ям}$  образует четвертое плечо.

Сопротивления плеч моста подбираются так, чтобы при неподвижном состоянии двигателя мост был уравновешен. Для этого его сопротивления должны удовлетворять следующему соотношению:

$$R1/R2 = R_{\Sigma}/R_{ям}. \quad (2.16)$$

При равновесии моста разность потенциалов в его диагонали равна нулю и ток в обмотке управления  $OU_c$  отсутствует. При вращении двигателя появляется э. д. с. и балансировка моста

нарушается. В этом случае напряжение в его диагонали определяется равенством

$$U_{OY_c} = E_M \frac{R1}{R1 + R2} + I \frac{R_{ям}R1 + R_{\Sigma}R2}{R1 + R2}, \quad (2.17)$$

где  $E_M$  — э. д. с. двигателя;  $I$  — ток якоря двигателя.

Учитывая выражение (2.16) и преобразуя уравнение (2.17), получаем

$$U_{OY_c} = E_M \frac{R1}{R1 + R2} = k_{o.c} E_M.$$

Следовательно,

$$U_{OY_c} = k_{o.c} c \Phi \omega = \text{const } \omega. \quad (2.18)$$

Таким образом, напряжение на обмотке  $OY_c$ , снимаемое с тахометрического моста, пропорционально э. д. с. двигателя или его частоте вращения.

Для усиления действия обратной связи по скорости на малых скоростях электропривода производится шунтирование части резистора  $R5$  концевыми выключателями  $KBB$  или  $KBH$  в зависимости от направления вращения. При работе в режиме «Ревизия» эта часть резистора шунтируется универсальным переключателем  $УП2$ .

Для обеспечения устойчивости работы и удовлетворительного протекания переходного процесса применяется гибкая обратная связь. Для этого стабилизирующая обмотка  $OY_{ст}$  включена в диагональ дифференцирующего моста, состоящего из трех резисторов  $R3—R5$  и одного индуктивного сопротивления, представляющего собой обмотку возбуждения генератора  $LG$ . При установившемся режиме, когда мост сбалансирован, напряжение  $U_{аб}$ , снимаемое с диагонали моста, равно нулю. Баланс нарушается в переходном режиме, когда падение напряжения в плече с индуктивным сопротивлением не совпадает с падением напряжения в плече с активным сопротивлением. Такой разбаланс моста приводит к появлению тока в обмотке обратной связи  $OY_{ст}$ . Значение этого тока тем выше, чем выше скорость изменения напряжения  $ЭМУ$ . Н. с. этой обмотки направлена противоположно н. с. задающей обмотки при возрастании напряжения  $ЭМУ$  и согласной с ней — при снижении напряжения  $ЭМУ$ . В обоих случаях скорость изменения напряжения  $ЭМУ$  уменьшается и он не так резко реагирует на сигналы, подаваемые в задающую обмотку. Система управления становится более устойчивой.

Гибкая обратная связь по напряжению может быть осуществлена стабилизирующими трансформаторами ТС-72-60 и ТС-144-110. Дифференцирующее действие трансформатора, включенного в цепь постоянного тока, основано на том, что напряжение  $U_{вых}$  на вторичной обмотке ненагруженного трансформа-

тора пропорционально скорости изменения тока в первичной обмотке:  $U_{\text{вых}} = M di/dt$ , где  $M$  — коэффициент взаимной индукции.

Рассмотрим работу схемы в отдельные периоды движения подъемных сосудов (см. рис. 2.24). Управление двигателем  $M$  в периоды пуска и торможения осуществляется изменением тока в задающей обмотке управления  $OY_3$  командоаппаратами  $KAB$ ,  $KAH$  или  $KAP$ . При автоматическом управлении командоаппараты  $KAB$  или  $KAH$  приводятся в движение от профилирующих дисков ретардирующих устройств, связанных через передачу с валом подъемной машины. Ретардирующее устройство обеспечивает необходимый закон изменения тока в обмотке  $OY_3$ , а следовательно, необходимую скорость движения подъемных сосудов.

При движении «Вперед» замыкается контакт  $B$  командоконтроллера  $KAP-B$ , что влечет за собой сначала срабатывание контактора  $B$ , а затем реле  $KOP$ . Замыканием контактов  $B$  производится подключение обмотки управления  $OY_3$  к источнику питания через резисторы  $R2$ ,  $KAB$  и  $KAP$  (при автоматическом управлении сопротивление  $KAP$  выведено). Замыкание контактов  $KOP$  приводит к шунтированию резистора  $POП$  и к подключению контактора форсировки  $KФ$  к источнику питания. Срабатывание реле  $KФ$  приводит к замыканию контакта  $KФ$  и шунтированию резистора  $PУП$ , чем достигается форсирование электромагнитного переходного процесса в обмотке возбуждения возбудителя  $LG1$ . Это в свою очередь увеличивает скорость изменения нарастания тока в обмотке возбуждения  $LM$  двигателя. При достижении током номинального значения срабатывает реле форсировки  $PФ$ , которое размыкает свой контакт  $PФ$ , обесточивая катушку контактора  $KФ$ . Это приводит к размыканию контакта  $KФ$  и введению резистора  $PУП$  в цепь обмотки возбуждения возбудителя  $LG1$ . Перед началом движения подъемного двигателя ток в обмотке  $OY_3$  зависит от значения сопротивления  $KAB$  и определяется положением ретардирующего диска. Это сопротивление максимально, а ток минимален. По мере разгона двигателя сопротивление  $KAB$  уменьшается, а ток возрастает и при установившейся частоте вращения двигателя максимален.

В начальный момент пуска размагничивающее действие отрицательной обратной связи по скорости мало и напряжение на якоре ЭМУ определяется лишь н. с. задающей обмотки  $OY_3$ . Этим достигается форсирование переходного процесса, и коэффициент форсировки  $k_{\phi} = F_3/F_{\Sigma}$  относительно велик. По мере увеличения скорости электропривода растет н. с. обратной связи по скорости, что снижает темп роста результирующей н. с. ЭМУ:  $F_{\Sigma} = F_3 - F_c$ . По завершении процесса пуска ретардирующее устройство не вызывает изменения сопротивления  $KAB$ , а следовательно, ток в обмотке  $OY_3$  постоянен и подъемные сосуды движутся с максимальной скоростью.

В конце подъема вступает в действие профиль замедляю-

шего диска ретардирующего устройства и вызывает увеличение сопротивления  $KAB$ , а следовательно, уменьшение тока в задающей обмотке  $OY_3$ . Это приводит к снижению напряжения на якоре двигателя и его частоты вращения.

Окончательная остановка подъемной машины производится переводом командоконтроллера  $KAP-B$  в среднее положение. При этом контактор  $B$  и реле  $KOP$  обесточиваются и вызывают: отключение обмотки  $OY_3$  от источника размыканием контактов  $B$  и подключение ее к якору генератора  $G$  замыканием контактов  $B$  и  $KOP$ . В результате создаваемая им н. с. размагничивает  $ЭМУ$ . Кроме того, контакт  $KOP$ , размыкаясь, вводит в цепь обмотки возбуждения возбудителя  $LG1$  резистор  $POП$  и уменьшает ток в ее обмотке до 50 % номинального, что соответствует такому же снижению тока в обмотке возбуждения  $LM$  двигателя. Этим достигается снижение нагрева двигателя в периоды пауз.

Ручное управление периодами пуска, торможения, движения с малой скоростью осуществляется командоаппаратом  $KAP$ , рукоятка которого выведена на пульт управления подъемной машины.

Контроль наличия тока в обмотке возбуждения  $LM$  двигателя осуществляется с помощью реле  $PHT$ .

Защита от токов к. з. в якорной цепи осуществляется с помощью автоматического выключателя  $QF$ , а в цепи управления — автомата  $QF1$ .

### 2.8.3. Система Г—Д с $ЭМУ$ и промежуточным магнитным усилителем ( $ПМУ$ )

Промышленная эксплуатация системы Г—Д с  $ЭМУ$  поперечного поля показала, что для форсирования переходных процессов необходимо значительное завышение напряжения  $ЭМУ$  по отношению к номинальному напряжению обмотки возбуждения генератора  $LG$ . Следовательно,  $ЭМУ$  должен иметь большой запас по напряжению, а его остаточный магнитный поток в этом случае будет велик, что влечет за собой потерю стабильности характеристик системы и к затруднению получения скорости дотягивания.

Для повышения стабильности характеристик системы Г—Д с  $ЭМУ$  необходимо, как показано выше, вводить сильную отрицательную обратную связь по напряжению  $ЭМУ$  для уменьшения остаточной э. д. с. и одновременно принимать меры для повышения коэффициента усиления системы. Это может быть достигнуто введением в схему дополнительного усилителя, в качестве которого используется магнитный усилитель.

На рис. 2.25 приведена принципиальная схема электропривода шахтной подъемной машины по системе Г—Д с  $ЭМУ$  и  $ПМУ$ .  $ЭМУ$  служит для питания обмотки возбуждения генератора  $LG$ , а  $ПМУ$  — для питания обмоток управления  $ЭМУ$ . Вы-

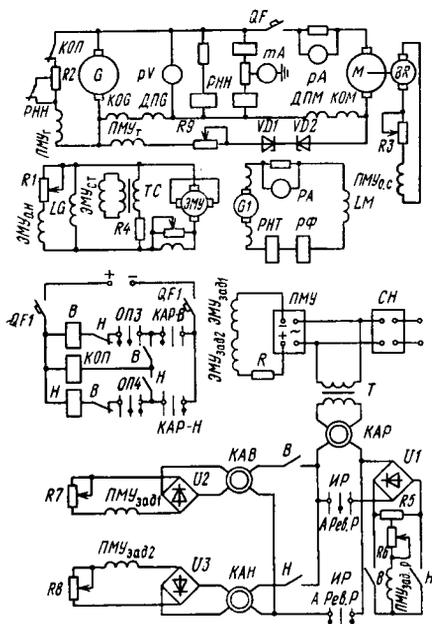


Рис. 2.25. Принциальная схема электропривода рудничной подъемной машины по системе Г—Д с ЭМУ и ПМУ

ход ПМУ подается на обмотки управления ЭМУ<sub>зад1</sub> и ЭМУ<sub>зад2</sub> через резистор R. Обмотка ЭМУ<sub>о.н</sub> включена на якорь ЭМУ и выполняет роль отрицательной обратной связи по напряжению ЭМУ. Обмотка ЭМУ<sub>ст</sub> включена на вторичную обмотку стабилизирующего трансформатора ТC и является стабилизирующей. ПМУ имеет шесть обмоток управления: ПМУ<sub>зад1</sub> и ПМУ<sub>зад2</sub> — задающие обмотки; ПМУ<sub>о.с</sub> — обмотка отрицательной обратной связи по скорости двигателя; ПМУ<sub>г</sub> — обмотка гашения остаточного магнитного потока генератора; ПМУ<sub>т</sub> — обмотка задержанной обратной связи по току двигателя. ПМУ<sub>зад.р</sub> — задающая обмотка при реверсии.

Наличие у ПМУ шести обмоток управления позволило выделить узел задающей обмотки и узел гашения.

Направление и частота вращения подъемного двигателя М в ручном и автоматическом режимах управления задаются направлением и значением тока в обмотках ПМУ<sub>зад1</sub> и ПМУ<sub>зад2</sub>. Режим «Ревизия» обеспечивается обмоткой ПМУ<sub>зад.р</sub>.

Обмотки возбуждения командоаппаратов автоматического управления KAV и KAH получают питание от командоаппарата ручного управления KAP. При автоматическом режиме управления рукоятка командоаппарата ручного управления KAP устанавливается в крайнее положение, соответствующее максимальному напряжению на его выходе. Напряжение работающего командоаппарата выпрямляется выпрямителями U2 и U3 и подается на обмотки управления ПМУ<sub>зад.1</sub> и ПМУ<sub>зад.2</sub>. При этом начало обмотки ПМУ<sub>зад.1</sub> подключено к положительному зажиму выпрямителя U2, а начало обмотки ПМУ<sub>зад.2</sub> — к отрицательному зажиму выпрямителя U3. Этим обеспечивается реверсирование напряжения на выходе ПМУ, что приводит к изменению полярности на обмотке возбуждения LG генератора, напряжения на якоре генератора G и к изменению направления вращения подъемного двигателя М. Напряжение генератора G, а следовательно, и частота вращения двигателя М определяется углом поворота ротора сельсинного командоаппарата автоматического управления KAV (KAH).

Командоаппараты *КАВ* (*КАН*) и *КАР* включены последовательно, что позволяет машинисту подъемной машины вмешиваться в автоматический режим управления перемещением рукоятки управления *КАР* и тем самым снижать (но не увеличивать) скорость движения подъемных сосудов.

Для перевода подъемной машины в режим «Ревизия» рукоятка избирателя режима *ИР* ставится в положение «Ревизия», а напряжение с сельсина *КАР* подается через выпрямитель *У1* и потенциометр *Р5* и резистор *Р6* на обмотку *ПМУ*<sub>зад. р.</sub>, полярность на которой изменяется замыкающими контактами *В* и *Н*.

Обмотка *ПМУ*<sub>г.</sub>, подключенная к зажимам якоря генератора через размыкающий контакт *КОП* и резистор *Р2*, служит для гашения напряжения остаточного магнитного потока *ЭМУ* и генератора *Г. Н. с.* этой обмотки направлена встречно н. с. задающей обмотки. Для усиления действия этой обмотки при напряжении генератора менее 40 В срабатывает реле низкого напряжения *РНН*, которое своим контактом *РНН* шунтирует часть резистора *Р2*, и тем самым увеличивается н. с. этой обмотки.

Обратная связь по скорости осуществлена с помощью тахогенератора *ВР*, механически связанного с валом подъемной машины, а электрически через установочный резистор *Р3* с обмоткой *ПМУ*<sub>о. с.</sub>

Задержанная отрицательная обратная связь по току осуществлена стабилитронами *VD1* и *VD2*, включенными встречно. Начало работы узла ограничения тока якоря определяется напряжением пробоя стабилитронов.

Для исключения влияния колебания напряжения питающей сети на схему управления силовые обмотки промежуточного магнитного усилителя *ПМУ* и обмотка возбуждения сельсинного командоаппарата ручного управления *КАР* получают питание от стабилизатора напряжения *СН*.

В схеме вместо резисторных командоаппаратов применены бесконтактные сельсинные командоаппараты *КАН*, *КАВ* и *КАР*. Роторы командоаппаратов *КАН* и *КАВ* приводятся в движение от профилирующих устройств ретардирующих дисков. Ротор сельсина командоаппарата ручного управления *КАР* связан через передачу с рукояткой управления.

Применение привода шахтных подъемных машин по системе Г—Д с *ЭМУ* и *ПМУ* позволило качественно улучшить характеристики статических и динамических режимов; уменьшить мощность аппаратуры управления, так как ток в обмотках управления *ПМУ* необходим меньший, чем в схеме с *ЭМУ*; обеспечить строгое выполнение диаграммы скорости независимо от величины и знака нагрузки, повысить стабильность и устойчивость работы.

Однако система Г—Д с *ЭМУ* и *ПМУ* не лишена недостатков, вызванных усложнением схемы, ее наладки и эксплуатации, а также наличием постоянно вращающихся машин, требующих тщательного ухода и обслуживания.

#### 2.8.4. Система Г—Д с силовым магнитным усилителем (СМУ)

Дальнейшим развитием привода шахтных подъемных машин по системе Г—Д служит применение для возбуждения генератора вместо ЭМУ (слабого звена всей системы) статических — магнитных усилителей. Магнитный усилитель — простейшее по конструкции устройство высокой надежности по большому сроку службы без ухода и обслуживания. Он обладает однозначной характеристикой, что обеспечивает более высокую управляемость и точность выполнения диаграммы скорости.

Принципиальная схема электропривода рудничной подъемной машины по системе Г—Д с СМУ приведена на рис. 2.26. Для питания и изменения тока в обмотке возбуждения генератора применяются два силовых магнитных усилителя. В этом случае обмотка возбуждения генератора делится на две полуобмотки  $LG1$  и  $LG2$ , которые вместе с балластными резисторами  $RB1$  и  $RB2$  создают сбалансированный мост. Этот мост является нагрузкой для СМУ. Выход одного трехфазного магнитного усилителя  $СМУ1$  подключается к одной диагонали моста, а выход другого  $СМУ2$  — к другой. Такая схема включения обмотки возбуждения позволяет бесконтактно изменять направление тока в ней.

Силовые магнитные усилители  $СМУ1$  и  $СМУ2$  являются элементами комплектных устройств, в которые входят также выпрямители  $U1$ ,  $U2$  и  $U3$ , трансформаторы  $T1—T3$ , резисторы и контрольно-измерительные приборы.

Выбор рабочей точки СМУ осуществляется обмотками смещения  $СМУ1_{см}$  и  $СМУ2_{см}$ . При подмагничивании магнитных усилителей ток в полуобмотках возбуждения генератора равен разности токов двух усилителей, а в балластных же сопротивлениях — сумме этих токов. Направление тока в полуобмотках возбуждения генератора определяется полярностью напряжения, подведенного к обмоткам управления СМУ.

В схеме предусмотрено одноступенчатое гашение напряжения от остаточного магнетизма. Обмотка гашения  $ПМУ_Г$  вступает в действие только после снижения напряжения генератора  $G$  до 25 % номинального значения, после чего срабатывает реле напряжения  $РН$ , которое своим контактом  $РН$  подключает цепь обмотки  $ПМУ_Г$  к якору генератора  $G$ .

Обмотка возбуждения  $LM$  подъемного двигателя  $M$  получает питание от трансформатора  $T4$  через силовой трехфазный магнитный усилитель  $СМУ3$ .

Магнитный усилитель  $СМУ3$  имеет три обмотки управления.  $СМУ3_{зад}$  — задающая обмотка получает питание от источника постоянного тока цепи управления  $U_y$ . При остановах подъемной машины ток в обмотке возбуждения  $LM$  ослабляется из-за введения в цепь задающей обмотки резистора ослабления поля  $РОП$ .  $СМУ3_{см}$  — обмотка смещения служит для создания начального тока в обмотке возбуждения двигателя при отсут-

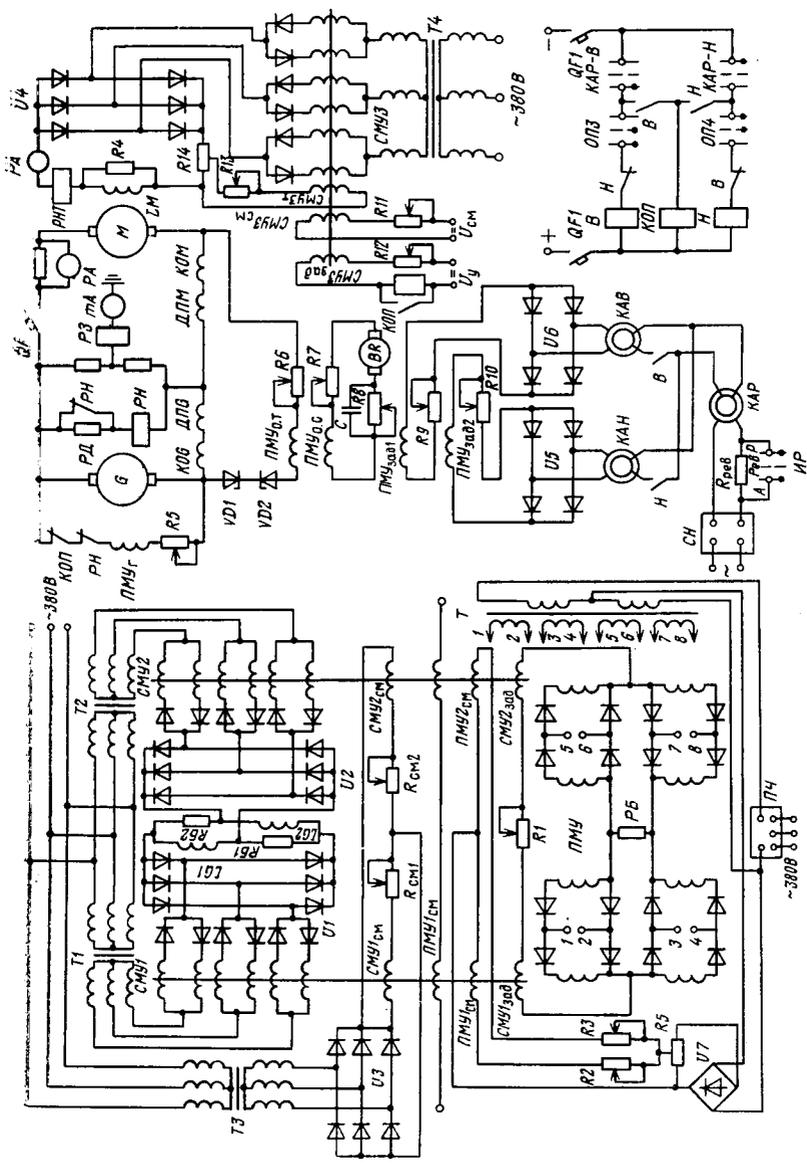


Рис. 2.26. Принципиальная схема электропривода ручной подъемной машины по системе Г—Д с СМУ

ствии тока в задающей обмотке. Форсирование тока в обмотке возбуждения двигателя обеспечивается отрицательной обратной связью по его току. Токвая обмотка  $СМУЗ_т$  включена на потенциометр  $R14$  через установочный резистор  $R13$ .

Для питания обмоток управления СМУ применяется промежуточный магнитный усилитель  $ПМУ$ , получающий питание от статического преобразователя частоты  $ПЧ$  на 400 Гц, что значительно повышает его быстродействие. Выход  $ПМУ$  подается на обмотки управления  $СМУ1_{зад}$  и  $СМУ2_{зад}$ , включенных встречно.  $ПМУ$  имеет свои обмотки управления, назначение которых аналогично ранее рассмотренным схемам.

Питание задающих обмоток управления осуществляется от сельсинных командоаппаратов автоматического  $КАВ$  или  $КАН$  и ручного управления  $КАР$ . В режиме «Ревизия» для ограничения максимальной скорости подъемной машины контактом избирателя режимов  $ИР$  в цепь обмотки возбуждения  $КАР$  вводится резистор  $R_{рев}$ . Недостаток системы  $\Gamma—Д$  с СМУ — значительная инерционность и низкий коэффициент усиления.

С увеличением мощности приводов шахтных подъемных машин мощность типовых силовых магнитных усилителей может оказаться недостаточной. В этом случае в качестве статических преобразователей для управления током возбуждения генератора могут применяться тиристорные преобразователи.

### 2.8.5. Система генератор—двигатель с тиристорным возбудителем ( $\Gamma—Д$ с ТВ)

Принципиальная электрическая схема электропривода рудничной подъемной машины по системе  $\Gamma—Д$  с ТВ приведена на рис. 2.27. Силовая часть тиристорного преобразователя состоит из двух трехфазных мостов  $U1$  и  $U2$ , которые получают питание от трехфазной сети переменного тока через трансформатор  $T1$ . Для ограничения уравнивающих токов, возникающих во внутренних цепях при согласованном управлении, в цепь выпрямленного тока каждого моста включены уравнивающие дроссели  $L1—L4$ .

Величина и полярность напряжения на выходе преобразователя меняется изменением величины и полярности намагничивающей силы суммирующего магнитного усилителя  $СМУ1$ , входящего в систему управления тиристорным преобразователем генератора.

Суммирующий магнитный усилитель  $СМУ1$  имеет шесть обмоток управления:  $ОУ1$  — задающая, определяющая полярность и величину напряжения генератора;  $ОУ2$  — отрицательной задержанной обратной связи по току двигателя (включение в цепь обмотки двух стабилизаторов вызвано необходимостью ее работы при изменении направления тока двигателя, а следовательно, и полярности напряжения, снимаемого с дополнительных и компенсационных обмоток генератора и двигателя  $ДПГ$ ,  $ДПМ$  и

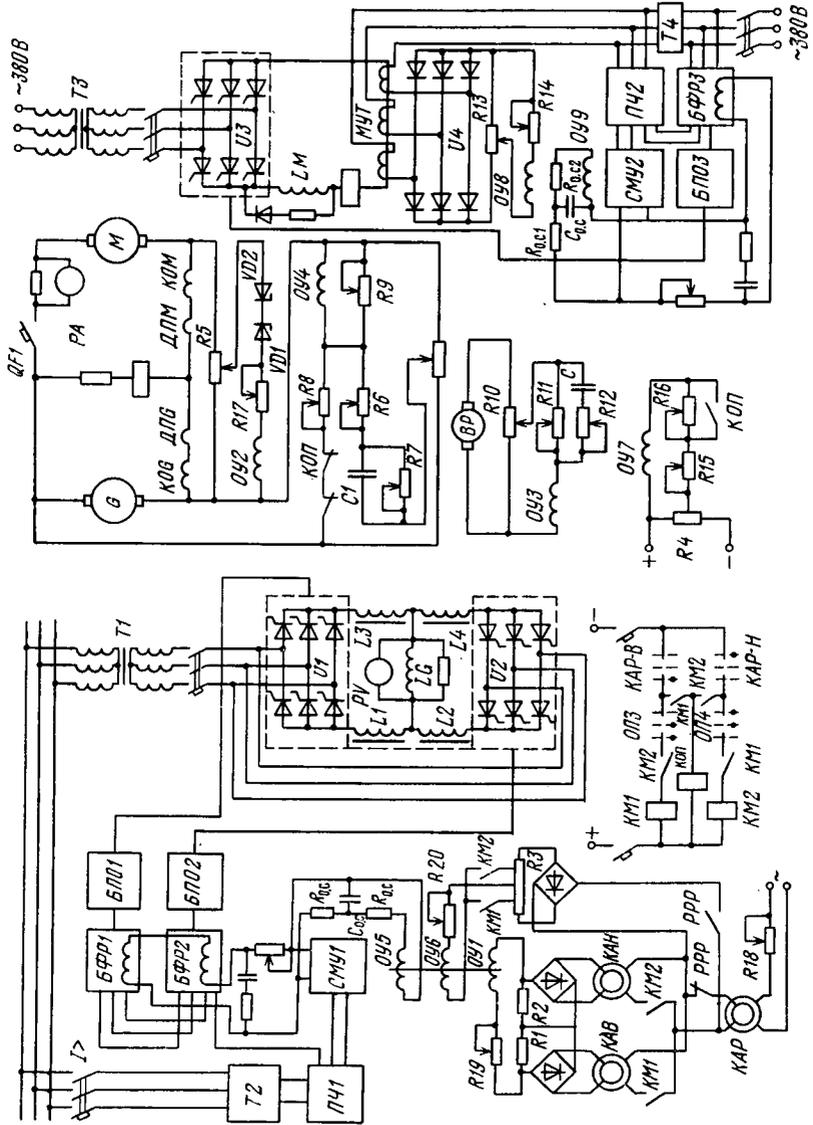


Рис. 2.27. Принципиальная схема электропривода рудничной подъемной машины по системе Г—Д с ТВ

КОМ, КОГ); ОУЗ — отрицательной обратной связи по скорости, включенная на якорь тахогенератора ВР (включение в цепь обмотки контура R12C обеспечивает гибкую обратную связь для стабилизации переходных режимов); ОУ4 — гибкой и жесткой отрицательной обратной связи по напряжению генератора, а также гашения поля генератора, гибкая обратная связь формируется с помощью дифференцирующей цепи, образованной резисторами R6 и R7, конденсатором C1; ОУ5 — внутренней отрицательной обратной связи по напряжению СМУ1 и она же гибкой обратной связи для повышения устойчивости системы и стабильности характеристик суммирующего магнитного усилителя, реализуемая включением контура R<sub>о.с</sub> C<sub>о.с</sub>; ОУ6 — обмотка задающая в режиме ревизии.

Обмотка возбуждения LM подъемного двигателя М питается от неперекрываемого тиристорного выпрямителя УЗ. Применение последнего позволяет: поддерживать постоянство тока возбуждения при колебаниях напряжения питающего трансформатора, а также при изменении сопротивления обмотки возбуждения в результате температурного влияния; ослаблять поле двигателя во время пауз для уменьшения его нагрева.

Суммирующий магнитный усилитель СМУ2 системы управления тиристорным выпрямителем УЗ имеет три обмотки управления: ОУ8 — отрицательной обратной связи по току возбуждения; ОУ9 — гибкой и жесткой отрицательной обратных связей по напряжению СМУ2; ОУ7 — задающая, служащая для задания тока в обмотке возбуждения.

Поддержание постоянства тока в обмотке возбуждения двигателя достигается проходным измерительным магнитным усилителем МУТ, который через выпрямитель U4 подключен к потенциометру R13. Напряжение, пропорциональное току в обмотке возбуждения, снимается с потенциометра R13 и подается в обмотку управления ОУ8 через резистор R14.

Для уменьшения тока в обмотке возбуждения на период паузы в обмотку ОУ7 вводится добавочный резистор R16, который при работе двигателя шунтируется замыкающим контактом КОП.

Рассмотрим работу схемы в отдельные периоды движения подъемных сосудов.

Управление двигателем М и его пуск до необходимой частоты вращения осуществляется изменением тока в задающей обмотке ОУ1 командоаппаратами КАВ, КАН или КАР. При автоматическом управлении командоаппараты КАВ или КАН вводятся во вращение от профилирующих дисков ретардирующего устройства, связанного через передачу с валом подъемной машины. Ретардирующее устройство обеспечивает необходимый закон изменения тока в обмотке ОУ1, а следовательно, необходимую диаграмму скорости движения подъемных сосудов.

При движении «Вперед» замкнут контакт КМ1 и в работе находится сельсинный командоаппарат КАВ. Через обмотку уп-

рвления *ОУ1* начинает проходить ток, который создает н. с., вызывающую отпирание тиристорov преобразователя обмотки возбуждения генератора. Это приводит к появлению напряжения генератора, и двигатель начинает вращаться. В начальный момент пуска размагничивающее действие отрицательной обратной связи по скорости *ОУ3* мало и напряжение генератора определяется лишь н. с. задающей обмотки *ОУ1*. Этим достигается форсирование переходного процесса. По мере увеличения частоты вращения двигателя растет н. с. обмотки обратной связи *ОУ3*, что снижает темп роста результирующей н. с. *СМУ1*.

Командоаппарат *КАВ* автоматически управляет процессом пуска двигателя, частота вращения которого постепенно достигает максимальной. По завершении процесса пуска ролик ретардирующего устройства перестает перемещаться, что не вызывает изменения тока в задающей обмотке, и двигатель работает с максимальной частотой вращения.

В конце периода движения подъемных сосудов с установившейся скоростью подается команда на включение замедляющего диска ретардирующего устройства и он вновь начинает воздействовать на сельсинный командоаппарат *КАВ*, вызывая снижение тока в задающей обмотке *ОУ1*. Это приводит к снижению напряжения на якоре двигателя и его скорости дотягивания. В период дотягивания ток в обмотке *ОУ1* остается постоянным и подъемные сосуды движутся в разгрузочных кривых с малой скоростью.

Окончательная остановка подъемной машины происходит в момент подхода одного из подъемных сосудов к индукционным датчикам конечных выключателей. Подается импульс на отключение контакта *КМ1* и включение контакта ограничения поля двигателя *КОП* в цепи обмотки *ОУ4*, создающей н. с., направленную на размагничивание генератора. Кроме того, контакт *КОП*, размыкаясь, вводит в обмотку возбуждения *ОУ7* резистор *R16*, уменьшающий ток в 2 раза, а следовательно, в 2 раза уменьшается и ток в обмотке возбуждения двигателя, чем снижается нагрев двигателя при останове подъемной машины.

Ручное управление в периоды пуска, замедления и движения с малой скоростью осуществляется командоаппаратом *КАР*, рукоятка которого выведена на пульт управления подъемной машины. При ручном управлении командоаппараты автоматического управления *КАВ* и *КАН* отключаются размыкающим контактом *РРР*, а командоаппарат ручного управления подключается замыкающим контактом к обмотке управления *ОУ6*. Эта же обмотка работает при ревизии ствола.

В систему управления тиристорами выпрямителей *U1—U3* входят блоки фазорегулирования *БФР1—БФР3*, блоки пилообразного напряжения *БПО1—БПО3*, преобразователи частоты *ПЧ1—ПЧ2*, согласующие трансформаторы *T2, T4*. В схеме управления электроприводом задействованы также согласующие

трансформаторы  $T1, T3$ , для питания выпрямителей  $U1—U3$ , делители напряжения  $R1—R5, R10$  и  $R15$ , установочные резисторы  $R8, R9, R15, R17—R20$ .

### 2.8.6. Система управляемый выпрямитель — двигатель (УВ—Д)

Якорь подъемного двигателя в системе УВ—Д получает питание от управляемого нереверсивного тиристорного выпрямителя  $U1$  (рис. 2.28) через согласующий трансформатор  $T1$ . Для сглаживания пульсаций выпрямленного тока в цепи якоря двигателя  $M$  включен дроссель  $L$ . Обмотка возбуждения двигателя получает питание от управляемого нереверсивного тиристорного выпрямителя  $U2$  с согласующим трансформатором  $T2$ . Для обеспечения необходимого закона изменения скорости движения подъемных сосудов в периоды разгона и торможения, стабилизации скорости в периоды равномерного движения, защиты электродвигателя от перегрузок в схеме использованы обратные связи по скорости и току. Сигнал обратной связи по скорости в виде напряжения  $U_{BR}$ , снимаемого с якоря тахогенератора  $BR$ , подается на регулятор скорости  $AR$ . Регулятор скорости имеет характеристику П-регулятора. Сигнал обратной связи по току в виде напряжения  $U_{д.т}$  реализуется датчиком тока  $UA$  и подается на регулятор тока  $AA$ . Напряжение на выходе датчика тока  $UA$  пропорционально току якорной цепи двигателя  $M$ . Регулятор тока имеет характеристику ПИ-регулятора.

Управление частотой вращения подъемного двигателя может быть ручным или автоматическим. При ручном управлении сигнал управления подается от сельсинного командоаппарата  $KA$ . При автоматическом управлении ступенчатый сигнал управления подается от путевых датчиков и поступает на задатчик интенсивности  $AJ$ , представляющий собой интегрирующее звено и

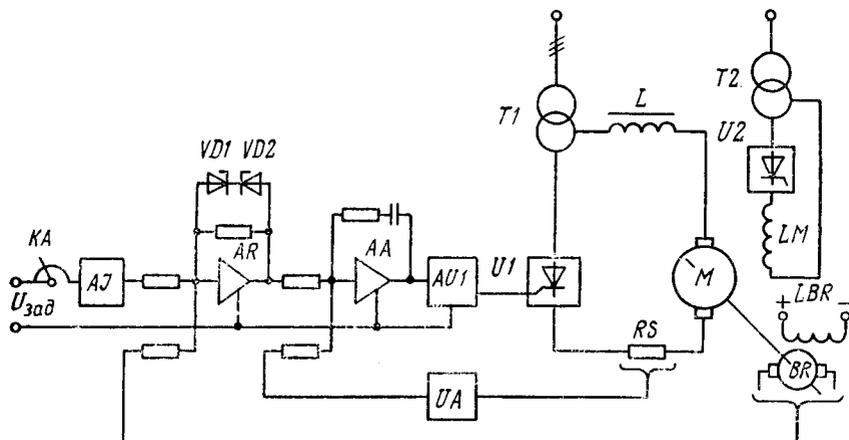


Рис. 2.28. Принципиальная схема электропривода подъемной машины по системе УВ—Д

предназначенный для выработки напряжения линейно меняющегося во времени. Это напряжение подается на вход регулятора скорости  $AR$ .

Задающее напряжение  $U_z$  на входе регулятора скорости  $AR$ , пропорциональное заданной скорости, сравнивается с сигналом (напряжением) действительной скорости, измеряемой тахогенератором  $BR$ . С выхода регулятора скорости  $AR$ , регулирующее воздействие которого определяется величиной отклонения  $\Delta v$  и принятым законом регулирования, реализуемого регулятором  $AR$ , подается на регулятор  $AA$ . На входе регулятора тока  $AA$  регулирующее воздействие, поступающее от регулятора  $AR$ , сравнивается с напряжением, пропорциональным току якорной цепи, снимаемого с датчика тока  $UA$ . На выходе  $AA$  формируется регулирующее воздействие в соответствии с законом регулирования, которое подается к системе управления  $AUI$  тиристорами выпрямителя  $UI$  для изменения величины выпрямленного напряжения, а следовательно, и частоты вращения подъемного двигателя для уменьшения отклонения  $\Delta v$ .

Для ограничения тока при чрезмерных нагрузках двигателя цепь обратной связи регулятора скорости  $AR$  шунтируется двумя стабилитронами  $VD1$  и  $VD2$ , включенными навстречу друг другу для ограничения выходного напряжения  $AR$  обеих полярностей. При чрезмерных нагрузках ток отсечки двигателя определяется напряжением пробоя стабилитронов.

Применение регулируемого выпрямителя в цепи обмотки возбуждения  $LM$  двигателя  $M$  позволяет поддерживать постоянство тока в ней независимо от колебания напряжения питания и температуры двигателя. Для этой цели используется обратная связь по току возбуждения.

## 2.9. СИЛОВЫЕ СХЕМЫ ПРИВОДА С ТИРИСТОРНЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

При реализации электропривода рудничной подъемной установки по системе УВ—Д применяют следующие две схемы:

с двумя силовыми тиристорными преобразователями, каждый из которых пропускает якорный ток двигателя взаимно противоположного направления (знака);

с одним силовым тиристорным преобразователем и реверсом в якорной цепи или реверсированием потока возбуждения.

В схеме с двумя силовыми тиристорными преобразователями последние могут быть соединены по перекрестной или встречно-параллельной схеме. Наиболее экономичной и совершенной схемой является встречно-параллельная (см. рис. 1.5), так как габаритная мощность двухобмоточного трансформатора при встречно-параллельной схеме приблизительно на 20 % меньше, чем трехобмоточного трансформатора при перекрестной схеме. Это имеет существенное значение, особенно при больших мощностях установленного электрооборудования.

Управление преобразователями в схеме встречно-параллельного включения силовых тиристорных преобразователей может быть совместное или раздельное. При совместном управлении один управляемый преобразователь работает в выпрямительном режиме, а другой подготовлен к инверторному режиму работы. При раздельном управлении преобразователями сигналы управления подаются раздельно. При таком управлении один из преобразователей всегда заперт и сигналы управления на него не подаются. Это полностью исключает возможность появления уравнительных токов, и отпадает необходимость в уравнительных дросселях, а также полностью используется габаритная мощность трансформатора.

Режим работы привода с раздельным управлением изменяется путем прекращения подачи сигналов управления на преобразователь, например, работающий в выпрямительном режиме, и после исчезновения тока в якорной цепи подается управляющий сигнал на второй преобразователь с углом регулирования  $\alpha > \pi/2$ , обеспечивающий его работу в инверторном режиме.

При раздельном управлении появление управляющих сигналов на неработающем преобразователе может привести к внутреннему к. з. Избежать этого можно применением в схеме управления логического переключающего устройства (ЛПУ), с помощью которого управляющий сигнал от СИФУ подается только на преобразователь, через который должен проходить ток якоря. Переключаются преобразователи в момент отсутствия тока в якорной цепи, что фиксируется датчиком нулевого тока.

Имеются подъемные установки, на которых эксплуатируется схема с одним комплектом силового преобразователя и реверсором в якорной цепи двигателя. Применение такой схемы стало возможным с разработкой быстродействующего реверсора, обеспечивающего время реверса 0,12—0,15 с. Такое время, в течение которого электропривод оказывается неуправляемым и работает в режиме свободного выбега, является допустимым по технологическим условиям работы для ряда подъемных установок.

Системы электропривода с реверсированием поля имеют меньший объем электрооборудования по сравнению со встречно-параллельной схемой, но имеют худшие динамические показатели, так как увеличивается время реверсирования из-за инерционности обмотки возбуждения.

## **2.10. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО И ПОСТОЯННОГО ТОКА ШАХТНЫХ ПОДЪЕМНЫХ МАШИН**

Область применения асинхронного двигателя с контакторным управлением для однодвигательных приводов шахтных подъемных машин в отечественной практике ограничивается мощностью 1250 кВт.

Работа асинхронного двигателя шахтной подъемной ма-

шины, управляемого изменением роторного сопротивления, сопровождается значительными потерями электроэнергии в периоды пуска и замедления. Поэтому эта система привода в отношении расхода электроэнергии будет тем рациональнее, чем меньше отношение продолжительности периодов пуска и торможения к периоду рабочего цикла подъема.

При эксплуатации подъемной установки с асинхронным двигателем, обслуживающей несколько рабочих горизонтов с одинаковой максимальной скоростью, общий к. п. д. установки при работе на вышележащих горизонтах будет меньше, чем на нижележащих. Таким образом, применение асинхронного привода на шахтных подъемных установках, обслуживающих несколько рабочих горизонтов, нецелесообразно, так как это сопряжено с большим расходом электроэнергии.

Применение для привода шахтных подъемных машин асинхронного двигателя с частотным управлением, асинхронного вентильного каскада и др. позволяет вести более экономичное регулирование скорости двигателя, а следовательно, улучшить экономичность работы подъемной установки. Это обстоятельство в значительной степени будет способствовать расширению области применения асинхронного электропривода для шахтных подъемных машин.

Система электропривода постоянного тока, обладая высокой экономичностью при регулировании скорости, поддержанием практически любых промежуточных скоростей независимо от нагрузки на валу двигателя, непрерывным переходом из двигательного режима в режим электрического торможения, сравнительно простым построением систем автоматического управления и схем автоматизации, имеет несомненные преимущества перед электроприводом переменного тока.

Однако система электропривода постоянного тока по системе Г—Д не лишена недостатков. Главные из них: высокая стоимость установленного электрооборудования, большая масса и габариты электрических машин, довольно низкий к. п. д. системы, большие эксплуатационные расходы, пониженная надежность из-за наличия коллекторных машин.

Исходя из вышеизложенного, система Г—Д нашла применение: на подъемных установках мощностью выше 1000 кВт и с высокими скоростями 10 м/с и более; для подъемных машин, обслуживающих несколько рабочих горизонтов, а также для подъемных установок с малым отношением продолжительности паузы к периоду рабочего цикла подъема.

Применение на шахтных подъемных машинах электропривода по системе УРВ—Д позволило в значительной степени сократить капитальные затраты, уменьшить массу и габариты электрооборудования и расходы меди. Применение же тиристорных преобразователей будет способствовать дальнейшему распространению электропривода постоянного тока шахтных подъемных машин по системе УВ—Д.

## 2.11. ВЫБОР ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ РУДНИЧНОЙ ПОДЪЕМНОЙ МАШИНЫ

### 2.11.1. Расчет мощности подъемного двигателя

Исходными данными для расчета мощности подъемного двигателя служат диаграммы скорости и усилий (см. рис. 2.2).

Требуемая эквивалентная мощность двигателя

$$P_{\text{экр}} = F_{\text{экр}} v_{\text{max}} / \eta, \quad (2.19)$$

где  $F_{\text{экр}}$  — эквивалентное усилие за цикл, Н;  $v_{\text{max}}$  — максимальная скорость движения подъемных сосудов, м/с;  $\eta = 0,975$  — к. п. д. безредукторного привода; для одноступенчатого редуктора к. п. д. составляет 0,93, для двухступенчатого — 0,90.

Эквивалентное усилие за цикл

$$F_{\text{экр}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n F_i^2 t_i / T_{\text{экр}}}. \quad (2.20)$$

Рассмотрим значения  $F_i$  для различных участков диаграммы усилий (рис. 2.2, б). Для участков, где  $F_i$  изменяется от  $+F_i$  до  $+F_{i+1}$

$$F_i^2 t_i = (F_i^2 + F_i F_{i+1} + F_{i+1}^2) t_i. \quad (2.21)$$

Таковыми участками диаграммы усилий будут:  $F_1 - F_1'$ ,  $F_2 - F_2'$ ,  $F_3 - F_3'$ ,  $F_4 - F_4'$ ,  $F_5 - F_5'$ , т. е.  $F_i^2 t_i = (F_1^2 + F_1 F_1' + F_1'^2) t_1$ ;  $F_i^2 t_i = (F_2^2 + F_2 F_2' + F_2'^2) t_2$  и т. д.

Для участков, где  $F_i$  изменяется от  $+F_i$  до  $-F_{i-1}$ ,

$$F_i^2 t_i = (F_i^2 - F_i F_{i+1} + F_{i+1}^2) t_i. \quad (2.22)$$

Таким участком будет лишь шестой участок, где  $F_i$  изменяется от  $F_5'$  до  $F_5''$ , т. е.  $F_i^2 t_i = (F_5'^2 - F_5' F_5'' + F_5''^2) t_5$ .

Для участков, где  $F_i$  изменяется от  $-F_i$  до  $-F_{i+1}$ ,

$$F_i^2 t_i = (F_i^2 + F_i F_{i+1} + F_{i+1}^2) t_i. \quad (2.23)$$

Такого участка на рис. 2.2, б нет.

Для участков диаграммы усилий, где  $F_i$  постоянно,  $F_i^2 t_i$ .

Таким участком является седьмой участок, где  $F_5'' - F_6'$ ,  $F_i^2 t_i = F_5''^2 t_6$  или  $F_i^2 t_i = F_6'^2 t_6$ .

Эквивалентное время цикла  $T_{\text{экр}}$  определяется для двигателей: с принудительной вентиляцией

$$T_{\text{экр}} = T_{\text{ц}} = \Sigma t; \quad (2.24)$$

с самовентиляцией

$$T_{\text{экр}} = 0,5 \Sigma t_{\text{уск (зам)}} + t_{\text{уст}} + 0,330, \quad (2.25)$$

где  $T_{\text{ц}}$  — время цикла подъема;  $t_{\text{уск (зам)}}$  — время ускорения (за-

медления) или работы с пониженной скоростью;  $t_{уст}$  — время работы с максимальной скоростью;  $\theta$  — время паузы.

Частота вращения двигателя

$$n_{дв} = \frac{60iv_{max}}{\pi D}, \quad (2.26)$$

где  $i$  — передаточное число редуктора;  $D$  — диаметр барабана, м.

По эквивалентной мощности  $P_{эkv}$  и максимальной частоте вращения  $n_{дв}$  по каталогу выбирается двигатель, используя условие  $P_{дв} \geq P_{эkv}$ .

Принятый электродвигатель проверяется по перегрузке:

$$kF_{max}/F_n < \lambda, \quad (2.27)$$

где  $k=1,3$  — для асинхронных двигателей и  $k=1,0$  — для двигателей постоянного тока;  $F_{max}$  — максимальное усилие из диаграммы усилий;  $\lambda$  — перегрузочная способность двигателя.

Если это неравенство не выполняется, то по каталогу выбирается электродвигатель большей мощности.

### 2.11.2. Выбор мощности двигателя и генератора преобразовательного агрегата и возбuditеля системы Г—Д

Преобразовательный агрегат системы Г—Д состоит из генератора постоянного тока независимого возбуждения и асинхронного (или синхронного) двигателя. Мощность генератора преобразовательного агрегата

$$P_{н.г} = P_{ном.дв}/\eta_{ном.дв}, \quad (2.28)$$

где  $P_{ном.дв}$  — номинальная мощность двигателя;  $\eta_{ном.дв}$  — номинальный к. п. д. двигателя.

Мощность двигателя переменного тока (асинхронного или синхронного) преобразовательного агрегата

$$P_{п.а} = P_{н.г}/\eta_{ном.г}, \quad (2.29)$$

где  $\eta_{ном.г}$  — номинальный к. п. д. генератора.

Номинальная частота вращения двигателя преобразовательного агрегата должна соответствовать номинальной частоте выбранного генератора.

Возбудитель в системе Г—Д служит для питания обмотки возбуждения, цепи управления, обмоток тахогенератора и задающих обмоток усилителей.

Полная мощность возбудителя суммируется из мощности:

1) на возбуждение двигателя, которая определяется по формуле

$$P_{в.дв} = U_{ном.в.дв}/r_{в.дв}, \quad (2.30)$$

где  $U_{ном.в.дв}$  — номинальное напряжение обмотки возбуждения двигателя;  $r_{в.дв}$  — сопротивление обмотки возбуждения двигателя;

2) на питание цепей управления — задающих обмоток и обмоток смещения магнитного усилителя (для схем рис. 2.26 и 2.27), задающей обмотки электромашиного усилителя (для схемы рис. 2.24) и обмотки возбуждения тахогенератора. Эта мощность невелика и может быть принята равной 1—2 % мощности подъемного двигателя:

$$P_{\text{возб}} = (0,01 \div 0,02) P_{\text{ном. дв}} + U_{\text{ном. в. дв}}^2 / r_{\text{в. дв}} \quad (2.31)$$

В качестве возбудителя принимается генератор постоянного тока параллельного возбуждения. Он может приводиться во вращение двигателем переменного тока преобразовательного агрегата или своим собственным двигателем. Если возбудитель работает в комплекте с преобразовательным агрегатом, его номинальная частота вращения принимается равной частоте вращения преобразовательного агрегата. При наличии собственного приводного двигателя его частота вращения должна соответствовать частоте вращения возбудителя, а его мощность

$$P_{\text{ном. дв. в}} = P_{\text{ном. возб}} / \eta_{\text{ном. возб}}, \quad (2.32)$$

где  $\eta_{\text{ном. возб}}$  — номинальный к. п. д. возбудителя.

При применении в качестве возбудителя вентильного преобразователя последний выбирается на напряжение обмотки возбуждения и на мощность, определяемую по формуле (2.31).

В качестве возбудителей генераторов используются электромашиные, магнитные усилители или вентильные преобразователи. Мощность последних определяется мощностью обмотки возбуждения генератора и рассчитывается по формуле

$$P_{\text{возб}} = U_{\text{ном. в. г}}^2 / r_{\text{в. г}}, \quad (2.33)$$

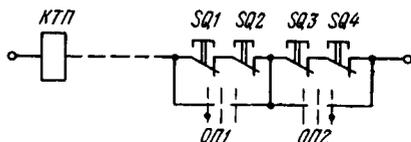
где  $U_{\text{ном. в. г}}$  — номинальное напряжение обмотки возбуждения генератора;  $r_{\text{в. г}}$  — сопротивление обмотки возбуждения генератора.

При выборе возбудителя по каталогу необходимо ориентироваться не только на его мощность, но и на ток.

## 2.12. АППАРАТЫ ЗАЩИТЫ И БЛОКИРОВКИ ШАХТНЫХ ПОДЪЕМНЫХ УСТАНОВОК

*Защита от переподъема.* Согласно ПБ подъемная установка должна быть оборудована устройством защиты от переподъема, которое должно срабатывать при переподъеме сосудов выше нормального верхнего положения на 0,5 м. Подъемные установки, оборудованные опрокидными клетями или скипами, имеют два комплекта защиты от переподъема (на копре и в здании подъемной машины), которые срабатывают при переподъеме подъемных сосудов выше нормального верхнего положения на 0,5 м. При грузоподъемных подъемах с опрокидными клетями

Рис. 2.29. Принципиальная схема защиты от переподъема подъемных сосудов



необходима установка дополнительных конечных выключателей, контролирующих высоту переподъема не более 0,5 м выше уровня приемной площадки, предназначенной для посадки в клеть и высадки из клетки людей. Эти дополнительные выключатели должны шунтироваться в зависимости от подъема людей или груза.

Конечные выключатели устанавливаются: один на копре, другой на указателе глубины. Последние могут быть: механические (контактные) и индукционные (бесконтактные).

Конечные выключатели, установленные на копре, приводятся в действие подъемными сосудами механическим воздействием на них или без непосредственного контакта — индукционным путем. Конечные выключатели, установленные на указателе глубины, дублирующие и срабатывают при воздействии на них гаек или толкателей и подвижных рычагов этажных выключателей в путевых программных аппаратах АКХ, АЗК и ППР.

При срабатывании конечного выключателя размыкается цепь контактора предохранительного тормоза *КТП* (рис. 2.29), что приводит к наложению предохранительного тормоза. В эту цепь включены контакты конечных выключателей *SQ1—SQ4*. Размыкание одного из них приводит к обесточиванию контактора *КТП* и к наложению предохранительного тормоза. Для возврата подъемного сосуда после переподъема необходимо вновь включить подъемный двигатель, что станет возможным только после шунтирования разомкнутого контакта обходным переключателем *ОП1* или *ОП2*. Обходные переключатели заблокированы с переключателями *ОП3*, *ОП4* (см. рис. 2.25—2.27), так что последние разрывают цепь катушек реверсирующих контакторов В и Н, чем исключается возможность пуска подъемной машины в сторону дальнейшего переподъема.

Механические конечные выключатели обладают рядом недостатков, основными из которых являются: отказ в работе при их обледенении, а также наличие резких ударов по рычагу при воздействии на них подъемных сосудов. Поэтому в качестве конечных выключателей на шахтном подъеме более широкое применение нашли бесконтактные конечные выключатели. Бесконтактные конечные выключатели обладают рядом преимуществ перед механическими: отсутствие движущихся частей; определенные положения подъемного сосуда на расстоянии; легкая герметизация и тем самым обеспечение высокой надежности.

Из бесконтактных магнитных выключателей наибольшее применение в настоящее время находят следующие: ВМ-62, ВМ-63,

ВМ-64В, ВМ4-65 и ВМ-66. В комплект магнитного выключателя входят магнит, датчик и станция управления.

|                    | ВМ-62  | ВМ-63  | ВМ-64В   | ВМ4-65  | ВМ-66  |
|--------------------|--------|--------|----------|---------|--------|
| Магнит . . . . .   |        |        | МВМ-63-1 |         |        |
| Датчик . . . . .   | ДВМ-62 | ДВМ-63 |          | ДВМ-65  |        |
| Станция управления | СВМ-62 | СВМ-63 | СВ-64К   | СВМ4-65 | СВМ-66 |

Схемное решение для всех выключателей одинаковое, а отличие состоит в конструктивном исполнении станции. МВМ-63-1 представляет собой постоянный магнит из специального сплава, помещенный в пластмассовую оболочку, залитую компаундом. Станции управления выключателем имеют следующие исполнения: защищенное (СВМ-63), рудничное нормальное (СВМ4-65, СВМ-66), взрывобезопасное (СВМ-64В). Магнит МВМ-63-1 является общим элементом для всех магнитных выключателей. Число магнитов может быть увеличено, если контролируемый объект движется с большой скоростью.

Датчик представляет собой чувствительный элемент, реагирующий на внешнее магнитное поле. Последний помещен в специальный пластмассовый корпус, залитый компаундом. Цепь датчика искробезопасна.

Принцип работы магнитного выключателя рассмотрим на примере магнитного выключателя ВМ-66, электрическая схема которого показана на рис. 2.30. При отсутствии внешнего магнитного поля (нет поблизости подъемного сосуда с магнитом МВМ-63-1) и при подаче питания на станцию управления во вторичной обмотке трансформатора  $T_4$  наводится э. д. с., которая через трансформатор  $T_3$  подается на базу триода  $VT$ . Переменная составляющая напряжения коллекторной цепи через трансформатор  $T_2$  и диоды  $VD1$  и  $VD2$  подается на реле  $K1$ , которое срабатывает и замыкает свой контакт  $K1$  в цепи исполнительного реле  $K2$ . Таким образом, реле  $K2$  оказывается под напряжением выпрямителя  $U$ , а магнитный выключатель готов к работе.

При прохождении мимо датчика магнита, находящегося на подъемном сосуде, трансформатор  $T_4$  насыщается, его э. д. с. снижается и приводит сначала к отключению реле  $K1$ , а затем и реле  $K2$ . Отключение реле  $K2$  вызывает переключения в схе-

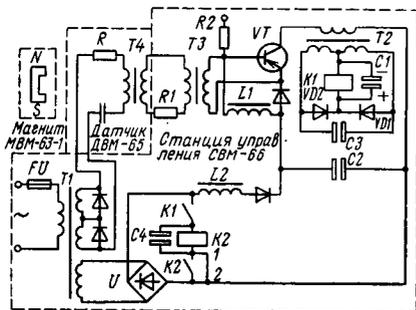


Рис. 2.30. Принципиальная электрическая схема магнитного выключателя

мах автоматики, сигнализации или защиты (для чего служат два замыкающих и два размыкающих контакта). После ухода подъемного сосуда, а вместе с ним и магнита, реле  $2K$  включается, и схема вновь готова к работе.

Если на зажимы  $1—2$  поставить перемычку, то при подходе подъемного сосуда к датчику исполнительное реле  $K2$  отключится и выдаст сигнал в схему контроля, при отходе реле возвращается в исходное положение. Если необходимо, чтобы при подходе подъемного сосуда к точке контроля реле  $K2$  отключалось и выдавало сигнал в схему автоматики и контроля, а в исходное положение возвращалось только после прихода подъемного сосуда в следующую точку контроля или после переключения схемы управления на обратный ход, то в этом случае перемычки с зажимов снимаются, а их концы соединяются с соответствующими контактами другого выключателя, который контролирует приход подъемного сосуда в следующую точку контроля. Такая блокировка реле  $K2$  позволяет избежать преждевременного возврата выключателя в состояние готовности и при отходе подъемного сосуда от точки контроля.

Если магнитный выключатель используется для защиты от переподъема подъемного сосуда, то такое положение рассматривается как аварийное и обратный ход сосуда допустим только после выяснения причин, вызвавших аварийную ситуацию, а зажимы  $1—2$  соединяются с контактами обходного переключателя на пульте оператора для ручного возврата выключателя в состояние готовности.

Магнитный выключатель при нормальных режимах работы должен постоянно находиться под напряжением, а реле  $K1$  и  $K2$  — под током, т. е. включены. В этом случае обеспечивается самоконтроль исправности схемы магнитного выключателя, и при любом повреждении, приводящем к потере работоспособности выключателя, исполнительное реле  $K2$  отключается, обеспечивая остановку подъемных сосудов или сигнализацию о потере контроля.

При использовании магнитных выключателей в режимах, при которых исполнительное реле  $K2$  работает не на отключение, а на включение, необходимо датчик и магнит установить неподвижно на расстоянии не более 140 мм друг от друга. В этом случае срабатывание магнитного выключателя происходит в момент прохождения между датчиком и магнитом подъемного сосуда, который шунтирует поле магнита и вызывает включение реле  $K2$ .

В схему магнитного выключателя входят также установочные резисторы  $R1$ ,  $R2$ , дроссели  $L1$ ,  $L2$  и конденсаторы  $C2$ ,  $C3$  для шунтирования катушек при отключении последних. Защита цепи управления от токов к. з. осуществляется плавким предохранителем  $FU$ .

*Защита от превышения скорости.* Нормальная работа шахтной подъемной установки может быть нарушена появлением

аварийной обстановки, вызванной: превышением максимальной скорости подъема; переподъемом подъемных сосудов в конечных верхних положениях; подходом подъемных сосудов к посадочным площадкам, оборудованным брусьями, и к разгрузочным или загрузочным кривым с большой скоростью; большим ускорением или замедлением в период разгона или торможения подъемных сосудов.

Все перечисленные выше аварийные обстановки вызываются в основном превышением скорости. Поэтому, согласно ПБ, защита подъемной установки должна срабатывать и отключать подъемную машину с наложением предохранительного тормоза при превышении установленной скорости на 15 %, а при подходе подъемного сосуда к верхнему положению — со скоростью не более 1,5 м/с.

Защита от превышения установленной скорости подъема обычно осуществляется механическим или электрическим ограничителем скорости.

Электрический ограничитель скорости состоит из тахогенератора *BR* (рис. 2.31), реле ограничения скорости *KOV* и командоаппаратов *КА-В* и *КА-Н*, представляющих собой регулируемые резисторы *R<sub>КА-В</sub>* и *R<sub>КА-Н</sub>*, сопротивление которых меняется с помощью профилей ретардирующих дисков. Принцип работы электрического ограничителя скорости заключается в следующем. Действительная скорость машины контролируется тахогенератором *BR*, напряжение на якоре которого пропорционально скорости. Для этого якорь тахогенератора посредством редуктора или клиноременной передачи соединен с валом подъемного двигателя. В якорную цепь тахогенератора включено реле ограничения скорости *KOV*, которое должно включиться при превышении скорости выше заданной на 15 %. Максимальной скорости соответствует расчетный ток реле *KOV*, который определяется э. д. с. тахогенератора, сопротивлениями цепи якоря *R<sub>я</sub>*, катушек реле *KOV*, *KKЦ* и полностью введенным регулируемым

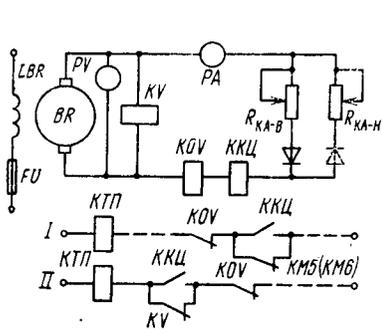


Рис. 2.31. Принципиальная схема электрического ограничителя скорости

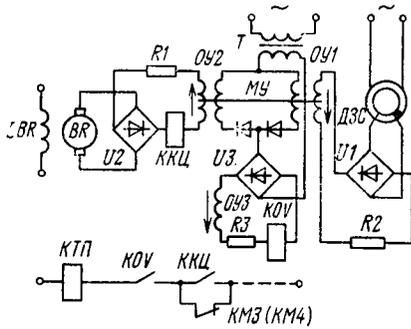


Рис. 2.32. Принципиальная схема бесконтактного электрического ограничителя скорости

резистором командоаппарата КА-В или КА-Н. Этот ток недостаточен для срабатывания *KOV*. Если действительная скорость подъемной машины станет выше максимальной на 15 %, то это приведет к увеличению тока протекающего через реле *KOV*, вследствие увеличения э. д. с. тахогенератора и к включению реле. Последнее своим контактом размыкает цепь катушки *КТП* предохранительного тормоза, что приводит к отключению подъемного двигателя от сети и к наложению предохранительного тормоза.

В период замедления подъемной машины профиль ретардирующего диска начинает перемещать ролик, связанный с командоаппаратом, вызывая уменьшение сопротивления КА-В (КА-Н) согласно заданию.

Пропорциональное изменение действительной и заданной скоростей не приводит к изменению тока в катушке реле *KOV*. Если же действительная скорость превысит допустимую в любой точке пути, это приведет к увеличению тока в катушке реле *KOV* и вызовет ее срабатывание.

Для контроля целостности якорной цепи *BR* служит реле контроля цепи *ККЦ*, включенного в его цепь. При стоянке двигателя и при движении подъемных сосудов с малой скоростью, при которой якорь реле *ККЦ* не втянут, может произойти срабатывание предохранительного тормоза. Чтобы этого не произошло, замыкающий контакт *ККЦ* шунтируется размыкающим контактом контактора четвертой или пятой ступени ускорения (*КМ5* или *КМ6*; см. рис. 2.31, I).

Если цепь тахогенератора неисправна, то реле *ККЦ* обесточено и ее контакт *ККЦ* в цепи защиты остается открытым. Обнаружится это после срабатывания контактора ускорения четвертой или пятой ступени, и дальнейший разгон подъемного двигателя прекратится.

На рис. 2.31, II при неподвижном состоянии двигателя и движении подъемных сосудов с малой скоростью исключение срабатывания предохранительного тормоза осуществляется контактом *KV*, шунтирующим замыкающий контакт *ККЦ*. При начале движения тахогенератор *BR* начинает вращаться и вызывает срабатывание реле *ККЦ* и *KV*. Первое замыкает свой контакт *ККЦ* в цепи катушки *КТП*, а второй размыкает свой контакт *KV*, и катушка *КТП* остается под током. Если же цепь тахогенератора *BR* окажется неисправной, то контакт *ККЦ* не замкнется, а контакт *KV* разомкнется, и это приведет к обесточиванию катушки *КТП* и наложению предохранительного тормоза.

Вольтметр *pV* и амперметр *pA* служат для контроля за работой ограничителя скорости при его эксплуатации.

В качестве тахогенератора в схеме применяются двигатели постоянного тока независимого возбуждения, обмотка возбуждения *LBR* которых подключена к источнику питания станции управления постоянным током.

Недостатками электрического ограничителя скорости являются: отсутствие контроля неисправности цепи тахогенератора при отключенном контакторе ускорения, отсутствие контроля неисправности механических приводов командоаппаратов.

Бесконтактный электрический ограничитель (рис. 2.32) скорости состоит из тахогенератора *BR* магнитного усилителя *МУ*, сельсина-датчика *ДЗС*, реле ограничения скорости *КОВ* и реле контроля цепи *ККЦ*.

Силовая обмотка магнитного усилителя *МУ* включена на обмотку реле ограничения скорости *КОВ* через выпрямитель *УЗ*, которая в свою очередь получает питание от вторичной обмотки трансформатора *Т*. Магнитный усилитель имеет две обмотки управления, одна из которых *ОУ1* включена через выпрямитель *У1* в ротор сельсина-датчика *ДЗС*, напряжение на выходе которого меняется с изменением положения ролика на профиле ретардирующего диска. Сигнал в обмотке управления *ОУ1* положителен и соответствует задающей скорости. В цепь обмотки управления *ОУ2* включено реле контроля цепи *ККЦ*, которое получает питание от тахогенератора *BR* через выпрямитель *У2*. Сигнал в обмотке *ОУ2* отрицателен и пропорционален действительной скорости подъемного двигателя. При неподвижном состоянии двигателя и подаче напряжения на трансформатор *Т* на выходе *МУ* появляется напряжение, что вызывает срабатывание реле *КОВ*, т. е. его нормальное положение во включенном состоянии. Такое состояние определяется суммарными ампер-витками обмоток управления и соответствует номинальному току реле. При увеличении скорости подъемного двигателя на 15 % выше допустимой произойдет увеличение тока в обмотке *ОУ2*, а следовательно, уменьшение результирующей н. с., что приведет к уменьшению тока в реле *КОВ* и его срабатыванию. Это вызывает размыкание контакта *КОВ* в цепи контактора предохранительного тормоза и приводит к наложению механических тормозов. При разгоне или торможении двигателя также ведется контроль за частотой вращения двигателя с помощью ретардирующего диска. В эти периоды одновременно изменяются как действительная скорость, контролируемая тахогенератором, так и задающая скорость, контролируемая сельсином *ДЗС*, ротор которого связан через механическую передачу с роликом ретардирующего диска.

Обмотка управления *ОУЗ* выполняет роль положительной обратной связи по току *МУ*.

Реле *ККЦ* контролирует исправность цепи тахогенератора. При ее обрыве включается предохранительный тормоз. Это происходит после срабатывания третьего или четвертого контактора ускорения *КМЗ* (*КМ4*).

Электрический бесконтактный ограничитель скорости имеет следующие преимущества по сравнению с контактным: повышение надежности в связи с исключением щеточного контакта

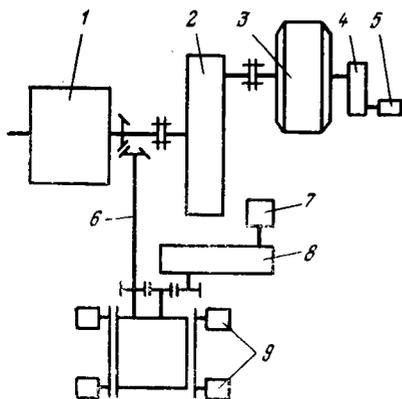


Рис. 2.33. Кинематическая схема ограничителя скорости повышенной надежности:

1 — барабан подъемной машины; 2 — редуктор подъемной машины; 3 — подъемный двигатель; 4 — повышающий редуктор или клиноременная передача; 5 — тахогенератор *BR1*; 6 — приводной вал указателя глубины; 7 — тахогенератор *BR2*; 8 — повышающая передача; 9 — командоаппараты

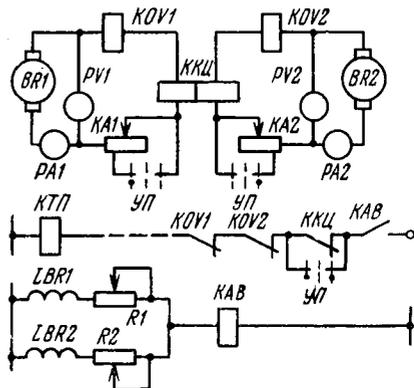


Рис. 2.34. Электрическая схема ограничителя скорости повышенной надежности

в командоаппарате; снижение мощности тахогенератора; включенное состояние реле *KOV* в нормальном положении, что улучшает самоконтроль.

Из-за недостаточной надежности существующих ограничителей скорости устанавливают два ограничителя, дублирующих друг друга. Такой ограничитель скорости позволяет контролировать любую возможную неисправность в электрической и кинематической цепях. Это достигается применением двух тахогенераторов 5, 7 (рис. 2.33): один приводится во вращение от подъемного двигателя, а другой (7) — от приводного вала указателя глубины.

Электрическая схема ограничителя скорости повышенной надежности показана на рис. 2.34. Реле контроля цепи выполнено двухобмоточным и служит для контроля тока в цепях реле ограничения скорости *KOV1* и *KOV2*. Одна обмотка реле *KKЦ* включена в цепь якоря тахогенератора *BR1*, а другая — в цепь тахогенератора *BR2*.

Намагничивающие силы, создаваемые этими цепями, направлены встречно друг другу и равны между собой. Следовательно, суммарная намагничивающая сила в магнитопроводе реле *KKЦ* при нормальной работе подъемной машины или при стоянке в любом месте ствола всегда равна нулю и его якорь не притягивается. При обрыве якорной цепи одного из тахогенераторов, потере обрыва возбуждения тахогенератора, оста-

новке тахогенератора, расцеплении указателя глубины с ко- ренным валом, остановке или смещении профиля ретардирую- щего диска появляется намагничивающая сила в магнитопро- воде реле *ККЦ*, которое притягивает свой якорь и вызывает размыкание контакта *ККЦ* в цепи контактора предохранитель- ного торможения.

Универсальный переключатель *УП* служит для проверки работы ограничителя скорости. Переключатель *УП* ставится в одно из крайних положений, например влево. При этом боль- шая часть сопротивления *КА1* шунтируется, а оставшиеся невыключаемые сопротивления обеспечивают заданные скоро- сти подхода подъемного сосуда к верхнему положению. Затем подъемную машину разгоняют, что вызывает увеличение тока в обмотке реле *КОВ1* пропорционально скорости машины. При скорости большей 1,5 м/с реле *КОВ1* срабатывает и своим контактом обесточивает контактор *КТП*. Через реле *КОВ2* также проходит ток, недостаточный для его срабатывания, так как сопротивления командоаппаратов не зашунтированы.

Проверка неисправности реле *КОВ2* осуществляется анало- гично, но рукоятка переключателя переводится в крайнее пра- вое положение.

Контроль тока в обмотках возбуждения тахогенераторов *LBR1* и *LBR2* осуществляется токовым реле *КАВ*, замыкающий контакт которого включен в цепь контактора предохранитель- ного тормоза *КТП*.

Резисторы *R1* и *R2* служат для установления необходимого тока в обмотке возбуждения *LBR1* и *LBR2* тахогенераторов.

*Защита от провисания струны и напуска каната.* Этот вид защиты применяется на большинстве подъемных установок, кроме установок с одно- или многоканатным шкивом трения, а также таких, где по технологическим условиям предусматри- вается ослабление каната (например, наклонные грузовые подъемы).

Устройства защиты от провисания струны и напуска ка- ната могут быть: с механическим приводом исполнительных контактов, работающие по принципу электрического контакта между канатом и подвесным тросом; контролирующие нагрузку на подшипники копровых шкивов.

Исполнительные контакты защитных устройств включаются в цепь защиты и сигнализации подъемной установки, т. е. сра- батывание защиты от провисания струны и напуска каната должно привести к подаче соответствующего сигнала оператору подъема или к наложению предохранительного тормоза. На установках с большой длиной струны каната, где при нормаль- ной работе наблюдается значительная вибрация каната, испол- нительные контакты должны включаться в цепь защиты или сигнализации с выдержкой времени, для чего используется реле времени с выдержкой 1—2 с, устраняющее ложные срабаты- вания.

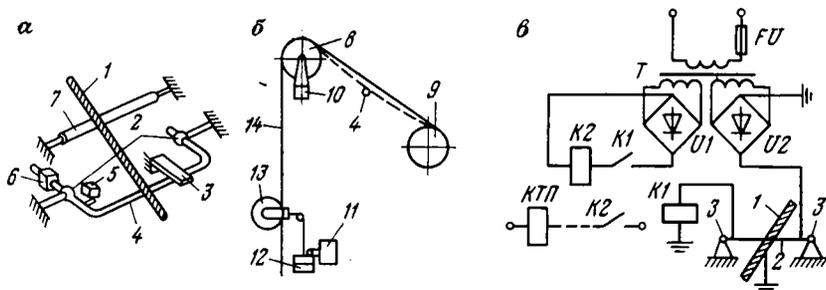


Рис. 2.35. Схемы защиты от провисания струны каната, выполненная с использованием конечных выключателей (а, б) и электрического контакта (в)

Устройство защиты, в котором использованы конечные выключатели, показано на рис. 2.35, а. Подвижная рамка 4, расположенная под стрелой каната между копровым шкивом 8 и барабаном 9 (см. рис. 2.35, б), под действием противовеса 6 или пружины находится в верхнем положении, которое ограничивается упором 3. При застревании подъемного сосуда увеличивается прогиб струны каната 1, который ложится на рамку 4, поворачивая ее вокруг неподвижной оси 2, вызывая срабатывание конечного выключателя 5. Контакт конечного выключателя размыкает цепь защиты подъемной машины. Рамка 4 от поломок при бдении подъемного каната защищается роликом 7.

Показанная на рис. 2.35, б защита от напуска каната осуществляется с помощью ролика с грузом 12. При нормальном положении каната 14 груз 12 приподнят роликом 13. Ослабление же подъемного каната, вызванное застреванием подъемного сосуда или при посадке его на кулаки, приводит к смещению вправо ролика 13. Опускается груз 12 и вызывает размыкание конечного выключателя 11 в цепи защиты подъемной машины.

Принцип действия устройства защиты, работающего на основе электрического контакта между канатом и подканатным тросом, может быть рассмотрен на примере схемы, показанной на рис. 2.35, в. Нормальному положению канатов соответствует включенное состояние реле  $K1$  и  $K2$ , а контакт  $K2$  в цепи контактора предохранительного тормоза  $КТП$  замкнут. При провисании подъемного каната 1 он соединяется с подканатным тросом 2, находящимся на изоляторах 3. При этом реле  $K1$  шунтируется, а его якорь отпадает, размыкая свой контакт  $K1$  в цепи реле  $K2$ , а следовательно, и контакт  $K2$ , что приводит к наложению предохранительного тормоза. При обрыве троса, жил кабеля или пробоя изоляции реле  $K1$  и  $K2$  обесточиваются, чем и достигается самоконтроль исправности элементов схемы.

Защита от провисания с помощью контроля за нагрузкой на подшипники копровых шкивов выполняется магнитными

датчиками, характеризующимися простотой и стойкостью к атмосферным воздействиям. Принцип действия магнитоупругих датчиков основывается на свойстве сталей изменять свою магнитную проницаемость при изменении механической нагрузки на нее. Дроссельный датчик (сердечник с катушкой) устанавливается под подшипником копрового шкива 10 (см. рис. 2.35, б). Изменение давления на сердечник вызывает срабатывание выходных реле, а их контакты воздействуют либо на цепь сигнализации, либо на цепь защиты подъемной машины для включения предохранительного тормоза.

*Защиты и блокировки, контролирующие исправность тормозной системы.* Защита от чрезмерного износа тормозных колодок выполняется с помощью конечных выключателей *СИК*, включенных в цепь защиты подъемной машины (рис. 2.36). Конечные выключатели связаны с тягами тормозов и замыкаются при чрезмерном ходе рабочих поршней тормозных цилиндров. Для возможности зарядки тормоза с целью его регулировки контакты *СИК* шунтируются установкой обходного переключателя в одно из крайних положений (замыкается контакт *ОП1* или *ОП2*). Кроме контактов *СИК*, включаемых в цепь предохранительного тормоза, предусмотрены также контакты износа колодок, замыкание которых происходит раньше срабатывания контактов *СИК* и сопровождается загоранием сигнальных ламп.

*Блокировка положения рукоятки рабочего тормоза.* В момент включения контактора предохранительного торможения *КТП* рукоятка рабочего тормоза должна находиться в положении «Заторможено». В этом случае контакт *СБТР* будет замкнут и при исправности остальных видов защиты цепь контактора *КТП* будет подготовлена. При отсутствии такого вида блокировки, т. е. при включении контактора *КТП* при расторможенном рабочем тормозе, может произойти самопроизвольное растормаживание подъемной машины. Эта блокировка запрещает работу машины при не полностью поднятом тормозном грузе.

*Защита от работы подъемной машины с неполностью поднятыми тормозными грузами* может возникнуть тогда, когда недостаточно давление воздуха или масла в тормозной системе или из-за других причин. В этом случае грузы предохранительного тормоза окажутся неполностью поднятыми, а подъемная машина нерасторможенной. Это может привести на малых машинах и лебедках с грузовым приводом тормоза к отказу срабатывания механизма колонки предохранительного торможения.

Поэтому все подъемные машины и лебедки оборудуются защитой, препятствующей включению подъемного двигателя при не полностью поднятом тормозном грузе. Это достигается конечными выключателями, которые включаются в цепь за-

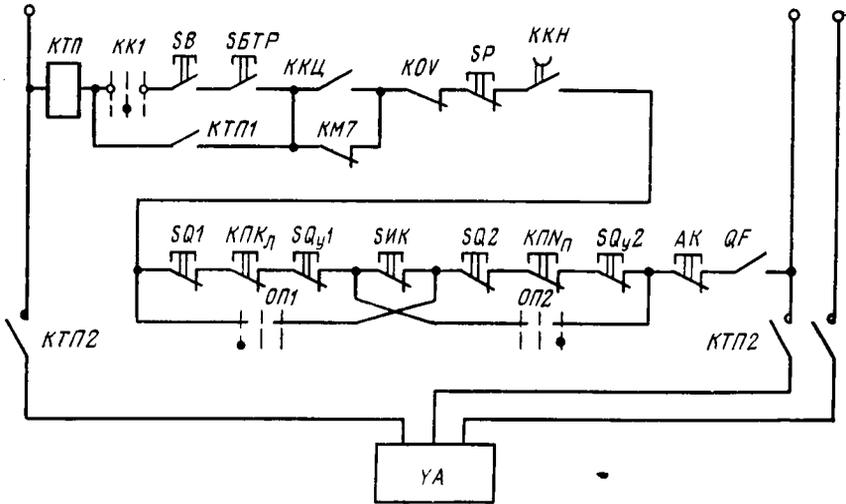


Рис. 2.36. Цепь защиты подъемной машины

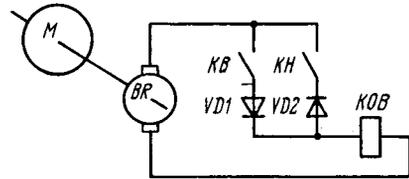


Рис. 2.37. Реле обратного вращения

щиты и замыкаются при нормальном верхнем положении тормозных грузов (контакт *SP*).

Малые же подъемные машины с гидравлическим приводом, у которых тормозные грузы используются как для предохранительного, так и для рабочего торможения, аппаратурой контроля за положением тормозного груза не оборудуются.

*Защита от обратного направления вращения* предназначена для торможения подъемной машины предохранительным тормозом, если момент двигателя недостаточен для подъема груза, под действием которого происходит движение в обратную сторону.

Такая защита осуществляется с помощью реле обратного вращения *КОВ* (рис. 2.37), подключенного на якорь тахогенератора контактами *KB* или *KH*. При вращении подъемной машины в заданную сторону напряжение тахогенератора запирается диодом *VD1* или *VD2* и реле *КОВ* не включается. При изменении направления вращения происходит изменение полярности тахогенератора, которое оказывается согласной с диодами *VD1* или *VD2* и приводит к срабатыванию реле *КОВ*. Последнее своим размыкающим контактом *КОВ* размыкает цепь защиты, что приводит к наложению предохранительного тормоза.

*Цель защиты.* В процессе эксплуатации подъемной установки могут наступить опасные нарушения режимов работы и движения подъемных сосудов. К ним относятся: переподъемы, превышение скорости, заклинивание сосудов, выходы сосудов из направляющих, жесткая посадка на приемные устройства, нарушения взаимодействия сосудов с загрузочным устройством, проскальзывание канатов на установках со шкивами трения, выход при движении из клетки вагонеток, расцепление барабанов на ходу для подъемных установок с расцепными барабанами, расцепление указателей глубины и аппаратов защиты с коренным валом подъемной машины. Эти нарушения нормального режима работы подъемной установки могут привести к перенапряжениям в канатах и элементах копра, обрывам каната с последующим падением сосуда в ствол, падению поднимаемых предметов и людей в приемный бункер у опрокидных клетей.

Появление аварийных режимов объясняется скрытыми дефектами в элементах установки, отказом в работе сложных систем управления либо ошибками обслуживающего персонала. Для обеспечения нормального режима работы подъемной установки необходимо контролировать положение подъемных сосудов у ствола шахты, скорость их движения, загрузку двигателя, давление в пневмо- или гидросистеме, наличие тока в цепи тахогенератора и другие величины.

Аппаратура, осуществляющая этот контроль, следующая: указатель глубины, скоростемер, конечные выключатели, ограничитель скорости и др. Эта аппаратура служит не только для контроля, но и для защиты подъемной установки путем воздействия на отключение электродвигателя подъемной машины и наложения предохранительного тормоза при опасном отклонении контролируемых величин от допустимых.

Это достигается контактором предохранительного торможения *КТП*, включенного в цепь защиты (см. рис. 2.36) подъемных машин с гидравлическим приводом тормоза, в которую включены также: *ККТ* — контакт командоаппарата, который замкнут только в нулевом (среднем) положении рукоятки управления; *КТП1* — блок-контакт контактора *КТП*, служащий для шунтирования контакта *КК1* при выводе рукоятки управления из нулевого положения, когда подъемная машина отторможена предохранительным тормозом; *КТП2* — замыкающие контакты контактора *КТП*, служащие для подключения катушек электромагнита *YA* предохранительного тормоза к сети; *ККЦ* — замыкающий контакт реле контроля цепи, контролирующей исправность цепи тахогенератора и шунтируемый при неподвижной подъемной машине размыкающим контактом *КМ7* контактора ускорения четвертой ступени; *КОВ* — размыкающий контакт реле опасной скорости, размыкающийся при превышении заданной скорости; *ККН* — замыкающий с замедлением при возврате контакт реле исправности

цепи возбуждения подъемного двигателя при его работе в режиме динамического торможения, размыкающийся при отсутствии тока в статоре двигателя при переходе в режим динамического торможения;  $QF$  — замыкающий контакт масляного выключателя, размыкающийся: при открывании двери масляного выключателя, при понижении напряжения сети, при срабатывании максимальной защиты;  $SP$  — контакт реле давления, размыкающийся при понижении давления в маслопроводе тормозной системы;  $СИК$  — контакт выключателя износа колодок тормозов, размыкающийся при чрезмерных их износах;  $SQ1$ ,  $SQ_{y1}$ ,  $SQ2$ ,  $SQ_{y2}$  — контакты конечных выключателей, установленных попарно на копре и на указателе глубины и размыкающиеся при переподъеме подъемных сосудов;  $ОП1$ ,  $ОП2$  — контакты обходных переключателей, шунтирующих контакты  $SQ1$ ,  $SQ_{y1}$ ,  $SQ2$ ,  $SQ_{y2}$  — при восстановлении цепи защиты для ликвидации переподъема:  $КПК_л$ ,  $КПК_п$  — замыкающиеся с замедлением при возврате контакта реле провисания канатов: размыкающиеся при провисании струны или напуске каната;  $SBTP$  — контакт блокировочного выключателя, механически связанного с рукояткой рабочего тормоза, замыкающийся при положении «Заторможено» рукоятки рабочего тормоза. Это не полный перечень аппаратуры контроля и защиты подъемной установки.

Подготовка к пуску подъемной машины заключается в следующем. Рукоятку рабочего тормоза необходимо установить в положение «Заторможено». При этом контакт блокировочного выключателя  $SBTP$  замыкается. Затем нажимается кнопка «Пуск»  $SB$ , что приводит к срабатыванию контактора предохранительного тормоза  $КТП$ . После включения последнего контакты  $SBTP$ ,  $KK1$  и кнопка «Пуск»  $SB$  шунтируются контактом  $КТП1$ , а замыкание контактов  $КТП2$  приводит к включению электромагнита предохранительного тормоза. Произойшла «Зарядка» подъемной машины. На этом подготовка к пуску подъемной машины заканчивается. При нарушении нормального режима работы подъемной установки происходит срабатывание одного из аппаратов, приводящее к разрыву цепи защиты и обесточиванию катушки контактора предохранительного торможения  $КТП$ . При этом отключаются катушка электромагнита  $YA$ , контакторы реверсора и вводится в действие предохранительное торможение с одновременным отключением от сети подъемного двигателя.

Отключение подъемного двигателя в системе Г — Д при предохранительном торможении осуществляется разрывом главной якорной цепи.

## ЭЛЕКТРОПРИВОД ВЕНТИЛЯТОРНЫХ, КОМПРЕССОРНЫХ И НАСОСНЫХ УСТАНОВОК

---

### 3.1. УСЛОВИЯ РАБОТЫ, ХАРАКТЕР НАГРУЗКИ И ТРЕБОВАНИЯ К ЭЛЕКТРОПРИВОДУ ВЕНТИЛЯТОРА

Основные производственные процессы в механизированных лавах угольных и сланцевых шахт (выемка угля комбайнами, зарубка пласта, отбойка угля струговыми агрегатами, погрузка) сопровождаются выделением пыли, а производство взрывных работ — выделением газов (углекислый газ, метан и др.), что вызывает загрязнение рудничной атмосферы.

Переход на разработку пластов, глубина залегания которых зачастую превышает 1000 м, сопровождается возрастанием метанообильности последних, достигая на некоторых шахтах 60 м<sup>3</sup> и более на 1 т добытого угля. Одновременно с этим возрастает и температура горных пород, достигая 35 °С и более.

Поэтому в тех выработках, в которых находятся или могут находиться люди, согласно требованиям Правил безопасности ПБ [31] воздух должен содержать по объему кислорода не менее 20 % и углекислого газа не более 0,5 %, а содержание метана в струе воздуха, исходящего из очистного участка, не должно превышать 1 %.

Для снабжения работающих в шахте или руднике людей достаточным количеством качественного воздуха и создания комфортных условий для высокопроизводительного труда необходима искусственная вентиляция, обеспечивающая постоянный приток свежего воздуха в горные выработки с поверхности и удаление отработанного воздуха из шахты (рудника) в атмосферу. Для этих целей на шахте (руднике) устанавливают вентиляторы.

Вентилятор принадлежит к механизмам, имеющим продолжительный режим работы с постоянной нагрузкой. Поэтому для определения мощности электродвигателя вентилятора необходимо знать не только подачу, которая определяется требуемым количеством воздуха для нормального проветривания шахты из условия добычи полезного ископаемого, численности рабочих, выделения метана и т. п., но также и давление, которое представляет собой сумму давлений последовательно соединенных различных выработок и зависящих от длины, периметра, поперечного сечения последних и других факторов.

Таким образом, расчетная мощность (кВт) электродвигателя вентилятора

$$P = \frac{k_3 Q p}{\eta_n \eta_v} 10^{-3}, \quad (3.1)$$

где  $k_3$  — коэффициент запаса,  $k_3 = 1,05 \div 1,1$  — для осевых и  $k_3 = 1,1 \div 1,15$  — для центробежных вентиляторов;  $Q$  — подача вентилятора, м<sup>3</sup>/с;  $p$  — давление вентилятора, Па;  $\eta_n$ ;  $\eta_v$  — к. п. д. соответственно передачи и вентилятора.

По каталогу выбирают электродвигатель соответствующей частоты вращения и конструктивного исполнения с номинальной мощностью, определенной из выражения (3.1), или ближайшей большей, так как режим работы вентилятора продолжительный с постоянной нагрузкой.

На работу вентилятора существенное влияние оказывает вентиляционная сеть, представляющая собой совокупность всех выработок, омываемых воздушным потоком при его работе. Рудничную вентиляционную сеть иначе можно охарактеризовать эквивалентным отверстием  $A$ , под которым подразумевается такое условное круглое отверстие в тонкой стенке, сопротивление которого эквивалентно сопротивлению всей шахты (без противодавления). Эта величина может быть определена по формуле

$$A = 0,38Q/\sqrt{p}. \quad (3.2)$$

Используя понятие эквивалентного отверстия, по формуле (3.2) можно написать зависимость  $p=f(Q)$ , представляющую собой характеристику вентиляционной сети:

$$p = \frac{0,124}{A^2} Q^2. \quad (3.3)$$

Выражение (3.3) — парабола с вершиной в начале координат  $p=f(Q)$ .

При проектировании вентиляторной установки заданными величинами являются: требуемая подача  $Q$  вентилятора и максимальное давление  $p_{\max}$  или соответствующее эквивалентное отверстие  $A_{\min}$  шахты за весь срок эксплуатации вентилятора. В период эксплуатации шахты, срок службы которой не менее 10—15 лет, режим работы вентилятора будет существенно отличаться от расчетного. Это объясняется:

изменением аэродинамического сопротивления вентиляционной сети в процессе развития шахтного поля;

изменением естественной тяги, зависящей от температуры воздуха на поверхности не только по временам года, но и в течение суток;

случайным изменением эквивалентного сопротивления, вызванного открыванием шахтных дверей.

Кроме того, в некоторых случаях появляется необходимость в принудительном изменении режима работы вентилятора. Это вызывается следующими обстоятельствами:

неодинаковостью списочного состава работающих, который меняется в довольно широких пределах от смены к смене и по дням недели;

неравномерностью использования взрывчатых веществ на протяжении длительных отрезков времени (для рудников);

непостоянством среднесуточной добычи (особенно для угольных шахт);

переходом на двухсменную работу и прерывную рабочую неделю.

Несоответствие режима работы вентилятора параметрам вентиляционной сети приводит к его эксплуатации вне зоны экономичной работы. Это обстоятельство хорошо подтверждается результатами обследования вентиляторных установок шахт Кривбасса, Донбасса и других бассейнов. Так, например, обследование 50-ти вентиляторных установок центробежного типа, установленных на шахтах Донецкого бассейна, показало низкую экономичность их работы. Результаты обследования приведены ниже [5].

|                                       |         |         |         |         |         |              |
|---------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|--------------|
| Статический к. п. д.                  | 0,2—0,3 | 0,3—0,4 | 0,4—0,5 | 0,5—0,6 | 0,6—0,7 | Болез<br>0,7 |
| Число вентилятор-<br>ных установок, % | 6       | 10      | 18      | 26      | 30      | 10           |

Принимая во внимание, что в настоящее время экономичный режим работы вентилятора ограничивается к. п. д. не ниже 0,6, то лишь 40 % обследованных вентиляторов отвечают этим требованиям. Если к этому добавить, что только в угольной промышленности эксплуатируются более 3500 вентиляторных установок, суммарная установленная мощность электродвигателей которых составляет более 1 млн. кВт, а мощность отдельных вентиляторов достигает 5000 кВт и более, то станет понятным, как неоправданно велики непроизводительные расходы электроэнергии. Поэтому снижение расхода электроэнергии приобретает первостепенное значение в борьбе за снижение себестоимости продукции.

Основное условие экономичной работы вентиляторной установки — соответствие подачи и давления, развиваемых вентилятором, потребности шахты (рудника) и сведения до минимума времени работы вентилятора в режимах, характеризующихся подачей в шахту (рудник) избыточного количества воздуха. Это может быть осуществлено изменением режима работы вентиляторной установки, т. е. изменением подачи или давления вентилятора.

### 3.2. РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ ШАХТНЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ

В настоящее время регулирование режима работы шахтных вентиляторов главного проветривания осуществляется одним из следующих способов:

- изменением сопротивления вентиляционной сети (дресселирование шибером, секторным затвором и т. д.);
- изменением характеристики вентилятора.

Регулирование режима работы вентилятора главного проветривания изменением характеристики вентиляционной сети представлено на рис. 3.1. Режим работы вентилятора с минимальным сопротивлением вентиляционной сети характеризуется точкой 1. При этом вентилятор работает с подачей  $Q_1$  и давлением  $p_1$ . При необходимости уменьшения подачи увеличивается сопротивление вентиляционной сети путем частичного перекрытия вентиляционного канала регулирующим шибером, что приводит к уменьшению эквивалентного отверстия, т. е.  $A_2 < A_1$ . Режим работы вентилятора в этом случае характеризуется точкой 2.

Такое регулирование применяется лишь в случае уменьшения подачи ( $Q_2 < Q_1$ ), что связано с поддержанием постоянства скорости движения воздуха в забоях или в тех случаях, когда вентилятор подает значительно больше воздуха, чем это требуется по ЕПБ.

Изменение характеристики вентилятора может производиться одним из нижеперечисленных способов: изменением угла поворота лопаток направляющих аппаратов (для центробежных и осевых вентиляторов), изменением угла установки лопаток рабочего колеса (для осевых вентиляторов), изменением скорости электропривода рабочего колеса вентилятора.

Сравнение различных способов регулирования подачи вентилятора по величине потребляемой электродвигателем мощности при постоянном эквивалентном отверстии рудника показывает, что наихудшие показатели по расходу электроэнергии при дроссельном регулировании, а наилучшие — при регулировании изменением скорости электропривода рабочего колеса

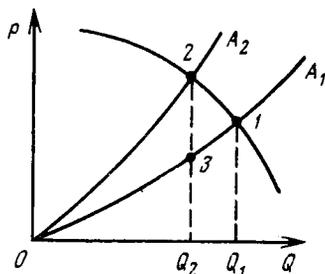


Рис. 3.1. Графики режима работы вентиляторной установки при изменении характеристики вентиляционной сети

вентилятора. Остальные способы регулирования: гидромфтой, углом установки лопаток рабочего колеса и поворотом лопаток направляющего аппарата занимают промежуточные положения.

### **3.3. ЭЛЕКТРОПРИВОД ВЕНТИЛЯТОРНЫХ УСТАНОВОК С ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТЬЮ**

Известно [4], что при определенной подаче эффективность ее регулирования направляющим аппаратом одинакова с регулированием скорости электропривода или даже выше. При этих условиях в качестве электропривода целесообразно использовать наиболее распространенные в промышленности благодаря своей простоте и малой стоимости асинхронные короткозамкнутые двигатели. Такой электропривод наиболее прост в эксплуатации, не требует постоянного надзора и обеспечивает длительную надежную работу. Однако применение асинхронных короткозамкнутых двигателей требует решения вопроса их запуска. Прямой пуск, который является наиболее простым, сопровождается большими пусковыми токами. А если учесть, что вентиляторы обладают значительными маховыми массами, то пуск оказывается длительным и вызывает длительное снижение напряжения питающей сети. Это сказывается на параллельно работающих двигателях и на самом запускаемом двигателе, еще более затягивая его пуск. В установках с сетью относительно малой мощности прямой пуск асинхронного короткозамкнутого двигателя может вызвать недопустимые падения напряжения. В этом случае необходимо понижение напряжения на статоре двигателя на период пуска, что может быть достигнуто включением добавочных сопротивлений (активных или индуктивных) или автотрансформатора в цепь статора.

Если же и такой пуск неприемлем, то прибегают к установке в качестве привода асинхронного двигателя с фазным ротором, позволяющим обеспечивать пуск с меньшими пусковыми токами.

В некоторых случаях в качестве электропривода вентилятора целесообразно использовать синхронный двигатель, который по сравнению с асинхронным короткозамкнутым двигателем обладает следующими преимуществами:

возможностью регулирования величины и знака реактивной мощности, что позволяет при работе синхронного двигателя с опережающим коэффициентом мощности компенсировать в определенных пределах реактивную мощность в питающей сети;

меньшей чувствительностью к колебаниям напряжения сети, так как его критический момент пропорционален напряжению сети;

более высоким коэффициентом полезного действия, чем у асинхронного двигателя того же габарита;

постоянством скорости электропривода независимо от нагрузки;

большой надежностью конструкции, что объясняется большим зазором между статором и ротором.

Но синхронные двигатели имеют и недостатки:

большая стоимость синхронного двигателя из-за системы возбуждения;

меньшая надежность синхронного двигателя в связи с усложнением системы возбуждения;

подпитывающее действие синхронных машин при коротких замыканиях, увеличивающее токи короткого замыкания в энергосистеме, что вынуждает во многих случаях устанавливать токоограничивающие реакторы и увеличивать разрывную мощность масляных выключателей.

Однако с развитием электромашиностроения конструктивные и эксплуатационные недостатки синхронного двигателя могут быть ликвидированы переходом:

к схемам с глухоподключенным возбудителем, позволяющим существенно снизить стоимость системы возбуждения;

к статическим и бесщеточным возбудителям.

Учитывая положительные и отрицательные свойства синхронных и асинхронных двигателей, можно следующим образом определить область их применения. Так, синхронные двигатели, имеющие высокие энергетические показатели, но требующие больших капитальных затрат и высокий уровень обслуживания, наиболее полно себя проявляют при использовании их в приводах большой мощности. Поэтому для электроприводов вентиляторов мощностью свыше 1000 кВт с нерегулируемой скоростью применяются исключительно синхронные двигатели. В электроприводах мощностью до 320 кВт преимущество отдается асинхронным короткозамкнутым двигателям. В диапазоне мощностей от 320 до 1000 кВт могут применяться как синхронные, так и асинхронные двигатели. Определяющим моментом в этом случае является конкретный анализ технико-экономических показателей.

На шахтах и рудниках, где главенствующая роль принадлежит асинхронному приводу, применение синхронных двигателей должно благоприятно сказаться на компенсации реактивной мощности. Поэтому в электроприводах мощностью 320—1000 кВт применение синхронных двигателей будет предпочтительнее, так как позволит установить на предприятии правильное соотношение последних с асинхронными двигателями.

Электропривод вентилятора главного проветривания шахты имеет: продолжительный режим работы; редкие пуски; малый момент сопротивления при трогании, обычно не превышающий 25—30 % номинального; ограниченное ускорение при пуске, квадратичную зависимость момента сопротивления от скорости.

Несмотря на то, что пуски вентилятора редки, они являются самыми тяжелыми режимами для электропривода венти-

лятора, оборудованного асинхронным короткозамкнутым или синхронным двигателем. Это объясняется тем, что пусковые моменты этих двигателей малы и при наличии значительных маховых масс вентилятора процесс пуска затягивается. Кроме того, пусковые токи двигателей вызывают снижение напряжения сети, которое ограничивается 15 %. Снижение напряжения питающей сети может привести к недопустимой длительности пуска и перегреву двигателя, длительной работе на подсинхронной частоте вращения синхронного двигателя, ухудшению условий втягивания его в синхронизм. Выбранный из условия продолжительного режима работы электродвигатель должен быть проверен по нагреву, ускорению и моменту трогания при пуске. Для электропривода с синхронным двигателем необходима также проверка условия вхождения в синхронизм.

При расчете нагрева электродвигателя используются: зависимость момента сопротивления от частоты вращения, величины моментов инерции вентилятора и двигателя; механическая характеристика двигателя. Последняя обычно рассчитывается по паспортным данным как синхронного, так и асинхронного двигателя по известной формуле Клосса.

Расчет сводится к определению времени пуска двигателя, который ведется, как правило, графоаналитическим методом. Для этого в координатных осях  $M-S$  строятся механические характеристики двигателя  $M=f(s)$  и вентилятора  $M_{в.н} = f(s)$ , а по ним — характеристика динамического момента  $M_{дин} = f(s) = M - M_{в.н}$ . Далее продолжительность пуска  $t_{п}$  определяется графическим интегрированием по формуле

$$t_{п} = J \sum_{i=1}^n \frac{\Delta \omega_i}{M_{ср. i} - M_{в.ср. i}}. \quad (3.4)$$

Полученное по выражению (3.4) время пуска  $t_{п}$  сравнивается с допустимым временем пуска, устанавливаемым заводом-изготовителем.

Для синхронных двигателей завод-изготовитель устанавливает обычно предельно допустимую температуру перегрева  $\tau_{доп}$ , которая находится из выражения

$$\tau_{доп} = A / (m_{кл} c), \quad (3.5)$$

где  $A$  — энергия, выделяющаяся в пусковой обмотке за время пуска, Дж;  $m_{кл}$  — масса пусковой обмотки, кг;  $c$  — удельная теплоемкость пусковой обмотки: для меди  $c = 0,395 \cdot 10^3$ , для алюминия  $c = 0,896 / 10^3$ , Дж/(кг·градус).

В формуле (3.5) энергия, выделяемая в пусковой обмотке за период пуска, определяется как энергия скольжения [36]

$$A = J \frac{\omega_0^2}{2} + \frac{M_{в.ном}}{\omega_0} \left( \int_{t=0}^{t=t_{п}} \omega^2 dt - \frac{1}{\omega_0} \int_{t=0}^{t=t_{п}} \omega^3 dt \right). \quad (3.6)$$

Из выражения (3.6) следует, что основная энергия определяется первым слагаемым, т. е. кинетической энергией вентилятора, и не зависит ни от способа пуска, ни от ускорения. При более тщательных расчетах необходимо учитывать и второе слагаемое, величина которого зависит от ускорения.

Электротехническая промышленность для приводов шахтных вентиляторов главного проветривания выпускает специальную серию синхронных двигателей СДВ, обладающих усиленной пусковой обмоткой.

По данным заводов-изготовителей прямой пуск синхронных двигателей допускается, если мощность, приходящаяся на один полюс, составляет  $P[\text{кВт}]/p \leq 250\text{—}300$  кВт при напряжении 6 кВ и 200—250 кВт при напряжении 3 кВ.

Если прямой пуск асинхронного или синхронного двигателя недопустим, то применяют следующие способы снижения подводимого к двигателю напряжения: включение в цепь статора добавочного сопротивления (резистор или реактор) или автотрансформатора. Однако введение дополнительной аппаратуры усложняет схему электропривода главной вентиляторной установки.

Для синхронного двигателя не менее важным моментом является выполнение условия вхождения его в синхронизм. Это особенно тяжело происходит при большой маховой массе вентилятора и при запуске его от пониженного напряжения.

Вхождение в синхронизм проверяют по критерию, при котором величина скольжения вхождения в синхронизм определяется из выражения [26]:

$$s_{\text{вх}} \leq \frac{26,7}{\omega_0} \sqrt{\frac{P_{\text{ном}} \lambda}{50GD^2}}, \quad (3.7)$$

где  $s_{\text{вх}}$  — скольжение, при котором вхождение в синхронизм возможно;  $\lambda$  — перегрузочная способность двигателя;  $P_{\text{ном}}$  — номинальная мощность синхронного двигателя;  $GD^2$  — маховой момент вентилятора.

Обмотка возбуждения синхронного двигателя получает питание постоянным током от возбудителя, который в период пуска может быть подключен наглухо через разрядное сопротивление или после достижения электроприводом скорости, равной 0,95—0,98 синхронной.

Наибольшее применение получила схема пуска синхронного двигателя с глухоподключенным возбудителем благодаря своей простоте, надежности и малой стоимости. Эта схема рекомендуется для синхронных двигателей малой мощности с моментом сопротивления на валу в период пуска  $M_{\text{ст}} \leq 0,4M_{\text{ном}}$  при полном напряжении на статоре.

Схемы с разрядным резистором нашли применение для синхронных двигателей средней и большой мощности. Они обеспечивают защиту обмотки возбуждения от перенапряжений, получение удовлетворительного пускового и входного моментов.



Управление током возбуждения ведется вручную или автоматически. В схеме на рис. 3.2 предусмотрено автоматическое поддержание постоянства коэффициента мощности или реактивной мощности. Это достигается введением обратной связи по реактивной мощности. Датчиком последней служит фазочувствительный выпрямитель, включенный в цепь трансформатора тока  $TA$  и напряжения  $TV$ . Сигналы суммируются в промежуточном магнитном усилителе  $ПМУ$ , включенном на входе электромагнитной системы импульсно-фазового управления тиристорами СИФУ ( $AU$ ).

Поддержание постоянства тока возбуждения достигается введением отрицательной обратной связи по току возбуждения с помощью датчика тока  $UA$ . Эта связь, кроме того, обеспечивает форсировку возбуждения при снижении напряжения питающей сети.

Необходимое значение тока возбуждения устанавливается потенциометром  $RP$ , который предназначен также для ручного управления.

Выпускаемые электротехнической промышленностью тиристорные возбудительные устройства серии ТЕ обеспечивают: автоматический пуск синхронного двигателя в функции тока статора; плавную ручную и автоматическую регулировку тока возбуждения от 0,3 до 1,4 номинального; ограничение максимального тока возбуждения в пределах 0,8—1,75 номинального; форсировку напряжения возбуждения до 1,75 номинального при снижении напряжения сети на 15—20 % номинального; форсированное гашение поля при отключении двигателя, защиту от внутренних коротких замыканий в блоках и внешних коротких замыканий со стороны постоянного тока; длительного асинхронного хода синхронного двигателя.

В новой конструкции синхронного двигателя с бесщеточным возбудителем щеточно-коллекторные контакты заменены обращенным генератором переменного тока, установленным на валу синхронного двигателя. Выпрямление переменного тока производится кремниевыми диодами, смонтированными также на валу. На вращающемся валу также расположены тиристоры, разрядные и установочные резисторы. Принципиальная схема синхронного двигателя с бесщеточным возбудителем показана на рис. 3.3. Выпрямительный блок, собранный по трехфазной мостовой схеме на диодах  $VD1—VD6$ , соединен с обмоткой возбуждения кабелем, проложенным внутри вала. Обмотка возбуждения статора возбудителя крепится на раме двигателя  $MS$ . Ток возбуждения синхронного двигателя регулируется изменением тока в обмотке возбуждения генератора переменного тока с помощью автоматического регулятора возбуждения  $ABP$ , в котором предусмотрено не только автоматическое, но и ручное управление.

Защита диодного выпрямителя от коммутационных перенапряжений, появляющихся в обмотке возбуждения синхронного

двигателя при пуске, осуществляется с помощью тиристорного ключа *VS1*, *VS2*.

Все вышесказанное свидетельствует о том, что в приводе вентилятора главного проветривания шахты ведущее положение должен занимать синхронный двигатель. Если по каким-либо причинам применение синхронного двигателя невозможно (недопустим прямой пуск, недопустимо падение напряжения сети и т. д.), то принимают компромиссные решения. Так, например, в схеме синхронно-асинхронного привода. Электропривод состоит из синхронного двигателя, являющегося главным приводным двигателем вентилятора и рассчитанного на полную его мощность и максимальную частоту вращения, и асинхронного двигателя *M*, жестко между собой соединенных. Асинхронный двигатель с фазным ротором является вспомогательным, выбирается на мощность, соответствующую половине частоте вращения синхронного двигателя, и предназначен для пуска привода до половинной частоты вращения. Далее, асинхронный двигатель отключается от сети, а синхронный двигатель подключается к сети. Так как включение синхронного двигателя происходит на половинной частоте вращения, то дальнейший разгон его сопровождается сниженными приблизительно в четыре раза потерями в пусковой обмотке по сравнению с прямым пуском. Асинхронный двигатель продолжает вращаться со скоростью идеального холостого хода синхронного двигателя, поэтому он должен выбираться по механической прочности из расчета этой скорости.

В процессе эксплуатации шахты подача воздуха вентиляторной установкой постепенно возрастает и достигает 1,5—2-кратного значения от начальной. В праздничные и ремонтные дни подача воздуха должна снижаться и составлять 30—50 % рабочей. Поэтому асинхронный двигатель выбирается мощностью 15—20 % номинальной мощности вентилятора и обеспечивает его работу на первой стадии работы шахты, а на второй — в праздничные и ремонтные дни.

Ступенчатое регулирование подачи вентилятора с высокими энергетическими показателями возможно в электроприводах с многоскоростными асинхронными двигателями. Регулирование частоты вращения в них осуществляется изменением числа пар полюсов обмотки статора. Они могут быть выполнены как с одной статорной обмоткой, разделенной на равные части, так и с несколькими независимыми обмотками. В первом случае обмотки могут быть соединены либо последовательно, либо параллельно. Переход с последовательного соединения к параллельному приводит к перераспределению магнитного потока в пространстве и к уменьшению вдвое числа пар полюсов, а следовательно, к увеличению соответственно синхронной частоты вращения.

Такой способ переключения обмоток статора позволяет вести регулирование скорости электропривода с переменным

моментом, что для механизмов с вентиляторным моментом нагрузки является более экономичным, чем при постоянной мощности.

Многоскоростные двигатели имеют синхронную частоту вращения, равную 3000, 1500, 1000, 750, 500, 375 об/мин и выпускаются двух-, трех- и четырехскоростными. Наибольшее распространение получили двухскоростные асинхронные короткозамкнутые двигатели мощностью до

500 кВт. Двухскоростные асинхронные двигатели новой серии ДВДА выполнены с раздельными обмотками и охватывают диапазон мощностей от 500 до 1400 кВт.

Применение двухскоростного двигателя вместо односкоростного несколько повышает средневзвешенный к. п. д. вентиляторной установки. Но в то же время установка удорожается, схема управления усложняется и сохраняется ступенчатость регулирования подачи воздуха вентилятором.

Двухскоростные двигатели целесообразно применять на вентиляторных установках, если требуется только два режима (с полной и половинной подачей).

Двухступенчатое регулирование скорости электропривода с асинхронным или синхронным двигателем может быть достигнуто применением преобразователя частоты. Реализация такой схемы (рис. 3.4) осуществлена на руднике им. С. М. Кирова (Кривбасс). В качестве привода центробежного вентилятора ВРЦД-4,5 использован асинхронный двигатель с фазным ротором мощностью 2500 кВт. Запуск двигателя *M1* резисторный. Для работы с половинной частотой вращения он отключается от сети переменного тока 50 Гц и подключается к синхронному генератору с частотой 25 Гц. Преобразовательный агрегат состоит из двух синхронных машин, одна из которых работает в режиме двигателя *MS1*, а другая — в режиме генератора *MS2*. Обе эти машины находятся на одном валу. Мощность синхронного генератора составляет 1/8 часть мощности двигателя *M1*. На эту же мощность выбирается и синхронный двигатель *MS2*. Возбуждение синхронных двигателей осуществляется от возбудителя *G*, представляющего собой генератор с параллельным возбуждением.

Машинный преобразователь частоты может быть использован и для разгона основного двигателя *M1*.

Как частный случай регулирования подачи воздуха возможна последовательная замена приводных двигателей в процессе эксплуатации шахты.

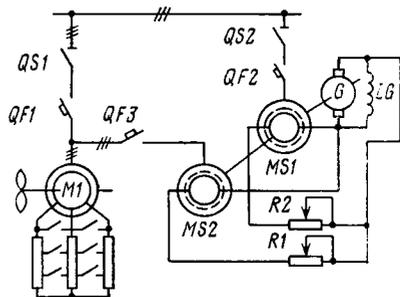


Рис. 3.4. Схема электропривода с асинхронным двигателем и машинным преобразователем частоты

Недостатки ступенчатого регулирования подачи воздуха потребовали разработки схем с бесступенчатым регулированием скорости электропривода вентилятора, а следовательно, плавного регулирования подачи вентиляторной установки, благодаря чему становится возможным создание схем программного управления подачей при непрерывном изменении параметров вентиляционной сети, числа работающих людей, характера проводимых работ и т. п.

### 3.4. ЭЛЕКТРОПРИВОД ВЕНТИЛЯТОРА ГЛАВНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ С ПЛАВНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ СКОРОСТИ

Регулирование подачи вентиляторов изменением скорости электропривода имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с другими способами регулирования, которые заключаются в следующем:

- высокая экономичность, которая всецело зависит от экономичности регулируемого электропривода, так как к. п. д. вентилятора в этом случае постоянен;

- возможность применения вентилятора простейшей конструкции без направляющего аппарата и устройства поворота лопаток колеса;

- расширенная область экономичной работы.

На рис. 3.5. приведены области экономичной работы (с к. п. д. не менее 0,6) для вентиляторов ВЦД-3,3 (кривая 1) и ВЦД-32 (кривая 2), регулируемых направляющим аппаратом и ВОД-30, регулируемого поворотом лопаток колеса и направляющим аппаратом (кривая 3). Там же приведена область экономичной работы вентилятора ВЦД-32 (кривая 4), регулируемого изменением частоты вращения.

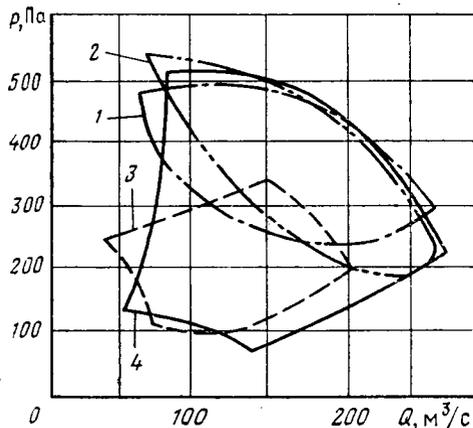


Рис. 3.5. Области экономичной работы вентиляторов

Из графика следует, что вентилятор с регулируемой частотой вращения имеет область экономичной работы увеличенной более чем в 2 раза. Это позволяет длительно эксплуатировать главную вентиляторную установку (ГВУ) с высоким к. п. д. и меньшими расходами электроэнергии.

Бесступенчатое регулирование скорости электропривода вентилятора достигается следующими решениями систем электропривода:

асинхронного машинно-вентильного каскада;  
асинхронного вентильного каскада;  
асинхронного двигателя со статическим преобразователем частоты;  
асинхронного двигателя в режиме двойного питания;  
постоянного тока (Г — Д или УВ — Д).

### 3.4.1. Схема асинхронного машинно-вентильного каскада

Асинхронный машинно-вентильный каскад (рис. 3.6, а), предназначенный для привода вентиляторов главного проветривания, состоит из главного асинхронного двигателя с фазным ротором  $M1$ ; выпрямителя  $U$ , собранного по трехфазной мостовой схеме; машины постоянного тока независимого возбуждения  $M2$  и синхронной машины  $MS$ . Вал синхронной машины  $MS$  жестко соединен с валом машины постоянного тока  $M2$ , якорь которой получает питание от выпрямителя  $U$ , включенного в цепь ротора.

Регулирование частоты вращения двигателя  $M1$  ведется введением в цепь его ротора противо-э. д. с. от машины постоянного тока  $M2$ , что достигается изменением тока в ее обмотке возбуждения  $LM2$ . При регулировании частоты вращения двигателя  $M1$  машина постоянного тока  $M2$  работает двигателем, а синхронная машина  $MS$  — генератором, которая энергию скольжения, за вычетом потерь энергии в машинах постоянного и переменного тока, возвращает в сеть. Чем больше противо-э. д. с., тем меньше частота вращения двигателя  $M1$ . Поэтому установленная мощность машины постоянного тока  $M2$  зависит от диапазона регулирования.

Машина постоянного тока должна выбираться на номинальный выпрямленный ток асинхронного двигателя  $I_d$  и на минимальную частоту вращения или максимальное скольжение  $s_{\max}$ :

$$I_d = I_{2\text{ном}}/\tau_I, \quad E_{d\text{max}} = \tau_U E_{2\text{ном}} s_{\max},$$

где  $I_{2\text{ном}}$  — номинальный ток ротора двигателя  $M1$ ;  $E_{2\text{ном}}$  — номинальная э. д. с. ротора двигателя  $M1$ ;  $\tau_I$  — коэффициент приведения переменного тока к постоянному;  $\tau_U$  — коэффициент приведения переменного напряжения к постоянному.

Таким образом, при диапазоне регулирования асинхронного двигателя  $M1$  2:1 мощность машины постоянного тока составляет 50 % мощности двигателя  $M1$ . Поэтому запуск двигателя  $M1$  резисторный.

При вентиляторах большой мощности возможна замена одной машины постоянного тока на две половинной мощности (см. рис. 3.6, б). Рассмотрим, как меняются параметры ротора асинхронного двигателя при регулировании его частоты вращения. При работе асинхронного двигателя  $M1$  с максимальной частотой вращения ток в выпрямленной цепи  $I_d$  максимален и равен номинальному при номинальной нагрузке, но напря-

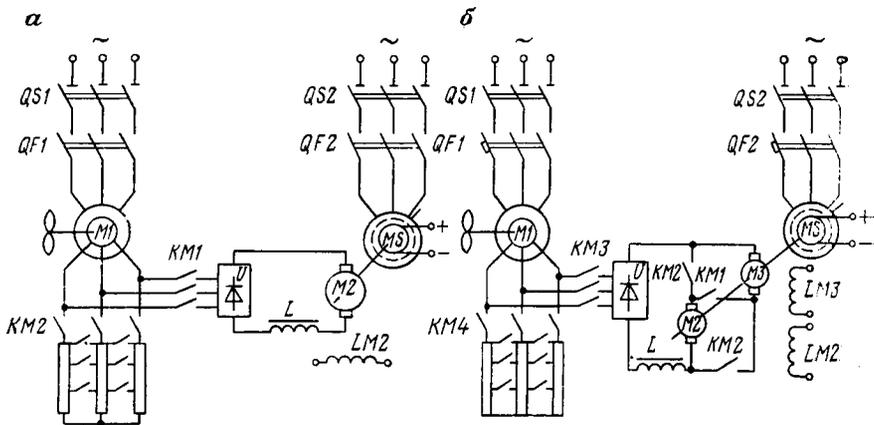


Рис. 3.6. Принципиальные схемы асинхронного машинно-вентильного каскада:

а — с одной машиной постоянного тока; б — с двумя машинами постоянного тока

жение минимально и определяется номинальным скольжением двигателя. При снижении частоты вращения резко снижается момент асинхронного двигателя вследствие вентиляторного характера нагрузки, а следовательно, и выпрямленный ток  $I_d$ , но возрастает напряжение пропорционально скольжению. Такая взаимосвязь тока и напряжения выпрямленной цепи позволяет использовать в агрегате постоянной частоты вращения две машины постоянного тока вдвое меньшей мощности. Схема управления двигателем должна предусматривать возможность переключения последних с последовательного на параллельное соединение, и наоборот. При минимальной частоте вращения, когда требуется наибольшая противо-э. д. с., а ток минимален, якоря машин  $M2$  и  $M3$  соединяются последовательно. При максимальной частоте вращения, когда ток максимален, а противо-э. д. с. минимальна, якоря этих машин соединяются параллельно.

Учитывая, что диапазон регулирования вентиляторов главного проветривания обычно 2:1, принимается следующая последовательность работы двигателей постоянного тока: при частоте вращения от 0,5 до 0,75 номинальной обе машины  $M2$  и  $M3$  соединяются последовательно; при частоте вращения от 0,75 до номинальной машины  $M2$  и  $M3$  — параллельно.

При установке двух машин постоянного тока мощность каждой из них определяется выражением

$$P_{M2} = P_{M3} = 0,56 I_d 0,25 U_{d \text{ ном}} = 0,14 P_{M1}.$$

Это при условии, когда обе машины соединены последовательно и работают при частоте вращения равной 0,75 номинальной. При этом напряжение равно  $0,25 U_{d \text{ ном}}$ , а ток  $0,56 I_{d \text{ ном}}$ .

Полная установленная мощность машин постоянного тока составит  $0,28 P_{M1}$ .

Мощность синхронного двигателя определяется мощностью машины постоянного тока:

$$P_{с. д} \geq P_{M2} = P_{M3}.$$

Указанная схема применяется для привода крупных шахтных вентиляторов.

Пуск машинно-вентильного каскада (см. рис. 3.6, б) производится следующим образом: сначала запускается агрегат постоянной частоты вращения (двигатель  $MS$ ) со стороны питающей сети переменного тока.

Для этого включается разъединитель  $QS2$  и масляный выключатель  $QF2$ . Синхронная машина  $MS$  в этом случае работает двигателем. Затем производится резисторный пуск асинхронного двигателя  $M1$  (контакты  $KM4$  замкнуты). После выхода его на естественную характеристику и достижения установившегося режима замыкаются контакты  $KM2$  и  $KM3$  и размыкаются контакты  $KM4$ . Первые соединяют машины постоянного тока  $M2$  и  $M3$  параллельно и подсоединяют их к выпрямителю  $U$ . Каскад готов к работе. При необходимости регулирования частоты вращения двигателя  $M1$  изменяется ток в обмотках возбуждения  $LM3$  и  $LM2$ , вызывая увеличение противо-э. д. с., а следовательно, снижение частоты вращения. При частоте вращения меньшей 0,75 номинальной размыкаются контакты  $KM2$  и замыкается контакт  $KM1$  и машины постоянного тока переводятся на последовательную работу. Дальнейшее регулирование частоты вращения ведется аналогично.

Недостатком схемы асинхронного машинно-вентильного каскада с последовательно-параллельным включением машин постоянного тока по сравнению с одной машиной является увеличение пуско-регулирующей аппаратуры и усложнение установки в целом.

### 3.4.2. Схема комбинированного машинно-вентильного каскада

Эта схема (рис. 3.7) состоит из асинхронного двигателя  $M1$ , двух машин постоянного тока  $M3$  и  $M2$  и синхронной машины  $MS$ . Якори машин  $M3$  и  $M2$  соединены последовательно и включены в цепь выпрямленного тока ротора асинхронного двигателя  $M1$ . Одна из машин постоянного тока соединена жестко с двигателем  $M1$ , так как она находится на его валу, а вторая  $M2$  — с валом синхронной машины  $MS$ .

Противо-э. д. с., вводимая в цепь ротора двигателя  $M1$ , создается обеими машинами постоянного тока. Машина  $M3$  имеет постоянный магнитный поток и создает э. д. с., всегда направленную встречно выпрямленной э. д. с. ротора. Машина  $M2$ , имеющая регулируемый магнитный поток, создает э. д. с., направленную как встречно, так и согласно с выпрямленной

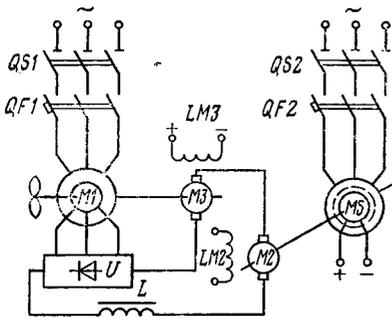


Рис. 3.7. Схема комбинированного асинхронного машинно-вентильного каскада

э. д. с. ротора, и изменяется в пределах от  $+E_{M2 \max}$  до  $-E_{M2 \max}$ .

Для пояснения принципа работы схемы комбинированного каскада рассмотрим уравнение э. д. с. для цепи ротора асинхронного двигателя:

$$E_{d2 \text{ ном}} S = E_{M3} \frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \pm \pm E_{M2} \frac{\Phi}{\Phi_{\text{ном}}} + I_d R_{\text{э.кв.}} \quad (3.8)$$

Из уравнения (3.8) следует, что для снижения угловой скорости асинхронного двигателя необходима встречно направленная э. д. с. машины  $M2$ , которая при минимальной угловой скорости имеет магнитный поток  $\Phi = \Phi_{\text{ном}}$ , а  $E_{M2 \text{ ном}}$ . Эта скорость, если пренебречь падением напряжения в якорной цепи и приняв, что  $\omega_{\text{ном}} = \omega_0$ , определяется из выражения

$$\omega_{\text{min}} = \frac{E_{d2 \text{ ном}} - E_{M2 \text{ ном}}}{E_{d2 \text{ ном}} + E_{M2 \text{ ном}}} \omega_0 \quad (3.9)$$

Снижение тока в обмотке  $LM2$  приводит к уменьшению э. д. с. и к увеличению угловой скорости двигателя  $M1$ . При угловой скорости равной половине диапазона регулирования (0,5D) э. д. с.  $E_M = 0$ , а противо-э. д. с. создается лишь машиной  $M3$ . Дальнейшее увеличение угловой скорости достигается изменением полярности э. д. с. машины  $M2$  реверсированием тока в обмотке возбуждения  $LM2$ . Увеличение тока возбуждения в ней приводит к увеличению э. д. с., которая в этом случае направлена согласно с выпрямленным напряжением ротора. Это приводит к снижению результирующей противо-э. д. с. и к увеличению угловой скорости двигателя  $M1$ . При равенстве  $E_{M3}$  и  $E_{M2}$  асинхронный двигатель работает с угловой скоростью, близкой к номинальной.

Для реализации схемы комбинированного асинхронного вентильно-машинного каскада определим габаритные мощности электрических машин, входящих в состав привода. Машина  $M3$  при всех частотах вращения работает в двигательном режиме, а поэтому общая нагрузка обеспечивается двумя двигателями  $M1$  и  $M3$ :

$$P_{\text{дв. вен}} = P_{M1} + P_{M3} \quad (3.10)$$

Машина  $M3$  рассчитывается в этом случае по номинальному току ротора двигателя  $M1$  и по напряжению, равному  $0,25 E_{d2 \text{ ном}}$ . Следовательно, его габаритная мощность составляет

25 % от номинальной мощности вентилятора, а асинхронного двигателя  $M1$  —  $0,75 P_{\text{вен}}$ .

Машина  $M2$  также рассчитывается по номинальному току ротора  $M1$  и по напряжению, равному напряжению машины  $M3$ , т. е.  $0,25 E_{d \text{ ном}}$ . В этом случае габаритная мощность машины  $M2$  равна мощности машины  $M3$ , т. е.  $0,25 P_{\text{вен}}$ .

Мощность машины  $M5$  выбирается исходя из мощности машины  $M2$ :

$$P_{M5} = P_{M2} = 0,25 P_{\text{вен}}$$

Таким образом, суммарная установленная мощность электрических машин привода вентилятора главного проветривания по схеме комбинированного асинхронного машинно-вентильного каскада составит  $1,5 P_{\text{вен}}$ , что значительно ниже установленной мощности в схеме асинхронного машинно-вентильного каскада с одной машиной постоянного тока.

Достоинство схемы комбинированного каскада — возможность отказа от пусковых устройств, без которых невозможен пуск асинхронного двигателя в других схемах каскада. При пуске каскада в работу машина постоянного тока  $M3$  работает двигателем и получает питание от машины  $M2$ , приводимой во вращение синхронной машиной  $M5$ . Машина  $M2$  в этом случае служит генератором. Если магнитный поток машины  $M3$  постоянен, то магнитный поток машины  $M2$  изменяется при пуске от нуля до номинального, которому соответствует половинная частота вращения асинхронного двигателя  $M1$ . Далее обмотка возбуждения  $LM2$  отключается, а асинхронный двигатель  $M1$  подключается к сети переменного тока и частота вращения увеличивается до  $0,75$  номинальной. Затем ток в обмотке  $LM2$  реверсируется и вновь увеличивается до номинального. Этому току соответствует частота вращения  $M1$  близкая к номинальной. На этом пуск каскада до максимальной частоты вращения заканчивается. Регулирование частоты вращения ведется аналогичными рассмотренными выше методами.

### 3.4.3. Асинхронный вентильный каскад

Асинхронный вентильный каскад (АВК) отличается от рассмотренных выше каскадов отсутствием дополнительных машин постоянного и переменного тока. Последние заменены статическим преобразователем энергии, состоящим из трансформатора и инвертора. Трансформатор служит для согласования напряжения ротора с напряжением питающей сети. Инвертор предназначен для преобразования постоянного напряжения ротора в переменное с частотой сети.

Принцип работы вентильного каскада аналогичен работе каскадных схем вообще. Регулирование величины противо-э. д. с., а с ней и частоты вращения асинхронного двигателя ведется изменением угла регулирования  $\beta$  тиристоров инвертора.

При  $\beta = 90$  эл. градусов асинхронный двигатель работает с максимальной частотой вращения и уменьшается с уменьшением угла  $\beta$ .

Запуск асинхронного двигателя в схеме АВК, как правило, резисторный. Это объясняется неглубоким регулированием частоты вращения вентилятора главного проветривания.

При резисторном пуске асинхронного двигателя в системе АВК его ротор отсоединяется от инвертора и подключается к пусковому резистору. Пуск автоматический в функции времени. При достижении номинальной частоты вращения ротор двигателя через выпрямитель подсоединяется к инвертору, у которого установлен угол регулирования тиристорами  $\beta = 90$  эл. градусов, а затем ротор отсоединяется от пускового резистора. Переход асинхронного двигателя в схему АВК происходит без бросков тока, а его частота вращения несколько снижается. Дальнейшее регулирование скорости электропривода вентилятора ведется вниз от номинальной.

Габаритная мощность согласующего трансформатора определяется максимальными выпрямленным напряжением и током ротора асинхронного двигателя. Максимальный ток ротора берется равным номинальному, а напряжение пропорционально скольжению двигателя:

$$S_{\text{тр}} = mE_{2 \text{ ном}} I_{2 \text{ max}} s_{\text{max}} = \frac{mE_{d2} s_{\text{max}} \tau_I I_{d \text{ max}}}{\tau_U 0,965} = \frac{P_{\text{дв. ном}} s_{\text{max}}}{\eta_{\text{дв. ном}} 0,965}, \quad (3.12)$$

где  $m$  — число фаз;  $0,965 = \cos \beta_{\text{min}}$  при  $\beta_{\text{min}} = 15$  эл. градусов;  $P_{\text{дв. ном}}$ ,  $\eta_{\text{дв. ном}}$  — соответственно номинальные мощность и к. п. д. двигателя;  $s_{\text{max}}$  — максимальное скольжение.

### 3.5. ТИПОВЫЕ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ВЕНТИЛЯТОРОВ ГЛАВНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ

Привод вентилятора главного проветривания шахты «Вентиляционная-1» (Кривбасс) (рис. 3.8) осуществляется двумя двигателями: синхронным  $M1$  мощностью 4000 кВт, 500 об/мин и асинхронным  $M2$  мощностью 500 кВт, 240 об/мин.

Главный двигатель  $M1$  вращает вал вентилятора ВРЦД-4,5 и обеспечивает максимальную подачу. Асинхронный двигатель  $M2$ , имеющий угловую скорость в 2 раза меньшую, обеспечивает пониженную подачу воздуха в начале работы шахты, а также в выходные и праздничные дни.

Для питания постоянным током обмотки возбуждения синхронного двигателя и для создания режима динамического торможения асинхронного двигателя, необходимого для более быстрого снижения угловой скорости при его остывании, служит возбудительный агрегат, состоящий из асинхронного короткозамкнутого двигателя  $M3$  и возбудителя  $G$  — машины постоянного тока параллельного возбуждения.

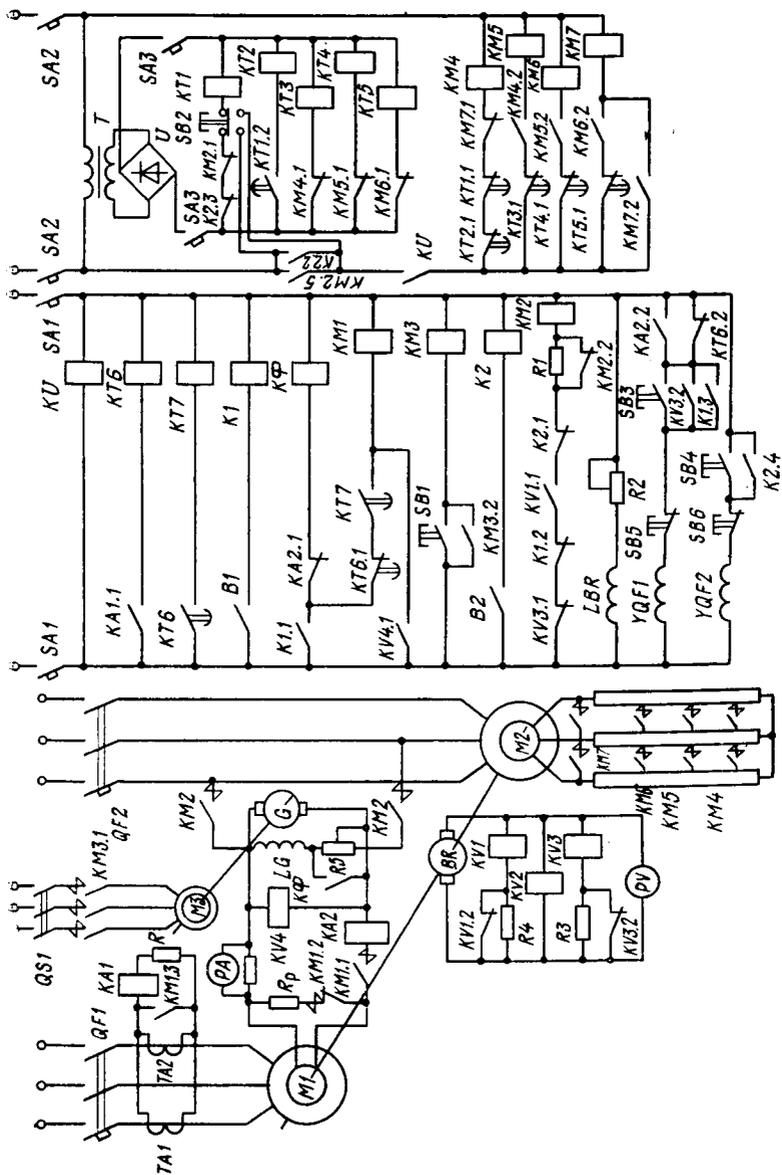


Рис. 3.8. Принципиальная схема синхронно-асинхронного электропривода вентилятора

Для работы вентилятора с максимальной подачей его запуск ведется в следующей последовательности: вначале запускается асинхронный двигатель  $M2$  с пусковым резистором в цепи ротора, а затем с угловой скорости, равной половине номинальной, запускается синхронный двигатель  $M1$ . При работе с половинной угловой скоростью, т. е. с пониженной подачей воздуха, синхронный двигатель не включается. В этом случае вентилятор вращается от асинхронного двигателя  $M2$ , работающего на естественной механической характеристике.

Для подготовки схемы к работе необходимо включить автоматы  $SA1—SA3$ . Это вызывает включение реле времени  $KT1—KT5$  и размыкание соответствующих контактов  $KT1.1—KT5.1$  и замыкание контакта  $KT1.2$ . Срабатывание реле напряжения  $KU$  приводит к подаче питания к катушкам контакторов ускорения  $KM4—KM7$ .

Сначала запускается асинхронный двигатель  $M3$  нажатием на кнопку  $SB1$ . Далее включается асинхронный двигатель  $M2$  нажатием на кнопку  $SB4$ . При этом обтекает ток катушка электромагнита  $YQF2$  масляного выключателя  $QF2$ . Включение последнего обеспечивает подачу напряжения сети на статор асинхронного двигателя  $M2$  и к замыканию контакта  $B2$ . Это приводит к срабатыванию промежуточного реле  $K2$ , которое своими контактами:  $K2.3$  обесточивает цепь первого реле времени  $KT1$ ,  $K2.1$  разрывает цепь питания контактора динамического торможения  $KM2$ ,  $K2.2$  подключает цепь питания контакторов ускорения  $KM4—KM7$ . Идет разгон асинхронного двигателя  $M2$  в функции времени. При достижении асинхронным двигателем  $M2$  номинальной частоты вращения срабатывает реле скорости  $KV3$  и замыкает свой контакт  $KV3.2$  в цепи катушки электромагнита  $YQF1$  и размыкается контакт  $KV3.1$  в цепи питания контактора  $KM2$ . В этой же цепи несколько ранее замкнулся контакт реле скорости  $KV11$ .

Электромагнит  $YQF1$  приводит к включению масляного выключателя  $QF1$ , к подаче на статор синхронного двигателя  $M1$  напряжения сети и последний начинает увеличивать свою частоту вращения при введенном разрядном сопротивлении  $R_p$ . При этом замыкается контакт  $B1$ , вызывающий включение промежуточного реле  $K1$ . Последнее своими контактами:  $K1.1$  подключает к источнику питания реле форсировки  $K\Phi$ , которое своим контактом  $K\Phi$  шунтирует резистор  $R5$ ,  $K1.2$  размыкается в цепи питания контактора  $KM2$ .  $K1.3$  шунтирует кнопку  $SB3$  и контакт  $KV3.2$ .

Бросок тока статора синхронного двигателя вызывает срабатывание реле тока  $KA1$ , замыкание контакта  $KA1.1$  и срабатывание реле времени  $KT6$ , что в свою очередь вызывает замыкание контакта  $KT7$  и размыкание контакта  $KT6.1$ .

По мере разгона двигателя  $M1$  ток статора снижается и вновь реле тока  $KA1$  размыкает свой контакт  $KA1.1$ , вызывая обесточивание сначала реле времени  $KT6$ , затем реле времени

*КТ7*. Некоторый промежуток времени остаются включенными оба контакта *КТ6.1* и *КТ7*. Это вызывает включение контактора *КМ1* и размыкание линейных контактов *КМ1.2* и замыкание контактов *КМ1.1*. При этом происходит подсоединение обмотки возбуждения к якорю генератора *G*. Увеличение тока возбуждения вызывает срабатывание реле тока *КА2* и размыкание контакта *КА2.1*, которое снимает форсировку и замыкание контакта *КА2.2*. Синхронный двигатель *М1* достигает синхронной частоты вращения. Это приводит к срабатыванию реле скорости *КВ4*, которое своим контактом *КВ4.1* шунтирует контакты *КТ6.1* и *КТ7*. Реле времени *КТ6*, обеспечив необходимую выдержку времени для разгона синхронного двигателя, размыкает свой контакт *КТ6.2* в цепи катушки электромагнита *УQF1*. На этом процесс запуска синхронного двигателя *М1* заканчивается, и вентилятор работает с максимальной частотой вращения.

Останов вентилятора производится отключением синхронного двигателя *М1* от сети. При этом размыкается цепь питания промежуточного реле *К1*, которое своим контактом *К1.2* подготавливает цепь контактора динамического торможения *КМ2*. В начале процесса остановки снижение частоты вращения вентилятора идет интенсивно, так как велик момент сопротивления. По мере же снижения частоты вращения абсолютное значение замедления падает.

При частоте вращения двигателя равной 250 об/мин контактом *КВ3.1* замыкается цепь питания катушки контактора динамического торможения *КМ2*. Он срабатывает, и в статор асинхронного двигателя *М2* через линейные контакты *КМ2* подается постоянный ток, а в цепь ротора вводится максимальное сопротивление. С выдержкой времени, обеспечиваемой реле времени *КТ1-КТ5*, подключаются к источнику питания контакторы ускорения *КМ4-КМ7*, которые своими контактами по мере снижения частоты вращения двигателя шунтируют ступени пусковых резисторов. Почти при нулевой частоте вращения контактом *КВ1.1* реле скорости *КВ.1* разрывается цепь питания контактора динамического торможения *КМ2* и снимается постоянный ток с обмотки статора асинхронного двигателя *М2*. Процесс останова вентилятора на этом заканчивается.

В схеме предусмотрена защита синхронного двигателя от снижения напряжения (реле форсировки *КФ*), от исчезновения тока возбуждения (реле наличия тока *КА2*), от затянувшегося пуска (реле времени *КТ6*).

Управление приводом вентилятора можно вести вручную или автоматически. Ручное управление ведется кнопками *SB1—SB5*.

Вентилятор главного проветривания ВРЦД-4,5 шахты «Северная — вентиляционная» (Кривбасс) имеет привод от асинхронного двигателя с фазным ротором мощностью 3500 кВт. Режим с пониженной подачей воздуха обеспечивается подключением главного двигателя к преобразователю частоты 25 Гц.



Преобразователь частоты — это две синхронные машины, находящиеся на одном валу. Одна из них работает двигателем, а другая — генератором. Синхронная машина, работающая генератором, имеет в 2 раза меньшее число полюсов, чем и достигается выработка напряжения с частотой 25 Гц.

Из регулируемых систем электроприводов вентиляторов главного проветривания наибольшее распространение получила схема асинхронного машинно-вентильного каскада, разработанная Донгипроуглемашем и ХЭМЗ применительно к вентиляторам ВЦД-32М и ВЦД-40.

Впервые в отечественном вентиляторостроении регулируемым электроприводом был оснащен центробежный вентилятор ВЦД-32.

Принципиальная схема асинхронного машинно-вентильного каскада электропривода вентилятора показана на рис. 3.9. Основными элементами схемы являются: асинхронные двигатели с фазным ротором  $M1$  и  $M2$ ; преобразовательный агрегат, состоящий из синхронной машины  $M5$  и двух машин постоянного тока независимого возбуждения  $M3$  и  $M4$ ; выпрямителя  $U$ , собранного на диодах по трехфазной мостовой схеме.

Регулирование скорости электропривода вентилятора предусматривается в диапазоне 2:1. В свою очередь диапазон регулирования разбивается на два поддиапазона: первый — с регулированием скорости от 0,5 до 0,75 номинальной, а второй — с регулированием скорости от 0,75 до номинальной. В первом поддиапазоне машины постоянного тока  $M3$  и  $M4$  соединяются контактом  $KM1$  последовательно, а во втором поддиапазоне — параллельно контактами  $KM2$ .

Перед запуском вентилятора необходимо выполнить ряд подготовительных операций: установка ляд в требуемое положение; закрытие направляющего аппарата; включение электроприводов всех вспомогательных агрегатов; включение разъединителей и т. д.

Схемой предусмотрено автоматическое, полуавтоматическое и ручное управление. Выбор режима управления ведется с помощью универсального переключателя. Предусмотрена также возможность регулирования подачи поворотом лопаток направляющего аппарата.

Пуск асинхронного двигателя резисторный в функции времени. Поддиапазон регулирования подачи вентилятора определяет диспетчер нажатием на кнопку  $SB-50$  или  $SB-70$ , расположенную на пульте управления. Кнопка  $SB-50$  соответствует первому поддиапазону регулирования,  $SB-70$  — второму.

Если выбран первый поддиапазон регулирования, т. е. нажата кнопка  $SB-50$ , то замыкается контакт  $KM1$  и двигатели постоянного тока  $M3$  и  $M4$  соединяются последовательно.

Выбор момента подключения ротора асинхронного двигателя к выпрямителю  $U$ , а следовательно, к якорям машин  $M3$  и  $M4$  осуществляется с помощью реле согласования угловых скоро-

стей *KV*. Реле *KV* имеет две обмотки, одна из которых запитана от якоря машины постоянного тока, а вторая — от цепи тахогенератора. Магнитные потоки, создаваемые токами, протекающими по этим обмоткам в магнитопроводе реле, направлены согласно. В обмотке *II* протекает ток, соответствующий максимальной противо-э. д. с. машины постоянного тока, который создает магнитный поток, недостаточный для включения реле *KV*. При разгоне асинхронного двигателя тахогенератор в цепи обмотки *I* создает ток и пропорциональный ему магнитный поток, который увеличивается с увеличением частоты вращения. При частоте вращения 0,5 номинальной суммарный магнитный поток достаточен для втягивания якоря реле *KV*. Оно срабатывает и вызывает срабатывание вначале реле, а затем замыкание контактов *KM2* и размыкание контакта *KM1*.

При нажатии на кнопку *SB-70*, т. е. выбран второй поддиапазон регулирования, замыкается контакт *P70*, подключающий якорь тахогенератора *BR* к обмотке *I* через регулировочный резистор *R6*. В этом случае тот же суммарный магнитный поток реле *KV* создается только при частоте вращения равной 0,75 номинальной.

Регулирование скорости электропривода вентилятора в любом из поддиапазонов осуществляется снижением противо-э. д. с. машин постоянного тока, достигаемого уменьшением тока в их обмотках возбуждения. Это производится командоаппаратами, приводимыми в движение реверсивным двигателем. Включение двигателя производится кнопкой «Больше», если частоту вращения необходимо увеличить, или кнопкой «Меньше» — для снижения частоты вращения.

Для перехода с первого поддиапазона регулирования частоты вращения на второй необходимо сначала привод остановить, а затем вновь запустить, установив предварительно необходимый поддиапазон регулирования.

При работе на максимальной скорости электропривода производительность вентилятора регулируется направляющим аппаратом. Их привод включается кнопками «Больше» или «Меньше», расположенными на пульте управления (на схеме не показаны).

Останов агрегата на любой частоте вращения осуществляется нажатием на кнопку «Стоп» на пульте управления. При этом главный двигатель, синхронная машина и вспомогательные механизмы отключаются.

### **3.6. УСЛОВИЯ РАБОТЫ, ХАРАКТЕР НАГРУЗКИ И ТРЕБОВАНИЯ К ЭЛЕКТРОПРИВОДУ КОМПРЕССОРА**

На современном горном предприятии при подземной разработке месторождений полезных ископаемых в угольных шахтах со взрывоопасной средой, а также в рудниках черной и цветной металлургии основным видом энергии служит пневматическая.

Потребителями пневматической энергии являются приводы: бурильных и буросбоечных машин, толкателей, стопоров и затворов, добычных, проходческих и погрузочных машин, лебедок, конвейеров, вентиляторов частичного проветривания, эжекторных установок при проветривании горных выработок и эрлифтных установок при откачке воды и пульпы. При транспортировании закладочных материалов по трубопроводам в горные выработки, выдаче измельченного полезного ископаемого также используется энергия сжатого воздуха.

Несмотря на то, что пневматическая энергия дороже электрической, что объясняется большими потерями энергии при ее производстве в компрессорном агрегате, пневматической сети и пневматическом двигателе, она нашла широкое применение. Так, например, в угольной промышленности на 70 % угольных шахт и рудников эксплуатируется свыше 2 тыс. стационарных компрессорных установок с общей производительностью более 200 тыс. м<sup>3</sup>/мин [28]. К достоинствам пневматической энергии можно отнести: высокую степень безопасности, простоту и надежность пневмодвигателей.

По принципу работы компрессорные машины делятся на поршневые, ротационные и центробежные. Поршневые компрессоры могут быть простого или двойного действия, одно- или многоступенчатые. В одноступенчатом компрессоре простого действия из двух движений поршня лишь одно движение является рабочим, сопровождающееся сжатием воздуха. В одноступенчатом компрессоре двойного действия оба движения являются рабочими. Повышение общего давления воздуха достигается последовательным соединением нескольких одноступенчатых компрессоров.

Мощность (кВт) электродвигателя компрессора определяется из выражения

$$P_k = \frac{A_n Q}{\eta_k \eta_n}, \quad (3.13)$$

где  $A_n = \frac{n}{n-1} p_1 V_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$  — работа, затрачиваемая на сжатие воздуха при политропическом процессе, Дж;  $n$  — показатель политропы, определяемый из уравнения  $pV^n = \text{const}$ ;  $p_1$  — начальное давление воздуха, Па;  $p_2$  — конечное давление воздуха, Па;  $V_1$  — начальный объем воздуха при всасывании, м<sup>3</sup>;  $Q$  — производительность (подача) компрессора, м<sup>3</sup>/с;  $\eta_k$  — индикаторный к. п. д. компрессора, учитывающий потери в нем при реальном процессе;  $\eta_n$  — к. п. д. механической передачи между двигателем и компрессором.

Выбранный по каталогу двигатель должен иметь мощность, удовлетворяющую условию  $P_{\text{ном}} \geq P_k$ .

Статическая нагрузка поршневого компрессора определяется силой, действующей на поршень:

$$F = pS,$$

где  $p = p_{\text{вых}} - p_{\text{вх}}$  — разность давлений на поршень, Па;  $S$  — площадь поршня, м<sup>2</sup>.

В кривошипном механизме момент сопротивления на валу двигателя находится по формуле

$$M_{\text{ст}} = Fp = pSR \sin \omega t, \quad (3.14)$$

где  $\rho = R \sin \omega t$  — радиус приведения;  $R$  — радиус кривошипа, м;  $\omega$  — угловая скорость вала компрессора.

Из выражения (3.14) следует, что изменение момента сопротивления на валу двигателя имеет пульсирующий характер с амплитудой  $M_{\text{ст max}} = pSR$ . Наиболее неравномерной нагрузкой характеризуется работа поршневого компрессора простого действия. Выравнивание нагрузки для таких компрессоров производится установкой маховика.

Таким образом, наличие в кинематической цепи поршневых машин кривошипно-шатунного механизма и необходимость использования маховика или двигателя с повышенным моментом инерции определяют следующие особенности машин как объекта электропривода: пульсирующий характер нагрузочного момента; зависимость пульсаций от скорости электропривода; повышенный момент инерции, затрудняющий пуск привода; повышенный момент сопротивления при пуске.

Режим работы компрессорной установки определяется точкой пересечения характеристики компрессора с характеристикой пневматической сети. Эта точка показывает, какое давление компрессор может создать при данной производительности. Поэтому изменение параметров пневматической сети влечет за собой и изменение режима работы компрессора. Предположим, что утечки воздуха в трубопроводе уменьшились. Это приведет к незначительному снижению расхода воздуха, но к значительному повышению давления у компрессора и у потребителей.

Режим работы компрессора изменяется также с изменением числа работающих потребителей. Так, например, в малоагрегированную смену характеристика пневматической сети может не пересечь характеристику компрессора, тогда установившийся режим работы установки отсутствует. Поэтому для поддержания режима работы пневматических установок в заданных пределах применяют различные способы регулирования режима работы компрессоров: изменением частоты вращения вала компрессора, а при постоянной частоте вращения — изменением числа параллельно работающих компрессоров.

При нерегулируемой частоте вращения вала компрессора регулирование ведется: дроселированием перед входом в компрессор, тогда расход воздуха уменьшается из-за понижения начального давления; включением дополнительного вредного пространства в поршневых компрессорах; отжатием пластин всасывающих клапанов в поршневых компрессорах.

Электропривод шахтных поршневых компрессоров большой производительности с нерегулируемой скоростью оборудуется

обычно тихоходными синхронными двигателями, непосредственно соединенными с валом компрессора. Увеличение момента инерции двигателя достигается за счет утяжеления его ротора, который выполняет функции маховика.

Турбокомпрессоры в отличие от поршневых компрессоров работают с высокой частотой вращения при неизменном моменте на валу. Электропривод в этом случае оснащается мощными высокоскоростными синхронными двигателями с повышающей передачей между ними.

Широко применяемый в настоящее время способ регулирования режима работы турбокомпрессоров дросселированием во всасывающем трубопроводе компрессора с одновременной работой его на выхлоп в атмосферу весьма неэкономичен. Поэтому для турбокомпрессоров большой производительности целесообразно применение регулируемого электропривода. Это даст возможность вести экономичное регулирование режима их работы. В настоящее время создан комплект автоматизированного регулируемого электропривода турбокомпрессора К-100-63-1

Анализ характеристик турбокомпрессоров показывает, что они являются мощными и высокоскоростными машинами. Поэтому для их привода целесообразно использовать максимальную частоту вращения электродвигателя, что позволяет применять повышающий редуктор с минимальным передаточным отношением.

При регулировании режима работы турбокомпрессора изменением частоты вращения  $n$  момент сопротивления на валу компрессора, а следовательно, на валу приводного двигателя (при стабилизации заданного давления воздуха в нагнетательном коллекторе) находится из выражения

$$M_k = a + bn^{1,23},$$

где  $a$  и  $b$  — коэффициенты, являющиеся функцией давления сжатого воздуха и начальных условий всасывания.

Пусковой момент электродвигателя не должен превышать двукратного значения номинального статического момента сопротивления компрессора.

Кроме перечисленных специфических требований, система регулируемого электропривода турбокомпрессоров должна отвечать общим требованиям, предъявляемым ко всем системам привода: высокие энергетические показатели системы (к. п. д. и  $\cos \varphi$ ); надежность и простота эксплуатации; минимально возможная первоначальная стоимость оборудования.

### 3.7. РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ТУРБОКОМПРЕССОРА С ДВИГАТЕЛЕМ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ

Двигатель двойного питания представляет собой асинхронный двигатель с фазным ротором, подключенный к двум источникам питания: со стороны статора — к сети с постоянным напряже-

нием и частотой 50 Гц, а со стороны ротора — к источнику пониженной частоты, величина которой, как и напряжение источника (по амплитуде и фазе), могут изменяться. Преобразователь с непосредственной связью обеспечивает двустороннее преобразование энергии, а поэтому электродвигатель в режиме двойного питания может работать как при частоте вращения ниже, так и выше синхронной в двигательном и тормозном режимах, т. е. достигается двухзонное регулирование частоты вращения.

Нормальная работа машин переменного тока возможна, если векторы н. с. статора и ротора в пространстве неподвижны друг относительно друга. Так как н. с. статора вращается в пространстве с угловой скоростью  $\omega_0 = 2\pi$ , а ротор с угловой скоростью  $\omega_2$ , то н. с. ротора должна вращаться относительно ротора с угловой скоростью равной

$$2\pi f_2 = \omega_0 \pm \omega_2 = \omega_0 s = 2\pi f_1 s,$$

т. е. э. д. с., вводимая в цепь ротора, должна иметь частоту скольжения. Знаки  $\pm$  означают, что угловая скорость может быть ниже синхронной (—) или выше синхронной (+). Эта угловая скорость определяется частотой задающего сигнала, поступающего в схему управления тиристорного преобразователя частоты.

Таким образом, возможны два способа регулирования частоты вращения: при первом способе на кольца ротора от преобразователя подается напряжение с частотой скольжения, а при втором — с независимой частотой.

В обоих случаях подводимое к ротору напряжение можно изменять как по фазе, так и по амплитуде независимо от частоты. Это создает благоприятные условия для регулирования потребления реактивной мощности, что обеспечивает наилучшие энергетические показатели в сравнении с любым другим видом привода для заданного диапазона изменения частоты вращения.

Принципиальная схема управления приводом компрессора с двигателем двойного питания (ДДП) приведена на рис. 3.10. Она состоит из асинхронного двигателя с фазным ротором  $M$ , преобразователя частоты  $UZ$ , включающего в себя силовой трансформатор  $T$ , согласующий напряжение сети с напряжением ротора двигателя, тиристорные блоки  $U1-U3$ , системы управления  $AUZ$  преобразователем частоты, датчиков углового перемещения ротора (синхронный тахогенератор с постоянными магнитами  $GS$ ), датчиков тока ротора  $UA1-UA3$ , давления и производительности на выходе компрессора, пускового устройства электродвигателя (индукционный реостат  $L$ ).

Преобразователь частоты построен на принципе непосредственного преобразования сетевой частоты 50 Гц в напряжение требуемой низкой частоты 0—6 Гц. Тиристорный блок преобра-

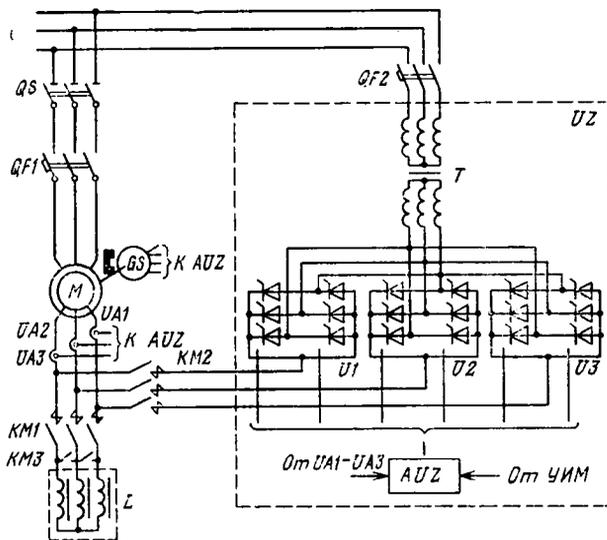


Рис. 3.10. Принципиальная схема силовой цепи двигателя двойного питания.

зователя частоты выполнен по трехфазной нулевой схеме и состоит из 18 тиристорov.

При регулировании напряжения возбуждения двигателя двойного питания принят следующий закон:

$$\bar{U}_f = \bar{U}_{f_1} + \bar{U}_{f_2} - k \bar{e}_f, \quad (3.15)$$

где  $\bar{U}_{f_1} = \alpha_0 + \alpha_1 s$  — составляющая вектора напряжения возбуждения, направленная встречно или согласно вектору э. д. с. ротора двигателя и обеспечивающая регулирование частоты его вращения;  $\alpha_0$  и  $\alpha_1$  — коэффициенты регулирования;  $\bar{U}_{f_2} = j\beta_1$  — составляющая вектора напряжения возбуждения, направленная перпендикулярно к вектору э. д. с. ротора и обеспечивающая регулирование коэффициента мощности двигателя;  $k$  — коэффициент обратной связи по току;  $\bar{e}_f$  — э. д. с. ротора, наведенная токами ротора в обмотках статора.

Для реализации закона (3.15) в регулятор вводятся сигналы частоты вращения ротора, частоты сети и сигналы обратной связи по току ротора.

Сигналы частоты вращения ротора двигателя формируются углоизмерительной машиной GS (рис. 3.11), представляющей собой синхронный тахогенератор с постоянными магнитами и имеющей число пар полюсов, равное числу пар полюсов главного двигателя. GS жестко связана с асинхронным двигателем.

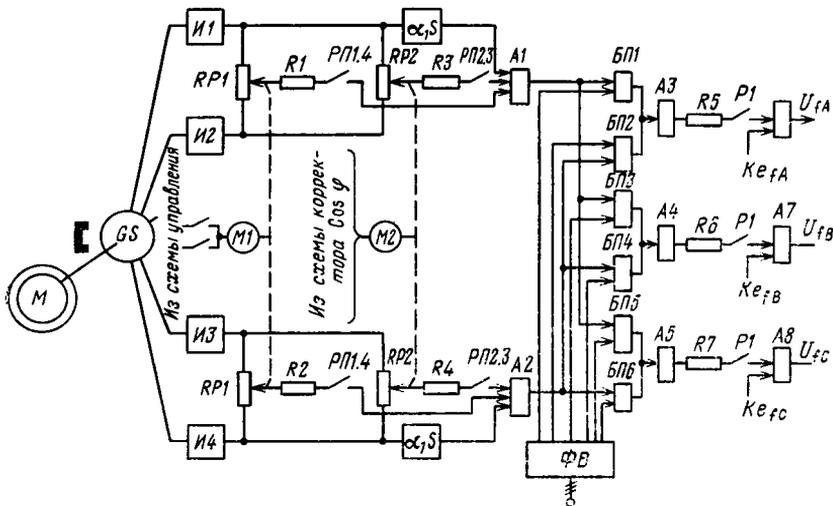


Рис. 3.11. Структурная схема регулятора

При вращении асинхронного двигателя  $M$  с  $GS$  снимаются напряжения, характеризующиеся выражениями

$$\begin{aligned} U_d &= \pm U_0 (1+s) \sin \omega_2 t; \\ U_q &= \pm U_0 (1+s) \cos \omega_2 t, \end{aligned} \quad (3.16)$$

где  $U$  — амплитуда напряжения  $GS$ .

С  $GS$  эти напряжения подаются на интеграторы  $И1—И4$ , с выхода которых напряжения

$$\begin{aligned} \int U_d dt &= \pm U_0 \cos \omega_2 t; \\ \int U_q dt &= \pm U_0 \sin \omega_2 t \end{aligned} \quad (3.17)$$

поступают на двоиный потенциометр  $RP1$ . Таким образом, с потенциометров снимаются напряжения  $\pm \alpha_0 \cos \omega_2 t$  и  $\pm \alpha_0 \sin \omega_2 t$ , предназначенные для регулирования скорости электропривода. Величина амплитуды  $U_0$  зависит от положения движка потенциометра  $RP1$  и регулируется с помощью реверсивного электродвигателя  $M1$ , механически с ним связанного.

Составляющая напряжения возбуждения  $\alpha_1 s$ , предназначенная для регулирования жесткости механических характеристик двигателя, получается в результате суммирования на пассивных элементах (резисторах) соответствующих напряжений, снимаемых с  $GS$  и с интеграторов  $И1—И4$ .

Напряжения, определяемые выражениями (3.17), подаются также на двоинные потенциометры  $RP2$ , с выхода которых снимаются напряжения  $\pm \beta \cos \omega_2 t$ ;  $\pm \beta \sin \omega_2 t$ . Значения этих напряжений зависят от положения движков потенциометров  $RP2$ ,

которые механически связаны с реверсивным электродвигателем  $M2$ .

В усилителях  $A1$  и  $A2$  суммируются сигналы напряжений, снимаемых с потенциометров  $RP1$ ,  $RP2$  и  $\alpha_1s$ , а на выходе имеем

$$U_{fd} = \pm (\alpha_0 + \alpha_1s) \sin \omega_2 t \pm \beta \cos \omega_2 t; \quad (3.18)$$

$$U_{fq} = \pm (\alpha_0 + \alpha_1s) \cos \omega_2 t \pm \beta \sin \omega_2 t$$

Перемножая сигнал напряжений (3.18) на соответствующие сигналы напряжения частоты сети, снимаемые с фазовращателя  $\Phi B$  в блоках умножения  $БП1—БП2$ , и складывая их с сигналами обратной связи по току ротора в усилителях  $A6—A8$ , на выходе последних получаем трехфазную систему напряжений:

$$U_{fA} = (\alpha_0 + \alpha_1s) \sin (\omega_f t + A) - \beta \cos (\omega_f t + A) - Ke_{fA}; \quad (3.19)$$

$$U_{fB} = (\alpha_0 + \alpha_1s) \sin \left( \omega_f t - \frac{2}{3} \pi + A \right) - \beta \cos \left( \omega_f t - \frac{2}{3} \pi + A \right) - Ke_{fB};$$

$$U_{fC} = (\alpha_0 + \alpha_1s) \sin \left( \omega_f t + \frac{2}{3} \pi + A \right) - \beta \cos \left( \omega_f t + \frac{2}{3} \pi + A \right) - Ke_{fC},$$

где  $A$  — начальный фазовый угол.

Для измерения тока ротора используется устройство, выполненное на датчиках Холла и позволяющее безынерционно измерять переменный ток низкой частоты (0—25 Гц).

Непрерывные сигналы управления (рис. 3.12) — описываемые уравнениями (3.19), — поступающие с регулятора, преобразуются в последовательность управляющих импульсов. Эти импульсы вырабатываются схемой нуль-органов  $HO1—HO3$  в момент перехода суммы двух напряжений  $U_f(t)$  и  $U_{оп}(t)$  через нуль. В качестве опорного напряжения используется синусоидальное напряжение постоянной амплитуды и частоты сети, питающей преобразователь:

$$U_{оп} = U_0 \sin \left( \omega_0 t + \frac{\pi}{m} \right), \quad (3.20)$$

где  $m=3$  — число фаз преобразователя.

Так как суммарное напряжение дважды за период питающего напряжения переходит через нуль, то схемой нуль-органов вырабатываются два управляющих импульса, поступающих на тиристоры анодной и катодной групп.

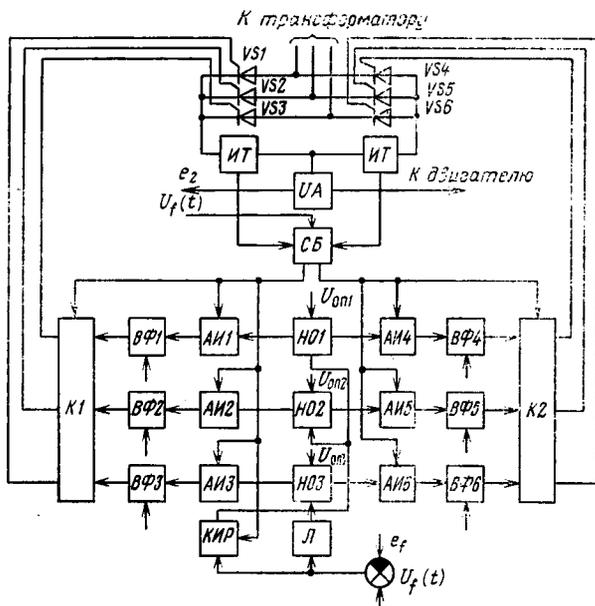


Рис. 3.12. Структурная схема управления одной фазы преобразователя частоты ДДП

При сигнале управления  $U_f(t) = 0$  обе группы имеют нулевые углы управления, которым соответствует нулевое среднее значение напряжения.

Если  $U_f(t) < 0$ , то анодная группа вентиля работает в выпрямительном режиме, а катодная — в инверторном, и наоборот.

Окончательное формирование выходных импульсов с требуемыми для запуска тиристоров параметрами осуществляется усилителями импульсов АИ1—АИ6 и выходными формирователями ВФ1—ВФ6.

Раздельная работа анодной и катодной групп вентиля преобразователя обеспечивается схемой блокировки СБ. Последняя, фиксируя знак регулятора  $U_f(t)$ , а также состояние анодной и катодной групп, исключает возможность одновременной работы этих групп. Контроль за фактическим состоянием тиристоров ведется индикаторами тока ИТ, расположенными в плечах моста силового элемента преобразователя частоты. Сигналы с ИТ поступают в схему блокировки СБ.

В связи с неодинаковостью углов управления выпрямительным и инверторным режимами групп вводится корректор инверторного режима КИР, который получает сигнал от схемы блокировки.

Для обеспечения автоматического регулирования турбокомпрессорного агрегата системой управления предусмотрено из-

менение коэффициентов регулирования  $\alpha_0$  и  $\beta$  по пропорционально-интегральному закону вида

$$\alpha_0 = k_p \left[ \Delta p + \frac{1}{T_{ин}} \int_0^T \Delta p(t) dt \right];$$

$$\beta = k_d \left[ \Delta i_d + \frac{1}{T_{ин}} \int_0^T \Delta i_d(t) dt \right],$$
(3.21)

где  $k_p$  и  $k_d$  — коэффициенты пропорциональности;  $\Delta p$  — отклонение сжатого воздуха от заданного;  $\Delta i_d$  — отклонение тока статора от заданного;  $T_{ин}$  — время изодрома.

Поддержание необходимого давления сжатого воздуха в магистрали достигается сигналом  $\alpha_0$ . Если давление сжатого воздуха в магистрали по каким-либо причинам изменилось, электронный регулятор давления подает сигнал на включение реверсивного двигателя  $M2$  (см. рис. 3.24), который с помощью механической связи перемещает движки потенциометра  $RP1$ , вызывая изменение амплитуд напряжений так, что скорость электропривода компрессора приводится к требуемому значению. После установления заданного давления сжатого воздуха в магистрали изменение частоты вращения вала компрессора прекратится.

Принципиальная электрическая схема управления ДДП турбокомпрессора приведена на рис. 3.13. Она предусматривает ручное и автоматическое управление. При автоматическом управлении импульс на пуск, останов или регулирование скорости электропривода подается из системы автоматики согласно заданной технологической последовательности операций.

Рассмотрим режим ручного управления. Управление ведется с помощью релейно-контакторной аппаратуры. Перед пуском двигателя необходимо выполнить следующие операции: включить автоматические выключатели  $SA1$ — $SA3$ , разъединитель  $QS$  (см. рис. 3.10), тумблеры  $T1$  и  $T2$  (см. рис. 3.13); ключи управления  $KY1$  и  $KY2$  установить в положение «Отключено»; универсальный переключатель  $УП$  — в положение «Ручное управление» —  $P$ .

При этом контактор  $KM1$  включен и его контакты в цепи ротора асинхронного двигателя замкнуты, контакторы  $KM2$  и  $KM3$  обесточены; аварийное реле  $КА$  включено, а его контакт в цепи реле  $K1$  замкнут; реле  $РМД$  включено, и оно подключает вспомогательный двигатель  $M2$  (см. рис. 3.12), приводящий движки потенциометров  $RP2$  в положение, при котором коэффициент регулирования  $\alpha_0$  соответствует малой скорости электропривода и давление воздуха на выходе компрессора минимально.

Завершив предварительные операции, ключ  $KY2$  переводят в положение «Включено». При этом включается катушка  $ЭВЛ2$ , которая, воздействуя на пружинно-моторный привод, включает

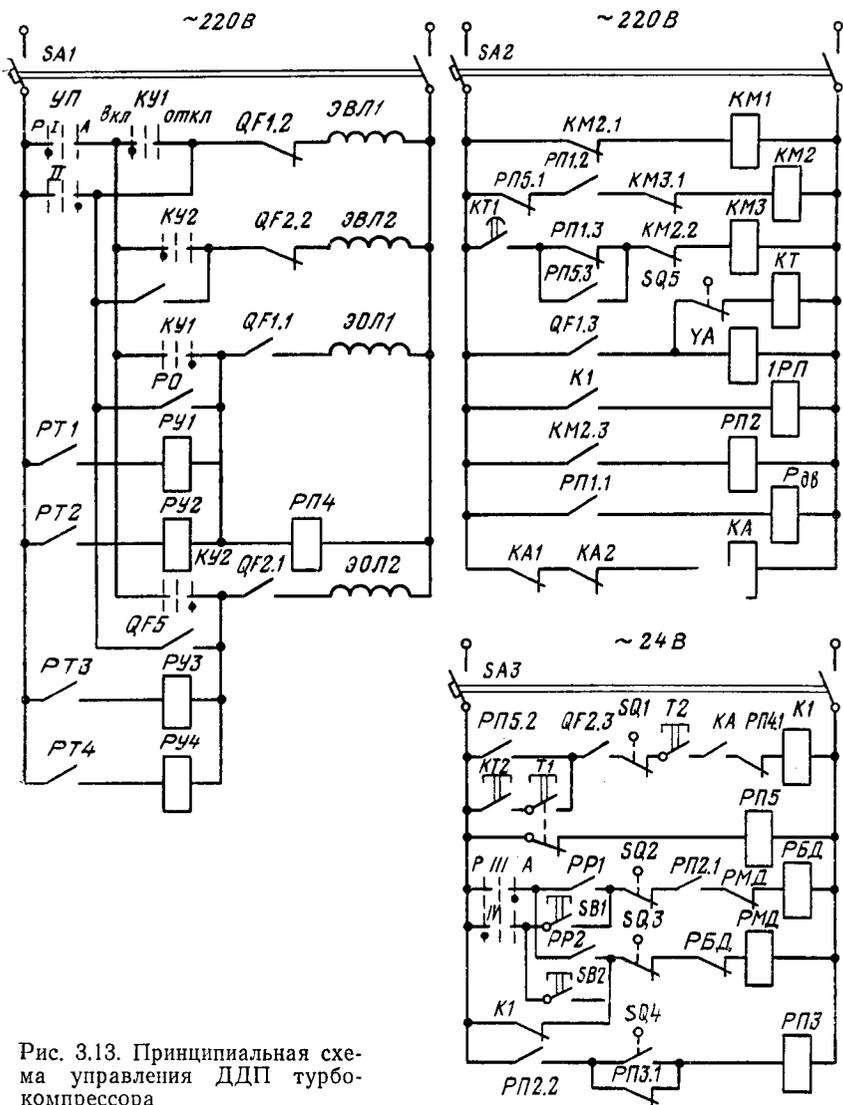


Рис. 3.13. Принципиальная схема управления ДДП турбокомпрессора

масляный выключатель  $QF2$  (см. рис. 3.10), подключая согласующий трансформатор  $T$  к питающей сети. Замыкаются контакты  $QF2.1$  в цепях катушек электромагнита ЭОЛ2 (см. рис. 3.13) и реле  $K1$ , и размыкается контакт  $QF2.2$  в цепи катушки электромагнита ЭВЛ2.

Для пуска двигателя необходимо ключ  $KY1$  перевести в положение «Включено». При этом включается электромагнит ЭВЛ1, приводящий к включению масляного выключателя  $QF1$  и

к подключению статора асинхронного двигателя  $M$  к питающей сети (см. рис. 3.10). Включение масляного выключателя вызывает размыкание контакта  $QF1.2$  в цепи катушки электромагнита  $ЭВЛ1$ , замыкаются контакты  $QF1.1$ ,  $QF1.3$  в цепях катушек электромагнита  $ЭОЛ1$  и реле времени  $КТ$ .

Начинается разгон двигателя с включенным в его роторную цепь индукционного резистора  $L$ .

Разгон двигателя идет под контролем реле времени  $КТ$ . По достижении двигателем частоты вращения равной 90 % синхронной замыкается контакт  $КТ1$  в цепи контактора  $КМ3$ , вызывая его срабатывание. Контакты  $КМ3$ , замыкаясь, переводят двигатель на естественную механическую характеристику. Контакт  $КТ2$ , замыкаясь, включает реле  $К1$ , которое подает импульс на включение промежуточного реле  $РП1$ . Последнее своими контактами  $РП1.1—РП1.3$  разрывает цепь контактора  $КМ3$  и замыкает цепи катушек контакторов  $КМ2$  и  $Р_{дв}$ . Это приводит в свою очередь к замыканию контактов  $КМ2$  и размыканию контактов  $КМ1$  и  $КМ3$ , и двигатель переводится в режим двойного питания. Промежуточное реле  $РП2$ , включившись, своими замыкающими контактами  $РП2.1$ ,  $РП2.2$  подготавливает цепь для катушки реле  $РБД$  и включает реле  $РП3$ . Нажатием на кнопку  $SB1$  реле  $РБД$  переводит двигатель  $M1$  привода движка потенциометра  $RP1$  в сторону увеличения скорости электропривода компрессора и к увеличению давления воздуха на его выходе (см. рис. 3.11).

Управление реле  $РБД$  и  $РМД$  может осуществляться и автоматически через реле  $РП1$  и  $РП2$ , которые подключены на выход регулятора давления.

Останов агрегата осуществляется ключом  $КУ1$  или реле  $РО$ . Своими контактами они замыкают цепь катушки электромагнита отключения  $ЭОЛ1$  и реле  $РП4$ . Срабатывание последних приводит к размыканию контактов масляного выключателя  $QF1$  и отключению двигателя от питающей сети, а также к размыканию цепи реле  $К1$  и через  $РП1$  к включению контактов  $КМ1$  и отключению контактов  $КМ2$ .

Перевод двигателя с работы в режиме двойного питания на обычный асинхронный режим с короткозамкнутым ротором осуществляется размыканием тумблера  $T2$ . В случае аварии с преобразователем такой перевод производится реле  $КА$ .

При работе с преобразователем в период его наладки необходимо тумблер  $T1$  поставить в положение «Наладка». При этом включается реле  $РП5$  и размыкается контакт  $РП5.1$  в цепи катушки контактора  $КМ2$  и исключается возможность подключения преобразователя к цепи ротора двигателя.

Защита тиристоров от коммутационных всплесков напряжения, возникающих в схеме при нормальных и аварийных коммутациях, осуществлена шунтированием вторичной обмотки трансформатора и каждого тиристора в отдельности  $RC$ -цепочками.

Согласующий трансформатор выбирается по вторичному напряжению и току. Фазное напряжение вторичной обмотки трансформатора определяется согласно выражению

$$U_{2 \text{ тр. ф}} = \frac{U_{f \text{ max}} \pi / m}{\sin(\pi / m) \cos \beta_0}, \quad (3.22)$$

где  $U_{f \text{ max}}$  — максимальное требуемое напряжение возбуждения двигателя;  $m$  — число фаз преобразователя (в рассматриваемом случае  $m=3$ );  $\beta_0=25 \div 35$  эл. градусов — минимальный угол регулирования тиристорами в выпрямительном и инверторном режимах.

Фазный ток вторичной обмотки трансформатора принимается равным максимальному току нагрузки, т. е.  $I_{2 \text{ тр. ф}} = I_{f \text{ max}}$ .

Максимальное напряжение возбуждения  $U_{f \text{ max}}$  находится аналитически или графически из векторной диаграммы.

Габаритная мощность согласующего трансформатора определяется по формуле

$$S_{\text{тр}} = m U_{2 \text{ тр. ф}} I_{2 \text{ тр. ф}}. \quad (3.23)$$

Тиристоры силового блока выбираются по максимальному току и напряжению. Величина обратного напряжения определяется амплитудным значением линейного напряжения согласующего трансформатора:

$$U_{\text{обр. тр}} = \sqrt{2} U_{2 \text{ тр. л}}. \quad (3.24)$$

Среднее значение тока, проходящего через тиристор для трехфазной нулевой схемы,

$$i_{\text{ср. тр}} = \frac{2}{3} \frac{\sqrt{2} I_{f \text{ max}}}{\pi}. \quad (3.25)$$

### 3.8. ЭЛЕКТРОПРИВОД НАСОСОВ

В качестве электроприводов насосов в шахтных участковых и центральных водоотливных установках применяются асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором. Электродвигатели насосов работают в продолжительном режиме с постоянной нагрузкой, мощность (кВт) которых определяется по формуле

$$P = \frac{k Q \gamma H}{3600 \eta_n \eta_{\text{п}}}, \quad (3.26)$$

где  $k$  — коэффициент запаса (1,2—1,3 при подаче до 160 м<sup>3</sup>/ч и 1,1—1,15 при подаче свыше 160 м<sup>3</sup>/ч);  $Q$  — подача, м<sup>3</sup>/ч;  $\gamma$  — удельный вес откачиваемой из шахты воды, кН/м<sup>3</sup>;  $H$  — напор насоса, м;  $\eta_n$ ,  $\eta_{\text{п}}$  — соответственно к. п. д. насоса и передачи.

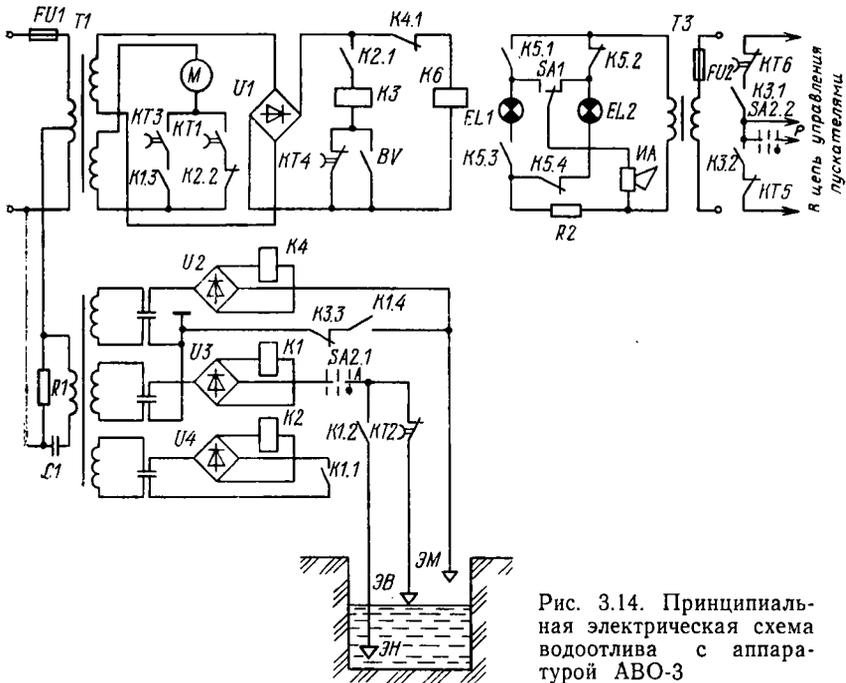


Рис. 3.14. Принципиальная электрическая схема водоотлива с аппаратурой АВО-3

Рассмотрим электропривод насоса участкового водоотлива с аппаратурой АВО-3. Аппаратура предназначена для управления одиночным насосом и обеспечивает автоматическую заливку насоса с помощью погружного заливочного насоса, автоматическую работу насоса, останов насоса при его неисправности, сигнализацию при его неисправности, аварийном уровне воды в водосборнике, целостности сигнальной цепи и наличии питания в аппаратуре управления.

На рис. 3.14 приведена принципиальная электрическая схема водоотлива с аппаратурой АВО-3. Рассмотрим работу схемы в автоматическом режиме. Уровень воды в водосборнике минимальный, и насос отключен. Как только уровень воды поднимется и достигнет электрода верхнего уровня ЭВ, цепь реле управления  $K1$  становится замкнутой. Оно срабатывает и своим контактом  $K1.2$  блокируется во включенном состоянии через электрод нижнего уровня ЭН. Одновременно контакт  $K1.1$  подключает реле управления  $K2$ , а контакт  $K1.3$  — двигатель  $M$  реле времени. Двигатель начинает вращаться и приводит во вращение диски, которые размыкают контакт  $KT2$ .

Реле  $K2$ , включившись, замыкает свой контакт  $K2.1$  и включает реле гидравлической защиты  $K3$ , которое замыкающим контактом  $K3.1$  включает контактор пускателя заливочного насоса, а замыкающим контактом  $K3.2$  подготавливает цепь для включения контактора главного насоса, так как в этот момент

контакт реле времени *KT5* разомкнут. Через 6 с замыкается контакт *KT5* моторного реле времени в цепи контактора пускателя главного насоса, и двигатель насоса включается.

Через 86 с после пуска двигателя главного насоса контакты *KT3*, *KT4* и *KT6* моторного реле времени разомкнутся. Это приведет к останову мотора реле времени и к отключению двигателя заливочного насоса, а также к отключению реле *K3*. Но реле *K3* остается под током, так как к этому времени наличие воды в водопроводе насоса вызывает замыкание контакта *BV*, который шунтирует разомкнувшийся контакт *KT4*. Если главный насос за 23 с не достигнет номинальной производительности, то контакт не замкнется и двигатель остановится, так как реле *K3* обесточится и разомкнет свой контакт в цепи его контактора. По мере работы насоса уровень воды в водосборнике понижается. При уровне воды ниже уровня электрода *ЭН* реле *K1* обесточивается. Это вызывает отключение и останов двигателя главного насоса, а вновь замкнувшийся контакт *K2.2* включает моторное реле времени *M*. Через 17 с двигатель реле времени остановится, так как размыкается контакт *KT1* и все контакты аппаратуры управления приходят в исходное состояние.

Несостоявшийся запуск насоса вызывает срабатывание аварийного реле *K4*, загорание лампы *EL2* с красным светофильтром и включение сирены *HA*. Оператор снимает звуковой сигнал переключением тумблера *SA1*. Аварийная сигнализация срабатывает также при повышении уровня воды до уровня электрода максимального уровня *ЭМ*.

**4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ**

В угольных шахтах и рудниках для доставки полезного ископаемого из забоя, а также для транспортирования его по сборным штрекам, квершлагам, участковым и капитальным уклонам и бремсбергам, наклонным стволам и штольням в настоящее время широко применяются скребковые и ленточные конвейеры [1, 42].

Скребковые конвейеры являются основным транспортным средством доставки угля из очистного забоя горизонтальных и пологопадающих пластов, а также из забоев подготовительных выработок.

Ленточные конвейеры служат для транспортирования полезного ископаемого по штрекам, бремсбергам, уклонам и наклонным стволам угольных шахт и рудников.

На поверхности шахт и рудников полезное ископаемое транспортируется либо на обогатительную фабрику, либо к погрузочному пункту в железнодорожные вагоны, либо на склад. Для реализации этих операций, а также внутреннего транспорта на обогатительных фабриках широко используются как ленточные, так и пластинчатые конвейеры. Ленточные и скребковые конвейеры служат также неотъемлемой частью проходческих комбайнов и погрузочных машин.

Рост производительности очистных и проходческих комбайнов влечет за собой рост производительности и мощности приводных электродвигателей скребковых и ленточных конвейеров. Так, например, суммарная установленная мощность двигателей комбайна КМ120 составляет 530 кВт, а проходческого комплекса «Союз-19» — 900 кВт, из которых мощность только привода режущего органа составляет 640 кВт, установленная мощность электропривода скребкового конвейера СП-87П, обеспечивающего производительность 600 т/ч, составляет 440 кВт [10]. Растет производительность магистральных ленточных конвейеров, установленная мощность электропривода которых достигает 2000 кВт и более [9].

Возрастающий объем добычи полезных ископаемых, увеличение протяженности горных выработок влияют на условия эксплуатации угледобывающего оборудования и средств транспортирования и требуют их непрерывного совершенствования.

## 4.2. РЕЖИМ И УСЛОВИЯ РАБОТЫ КОНВЕЙЕРНЫХ УСТАНОВОК

Привод ленточного (скребкового) конвейера предназначен для передачи ленте (цепи) тягового усилия, сообщения ей необходимой скорости и обеспечения режимов пуска и останова. Привод ленточного (скребкового) конвейера состоит из электродвигателя, редуктора, муфты и тормоза. В состав привода конвейера может быть введена гидравлическая или электромагнитная муфта. Определение составных элементов привода ленточных (скребковых) конвейеров и выбор системы управления ими должны базироваться на знании: режима работы конвейера; числа приводных барабанов и электродвигателей; месторасположения приводных барабанов; условий работы.

Рассмотрим влияние вышеперечисленных факторов на элементы привода конвейера и системы управления им.

Режим работы конвейера характеризуется:

продолжительной работой в течение значительного промежутка времени, так как загрузка, транспортирование и разгрузка осуществляются непрерывно, без остановок. Это обстоятельство имеет существенное значение при выборе электродвигателя и других элементов электропривода;

редкими пусками и остановами, что объясняется продолжительным режимом работы конвейера. Поэтому продолжительность пуска и торможения не влияют на производительность конвейера. Следовательно, период пуска можно увеличивать по времени, чтобы снизить динамические нагрузки в ленте или в цепи конвейера и тем самым увеличить срок службы;

постоянством направления движения тягового органа конвейера, что обуславливает применение нереверсивной схемы управления электродвигателем;

неравномерностью нагрузки. Это в первую очередь касается скребковых конвейеров, работающих в комплексе с очистными комбайнами или стругами. Из-за передвижного характера работы очистной машины загрузка на забойный конвейер осуществляется не в одной точке, а с постоянным изменением положения места загрузки вдоль конвейера. В связи с этим конвейерный став используется полностью лишь в течение непродолжительного времени, когда комбайн работает в верхней части лавы. Все остальное время цикла конвейер загружен только на некоторой части своей длины. Загрузка сборных конвейеров, установленных на откаточных штреках, бремсбергах и уклонах, зависит не только от неравномерности грузопотоков из лав, но и от места поступления грузопотока на них. В связи с этим конвейер, выбранный по максимальной приемной способности, оказывается в процессе эксплуатации в значительной степени незагруженным;

сравнительно тяжелыми условиями пуска. Тяжелый пуск — это пуск конвейера под нагрузкой, объясняемой наличием

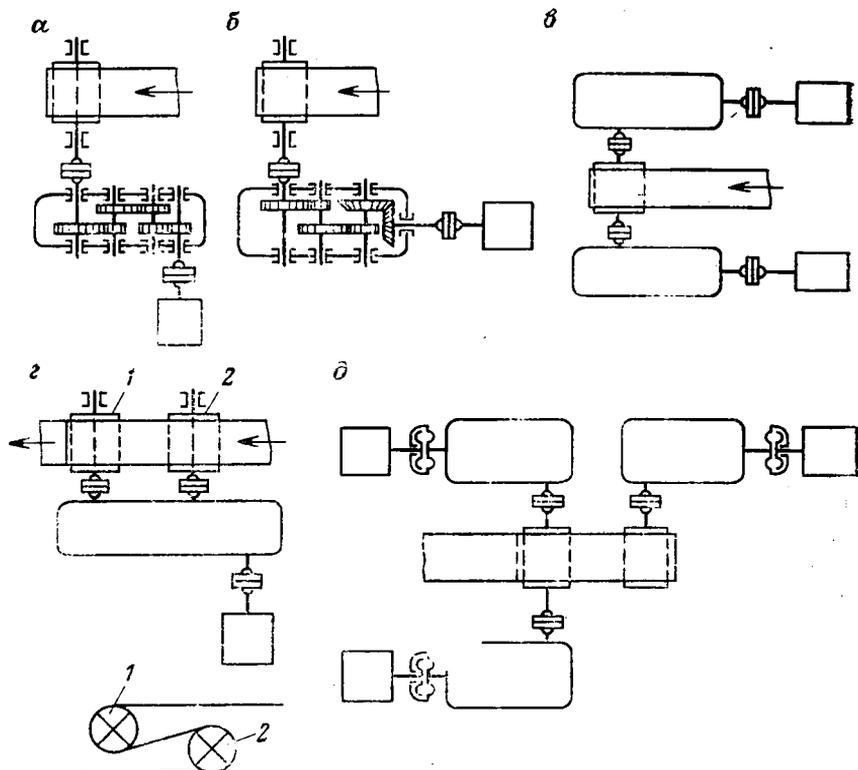


Рис. 4.1. Схемы расположения в приводе ленточного конвейера приводных блоков:

*а* — однобарабанный привод с перпендикулярным расположением двигателя относительно оси конвейера; *б* — то же с параллельным расположением; *в* — однобарабанный двухдвигательный привод; *г* — двухбарабанный однодвигательный привод; *д* — трехдвигательный привод

груза на ленте или ставе скребкового конвейера после аварийной его остановки. Увеличение момента сопротивления в период пуска конвейера вызывается иногда естественной в условиях эксплуатации заштыбовкой скребковой цепи или ленты.

На состав привода конвейера в значительной степени влияет число приводных барабанов. На рис. 4.1, *а* и *б* показан однобарабанный привод с одним двигателем и редуктором. Разница между этими двумя схемами заключается в расположении электродвигателя по отношению к оси конвейера. Параллельное расположение электродвигателя (см. рис. 4.1, *б*) предпочтительнее перпендикулярного (см. рис. 4.1, *а*), так как снижается ширина привода, но появляется необходимость в применении редуктора с менее работоспособной конической парой шестерен. Применение в качестве привода конвейера асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с повышенным пусковым моментом может привести к созданию повышенных динамических

усилий в тяговом органе в период пуска незагруженного конвейера. Поэтому в приводах с асинхронными короткозамкнутыми двигателями для обеспечения плавности пуска ленточного конвейера и защиты цепи скребкового конвейера при резком стопорении между электродвигателем и барабаном или звездочкой устанавливается гидравлическая или электромагнитная муфта. В случае же применения регулируемого электропривода гидро- или электромагнитная муфта может отсутствовать.

Однобарабанный привод конвейера с двумя асинхронными короткозамкнутыми двигателями требует установки гидро- или электромагнитной муфты. Это объясняется необходимостью выравнивания нагрузок на двигателях, вызванной неидентичностью механических характеристик. Однобарабанный привод нашел применение при небольшой требуемой мощности и высоком коэффициенте сцепления ленты с барабаном.

Увеличение длины и производительности конвейеров приводит к увеличению установленной мощности электродвигателей. Применение же двигателей большей мощности невозможно из-за стесненности рабочего места, а применение вместо одного нескольких конвейеров меньшей длины нерационально из-за увеличения пунктов перегрузки полезного ископаемого с конвейера на конвейер. Поэтому наиболее рациональным решением является применение многодвигательного двух- или трехбарабанного привода с различными вариантами расположения двигателей. Возможные схемы расположения двигателей и редукторов в двухбарабанном приводе показаны на рис. 4.1, *з*, *д*. Одноредукторный двухбарабанный привод возможен только со сближенными барабанами. Положительные качества такой системы — компактность, наличие выносного барабана, большой угол обхвата лентой обоих барабанов — обеспечили ей широкое применение на подземных передвижных конвейерах. На рис. 4.1, *д* показан двухбарабанный привод с тремя двигателями и с тремя редукторами. Такая схема расположения оборудования позволяет иметь расставленные приводные барабаны, лента через которые проходит нерабочей, чистой стороной. Это обстоятельство создает возможность передачи большей тяговой силы из-за постоянства коэффициента сцепления ленты с барабаном. Это является отличительной особенностью по сравнению со схемой, показанной на рис. 4.1, *з*, в которой второй приводной барабан 2 находится в более тяжелых условиях, нежели первый приводной барабан 1, так как его огибает лента загрязненной стороной.

Привод ленточного конвейера может быть установлен в головной части конвейера, в хвостовой ее части или в каком-либо промежуточном пункте на холостой ветви. Привод горизонтальных и наклонных конвейеров с подачей вверх полезного ископаемого устанавливается в головной части конвейера у разгрузочного барабана, что обеспечивает лучшую передачу тягового усилия от барабана к ленте (рис. 4.2, *а*, *б*).

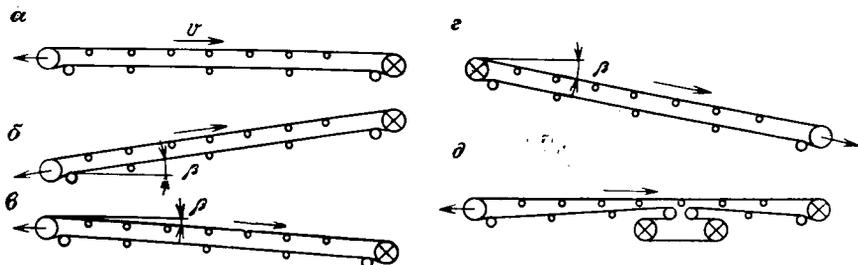


Рис. 4.2. Схемы места установки привода:

*a* — для горизонтального конвейера; *б* — для наклонного конвейера, работающего на подъем груза; *в* — для конвейера, работающего на спуск груза с малым наклоном; *г* — то же с большим наклоном; *д* — многоприводного горизонтального конвейера

Привод наклонного конвейера с транспортированием груза вниз устанавливается внизу при небольшом угле наклона и вверх — при больших углах наклона (см. рис. 4.2, *в*, *г*).

При многобарабанном приводе горизонтальных конвейеров привод располагается как в головной, так и в хвостовой части конвейера. Такое размещение приводов позволяет уменьшить натяжение ленты, а следовательно, увеличить длину конвейера. Наибольший эффект можно получить при трех и более приводных барабанах (см. рис. 4.2, *д*).

Привод скребковых конвейеров, применяемых в подземных горных выработках, может располагаться в головной части конвейера при одной приводной звездочке. При наличии двух приводных звездочек приводы располагаются как в головной, так и в хвостовой части конвейера.

Применение двухбарабанного привода приводит к усложнению и удорожанию механической части конвейера, но уменьшается максимальное натяжение, что влечет за собой снижение прочностных характеристик и уменьшение стоимости тягового органа (ленты, цепи), а следовательно, увеличение длины конвейера при той же предельной прочности.

Окончательно выбор той или иной схемы привода определяется в каждом конкретном случае технико-экономическим расчетом.

Условия, в которых эксплуатируются шахтные конвейеры, характеризуются большой стесненностью рабочего места и его непостоянством, различным наклоном и протяженностью горных выработок, запыленностью и влажностью окружающей среды, химической активностью шахтных вод, механическим воздействием от обрушающихся кусков горных пород, взрывоопасностью рудничной атмосферы, внезапностью выбросов угля и газа.

Конвейеры, установленные на поверхности шахт и рудников или на обогатительных фабриках, не подвержены вышеперечисленным воздействиям и поэтому условия их эксплуатации значительно лучше.

Условия эксплуатации, режимы работы и конструктивные исполнения приводных станций скребковых и ленточных конвейеров формируют следующие требования, предъявляемые к их электроприводам:

использование в качестве электропривода рудничных и взрывозащищенных электродвигателей повышенной надежности под землей и защищенных или нормального исполнения электродвигателей на поверхности. Те же требования предъявляются и к аппаратуре управления электродвигателями;

обеспечение высокой перегрузочной способности при возможно меньших пусковых токах;

обеспечение плавности пуска;

равномерное распределение нагрузки между электродвигателями при многодвигательном электроприводе.

### 4.3. ОДНОДВИГАТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД КОНВЕЙЕРОВ

Основным видом привода конвейеров и питателей в настоящее время служит электропривод переменного тока. Применение асинхронного короткозамкнутого электродвигателя позволяет ликвидировать коллектор, имеющийся у двигателя постоянного тока и щетки — у асинхронного двигателя с фазным ротором, упростить конструкцию, повысить надежность и уменьшить (для одинаковых мощностей) габаритно-весовые показатели электропривода. Особенно это относится к электродвигателям взрывозащищенного исполнения, широко используемым на шахтах, опасных по газу или угольной пыли. Такие двигатели, специально предназначенные для привода конвейеров, имеют высокую перегрузочную способность и высокие пусковые моменты при сравнительно низких пусковых токах [18, 45]. Кратность начальных пусковых моментов  $M_p/M_{ном}$  конвейерных электродвигателей находится в пределах 2,5—3,0, что обеспечивает пуск загруженных конвейеров. Однако наличие слабину скребковой цепи или ленты конвейера и при запуске конвейера вхолостую, резкое приложение повышенного движущего момента могут вызвать значительную динамическую перегрузку в ленте или цепи. Поэтому прямой пуск конвейера возможен лишь для конвейеров малой длины, у которых слабина цепи или ленты незначительна.

Для пуска длинных конвейеров необходимо плавное приложение движущего момента, что позволит снизить перенапряжения в тяговом органе, вызываемые упругими деформациями. С этой целью между двигателем и приводным барабаном устанавливается гидро- или электромагнитная муфта. Применение муфт позволяет не только обеспечить плавный пуск и снижение динамических перегрузок, но и ликвидировать пробуксовку ленты, крайне опасную для ленточных конвейеров.

Рассмотрим принцип действия электропривода конвейера с гидромуфтой. Гидромуфта, расположенная между двигате-

лем и приводным барабаном, состоит из следующих основных частей: корпуса, насосного и турбинного колес. Турбинное колесо, жестко связанное с валом барабана или звездочки, называется ведомой частью. Насосное колесо, жестко связанное с валом двигателя, называется ведущей частью. Приведение в движение ленты конвейера с гидромуфтой производится в следующей последовательности. Сначала запускается электродвигатель включением последнего в электрическую сеть. Затем по мере заполнения жидкостью пространства между насосным и турбинным колесами приходит в движение турбинное колесо, а вместе с ним и тяговый орган конвейера. Следовательно, угловая скорость ведущей части гидромуфты равна угловой скорости ведомой части лишь при отсутствии нагрузки. Наличие же нагрузки вызывает снижение угловой скорости ведомой части. Такое отставание ведомой части от ведущей характеризуется скольжением  $s = (\omega_{\text{вед}} - \omega_{\text{в.ч}}) / \omega_{\text{вед}}$ , где  $\omega_{\text{вед}}$  и  $\omega_{\text{в.ч}}$  — угловая скорость соответственно ведущей и ведомой частей гидромуфты.

Разность угловых скоростей, вызванная скольжением, приводит к потерям мощности, которые идут на нагрев жидкости гидромуфты. Эти потери определяются из выражения  $\Delta P = M \omega_{\text{вед}} s$ , где  $M$  — передаваемый момент.

Таким образом, эти потери пропорциональны как скольжению  $s$ , так и передаваемому моменту  $M$ . При максимальном заполнении жидкостью рабочего пространства угловая скорость ведомой части максимальна  $\omega_{\text{в.ч}}$  и скольжение составляет 1—2 %, а потери мощности незначительны. Увеличение нагрузки или скольжения, вызванное необходимостью снижения скорости ведомой части, может вызвать перегрев муфты из-за увеличения потерь. Как правило, в качестве связующей жидкости используется масло. Поэтому перегрев масла может вызвать его воспламенение, что крайне опасно. Применение же невоспламеняемых масел удорожит установку.

Электропривод с гидромуфтой имеет ряд существенных недостатков:

1. Глубина регулирования скорости электропривода с гидромуфтой ограничена диапазоном 2:1. При более глубоком регулировании не обеспечивается устойчивая работа электропривода из-за мягкости механических характеристик гидромуфты. Глубокое регулирование вызывает чрезмерный перегрев масла, в результате чего оно разлагается и портится.

2. Управление гидромуфтой достаточно сложное. Оно осуществляется изменением количества масла в полости муфты. Заполнение полости муфты маслом или ее освобождение от масла производится специальным насосом.

3. Гидромуфта обладает достаточно большой инерционностью. Так, например, время заполнения маслом при ее включении и откачки масла при ее отключении составляет 2—4 мин.

4. Вязкость масла, а также ее утечка влияют на ее характеристики.

5. Гидромуфты имеют водяное охлаждение и поэтому требуется значительный расход воды и специальный насос.

Поэтому наравне с гидромуфтами в приводе конвейеров применяются электромагнитные муфты скольжения. На рис. 4.3 показана принципиальная схема с электромагнитной муфтой скольжения (ЭМС), которая устанавливается между электродвигателем и рабочим механизмом. Она состоит из двух вращающихся частей, расположенных концентрично относительно друг друга. Обе части муфты, выполненные из малоуглеродистой стали, связаны между собой магнитным потоком. Наружняя часть муфты, связанная с двигателем, называется якорем и выполняется в форме массивного стального цилиндра. Внутренняя часть ЭМС, связанная жестко с валом барабана конвейера, называется индуктором; в нем расположена обмотка возбуждения. Ток в обмотку возбуждения поступает через контактные кольца и щетки от управляемого выпрямителя 4 с системой управления 5. Частота вращения якоря постоянна, а частота вращения индуктора переменна и зависит от значения тока возбуждения. При отсутствии тока в обмотке возбуждения индуктор неподвижен, а вместе с ним остается неподвижным и барабан конвейера. При увеличении тока в обмотке возбуждения увеличивается магнитный поток, который наводит в якоре э. д. с., создающую ток. Последний в свою очередь создает магнитный поток, взаимодействующий с магнитным потоком индуктора и вызывающий вращение ведомого вала (индуктора). Величина вращающего момента зависит от частоты вращения индуктора и от значения тока возбуждения. Количественные зависимости между моментом на валу индуктора и частотой вращения при различных токах возбуждения могут быть получены из рассмотрения векторной диаграммы ЭМС, в которой последняя рассматривается как явно полюсная ненасыщенная синхронная машина [32]. Можно записать следующее уравнение:

$$E_0 s = I_2 r_2 \cos \psi + I_2 X_2 s \sin \psi + E_{ad} s, \quad (4.1)$$

где  $E_0$  — э. д. с. холостого хода;  $I_2$  — ток якоря;  $r_2$ ,  $X_2$  — соответственно активное и индуктивное сопротивление якоря

$$\begin{aligned} \cos \psi &= \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + (X_q s)^2}}; \\ \sin \psi &= \frac{X_q s}{\sqrt{r_2^2 + (X_q s)^2}}; \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$X_q = X_2 + X_{aq}; \quad E_{ad} = I_2 X_{ad} \sin \psi,$$

$X_{ad}$  и  $X_{aq}$  — индуктивные сопротивления реакции якоря соответственно по поперечной и продольной осям.

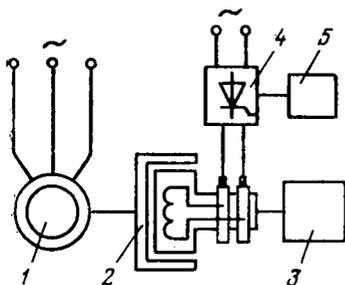


Рис. 4.3. Принципиальная схема электропривода с электромагнитной муфтой скольжения:

1 — электродвигатель; 2 — ЭМС; 3 — барабан (звездочка); 4 — управляемый выпрямитель; 5 — система управления выпрямителем

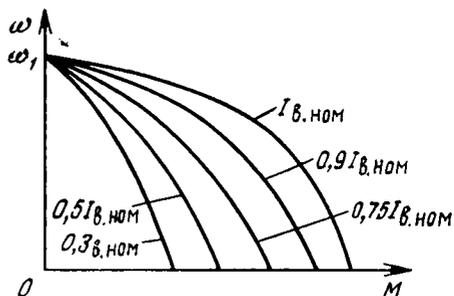


Рис. 4.4. Механические характеристики ЭМС

Подставляя выражения (4.2) в уравнение (4.1), решая его относительно тока якоря, а затем используя выражение для момента двигателя, находят аналитическое выражение механической характеристики ЭМС:

$$M = \frac{mE_0^2 r_2 s [r_2^2 + (X_d s)^2]}{\omega_1 (r_2^2 + X_d X_q s^2)^2}, \quad (4.3)$$

где  $\omega_1$  — угловая скорость ведущей части.

Для насыщенных магнитных полюсов  $E_0 = a I_B$ , где  $a$  — коэффициент пропорциональности;  $I_B$  — ток возбуждения.

По величине потерь в якоре ЭМС подобна асинхронному двигателю:

$$\Delta P = P_{1s} \quad (4.4)$$

или ее к. п. д.

$$\eta = 1 - \Delta P / (P_2 + \Delta P). \quad (4.5)$$

На рис. 4.4 приведены механические характеристики ЭМС при различных токах возбуждения. Из них следует, что плавный разгон барабана или звездочки тягового органа конвейера обеспечивается плавным изменением тока в обмотке возбуждения. Плавный разгон будет сопровождаться плавным приложением движущего момента к ленте или цепи конвейера, что позволит снизить динамические усилия в тяговом органе и повысить срок его службы.

По быстродействию, простоте управления и эксплуатации электромагнитные муфты скольжения превосходят гидромуфты, но имеют серьезный недостаток — высокую стоимость и большие габариты, которые соизмеримы со стоимостью и габаритами приводного асинхронного двигателя.

Рост производительности и длины конвейеров приводит к росту мощности приводных двигателей, а следовательно, применение в системах электропривода промежуточных муфт (гидравлических, электромагнитных и других типов) становится экономически невыгодным. Поэтому в качестве электропривода для таких конвейеров применяется асинхронный двигатель с фазным ротором. Повышение пускового момента в таком приводе достигается введением резисторов в цепь ротора, а плавность — увеличением числа ступеней (от 10 до 24). Увеличение длительности пуска не сказывается на производительности конвейера, но вызывает значительное снижение динамического момента, а следовательно, и динамических усилий в тяговом органе в период пуска и повышает срок его службы.

Обзор технологических схем шахтного конвейерного транспорта и анализ режимов работы отдельных его звеньев позволили установить, что из-за специфических условий конвейеры постоянно недоиспользуются по производительности. Это в первую очередь объясняется неравномерной работой добычных машин.

Для достижения возможно полной загрузки конвейеров при неравномерных грузопотоках возникает необходимость в регулировании их производительности от фактического поступления груза.

Основным параметром для автоматического регулирования производительности конвейеров на транспортных линиях с неравномерным потоком является скорость движения грузонесущего органа.

Так как регулирование скорости обеспечивает равномерную загрузку конвейера, то сопротивления движению практически постоянны. Следовательно, приводы конвейеров должны обеспечивать регулирование скорости движения грузонесущего органа при постоянном моменте на его валу, т. е. при постоянном натяжении независимо от диапазона регулирования скорости.

Одновременно со снижением скорости движения тягового органа, вызванным снижением производительности добычной машины, увеличивается срок ее службы, так как сокращается частота огибания лентой барабанов. Срок службы ленты при этом увеличивается почти пропорционально уменьшению ее скорости. А это особенно важно, так как стоимость ленты конвейера составляет от 40 до 75 % стоимости всей конвейерной установки, в зависимости от длины транспортирования. В равной степени снижается износ и механической части оборудования.

Поэтому в качестве электропривода ленточных конвейеров становится целесообразным применение регулируемого электропривода. Для ленточного конвейера может быть использован электропривод переменного тока на базе асинхронного двигателя с фазным ротором по системе асинхронного вентильного каскада (АВК). Исходя из принципа работы системы

АВК, напряжение ротора на выходе выпрямителя уравнивается напряжением инвертора и падением напряжения в цепи постоянного тока. Тогда выпрямленный ток в роторной цепи

$$I_d = \frac{E_{d0}s - E_{d0n} \cos \beta - \Delta U}{R_s}, \quad (4.6)$$

где  $E_{d0} = 1,35 E_{2\text{ном}}$ ;  $E_{2\text{ном}}$  — э. д. с. ротора линейная;  $E_{d0n}$  — э. д. с. холостого хода инвертора при  $\beta = 0$ ;  $\Delta U$  — суммарное падение напряжения в вентилях роторной и инверторной групп преобразователей;  $R_s$  — эквивалентное сопротивление, приведенное к роторной цепи,

$$R_s = \frac{3X_{двс}}{\pi} + \frac{3X_{тр}}{\pi} + 2r_2 + r_{с.д} + 2r_{тр},$$

$X_{тр}$ ;  $r_{тр}$  — соответственно индуктивное и активное сопротивление фазы трансформатора, приведенные к цепи выпрямленного тока;  $r_{с.д}$  — активное сопротивление сглаживающего дросселя.

Выражение для угловой скорости двигателя находится из уравнения (4.6) заменой скольжения на угловую скорость:

$$\omega = \omega_0 \left[ \left( 1 - \frac{I_d R_s}{E_{d0}} \right) - \frac{E_{dн} \cos \beta}{E_{d0}} \right]. \quad (4.7)$$

Из выражения (4.7) следует, что при заданной нагрузке на валу двигателя для изменения скорости привода достаточно изменить величину э. д. с. инвертора, т. е. достаточно изменить угол регулирования тиристорами инвертора  $\beta$ .

В режиме холостого хода, когда  $I_d$  равен нулю, каждому значению  $E_{d0н} = \cos \beta$  соответствует фиктивная скорость идеального холостого хода каскада:

$$\omega_{0к} = \omega_0 \left( 1 - \frac{E_{d0н} \cos \beta}{E_{d0}} \right). \quad (4.8)$$

Построение механических характеристик асинхронного вентильного каскада ведется по данным, рассчитанным по нижеприведенным формулам [34]:

$$M = \frac{6E_{2\text{ном}}^2}{\pi\omega_0 X_d} \left\{ \frac{s - s_0}{s(1+q) + \rho} - \left[ \frac{s - s_0}{s(1+q) + \rho} \right]^2 \right\}; \quad (4.9)$$

$$M = \frac{3\sqrt{3} E_{2\text{ном}}^2}{\pi\omega_0 X_d} \left\{ \frac{s - s_0}{s(1+q) + \rho} \sqrt{1 - 4 \left[ \frac{s - s_0}{s(1+q) + \rho} \right]^2} \right\}. \quad (4.10)$$

По формуле (4.9) рассчитывается механическая характеристика системы АВК при работе роторного выпрямителя в первом режиме, характеризующемся углом коммутации вентилях  $\gamma = 60$  эл. градусов, а по формуле (4.10) — для режима работы роторного выпрямителя во втором режиме, характеризующемся

появлением угла естественного запаздывания открывания тиристорov (диодов).

В формулах (4.9) и (4.10) приняты следующие условные обозначения:  $\omega_0$  — синхронная угловая скорость асинхронного двигателя;  $s$  — текущее скольжение;  $s_0$  — скольжение холостого хода

$$s_0 = \xi \cos \beta + \lambda, \quad (4.11)$$

$\beta$  — угол управления тиристорами;

$$\xi = \frac{k_{в.н} E_{2\text{тр}}}{1,35 E_{2\text{ном}}}; \quad \lambda = \frac{\Delta U}{1,35 E_{2\text{ном}}},$$

$k_{в.н}$  — коэффициент, зависящий от схемы соединения тиристорov инвертора (для трехфазной нулевой схемы и для шестифазной схемы с уравнительным реактором  $k_{в.н} = 1,17$ ; для трехфазной мостовой схемы  $k_{в.н} = 2,34$ ),  $E_{2\text{тр}}$  — фазная э. д. с. вторичной обмотки трансформатора инвертора; 1,35 — коэффициент схемы выпрямления для трехфазной мостовой;

$$\rho = \frac{X_{\text{тр}}}{X_{\text{д}}} + \frac{2\pi r_2}{3X_{\text{д}}} + \frac{2\pi r_{\text{тр}}}{3X_{\text{д}}} + \frac{\pi r_{\text{с.д}}}{3X_{\text{д}}}; \quad (4.12)$$

$$q = \frac{2\pi r_1'}{3X_{\text{д}}}, \quad (4.13)$$

$X_{\text{д}}$  — индуктивное сопротивление фазы асинхронного двигателя, приведенное к цепи ротора;  $r_2$  и  $r_{\text{тр}}$  — активные сопротивления фазы соответственно ротора и трансформатора;  $r_1'$  — активное сопротивление фазы статора асинхронного двигателя, приведенное к цепи ротора.

Необходимые для расчета параметры асинхронного двигателя и согласующего трансформатора находят из следующих выражений:

$$X_{\text{д}} = \frac{E_{2\text{ном}}^2}{\omega_0 \lambda M_{\text{ном}}}. \quad (4.14)$$

где  $\lambda$  — перегрузочная способность двигателя;  $M_{\text{ном}}$  — номинальный момент двигателя, Н·м;  $E_{2\text{ном}}$  — номинальная линейная э. д. с. ротора двигателя;

$$r_1' = \frac{U_{1\text{ном}} s_{\text{ном}}}{\sqrt{3} I_{1\text{ном}} k_{\text{тр}}^2}, \quad (4.15)$$

где  $U_{1\text{ном}}$  — номинальное линейное напряжение статора двигателя;  $k_{\text{тр}} = 0,9 U_{1\text{ном}} / E_{2\text{ном}}$  — коэффициент трансформации двигателя;

$$r_2 = \frac{105 M_{\text{ном}} s_{\text{ном}}}{I_{2\text{ном}}^2 p}, \quad (4.16)$$

где  $s_{\text{ном}}$  — номинальное скольжение двигателя;  $I_{2\text{ном}}$  — номинальный ток ротора;  $p$  — число пар полюсов.

Для трансформаторов с одной группой вторичных обмоток

$$r_{\text{тр}} = \frac{\Delta P_{\text{к.з}}}{3I_2^2 \text{ ном. тр}}, \quad (4.17)$$

где  $\Delta P_{\text{к.з}}$  — потери короткого замыкания трансформатора, Вт;  $I_2 \text{ ном. тр}$  — номинальный ток вторичной обмотки трансформатора.

$$Z_{\text{тр}} = \frac{E_2 \text{ ном. тр} e_{\text{к.з}}}{100I_2 \text{ ном. тр}}, \quad (4.18)$$

где  $E_2 \text{ ном. тр}$  — фазная номинальная э. д. с. вторичной обмотки трансформатора;  $e_{\text{к.з}}$  — напряжение короткого замыкания трансформатора, %.

$$X_{\text{тр}} = \sqrt{Z_{\text{тр}}^2 - r_{\text{тр}}^2}. \quad (4.19)$$

Для трансформаторов со схемой вторичных обмоток две обратные звезды

$$\left. \begin{aligned} r_{\text{тр}} &= \frac{\Delta P_{\text{к.з}}}{6I_2^2 \text{ ном. тр}}; \\ X_{\text{тр}} &= 0,0244 \frac{E_2 \text{ ном. тр} e_{\text{к.з}}}{I_{2\text{дном}}} \end{aligned} \right\} \quad (4.20)$$

где  $I_{2\text{дном}}$  — номинальный выпрямленный ток трансформатора.

Механические характеристики АВК, рассчитанные по формулам (4.9) и (4.10) при различных углах  $\beta$  приведены на рис. 4.5. Анализ механических характеристик системы АВК показывает, что жесткость механических характеристик во всем диапазоне регулирования скорости привода достаточно высока, правда, несколько меньше жесткости естественной характеристики  $I$ , но не уступает жесткости механических характеристик электропривода по системе генератор — двигатель (Г—Д). Максимальная угловая скорость, имеющая место в режиме холостого хода, определяется из выражения

$$\omega_{\text{max}} = \omega_0 \left( 1 - \frac{\Delta U}{1,35E_2 \text{ ном}} \right). \quad (4.21)$$

Минимальная угловая скорость, а следовательно, и диапазон регулирования определяется значением вторичного напряжения трансформатора:

$$\omega_{\text{min}} = \omega_0 \left( 1 - \frac{k_{\text{в.и}} E_2 \text{ ном. тр} 0,965}{1,35E_2 \text{ ном}} \right), \quad (4.22)$$

где угол регулирования инвертором  $\beta$  принят равным 15 эл. градусов во избежание прорыва инвертора.

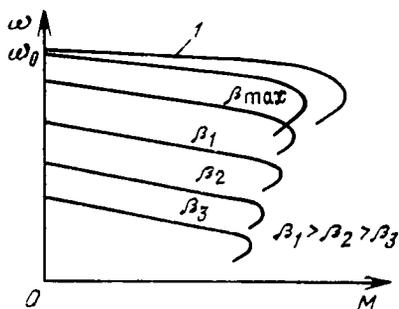


Рис. 4.5. Механические характеристики АВК

#### 4.4. МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД КОНВЕЙЕРОВ

Электроприводы шахтных ленточных и скребковых конвейеров из-за определенных особенностей и условий их работы в зависимости от типа, назначения и производительности конвейера выполняются как однодвигательными, так и многодвигательными. Число электродвигателей в одном приводе может достигать пяти.

В этом случае результирующая механическая характеристика многодвигательного электропривода получается суммированием характеристик отдельных электродвигателей. Однако следует иметь в виду, что даже при одинаковых паспортных данных электродвигатели будут иметь разные параметры. Последнее обстоятельство будет служить причиной неравномерного распределения нагрузки между двигателями. Согласно ГОСТ 183—74 для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором допускается отклонение номинальных скольжений в пределах  $\pm 20\%$ .

Рассмотрим двухдвигательный привод конвейера, состоящий из двух асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, имеющих жесткую связь между собой. Рабочие части механических характеристик показаны на рис. 4.6 отрезками прямых  $OA$  и  $OB$ . Неодинаковость номинальных скольжений электродвигателей приводит к тому, что при совместной их работе при номинальном моменте общее скольжение, с которым будут работать электродвигатели, находится между номинальными скольжениями электродвигателей  $s_{ном1} < s < s_{ном2}$ . Следовательно, согласно рис. 4.6, один из двигателей со скольжением  $s_{ном1}$  будет перегружен, а двигатель со скольжением  $s_{ном2}$  — недогружен. Распределение моментов двигателей подчиняется следующим выражениям:

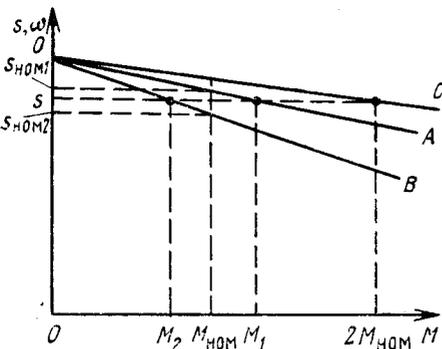


Рис. 4.6. Распределение нагрузки между двумя механически связанными асинхронными двигателями с неодинаковыми значениями номинального скольжения

$$M_1 = 2M_{ном}s_{ном2} / (s_{ном1} + s_{ном2}); \quad (4.23)$$

$$M_2 = 2M_{ном}s_{ном1} / (s_{ном1} + s_{ном2});$$

или взяв отношение моментов, получим

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{s_{ном2}}{s_{ном1}}, \quad (4.24)$$

т. е. совместная работа двух двигателей с неодинаковым наклоном механических характеристик вызывает распределение нагрузки на оба двигателя обратно пропорционально их номинальным скольже-

ниям. В самом худшем случае, когда номинальные скольжения отличаются на 40 %, первый двигатель будет перегружен:

$$M_1 = 2M_{\text{ном}1} s_{\text{ном}1} / (s_{\text{ном}1} + 1,4s_{\text{ном}1}) = 1,16M_{\text{ном}1}$$

а второй — недогружен:

$$M_2 = 2M_{\text{ном}2} s_{\text{ном}2} / (s_{\text{ном}1} + 1,4s_{\text{ном}1}) = 0,84M_{\text{ном}2}$$

Результирующая механическая характеристика представляет собой прямую  $OC$  со скольжением:

$$s = 2s_{\text{ном}1}s_{\text{ном}2} / (s_{\text{ном}1} + s_{\text{ном}2}) = 2s_{\text{ном}1}1,4s_{\text{ном}1} / (s_{\text{ном}1} + 1,4s_{\text{ном}1}) = 1,16s_{\text{ном}1}$$

В реальной шахтной сети напряжение на зажимах двигателя всегда ниже номинального. Следовательно, наклон механических характеристик двигателей еще больше увеличивается и приводит к еще большей перегрузке одного и недогрузке другого двигателя. Длительная эксплуатация такой системы невозможна, так как может привести к выходу из строя перегруженного электродвигателя. Поэтому решение проблемы выравнивания нагрузок между асинхронными короткозамкнутыми двигателями, работающими на один вал, — задача первостепенной важности. С этой целью могут быть применены различные устройства (гидро-, электромагнитные муфты, хотя последние сами по себе могут быть причиной неравномерного распределения нагрузок между приводными электродвигателями из-за изменения объема жидкости, заполняющей рабочую полость гидромуфты или колебания напряжения в ЭМС).

В случае применения в качестве электропривода асинхронных двигателей с фазным ротором выравнивание нагрузок между двигателями осуществляется введением невыключаемого резистора в цепь ротора электродвигателя, имеющего меньшее значение номинального скольжения. Такая схема не решает проблемы плавности пуска конвейера. Поэтому в последнее время появились тиристорные схемы управления асинхронными двигателями как с фазным, так и с короткозамкнутым ротором. Такие схемы позволяют автоматически изменять жесткость механических характеристик, поддерживая тем самым равномерную загрузку каждого из приводных двигателей. На рис. 4.7, а приведена схема импульсного регулирования частоты вращения асинхронного двигателя с фазным ротором. Регулирование жесткости механической характеристики в данной схеме производится изменением сопротивления в цепи выпрямленного тока импульсным методом. Этот метод заключается в следующем. В цепь ротора асинхронного двигателя включается неуправляемый выпрямитель, собранный по трехфазной мостовой схеме, выпрямленное напряжение которого подается на резистор  $R_d$  через дроссель  $L$ . Параллельно этому резистору включен тиристорный коммутатор, состоящий из двух тиристорov  $VS1$  и  $VS2$ , двух диодов  $VD1$  и  $VD2$ ,

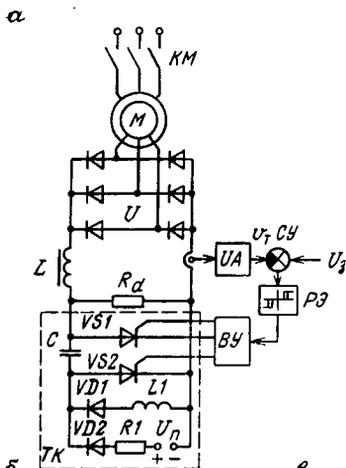
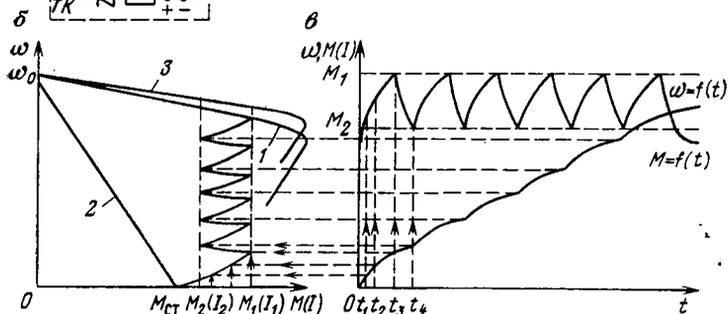


Рис. 4.7. Принципиальная схема (а), статические (б) и динамические (в) характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором при импульсном регулировании



резистора  $R_1$ , индуктивности  $L_1$  и источника питания  $U_{\text{п}}$ . Основной тиристор  $VS_1$  работает в импульсном режиме. Поэтому для создания искусственной коммутации создана цепочка, состоящая из вспомогательного тиристора  $VS_2$ , конденсатора  $C$ , диода  $VD_1$  и индуктивности  $L_1$ . Заряд конденсатора  $C$  при длительно открытом  $VS_1$  осуществляется через диод  $VD_2$  и сопротивление  $R_1$  от постоянного источника  $U_{\text{п}}$ . Тиристорный коммутатор  $TK$  позволяет изменять скважность широтно-импульсной модуляции  $\gamma = t_3/T_{\text{к}}$ , а следовательно, влиять на среднее значение дополнительного сопротивления  $R_d$  согласно выражению

$$R_{d \text{ ср}} = R_d(1 - t_3/T_{\text{к}}) = R_d(1 - \gamma), \quad (4.25)$$

где  $t_3$  — время включенного состояния тиристора  $VS_1$ ;  $t_3 + t_0 = T_{\text{к}}$  — время цикла коммутации;  $t_0$  — время закрытого состояния тиристора  $VS_1$ .

Таким образом, регулируя скважность  $\gamma$ , можно получить семейство механических характеристик, изображенных на рис. 4.7, б. Характеристика 1 соответствует открытому состоянию тиристора  $VS_1$ , а характеристика 2 — закрытому его состоянию. Возможность плавного изменения жесткости механи-

ческой характеристики, подбором соответствующей скважности добиваются равномерного распределения нагрузки между двигателями в многодвигательном электроприводе. Все искусственные характеристики лежат ниже естественной 3.

Схема управления асинхронным двигателем с тиристорным коммутатором в роторе позволяет обеспечивать постоянство тока, а следовательно, и момента в переходных режимах. В период пуска, например, в цепи ротора выбирается такое сопротивление резистора  $R_d$ , которое при неподвижном состоянии двигателя и полностью закрытом тиристоре  $VS1$  создает момент меньший или равный моменту сопротивления  $M_{ст}$ . В этом случае при подаче напряжения на обмотки статора двигатель развивает момент, недостаточный для движения тягового органа, но достаточный для того, чтобы привести ленту в натянутое состояние, т. е. выбрать ее провисание. В дальнейшем разгон двигателя идет с постоянным ускорением, что достигается введением обратной связи по току двигателя. Эта связь реализуется с помощью датчика тока  $UA$ , сигнал с которого  $U_T$ , пропорциональный выпрямленному току ротора  $I_d$ , подается на суммирующее устройство  $CY$ , где он сравнивается с сигналом задания  $U_3$  и их разность подается на релейный элемент  $PЭ$ , а через выходной усилитель  $BY$  — на электроды тиристоров  $VS1$  и  $VS2$ . В период пуска двигателя выпрямленный ток ротора колеблется между двумя значениями, равными  $I_{d1}$  и  $I_{d2}$ , пропорциональными моментам  $M_1$  и  $M_2$ . Если выпрямленный ток  $I_d$  достигает значения  $I_{d1}$ , то релейный элемент срабатывает и падаёт управляющий импульс на открытие тиристора  $VS2$ . При снижении выпрямленного тока до значения  $I_{d2}$  релейный элемент возвращается в исходное положение, вырабатывая управляющий импульс на открытие тиристора  $VS1$ . Ток в роторе снова начинает возрастать до тех пор, пока вновь не сработает  $PЭ$  и не откроется тиристор  $VS2$  и т. д. Характер изменения момента двигателя в период его пуска показан на рис. 4.7, в. Для изменения значения момента двигателя достаточно изменить величину задающего напряжения  $U_3$ .

Пусть в первом случае тиристор  $VS2$  открывается в момент, когда  $\Delta U_T \geq U_{31} - U_{T1}$ ;  $U_{T1} = I_{d1} R_{ш}$ , а тиристор  $VS1$  — в момент, когда  $\Delta U_T \leq U_{31} - U_{T2}$ ;  $U_{T2} = I_{d2} R_{ш}$ , где  $R_{ш}$  — сопротивление шунта. Тогда при увеличении задающего напряжения до значения  $U_{32} > U_{31}$  потребуются соответственное увеличение напряжения обратной связи  $U_T$  до величины, которая должна сохранить разность напряжений неизменной:

$$U_{31} - U_{T1} = U_{32} - U_{T1} = \text{const.}$$

Следовательно, токи ротора, при которых будет происходить срабатывание релейного элемента  $PЭ$ , возрастут и возрастет средний пусковой момент двигателя.

В электроприводе ленточного конвейера с асинхронным короткозамкнутым двигателем импульсное регулирование тока

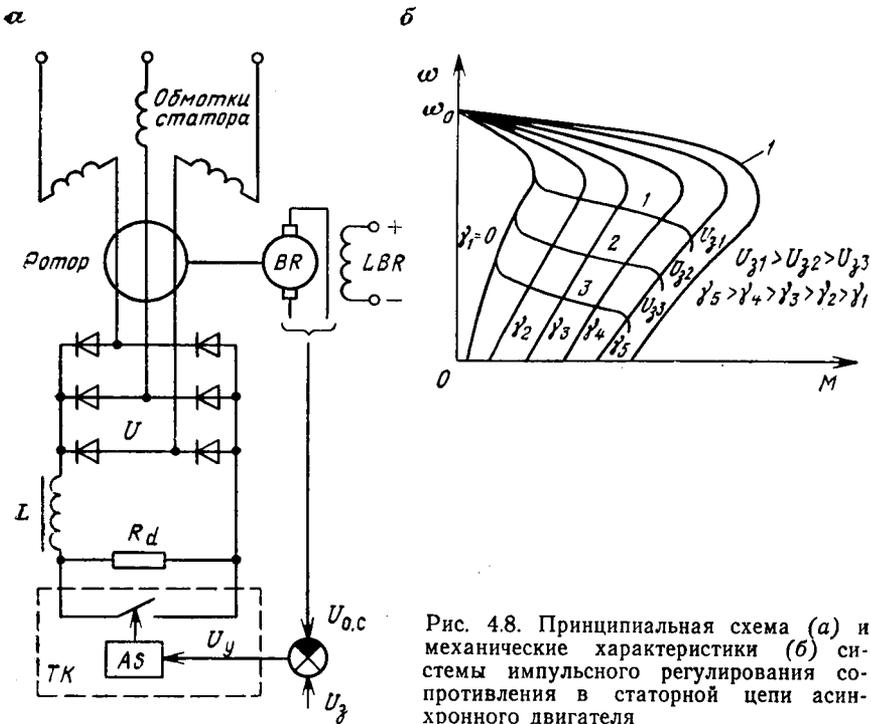


Рис. 4.8. Принципиальная схема (а) и механические характеристики (б) системы импульсного регулирования сопротивления в статорной цепи асинхронного двигателя

возможно лишь в статорной цепи. На рис. 4.8, а приведена принципиальная схема импульсного регулятора в статорной цепи. Изменение величины добавочного сопротивления  $R_d$  за счет продолжительности его включения позволяет регулировать подводимое к статору двигателя напряжение. Это реализуется тиристорным коммутатором  $TK$ . Механические характеристики для такого способа регулирования при различных значениях скважности  $\gamma$  приведены на рис. 4.8, б. Анализ механических характеристик показывает, что с изменением скважности перегрузочная способность двигателя снижается. Поэтому полученные механические характеристик необходимы жесткости требует введения обратной связи по скорости. Механические характеристики в этом случае имеют форму, представленную сплошными линиями 1, 2, 3, полученными при различных значениях задающего напряжения  $U_z$ . При отсутствии необходимости в регулировании частоты вращения асинхронного двигателя тиристорный коммутатор с его системой управления  $AS$  шунтируется и двигатель работает на естественной характеристике 1.

Импульсный метод управления асинхронным двигателем является наиболее простым и легко реализуемым. Однако этот метод обладает рядом существенных недостатков. При таком

способе регулирования имеет место непрерывное протекание переходных процессов и связанное с этим протекание по обмоткам двигателя свободных составляющих переходных токов, обуславливающих нагрев двигателя и появление знакопеременных ударных моментов, ухудшающих качество переходного процесса при пуске конвейера.

Из параметрических методов управления асинхронным двигателем наилучшими показателями обладает метод фазового управления. При таком методе воздействуют на величину приложенного к приводному двигателю напряжения изменением угла регулирования тиристорами по отношению к синусоиде питающего напряжения. Использование тиристоров для коммутации статорных цепей асинхронного двигателя позволяет значительно снизить и полностью подавить знакопеременные ударные моменты при пуске двигателя с короткозамкнутым ротором двумя основными методами:

1. Детерминированным фазированием, т. е. поочередным включением статорных обмоток двигателя на сеть в моменты времени, соответствующие определенной фазе питающего напряжения, что исключает появление аperiodических составляющих пускового тока и позволяет получить динамическую механическую характеристику, близкую к статической.

2. Плавным увеличением по линейному или экспоненциальному закону напряжения, подводимого к двигателю. Полное время нарастания питающего напряжения при этом должно быть не менее времени затухания аperiodической составляющей тока, т. е.

$$t_{п.н} \geq \frac{4X_k}{\omega_0 r_k},$$

где  $t_{п.н}$  — время нарастания питающего напряжения;  $X_k$ ,  $r_k$  — параметры короткого замыкания схемы замещения асинхронного двигателя;  $\omega_0$  — угловая частота сети.

Подавление знакопеременных ударных моментов в значительной степени увеличивает плавность пуска, а следовательно, долговечность и надежность работы как электропривода, так и тягового органа.

Выравнивание загрузки двигателей, работающих на один вал, за счет введения добавочного сопротивления в цепь ротора или статора приводит к дополнительным потерям, а следовательно, к снижению к. п. д. двигателя. Одновременно снижается и частота вращения двигателя, вызывая снижение производительности конвейера. Снижение частоты вращения двигателя приводит к необходимости завышения его установленной мощности примерно в  $1/(1-s)$  раз.

Методика расчета механических характеристик в схеме с импульсным регулированием в выпрямленной цепи ротора асинхронного двигателя рассмотрена в [19, 34].

Аналитическое выражение механической характеристики асинхронного двигателя с импульсным регулированием в цепи выпрямленного тока ротора описывается выражением [19]

$$M = \frac{\left( E_{d0} - \frac{3X_{дв}}{\pi} I_d \right) I_d}{\omega_0}, \quad (4.26)$$

в котором  $E_{d0} = \sqrt{2} E_{2 \text{ ном}} \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} = 1,35 E_{2 \text{ ном}}$  — для трехфазной мостовой схемы выпрямления напряжения ротора;

$$I_d = \left[ \gamma + \beta(1-\gamma) + (1-\beta) \frac{\beta_1 - \beta_2}{\beta_1 \beta_2} k_1 \right] I_3; \quad (4.27)$$

$$\beta = \beta_1 / \beta_2 = R_1 / (R_1 + R_2);$$

$$k_1 = \frac{(1 - e^{-\beta_1 \gamma}) [1 - e^{-\beta_2 (1-\gamma)}]}{1 - e^{-\Phi}}$$

$$I_3 = (E_{d0} s - \Delta U) / R_1; \quad I_4 = (E_{d0} s - \Delta U) / R_2; \quad I_4 / I_3 = \beta_1 / \beta_2,$$

где  $\beta_1 = T / T_1$ ;  $\beta_2 = T / T_2$  — периоды коммутации соответственно в первом и во втором интервалах времени в относительных единицах;  $R_1 = R_a + R_{др}$  — суммарное сопротивление в первый интервал времени;  $R_2 = R_1 + R_{др}$  — суммарное сопротивление во втором интервале времени;

$$R_3 = 1,75 R_{дв} + \frac{3}{\pi} X_{дв} s;$$

$\frac{3}{\pi} X_{дв} s$  — сопротивление, учитывающее снижение выпрямленного напряжения вследствие явления перекрытия вентилей;  $X_{дв}$ ;  $R_{дв}$  — соответственно приведенные к цепи ротора индуктивное и активное сопротивления фазы асинхронного двигателя при скольжении  $s=1$ . При соединении обмоток статора и ротора асинхронного двигателя в звезду

$$X_{дв} = X_1' + X_2 = \frac{X_1}{k_e^2} + X_2;$$

$$R_{дв} = R_1' + R_2 = \frac{R_1}{k_e^2} + R_2,$$

$k_e$  — коэффициент трансформации двигателя;  $L_{др}$ ;  $R_{др}$  — соответственно индуктивность и активное сопротивление сглаживающего дросселя;  $T_1 = L / R_1$ ;  $T_2 = L / R_2$  — электромагнитные постоянные времени соответственно в первом и во втором интервалах периода коммутации;  $L = L_a + L_{др}$  — суммарная индуктивность цепи;  $L_a \approx 1,5 X_{дв} / (2\pi f_1)$  — эквивалентная индуктивность асинхронного двигателя;  $f_1$  — частота питающего напря-

жения;  $I_3$  и  $I_4$  — соответственно максимальное ( $\gamma=1$ ) и минимальное ( $\gamma=0$ ) значения токов в цепи постоянного тока;

$$\varphi = \beta_1 \gamma + \beta_2 (1 - \gamma);$$

$\Delta U$  — падение напряжения в вентилях.

#### 4.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ КОНВЕЙЕРА

Так как конвейер основную часть времени работает с установившейся скоростью, то движущее усилие, создаваемое двигателем, уравнивается усилием, идущим на преодоление сил трения, действующих между тяговым органом (лента, цепь) и поддерживающих устройств (ролики, канаты и т. п.). На наклонных участках конвейера возникает дополнительная активная сила, обусловленная составляющей силы веса перемещаемого груза, которая препятствует или способствует движению. Масса и конструкция тягового органа также участвует в создании статической нагрузки. Поэтому мощность электродвигателя приводного барабана определяется исходя из усилия тягового  $F$  и установившейся скорости движения тягового органа  $v$ :

$$P = k_3 \frac{Fv}{\eta_n} 10^{-3}, \quad (4.28)$$

где  $k_3 = 1,1 \div 1,25$  — коэффициент запаса, учитывающий неточности расчета сил сопротивления;  $\eta_n$  — к. п. д. передачи (редуктора).

Тяговое усилие находится из диаграммы усилий, действующих в тяговом органе конвейера. Для наглядности эту диаграмму строят на контуре конвейера, т. е. вдоль тягового органа. Сказанное иллюстрируется диаграммой усилий в тяговом органе одноприводного конвейера с горизонтальной трассой (рис. 4.9). Согласно диаграмме усилий двигателю приходится преодолевать силу  $F = F_{нб} - F_{сб}$ , где  $F_{нб}$ ,  $F_{сб}$  — усилия соответственно на набегающем и на сбегающем участке приводного барабана (ПБ).

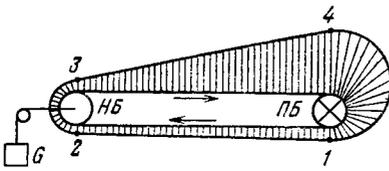
Усилие на сбегающей ветви тягового органа создается натяжным барабаном  $НБ$ .

Скорость движения ленты выбирается в зависимости от производительности конвейера, ее ширины и рода груза.

Скорость движения цепи скребкового конвейера определяется скоростью ведущей звездочки и, как правило, не превышает 2 м/с.

Для построения диаграммы усилий выделяют несколько характерных точек: точка 1 соответствует усилию сбегающей с приводного барабана ветви  $F_{сб}$ ; точка 2 соответствует усилию набегающей ветви на приводной барабан и определяется как сумма усилий в точке 1 плюс усилие, идущее на преодоление

Рис. 4.9. Диаграмма усилий тягового органа конвейера



сил сопротивления порожняковой ветви  $F_{п.в}$ ; точка 3 соответствует усилию на сбегающей ветви натяжного барабана, которое определяется как сумма усилий на сбегающей ветви и усилия, идущего на преодоление сопротивления на барабане, и наконец, усилие в точке 4 соответствует усилию в точке 3 плюс усилие, идущее на преодоление сил сопротивления груженой ветви конвейера. Определение этих усилий и построение ее диаграммы производится в следующей последовательности: определяется величина усилия, создаваемого силами сопротивления порожней ветви конвейера

$$F_{п.в} = (q_l + q_p'') L \omega, \quad (4.29)$$

где  $q_l$  — вес, приходится на 1 м ленты;  $q_p''$  — вес вращающихся частей роликов на порожней ветви, приходящийся на 1 м ленты;  $L$  — длина горизонтального участка конвейера, м;  $\omega$  — коэффициент сопротивления движению.

Следовательно, усилие в точке 2

$$F_2 = F_1 + F_{п.в}. \quad (4.30)$$

Далее определяется усилие на сбегающей с натяжного барабана ветви:

$$F_3 = F_2 k, \quad (4.31)$$

где  $k$  — коэффициент, зависящий от угла обхвата лентой барабана. Последний принимается в зависимости от угла обхвата барабана лентой:

|                   |           |           |           |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|
| $\alpha$ , градус | 180       | 90        | <90       |
| $k$               | 1,03—1,04 | 1,02—1,03 | 1,01—1,02 |

Наибольшее усилие в точке 4

$$F_4 = F_3 + F_{г.в}, \quad (4.32)$$

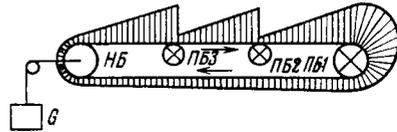
где  $F_{г.в} = (q + q_l + q_p')$   $L \omega$  — сила сопротивления движению груженой ветви конвейера;  $q$  — вес груза, приходящийся на 1 м ленты, Н;  $q_p'$  — вес вращающихся частей роликов на груженой ветви, приходящийся на 1 м ленты, Н.

И наконец, учитывая уравнение Л. Эйлера, можно записать обязательное условие, исключающее проскальзывание ленты относительно барабана  $F_{нб} = F_{сб} e^{\mu \alpha}$  или в нашем случае

$$F_4 = F_1 e^{\mu \alpha}, \quad (4.33)$$

где  $\mu$  — коэффициент сцепления между лентой и барабаном;  $\alpha$  — угол обхвата барабана лентой, градус.

Рис. 4.10. Диаграмма усилий в многодвигательном конвейере



Определив величину  $F_1$ , последовательным обходом по контуру конвейера находят усилия во всех характерных точках. Разность усилий  $F_4 - F_1$  называется тяговой силой и подставляется в формулу для определения мощности приводного двигателя. Усилие в натяжном барабане  $F_{нб}$  определяется как сумма усилий, действующих на него в точках 2 и 3.

Аналогично строится диаграмма усилий для конвейеров сложного профиля, обеспечивающих подъем или спуск груза.

В одноприводном конвейере электродвигатель располагается в месте наибольшего усилия. Величина этого усилия зависит как от производительности конвейера, так и от его длины. Для конвейеров большой протяженности становится нецелесообразным применение одной приводной станции, так как возрастает усилие на приводном барабане и требуется увеличение толщины ленты, а следовательно, возрастает ее стоимость. Поэтому становится целесообразным применение многоприводных конвейеров с равномерным распределением приводных станций вдоль конвейера (рис. 4.10). Это позволяет в значительной степени снизить максимальное усилие и применить ленту меньшей толщины. Однако увеличение числа приводных станций вызывает увеличение числа мест перегрузок и усложнение конструкции конвейера. Поэтому более целесообразным оказывается применение конвейеров длиной 1000—1500 м с одной приводной станцией [9, 42].

На конвейерах большой длины и производительности устанавливается двухбарабанный привод. Это объясняется необходимостью увеличения тягового усилия. Согласно формуле Л. Эйлера, наибольшая тяговая сила, которая может быть передана барабаном при заданных  $\alpha$  и  $\mu$ , равна разности наибольшего натяжения на набегающей и сбегавшей ветвях:

$$F_{\max} = F_{нб \max} - F_{сб} = F_{нб \max} \frac{e^{\mu\alpha} - 1}{e^{\mu\alpha}} = F_{сб} (e^{\mu\alpha} - 1). \quad (4.34)$$

Из выражения (4.34) следует, что сила натяжения на набегающей ветви  $F_{нб}$  всегда больше тяговой силы  $F$ , но разность между ними, т. е.  $F_{сб}$ , тем меньше, чем больше  $e^{\mu\alpha}$ , а следовательно, чем больше  $\mu$  и  $\alpha$ . Сила  $F_{нб}$  является наибольшей тяговой силой, которая определяет поперечные размеры тягового органа. Поэтому для достижения возможно меньшего соотношения  $F_{нб}/F$  на длинных конвейерах применяются двухбарабанные, а в отдельных случаях трехбарабанные приводы. В двухбарабанном приводе общий расчетный угол обхвата считается равным сумме углов обхвата на обоих барабанах, т. е.

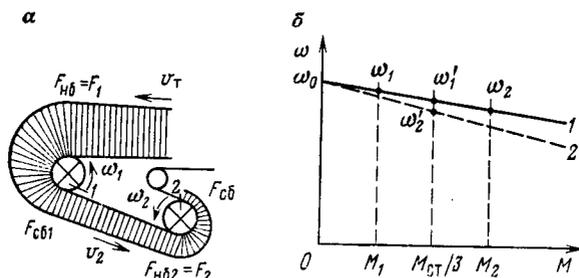


Рис. 4.11. Кинематическая схема с диаграммой усилий двухбарабанной приводной станции (а) и механические характеристики привода (б)

$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$ . В приводе с отдельными двигателями (рис. 4.11, а) при полном использовании тяговой силы обоих барабанов и одинаковых коэффициентах сцепления  $\mu$  натяжение на промежуточной ветви

$$F_{\text{пр}} = \frac{F_{\text{нб}}}{e^{\mu\alpha_1}} = F_{\text{сб}} e^{\mu\alpha_2}. \quad (4.35)$$

Такое соотношение справедливо, так как расстояние между барабанами незначительно и можно принять, что  $F_{\text{сб1}} = F_{\text{пр}} = F_{\text{нб2}}$ . Тяговая сила на барабанах 1 и 2:

$$F_1 = F_{\text{нб1}} - F_{\text{пр}} = F_{\text{пр}} (e^{\mu\alpha_1} - 1); \quad (4.36)$$

$$F_2 = F_{\text{пр}} - F_{\text{сб2}} = F_{\text{пр}} \left(1 - \frac{1}{e^{\mu\alpha_2}}\right). \quad (4.37)$$

Разделив выражение (4.36) на (4.37) и обозначив это соотношение через коэффициент  $k$ , получим

$$k = \frac{F_1}{F_2} = \frac{e^{\mu\alpha_2} (e^{\mu\alpha_1} - 1)}{e^{\mu\alpha_2} - 1}. \quad (4.38)$$

При одинаковых диаметрах барабанов и линейных скоростях соотношение усилий может быть заменено соотношением мощностей, т. е.

$$k = P_1/P_2, \quad (4.39)$$

где  $P_1$ ,  $P_2$  — мощности электродвигателя соответственно первого и второго приводных барабанов.

Опыт проектирования конвейеров с двухбарабанным приводом показывает, что коэффициент  $k \approx 2,0$ . Поэтому, чтобы иметь унифицированные блоки двигатель — редуктор, этот коэффициент принимают равным двум. На первом барабане в этом случае устанавливают два, а на втором — один блок двигатель — редуктор одинаковой мощности.

В многоприводных конвейерах электродвигатели всех приводных устройств реализуют развиваемые ими моменты через тяговые усилия, передаваемые на один тяговый орган, движущийся в замкнутом контуре с определенной скоростью при определенном сопротивлении движению грузонесущего полотна. Из этого следует, что частота вращения первого приводного барабана должна строго соответствовать частоте вращения второго приводного барабана. Но это справедливо лишь в случае, если тяговый орган (лента) принимается абсолютно жестким. На самом деле лента обладает высокой эластичностью с большим удельным растяжением. Например, для тросовых лент при реальной нагрузке удлинение ленты составляет 0,1—0,15 % и 1,5—2,0 % для лент с тканевой основой. Это обстоятельство приводит к тому, что из-за различных удлинений тягового органа приводные барабаны вращаются с разными угловыми скоростями.

Соотношение угловых скоростей барабанов может быть получено из выражения, написанного для условия, что масса ленты, проходящая в единицу времени, должна быть постоянной для любой точки конвейера:

$$v_1 q_1 \rho = v_2 q_2 \rho, \quad (4.40)$$

где  $v_1$  и  $v_2$  — линейные скорости на входных точках соответственно первого и второго барабанов;  $q_1$  и  $q_2$  — площади сечения ленты при действии усилий соответственно  $F_1$  и  $F_2$ ;  $\rho$  — плотность материала ленты.

При одинаковых усилиях  $F_1$  и  $F_2$  площади сечения ленты как на первом, так и на втором барабане будут одинаковы, а следовательно, одинаковыми будут и угловые скорости барабанов.

В двухбарабанном приводе соотношение усилий на входах первого и второго барабанов равно двум. Это значит, что неодинаковые усилия приведут к неодинаковому изменению площади сечения ленты. Тогда из уравнения (4.40) можно получить необходимое соотношение скоростей:

$$\delta = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{q_2}{q_1}. \quad (4.41)$$

Рассмотрим, как изменяются площади сечения ленты перед входами барабанов. Площадь сечения ленты  $q_1$  перед первым барабаном

$$\begin{aligned} q_1 = h_1 l_1 &= (h - \Delta h_1)(l + \Delta l_1) = \left(1 - \frac{l \Delta l_1}{lh} + \frac{h \Delta h_1}{lh} - \frac{\Delta h_1 \Delta l_1}{lh}\right) lh = \\ &= lh \left(1 + \frac{\Delta l_1}{l}\right). \end{aligned} \quad (4.42)$$

Аналогично перед вторым барабаном

$$q_2 = lh \left(1 + \frac{\Delta l_2}{l}\right), \quad (4.43)$$

где  $h, l$  — соответственно начальная толщина и длина ненапрянутой ленты.

Подставляя выражения (4.42) и (4.43) в уравнение (4.41), получаем

$$\delta = \frac{v_1}{v_2} = \frac{1 + \frac{\Delta l_1}{l}}{1 + \frac{\Delta l_2}{l}} = \frac{\omega_1}{\omega_2}. \quad (4.44)$$

Таким образом, при  $F_1 = 2F_2$  скорость движения ленты через первый барабан будет больше скорости прохождения ленты через второй барабан, т. е.  $v_1 > v_2$ , а так как все три двигателя выбираются одинаковой мощности, а следовательно, с одинаковыми механическими характеристиками  $I$ , то электродвигатель второго барабана будет перегружен  $M_2$ , т. к. имеет угловую скорость  $\omega_2$ , а электродвигатели первого — недогружены  $M_1$ , т. к. имеют угловую скорость  $\omega_1$  (см. рис. 4.11, б).

Количественные соотношения между тяговыми усилиями, создаваемые электродвигателями, могут быть получены, если принять, что

$$\begin{aligned} F_1 &= \beta_1(v_0 - v_1); \\ F_2 &= \beta_2(v_0 - v_2), \end{aligned} \quad (4.45)$$

где  $\beta_1$  и  $\beta_2$  — соответственно модули жесткости механических характеристик двигателей;  $v_0$  — скорость идеального холостого хода.

Сила статических сопротивлений

$$F_{ст} = F_1 + F_2. \quad (4.46)$$

Решая совместно уравнения (4.44) — (4.46) относительно усилий, развиваемых электродвигателями, получаем

$$\frac{F_1}{F_{ст}/3} = \frac{3\beta_1}{\beta_2 + 2\delta\beta_1} \left[ \delta + \frac{\beta_2 v_0}{F_{ст}} (1 - \delta) \right]; \quad (4.47)$$

$$\frac{F_2}{F_{ст}/3} = \frac{3\beta_2}{\beta_2 + 2\delta\beta_1} \left[ 1 - \frac{2\beta_1 v_0}{F_{ст}} (1 - \delta) \right].$$

Равномерная нагрузка между электродвигателями обеспечивается следующим соотношением модулей жесткости механических характеристик:

$$\beta_2 = \beta_1 \frac{\delta}{1 - \frac{3\beta_1 v_0}{F_{ст}} (1 - \delta)}. \quad (4.48)$$

Согласно выражению (4.48), все три двигателя будут нагружены одинаково усилием равным  $F_{ст}/3$ , но частота вращения одного из них будет меньше двух других и соответствовать



фом служит зависимость работы электродвигателя скребкового конвейера от состояния насоса орошения комбайна (см. рис. 4.12). Это означает, что конвейер может быть запущен лишь после включения системы орошения. Для этого в цепь управления двигателем конвейера включен замыкающий контакт реле давления  $SQ$ , который замыкается только после поднятия давления в системе орошения. Замыкание контакта  $SQ$  подготавливает цепь промежуточного реле  $KA$ , которое срабатывает после нажатия на кнопку «Пуск»  $SB1$  и вызывает замыкание своего контакта  $KA$ , подавая напряжение на катушку контактора  $KM$ .

В электроприводах мощных ленточных конвейеров применяются асинхронные двигатели с фазным ротором. Применение асинхронных двигателей с фазным ротором позволяет ограничить пусковые токи и ускорения, а также снизить динамические нагрузки в период выбора зазоров в передачах и создать предварительное натяжение ленты за счет использования предварительной ступени пускового резистора. В настоящее время на мощных конвейерных установках число ступеней пускового резистора меняется от 10 до 24. Такое большое число пусковых ступеней резистора позволяет в значительной степени снизить броски моментов двигателя при переходе с одной пусковой ступени резистора на другую, что способствует снижению упругих колебаний в тяговом органе и проскальзывания его по барабану. Переключение ступеней пускового резистора ведется либо в функции времени, либо в функции тока с корректировкой по времени. Схема управления двухдвигательным электроприводом ленточного конвейера, обеспечивающая пуск в функции времени с корректировкой по току, показана на рис. 4.13.

Коммутация первичных цепей электродвигателей конвейера осуществляется двумя индивидуальными масляными выключателями  $QF2$  и  $QF3$ . Третий общий масляный выключатель  $QF1$  обеспечивает одновременную подачу напряжения на статорные обмотки двигателей  $M1$  и  $M2$  после включения индивидуальных масляных выключателей  $QF2$  и  $QF3$ .

Порядок запуска ленточного конвейера следующий. Перед запуском двигателей включаются вспомогательные механизмы (маслосмазка и натяжение конвейерной ленты). Включение привода натяжной лебедки вызывает срабатывание реле натяжения ленты и замыкание его контакта  $KНЛ$  в цепи питания реле времени  $KT1—KT6$ . Далее включаются автоматы цепей управления  $SA1$ ,  $SA2$  и  $SA3$ . Включение автомата  $SA1$  приводит к появлению тока в катушке реле времени  $KT1$ , что вызывает его срабатывание и замыкание контакта  $KT1.1$  в цепи катушки реле времени  $KT2$ . Это в свою очередь приводит к его включению и так до тех пор, пока все реле времени не включатся. Все реле времени, включившись, замыкают контакты  $KT1.2—KT6.2$  и размыкают контакты  $KT1.3—KT6.3$ .

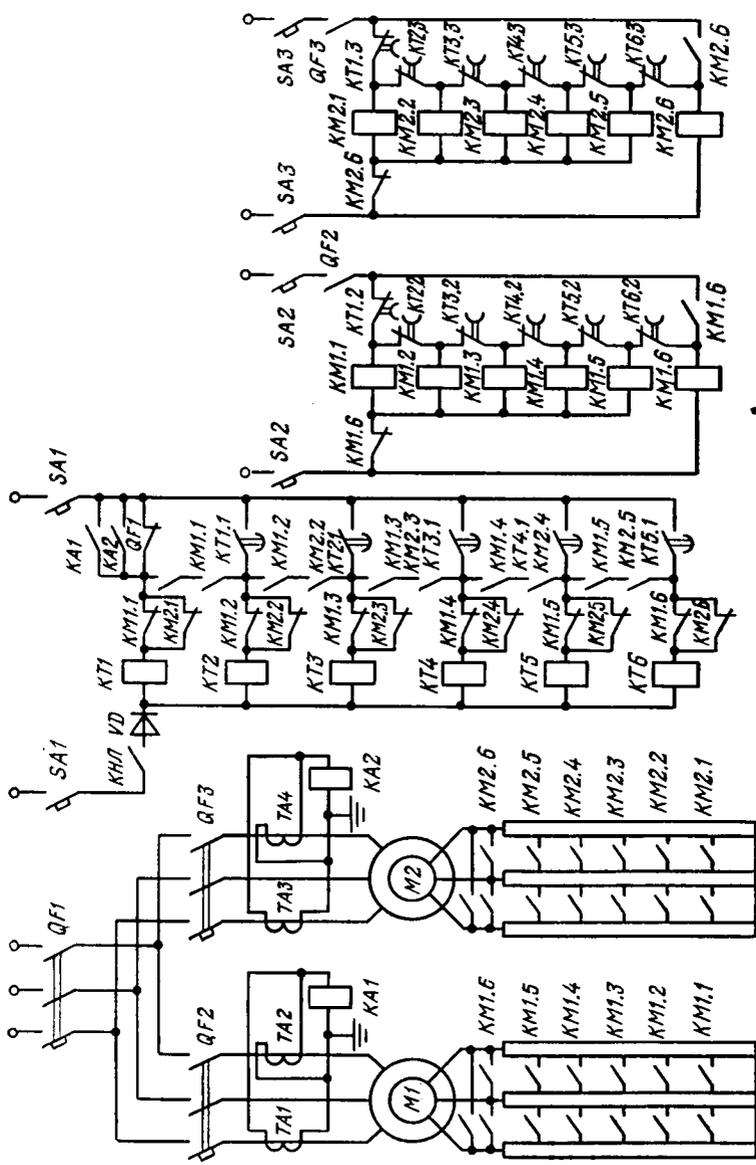


Рис. 4.13. Принципиальная схема управления двухдвигательным электроприводом конвейера

Для запуска двигателей сначала включаются масляные выключатели  $QF2$  и  $QF3$ , что приводит к замыканию их контактов  $QF2$  и  $QF3$  в цепях питания контакторов ускорения  $KM1$  и  $KM2$ . Затем включается масляный выключатель  $QF1$ . Двигатели  $M1$  и  $M2$ , получив питание, приходят во вращение при полностью включенном сопротивлении пускового резистора. Эта ступень называется предварительной и предназначена для выбора зазоров в передаче и слабины тягового органа. Одновременно с включением масляного выключателя  $QF1$  размыкается его контакт  $QF1$ , вызывая обесточивание первого реле времени  $KT1$ . Оно с выдержкой времени, необходимой для выбора зазоров в передаче и слабины тягового органа, замыкает свои контакты  $KT1.2$  и  $KT1.3$  в цепях катушек контакторов ускорения  $KM1.1$  и  $KM2.1$  и размыкает свой контакт  $KT1.1$  в цепи второго реле времени  $KT2$ . Контакторы ускорения  $KM1.1$  и  $KM2.1$ , включившись, замыкают свои главные контакты  $KM1.1$  и  $KM2.1$ , шунтирующие первую ступень пускового резистора, а размыкающие блок-контакты  $KM1.1$  и  $KM2.1$  размыкаются и замыкающие блок-контакты  $KM1.1$  и  $KM2.1$  замыкаются. Переход на вторую пусковую ступень сопровождается бросками токов в двигателях, вызывающих включение реле тока  $KA1$  и  $KA2$ . Замкнувшиеся контакты  $KA1$  и  $KA2$  этих реле вновь подключают реле времени  $KT2$  к источнику тока. И только тогда, когда токи двигателей  $M1$  и  $M2$  снизятся до значений, соответствующих моментам переключений на вторую пусковую ступень, контакты реле  $KA1$  и  $KA2$  разомкнутся и разорвут цепь питания катушки  $KT2$ . Реле времени, обесточившись, замыкает свои контакты  $KT2.2$  и  $KT2.3$ , вызывая включение контакторов ускорения  $KM1.2$  и  $KM2.2$ , и размыкает контакт  $KT2.1$ , обесточивая реле времени третьей ступени пускового резистора  $KT3$ . Но шунтирование второй пусковой ступени резистора контактами  $KM1.2$  и  $KM2.2$  вызывает вновь увеличение токов двигателей и включение реле тока  $KA1$  и  $KA2$ . Замыкание их контактов, а также контактов  $KM1.2$  и  $KM2.2$  создает цепь для питания реле времени  $KT3$ : автомат  $SA1$  — контакт КНЛ — диод  $VD$  — катушка реле  $KT3$  — контакт  $KM1.3$  (или  $KM2.3$ ) — контакты  $KM2.2$ ,  $KM1.2$ ,  $KM2.1$ ,  $KM1.1$ ,  $KA1$  (или  $KA2$ ). По мере увеличения частоты вращения двигателей их токи снижаются и при моментах, соответствующих моментам переключения, контакты токовых реле  $KA1$  и  $KA2$  размыкаются и реле времени  $KT3$ , обесточившись, замыкает свои контакты  $KT3.2$  и  $KT3.3$ , вызывая включение контакторов ускорения  $KM1.3$  и  $KM2.3$  и шунтирование третьей ступени пускового резистора. Аналогично идет процесс шунтирования пусковых ступеней до замыкания последних контактов  $KM1.6$  и  $KM2.6$ , когда двигатели начинают работать на естественных механических характеристиках. К этому моменту все реле времени  $KT1$ — $KT6$  и контакторы ускорения  $KM1.1$ — $KM1.5$  и  $KM2.1$ — $KM2.5$  обесточены.

#### 4.7. СХЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПОТОЧНО-ТРАНСПОРТНОЙ ЛИНИИ

При управлении группой конвейеров, обслуживающих сложный технологический комплекс, приходится вводить различные блокировки. Кроме того, весьма важным при проектировании схемы управления является сигнализация о состоянии механизмов, которая реализуется чаще всего с помощью световой мнемосхемы, расположенной на пульте управления оператора.

На рис. 4.14 показана конвейерная линия, состоящая из трех последовательно расположенных конвейеров. Электропривод ленточных конвейеров осуществлен асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором, схема управления которыми показана на том же рисунке. Схема управления электродвигателями группы конвейеров обеспечивает:

требуемую продолжительность пуска конвейерной линии в направлении обратном грузопотоку. Этим исключается опасность в образовании завала в месте перегрузки. Поэтому пуск каждого последующего конвейера (в направлении против грузопотока) разрешается лишь тогда, когда грузонесущий орган предыдущего конвейера полностью разогнулся. Такая блокировка осуществляется с помощью реле скорости, контролирующего движение тягового органа;

требуемую последовательность останова конвейерной линии в направлении грузопотока. Должна быть предусмотрена такая блокировка, которая обеспечивала бы при аварийной остановке одного из конвейеров останов всех конвейеров от места загрузки до остановившегося конвейера, а остальные конвейеры должны продолжать работать, чтобы освободить тяговый орган от груза;

контроль за временем пуска ленточных конвейеров. Затянувшийся пуск свидетельствует либо о неисправности электродвигателя или системы управления им, либо о проскальзывании ленты по приводному барабану, что недопустимо;

возможность остановки конвейерной линии из любой точки; аварийную остановку конвейера и всех последующих по направлению пуска при: затянувшемся времени пуска конвейера, снижении скорости ленты конвейера, обрыве тягового органа, недопустимом превышении скорости движения тягового органа (на бремсберговых конвейерах), перегрузке электродвигателя конвейера, перегреве подшипников приводных барабанов, образовании завала в местах перегрузки, сходе ленты конвейера;

следующие виды сигнализации: предупредительную, аварийную, о числе включенных конвейеров и т. п.;

искробезопасность исполнения цепей управления и минимальное число жил.

Согласно вышеперечисленным требованиям пуск конвейерной линии осуществляется в следующей последовательности. Сначала запускается электродвигатель  $M1$  нажатием на

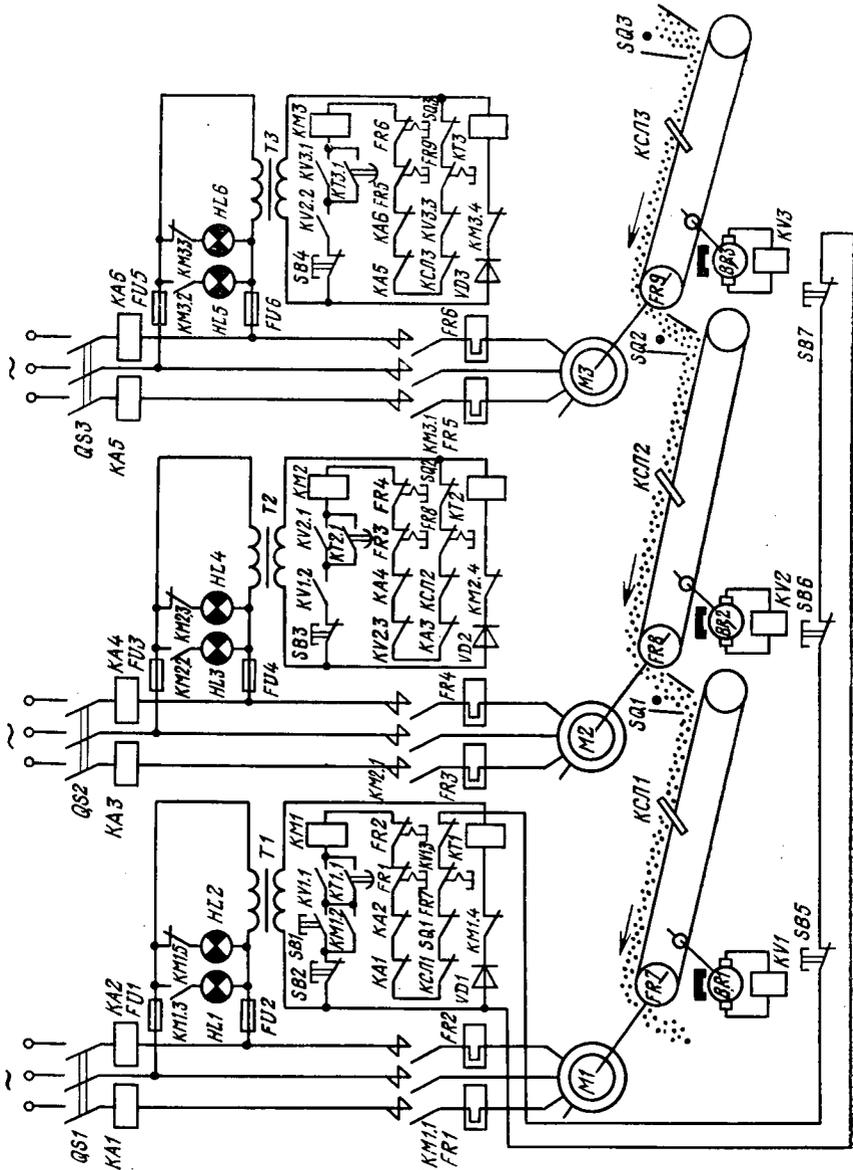


Рис. 4.14. Схема управления электротропным конвейером

кнопку *SB1*. При этом получает питание контактор *KM1* и, срабатывая, замыкает свои линейные контакты *KM1.1* в цепи статора асинхронного двигателя *M1*. Двигатель начинает разворачиваться, приводя в движение ленту конвейера. Одновременно с этим замыкаются блок-контакты: *KM1.2*, шунтирующий кнопку *SB1*, и *KM1.3*, включающий лампу сигнализации *HL1*, указывающую на рабочее состояние двигателя *M1*. Размыкание контакта *KM1.4* обесточивает реле времени *KT1*, которое отсчитывает время, необходимое для разгона двигателя до максимальной частоты вращения. Лента конвейера, пришедшая в движение, приводит к вращению вал тахогенератора реле скорости *KV1*. При достижении лентой конвейера максимальной скорости реле *KV1* подает сигнал на замыкание своих контактов: *KV1.1* в цепи, шунтирующей контакт *KT1.1*, а второй — *KV1.2* в цепи управления следующего конвейера. Нормальное протекание процесса пуска контролирует реле времени *KT1*. По истечении положенного времени реле *KT1* отпускает свой якорь и вызывает размыкание своего контакта *KT1.1* в цепи контактора *KM1*. Несмотря на размыкание контакта *KT1.1*, контактор *KM1* продолжает получать питание через замкнувшийся контакт *KV1.2*. Если же за время, необходимое для пуска, лента не достигла по каким-либо причинам своей максимальной скорости, контакт *KT1.1* разомкнется до того, как замкнется контакт *KV1.1*, и двигатель *M1* остановится, так как цепь контактора *KM1* будет разомкнута. Затыжка была вызвана проскальзыванием ленты по барабану. Это опасный режим, который может вызвать загорание ленты. Поэтому в схеме и предусмотрена блокировка, исключающая этот опасный режим. В случае нормального прохождения пуска первого двигателя *M1* подается сигнал на включение двигателя *M2* второго конвейера — замыкается контакт *KV1.2*. Катушка контактора *KM2* обтекается током и, срабатывая, замыкает свои контакты *KM2.1* в цепи статора второго двигателя *M2*. Контроль за пуском второго двигателя производится в такой же последовательности.

В схемах управления электродвигателями предусмотрены следующие виды защит: от перегрузки двигателей — тепловыми реле *FR1 — FR6*; от перегрева подшипников приводных барабанов — тепловыми реле *FR7 — FR9*; от превышения скорости движения конвейерной ленты (при установке конвейера на

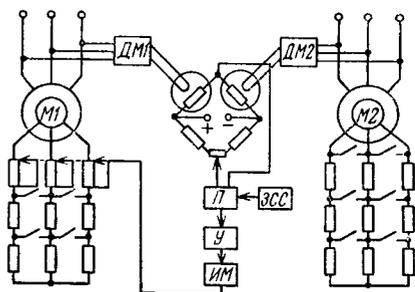


Рис. 4.15. Схема автоматического поддержания заданного распределения нагрузок между электродвигателями двухбарабанного привода

бремсберге) — реле скорости *KV1.3—KV3.3*; от схода ленты — реле *КСЛ1—КСЛ3*; от завала в пунктах загрузки — выключателями *SQ1—SQ3*.

При срабатывании одного из видов защиты останавливается не только конвейер, у которого произошла авария, но и последующие против потока груза. Остальные же конвейеры по направлению потока груза остаются работающими.

В схеме управления применена световая сигнализация, которая указывает на то, в каком состоянии находятся электродвигатели: включенные зеленые лампы *HL2, HL4, HL6* указывают на отключенное состояние двигателя, красные *HL1, HL3, HL5* — на рабочее состояние.

Остановить конвейерную линию можно из любой точки трассы воздействием на одну из кнопок *SB5, SB6, SB7*.

Схема управления приводными двигателями двухбарабанного привода конвейера, кроме вышеперечисленного, должна предусматривать автоматическое поддержание соотношения потребляемых двигателями мощностей постоянным. Как известно, неодинаковость механических характеристик двигателей, а также изменение рабочих и конструктивных параметров конвейера в процессе эксплуатации вызывают неравномерность загрузки последних. Так как мощность, потребляемая приводным двигателем, прямо пропорциональна окружному усилию на ободе приводного барабана, то для поддержания постоянства отношений между натяжениями на набегающих ветвях приводных барабанов необходимо обеспечить постоянство соотношения мощностей между этими двигателями. Для этой цели предусматривается замер потребляемой каждым двигателем мощности. Эти мощности сравниваются, и при отклонении их соотношения от заданного изменяется частота вращения одного из двигателей до установления заданного значения соотношения мощностей. Схема автоматического поддержания заданного распределения нагрузок между электродвигателями двухбарабанного привода показана на рис. 4.15. Схема включает в себя два датчика мощности *ДМ1* и *ДМ2*, выходные сигналы постоянного тока которых пропорциональны потребляемым электродвигателями мощностям. Эти сигналы подаются на два плеча моста, которые являются терморезисторами. Сигнал, снимаемый с диагонали моста, подается на потенциометр *П*, в котором сравнивается с эталонным напряжением, пропорциональным заданному соотношению, создаваемому задатчиком соотношения скоростей *ЗСС*. При равномерной загрузке двигателей сигнал рассогласования равен нулю. Если же соотношение нагрузок не соответствует заданному значению, сигнал рассогласования подается через усилитель *У* на исполнительный механизм *ИМ*. Последний, изменяя величину сопротивления невыключаемой ступени резистора в цепи ротора асинхронного двигателя *М1*, увеличивает или уменьшает его частоту вращения до восстановления заданного соотношения нагрузок.

**5.1. УСЛОВИЯ РАБОТЫ, НАГРУЗКИ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ  
ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ЭЛЕКТРОВОЗНОГО ТРАНСПОРТА**

Для перемещения полезных ископаемых на шахтах и рудниках широко используется электровозная откатка, которая осуществляется контактными или аккумуляторными электровозами. В состав электровозной откатки входит: подвижной состав (электровоз и вагоны), источник электрической энергии и тяговая сеть (питающие провода и рельсовый путь).

Чтобы привести электропоезд в движение, нужно приложить к нему силу тяги  $F$ , которая создается установленными на электровозе электродвигателями, получившими название тяговых. Эта сила должна быть больше сил статического сопротивления  $W$  в период разгона и равна ей в период установившегося движения. Сила тяги в свою очередь реализуется ведущими колесными парами электровоза, которые, взаимодействуя с рельсами, и создают силу сцепления. Эта сила, имеющая природу силы трения, может быть выражена для электровоза как произведение коэффициента сцепления  $\psi$  колеса с рельсами и нормального давления движущихся колес на рельсы:

$$F_{сц} = G_{сц}\psi 10^3, \quad (5.1)$$

где  $G_{сц}$  — сцепной вес электровоза, кН.

Коэффициент сцепления колес  $\psi$  с рельсами в условиях эксплуатации не остается постоянным и зависит от материала бандажей и рельсов, а также от состояния пути. Этот коэффициент колеблется от 0,08 при наиболее неблагоприятных условиях (загрязнение рельсов и бандажей) до 0,4 — при чистых сухих рельсах.

Для железорудных и медных шахт угольная и сланцевая пыль отсутствует, но наличие влаги и жидкой грязи также снижает значение коэффициента сцепления, хотя не в таких пределах, как на угольных шахтах.

Скорость движения электропоезда также оказывает влияние на значение коэффициента сцепления, который уменьшается с увеличением скорости движения. Очень важно иметь высокий коэффициент сцепления  $\psi$ , так как он определяет величину максимальной силы тяги и торможения электровоза при данном сцепном его весе. Поэтому может быть увеличен

максимально допустимый подъем, допустимые скорости, ускорение и замедление.

Надежное движение электровоза возможно при условии, если

$$F < F_{\text{сц}}, \quad (5.2)$$

где  $F$  — сила тяги, создаваемая электродвигателем,

$$F = Mk/R, \quad (5.3)$$

где  $M$  — момент электродвигателя;  $k$  — передаточное число редуктора;  $R$  — радиус колеса электровоза.

Неравенство (5.2) должно строго соблюдаться, так как превышение силы тяги над силой сцепления приведет к пробуксовке, т. е. к проскальзыванию колесной пары электровоза по рельсам, что вызовет дополнительный износ бандажей колес и рельс и даже полную остановку электропоезда.

Развиваемый электродвигателем электровоза вращающий момент или пропорциональная ему сила тяги должны уравновешиваться силами статического сопротивления его движению, которые состоят из основных и дополнительных. Основные сопротивления движению  $W_0$  — это сопротивления, вызванные трением качения колес по рельсам, трением скольжения в шейках осей колес, упругим профилем пути, механическими потерями в двигателе и редукторе.

Дополнительные сопротивления создаются составляющими веса электропоезда, движущегося на подъем или под уклон  $W_i$ . Эти сопротивления действуют против движения (при подъеме) и по движению (при спуске). К дополнительным сопротивлениям относятся сопротивления, вызванные ударами, проскальзыванием колес, трением бандажей о рельсы при прохождении электропоездом криволинейных участков пути  $W_k$ , а также сопротивления воздушной среды. Несмотря на то, что скорость движения электровозов незначительна и равна 10—20 км/ч, она все же влияет на сопротивление движению. Двигаясь в подземной выработке, ограниченной объемами, электровоз выталкивает воздух подобно поршню. При этом впереди поезда давление воздуха возрастает, а позади его снижается, что создает дополнительное сопротивление  $W_b$ .

Итак, полное сопротивление движению электровоза выражается суммой

$$W = W_0 \pm W_i + W_k + W_b = (G_{\text{гп}} + G) \omega \pm (G_{\text{гп}} + G) (\sin \alpha + \omega \cos \alpha) + W_k + W_b, \quad (5.4)$$

где  $G_{\text{гп}} + G$  — вес электропоезда;  $\omega = (df_{\text{ц}} + 2f_{\text{к}})/D$  — коэффициент сопротивления движению;  $D$  — диаметр колес;  $d$  — диаметр цапф осей;  $f_{\text{ц}}$  — коэффициент трения в цапфах;  $f_{\text{к}}$  — коэффициент трения качения;  $\alpha$  — угол наклона пути.

При движении электропоезда с переменной скоростью возникают дополнительные динамические силы сопротивления дви-

жению, связанные с изменением запаса кинетической энергии движущихся частей. Эти силы пропорциональны произведению массы электропоезда, приведенной к ободу колеса, на ускорение или замедление, т. е.

$$F_{\text{дин}} = mdV/dt. \quad (5.5)$$

Таким образом, полная сила тяги

$$F = W + mdV/dt \quad (5.6)$$

имеет максимальное значение при разгоне электропоезда, так как силы сопротивления и динамическая сила противодействуют увеличению скорости и поэтому направлены против движения. При замедлении электропоезда динамическая сила, наоборот, препятствует снижению скорости, т. е. действует в направлении движения. При отключении тягового электродвигателя электропоезд продолжает двигаться в том же направлении под действием динамической силы, преодолевая при этом все статические сопротивления движению поезда. Для более интенсивного торможения электропоезда необходимо приложить дополнительное усилие, направленное против движения. Такое усилие будет отрицательным, а следовательно, тормозным. Оно может быть механическим или электрическим. Тормозное усилие должно прикладываться также постоянно для поддержания неизменной скорости при движении электропоезда под уклон. В связи с тем что при механическом торможении затруднено получение постоянной скорости, а при длительном торможении вызывается дополнительный износ колодок и реборд колесных пар, его стремятся заменить электрическим торможением. При движении электропоезда в режиме торможения также должно выполняться условие

$$F_{\text{т max}} \leq G_{\text{сц}} \psi 10^3. \quad (5.7)$$

Если тормозная сила превысит силу сцепления, происходит скольжение заторможенных колес по рельсам, а электровоз становится неуправляемым. Кроме того, увеличивается износ колес и их бандажей наложением тормозных колодок при применении механического тормоза.

Вышеизложенное позволяет сделать вывод, что электропривод электровоза должен создавать как тяговое, так и тормозное усилие в процессе его движения, т. е. он должен работать как в двигательном, так и в тормозном режиме и быть реверсивным.

Режим работы тягового двигателя характеризуется: коэффициентом полезного действия, частотой вращения и моментом, развиваемым на валу двигателя. Все эти величины в процессе работы тягового двигателя изменяются и находятся между собой в определенных зависимостях.

Таковыми зависимостями, характеризующими электромеханические свойства тягового двигателя, служат:

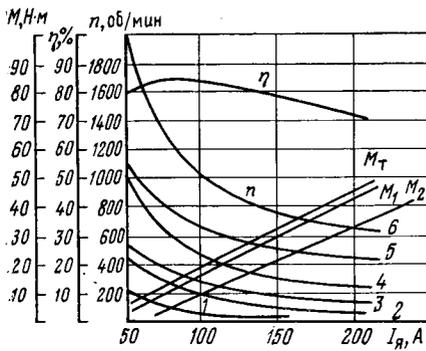
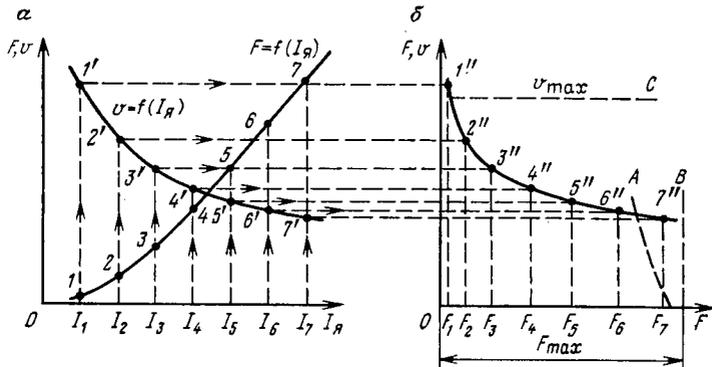


Рис. 5.1. Электромеханические характеристики двигателя ДПТР-12

Рис. 5.2. График построения тяговой характеристики: а — электромеханические б — тяговая



зависимость между частотой вращения и током якоря двигателя  $n=f(I_{я})$ ;

зависимость между моментом на валу и током якоря двигателя  $M=f(I_{я})$ ;

зависимость между к. п. д. и током якоря двигателя  $\eta=f(I_{я})$ .

Вышеперечисленные зависимости для тягового двигателя типа ДПТР-12 приведены на рис. 5.1. По оси ординат отложены частота вращения якоря  $n$  (об/мин), момент  $M$  (Н·м) и к. п. д.  $\eta$  (%). На рис. 5.1 приведены:

характеристики  $n(I_{я})$  при  $0,25 U_{ном}$  (1); при  $0,25 U_{ном}$  и ослаблении поля электродвигателя на 50 % (2) при  $0,5 U_{ном}$  (3); при  $0,5 U_{ном}$  и ослаблении поля электродвигателя на 50 % (4); при  $U_{ном}$  (5); при  $U_{ном}$  и ослаблении поля (6);

характеристики  $M(I_{я})$  при  $U_{ном}(M_1)$ ; при  $U_{ном}$  и ослаблении поля ( $M_2$ ); при электродинамическом торможении ( $M_T$ );

характеристика  $\eta(I_{я})$  для номинального напряжения.

Указанные характеристики являются типовыми, так как они определяются как усредненные по результатам испытаний десяти однотипных электродвигателей из одной партии.

Типовые испытания тяговых двигателей проводятся в часовом режиме работы; значения мощности, тока, напряжения, ча-

стоты вращения, к. п. д. и другие параметры принимаются номинальными.

Таким образом, часовая мощность тягового двигателя — это наибольшая мощность, которую может развить двигатель, работая непрерывно в течение 1 ч, не превосходя при этом допустимых по условиям изоляции пределов нагревания обмоток.

Часто мощность тягового двигателя относят к продолжительному режиму работы. В этом случае она называется продолжительной и представляет собой максимальную мощность, которую может развить двигатель, работая непрерывно достаточно продолжительное время, не вызывая перегрева обмоток выше предельно допустимых значений.

Соответствующие этим мощностям токи находятся в таком соотношении:  $I_{\text{ч}}/I_{\text{пр}}=0,4$  — для закрытых тяговых двигателей с естественным охлаждением;  $0,6—0,8$  — для тяговых двигателей с самовентиляцией и  $0,8—0,9$  — для тяговых двигателей с принудительной вентиляцией.

При ведении тяговых расчетов необходимо иметь тяговую характеристику электровоза, представляющую собой зависимость скорости его движения от тягового усилия  $v=f(F)$  при постоянном напряжении.

Для построения такой характеристики необходимо сначала построить характеристики  $v=f(I_{\text{я}})$  и  $F=f(I_{\text{я}})$ , используя имеющуюся характеристику  $n=f(I_{\text{я}})$ . Переход от частоты вращения  $n$  двигателя к скорости движения  $v$  электровоза и от тока якоря  $I_{\text{я}}$  к тяговому усилию на ободу колеса  $F$  может быть осуществлен с применением следующих известных формул:

$$v = \frac{6\pi D_{\text{к}} n 10^{-2}}{i};$$
$$F = 0,367 \frac{U I_{\text{я}} \eta_{\text{дв}} \eta_{\text{п}}}{v},$$

где  $v$  — скорость электровоза, км/ч;  $D_{\text{к}}$  — диаметр ведущего колеса, м;  $i$  — передаточное число редуктора;  $\eta_{\text{дв}}$ ,  $\eta_{\text{п}}$  — соответственно к. п. д. двигателя и передачи.

На рис. 5.2, а показаны характеристики  $v=f(I_{\text{я}})$  и  $F=f(I_{\text{я}})$ , а на рис. 5.2, б — ход построения тяговой характеристики электровоза. Задаваясь различными значениями тока якоря  $I_{\text{я}}$ , находят соответствующие им значения скорости движения и силы тяги и переносят их на оси координат  $v(F)$ .

Рабочая часть тяговой характеристики ограничена условиями сцепления движущихся колес с рельсами, надежной работой двигателя по условиям коммутации и механической прочностью. Ограничение силы тяги электровоза по сцеплению определяется формулой (5.1). Ограничение по устойчивой коммутации определяется соотношением  $F_{\text{max}}=2F_{\text{ч}}$ , где  $F_{\text{ч}}$  — сила тяги при часовом токе  $I_{\text{ч}}$ , а ограничение по макси-

мально допустимой скорости — максимально допустимая скорость данного типа электровоза  $v_{\max}$ .

На тяговой характеристике (см. рис. 5.2, б) показаны: линия А — ограничение по сцеплению, линия В — по коммутации и линия С — по максимальной скорости.

Выбор мощности тягового двигателя производится на основании тягового расчета, который позволяет построить нагрузочные диаграммы электродвигателей, т. е. графики зависимости частоты вращения, момента и тока от времени. Далее по нагрузочным диаграммам методом эквивалентного тока определяются сначала эквивалентный ток двигателя, а затем и его эквивалентная мощность. Номинальная мощность двигателя  $P_{\text{ном}}$  принимается равной или больше эквивалентной  $P_{\text{ном}} \geq P_{\text{э}}$ . Кроме того, тяговые электродвигатели должны иметь высокую механическую прочность, так как они в период движения испытывают постоянную тряску, частые толчки и удары из-за неровностей рельсового пути. Для исключения попадания вовнутрь электродвигателя пыли, влаги они должны быть закрытого исполнения. Тяговые электродвигатели должны обладать высокой перегрузочной способностью из-за необходимости развивать значительную силу тяги в период пуска и движения при преодолении больших подъемов, малой чувствительностью к резким падениям напряжения сети, малой массой и габаритами из-за ограниченного пространства для их установки, высоким к. п. д. и характеристиками, обеспечивающими использование их мощностей при различных условиях движения.

Шахтные электровозы оснащаются электродвигателями постоянного тока с последовательным возбуждением, которые имеют ряд преимуществ по сравнению с двигателями постоянного тока с параллельным возбуждением и электродвигателями переменного тока.

Эти достоинства состоят в следующем. Как правило, электропривод электровоза многодвигательный, имеющий механическую связь между двигателями через ведущие колесные пары и рельсы (рис. 5.3). Независимо от способа расположения электродвигателей относительно ведущих осей электровоза возникает проблема выравнивания нагрузок между двумя или более двигателями. Эта неравномерность загрузки тяговых электродвигателей объясняется разницей диаметров движущихся колес и расхождением в электромеханических характеристиках. При параллельном соединении тяговых электродвигателей неравномерное распределение нагрузок проявляется в потреблении

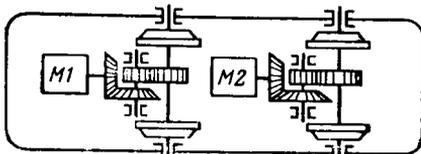


Рис. 5.3. Схема расположения тяговых двигателей на электровозе

электродвигателями различных токов. Допустим, что электро-  
 воз оборудован тяговыми электродвигателями с последователь-  
 ным возбуждением, с одинаковыми механическими характери-  
 стиками, но с разными диаметрами ведущих колес. Первый  
 двигатель вращает колесную пару с диаметром колеса  $D_2$  боль-  
 шим, чем диаметр  $D_1$  колеса второй колесной пары. Так как  
 скорость поступательного движения всех колесных пар одина-  
 кова, то при неодинаковых диаметрах колес частоты их вра-  
 щения обратно пропорциональны диаметрам. Таким образом,  
 якорь первого двигателя будет иметь угловую скорость  $\omega_2$ , ко-  
 торая меньше угловой скорости  $\omega_1$  второго электродвигателя.  
 Токи, потребляемые электродвигателями из сети, находятся по  
 характеристикам 1 и 2 (рис. 5.4). По характеристике 1 нахо-  
 дится неравномерность загрузки электродвигателей постоян-  
 ного тока с последовательным возбуждением а по характери-  
 стике 2 — электродвигателей постоянного тока с параллельным  
 возбуждением. В первом случае разность токов двигателей со-  
 ставляет  $\Delta I$ , а во втором случае  $\Delta I'$ , что указывает на преимущ-  
 ества двигателей постоянного тока с параллельным возбужде-  
 нием по сравнению с электродвигателями независимого  
 возбуждения.

Аналогично можно показать, как влияют на неравномер-  
 ность загрузки электродвигателей неодинаковость их механиче-  
 ских характеристик. Для тяговых двигателей допускается от-  
 клонение угловой скорости до  $\pm 4\%$  типовой характеристики  
 (рис. 5.5). Так как угловая скорость обоих электродвигателей  
 должна быть одинакова, то для электродвигателей с последо-  
 вательным возбуждением (характеристики 1 и 1') перегрузка  
 одного из них будет определяться величиной  $\Delta I = I_2 - I_1$ , в то  
 время как для электродвигателей с параллельным возбужде-  
 нием (характеристики 2 и 2') перегрузка последних будет зна-  
 чительно большей и составлять  $\Delta I' = I_2' - I_1'$ . Таким образом,

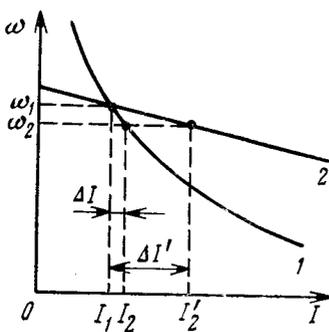


Рис. 5.4. Кривые влияния различия в диаметрах движущих колес на нагрузку двигателей

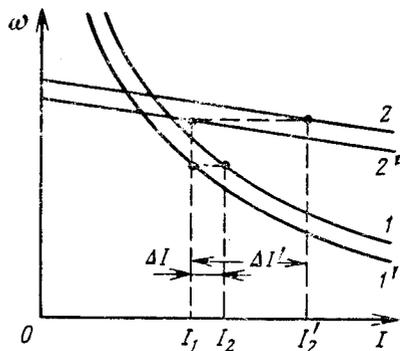


Рис. 5.5. Кривые влияния различия в характеристиках двигателей на их нагрузку

чем больше жесткость электромеханической характеристики электродвигателя, тем больше разница в токах и силе тяги параллельно соединенных электродвигателей. Следовательно, наименьшую неравномерность в распределении токов будет иметь электродвигатель с последовательным возбуждением. Большая неравномерность в нагрузках приводит к перегреву более загруженного двигателя и к буксованию его колесной пары.

Рассмотрим теперь влияние колебания напряжения сети на работу электропривода электровоза. При постепенном снижении напряжения сети из-за удаления электровоза от пункта питания, т. е. с увеличением падения напряжения, скорость движения электропоезда снижается при любой системе электропривода. При электродвигателе с последовательным возбуждением, если считать нагрузку постоянной, ток электродвигателя остается без изменения, так как  $M_3 = k_d I^2$ , т. е. колебания напряжения сети не влияют на ток двигателя. Для электродвигателей с параллельным возбуждением снижение напряжения сети приводит не только к снижению скорости, но и к снижению электромагнитного момента  $M_3 = ck_b UI$ , а при сохранившейся нагрузке на ободе ведущего колеса вызовет необходимость увеличения тока якоря электродвигателя для сохранения постоянства тягового усилия. Следовательно, снижение напряжения сети вызовет дополнительную нагрузку электродвигателей, дальнейшее снижение напряжения, перегрузку электродвигателей, контактной сети и подстанции.

Таким образом, применение электродвигателей постоянного тока с последовательным возбуждением в качестве электропривода электровозов вместо электродвигателей с параллельным возбуждением позволяет иметь меньшую мощность преобразовательной подстанции, меньшее сечение контактных проводов и кабелей; при одной и той же мощности тяговых подстанций на линию может быть выведено большее число подвижного состава или при одном и том же числе подвижного состава требуется меньшая мощность тяговых подстанций.

При резком изменении напряжения в контактной сети броски тока в цепи якоря двигателя будут различными. Ток в электродвигателе с последовательным возбуждением будет меньше, чем в двигателе с параллельным возбуждением, так как цепь якоря первого двигателя обладает большим индуктивным сопротивлением (обмотка якоря и обмотка возбуждения) по сравнению со вторым двигателем, имеющим лишь индуктивность обмотки якоря. Поэтому протекание переходных процессов в электродвигателе с последовательным возбуждением происходит в более благоприятных условиях, что повышает эксплуатационную надежность электропривода.

Перечисленные положительные качества двигателей постоянного тока с последовательным возбуждением предопределили их широкое распространение в качестве электропривода рудничной электровозной откатки.

В рудничной электровозной тяге применяются тяговые электродвигатели на напряжение до 250 В для контактных электровозов в рудничном нормальном исполнении, а для аккумуляторных электровозов — в рудничном взрывобезопасном исполнении на напряжение от 40 до 200 В. Тяговые электродвигатели выполняются горизонтальными, закрытого типа, невентилируемые (с естественным охлаждением) с одним свободным концом вала, в особо прочном корпусе.

Электропривод электровозов работает в различных режимах (двигательном или тормозном), обеспечивая разгон, торможение и движение электропоезда с установившейся скоростью. Для выполнения этих операций необходимо изменять форму механических или электромеханических характеристик, с тем чтобы изменять тяговое усилие и частоту вращения электродвигателя и чтобы последний работал на искусственных характеристиках. Искусственные характеристики могут быть получены изменением подводимого к якорю электродвигателя напряжения, введением в цепь якоря добавочного резистора, последовательным и параллельным соединением тяговых электродвигателей и импульсным регулированием.

Наиболее широко в тяговом электроприводе распространен метод регулирования скорости введением в цепь его якоря добавочного резистора. При таком методе регулирования скорости для обеспечения плавного разгона с постоянным ускорением используется большое число ступеней пускового резистора. Это увеличивает габариты установки и снижает надежность электропривода. Снижение числа ступеней пускового резистора может быть обеспечено изменением схемы соединения тяговых электродвигателей. В начале разгона тяговые электродвигатели включаются последовательно, что уменьшает напряжение, подводимое к якорю каждого двигателя, в 2 раза при двухдвигательном электроприводе, а разгон до половинной скорости осуществляется пусковыми резисторами. Дальнейший разгон электродвигателей до максимальной частоты вращения осуществляется теми же пусковыми резисторами, но уже при параллельном соединении электродвигателей, т. е. при полном напряжении сети. Такой переход схемы соединения тяговых двигателей с последовательного на параллельный в период пуска электровоза не только повышает плавность разгона при ограниченном числе ступеней пускового резистора, но и улучшает энергетические показатели электропривода.

Рассмотрим расход электроэнергии в период пуска электровоза. На основе уравнения баланса мощностей можно записать

$$P_c = P_{эм} + \Delta P, \quad (5.8)$$

где  $P_c = U_c I_n$  — мощность, потребляемая электродвигателем из сети;  $P_{эм} = EI$  — мощность, идущая на создание электромагнитного момента;  $\Delta P = (R_n + r_{я}) I_n^2$  — мощность, теряемая в пусковом резисторе и якоре электродвигателя;  $U_c$  — напряжение

сети;  $I_n$  — пусковой ток тягового электродвигателя;  $E$  — э. д. с. электродвигателя;  $R_n$ ;  $r_{я}$  — сопротивления соответственно пускового резистора и якорной цепи электродвигателя.

В период пуска, который происходит при постоянном напряжении сети  $U_c$  и постоянном пусковом токе  $I_n$ , равном среднему пусковому току, сопротивлению движению, не зависящему от скорости, мощность, потребляемая из сети, потери в цепи якоря электродвигателя будут постоянными, а электромагнитная мощность будет изменяться линейно в функции времени.

Рассмотрим сначала пуск тяговых электродвигателей, включенных параллельно, т. е. на полное напряжение сети. В этом случае в начале пуска (при  $t=0$ ) мощность, потребляемая из сети, идет на нагрев пускового резистора и обмоток якорей электродвигателей:

$$U_c I_n = R_n I_n^2 + r_{я} I_n^2. \quad (5.9)$$

Мощности, соответствующие этому моменту времени, представлены на рис. 5.6, а отрезками  $OB$ ,  $AB$  и  $OA$ . Так как напряжение сети и пусковой ток на период пуска приняты постоянными, то отрезок  $BC$  изображает зависимость электрической мощности, потребляемой из сети, от времени  $P_c = f(t)$ . После окончания пуска ( $t=t_n$ ) пусковой резистор отключен ( $R_n=0$ ) и мощность, потребляемая из сети, равна мощности, идущей на создание электромагнитного момента электродвигателя, и мощности потерь в цепи якоря электродвигателя. Уравнение (5.8) примет вид

$$U_c I_n = r_{я} I_n^2 + E I_n. \quad (5.10)$$

Электромагнитная мощность электродвигателя пропорциональна частоте вращения, поэтому закон изменения ее во времени может быть получен соединением точки  $O$  и  $F$  прямой линией. Если из электромагнитной мощности вычесть механические потери, то получим закон изменения полезной мощности на валу электродвигателя.

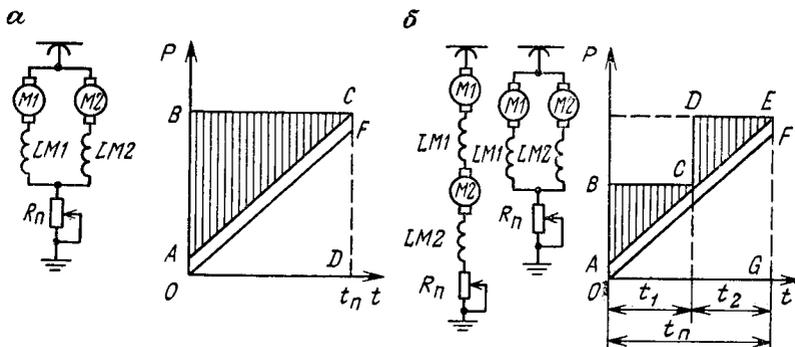


Рис. 5.6. Электрические диаграммы пуска при параллельном (а), последовательном соединении двигателей и при параллельном соединении — перегруппировке двигателей (б)

Переходя к выражению энергии за период пуска

$$A = \int_0^{\tau} P dt,$$

можно показать, что в период пуска тяговых электродвигателей приблизительно 50 % электрической энергии, потребляемой ими из сети, идет на потери энергии в пусковом резисторе (площадь  $ABC$ ).

При последовательном соединении тяговых электродвигателей в начальный момент пуска через каждый двигатель протекает пусковой ток  $I_n$ , а к якорям каждого двигателя прикладывается половинное напряжение сети. Следовательно, потребляемая из сети мощность будет в 2 раза меньше, чем при параллельном соединении якорей электродвигателей. Эта мощность выражается отрезком  $OB$  (см. рис. 5.6, б). Зная потери в якорях электродвигателей  $2r_{я}I_n$ , откладываем на оси ординат отрезок  $OA$ , равный этим потерям. После окончания пуска, т. е. через время  $t=t_n$ , тяговые электродвигатели будут работать с полным напряжением и потребляемая ими мощность будет равна  $2UI_n$ , что соответствует отрезку  $GE$ . Откладывая из точки  $E$  электрические потери в тяговых электродвигателях, находим точку  $F$  и, соединяя ее с точкой  $O$ , определяем закон изменения электромагнитной мощности в период пуска. В интервале времени  $t=t_1$  электродвигатели соединены последовательно, а увеличение скорости обеспечивается уменьшением сопротивления пускового резистора до нуля. В точке  $C$  происходит переключение электродвигателей с последовательного на параллельное соединение с одновременным введением пускового резистора. Потребляемая мощность электродвигателями увеличивается до значения  $2UI_n$  и сохраняется такой до завершения пуска, когда пусковой резистор полностью выведен ( $R_n=0$ ). Потери энергии при пуске в этом случае определяются площадями  $ABC$  и  $CDE$ , т. е. потери энергии уменьшаются и составляют приблизительно 33 % энергии, подведенной к тяговым электродвигателям. Таким образом, применение перегруппировки тяговых электродвигателей, помимо экономии электроэнергии при пусках, позволяет получить пониженные скорости движения с высоким к. п. д.

Для снижения скорости движения электровоза перед криволинейными участками пути, стрелками, крестовинами и перед остановкой, а также для поддержания ее постоянной при движении вниз по уклону применяется электрическое торможение. Из известных режимов электрического торможения наибольшее применение в электровозном транспорте нашел способ электродинамического торможения с самовозбуждением, называемый еще резисторным. Для реализации этого режима электродвигатели должны быть отключены от сети, а их якоря включены на добавочный резистор. На рис. 5.7 показаны принципиальные схемы перехода из тягового режима в режим электродинамиче-

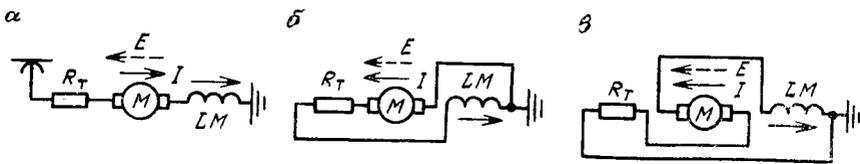


Рис. 5.7. Принципиальные электрические схемы динамического торможения с одним тяговым двигателем

ского торможения с самовозбуждением с одним тяговым электродвигателем. Вначале электродвигатель работает в тяговом режиме, которому соответствует схема на рис. 5.7, а. Затем тяговый электродвигатель отключается от сети и его якорь замыкается на добавочный резистор  $R_T$ . Якорь электродвигателя продолжает вращаться по инерции, и э. д. с., создаваемая в нем остаточным магнитным потоком, сохраняет свое направление, что и в тяговом режиме. Поэтому, чтобы сохранить прежнее направление тока в обмотке возбуждения электродвигателя при переходе в режим электродинамического торможения, необходимо переключить либо концы катушек главных полюсов (рис. 5.7, б), либо концы обмоток якоря (рис. 5.7, в). Если таких переключений не сделать, то ток, создаваемый остаточной э. д. с., изменит свое направление и, протекая через обмотку возбуждения, размагнитит магнитные полюса. Электродвигатель становится неуправляемым, так как тормозной момент не создается.

На рис. 5.8, а показана электрическая схема электровоза с двухдвигательным электроприводом. При переходе в режим динамического торможения собирается схема с перекрестно-петлевым их соединением (см. рис. 5.8, б). При такой схеме переключения ток  $I_1$  якоря первого электродвигателя  $M1$  проходит через обмотку возбуждения  $LM2$  второго электродвигателя  $M2$ , а ток якоря  $I_2$  второго электродвигателя — через обмотку возбуждения  $LM1$  первого электродвигателя  $M1$  и обеспечивает надлежащее намагничивание обмоток возбуждения без их переключения.

При движении электропоезда под уклон требуется длительное время поддержания необходимой скорости при работе дви-

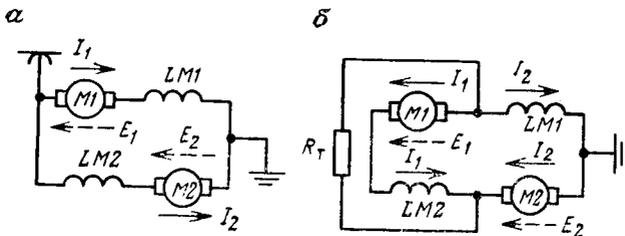


Рис. 5.8. Принципиальная электрическая схема динамического торможения с двумя тяговыми двигателями

гателя в режиме электродинамического торможения, а поскольку в этот момент в цепь якоря электродвигателя включен резистор, то последний должен быть рассчитан и выбран из расчета продолжительной его работы.

Режим электродинамического торможения менее экономичен, нежели тормозной режим с рекуперацией энергии в сеть, но он имеет определенные достоинства, заключающиеся в том, что при работе электродвигателя в этом режиме исключается явление юза, так как с резким снижением скорости движения снижается и тормозное усилие. Одновременно с этим невозможно полное стопорение электропоезда и удержание его на уклоне, что требует обязательного применения механического тормоза.

## 5.2. ТИПОВЫЕ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ АККУМУЛЯТОРНЫХ И КОНТАКТНЫХ ЭЛЕКТРОВЗОВ

Аккумуляторные электровозы предназначены для транспортирования вагонеток с полезными ископаемыми, породой, вспомогательными материалами и людей по главным откаточным выработкам шахт, опасных по газу или пыли, где правилами безопасности разрешено применение электровозов повышенной надежности. Схема (рис. 5.9) обеспечивает пуск электровоза, движение на двух различных скоростях при последовательном и параллельном соединении тяговых двигателей и свободный выбег. Управление электровозом, т. е. подключение тяговых электродвигателей к сети и отключение от нее, изменение величины добавочного сопротивления резистора, изменение схемы подключения тяговых электродвигателей осуществляется контроллером, установленным в кабине машиниста. Контроллер имеет две рукоятки: главного и реверсивного барабанов. Главная рукоятка предназначена для управления электровозом в тяговом

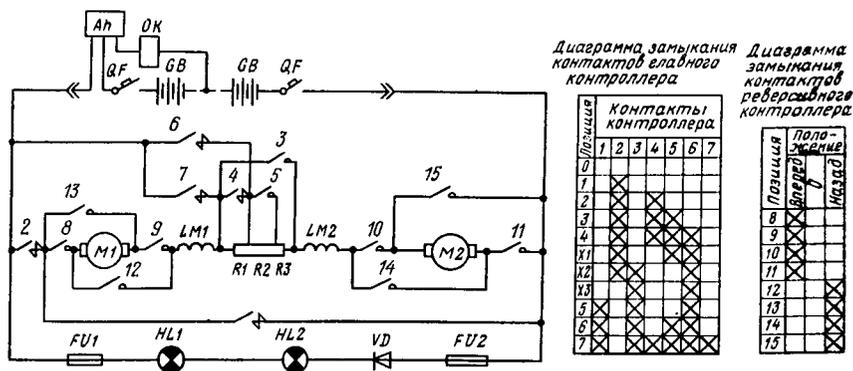


Рис. 5.9. Электрическая схема аккумуляторного электровоза

режиме, а реверсивная — для изменения направления движения. Обе рукоятки заблокированы между собой так, что перевод реверсивной рукоятки из положения «Вперед» в положение «Назад» или наоборот возможен только лишь при нулевом положении главной рукоятки. Главный барабан имеет восемь фиксированных положений, из которых одна нулевая. Реверсивный барабан имеет три положения: «Вперед», «Назад» и нулевое.

Рассмотрим принцип работы схемы. Для подготовки схемы к работе необходимо включить автомат  $QF$ , затем для движения «Вперед» рукоятка реверсивного барабана устанавливается в положение «Вперед». При этом замыкаются контакты 8—11. Теперь рукоятка главного барабана переводится из позиции 0 в позицию 1. Якори тяговых электродвигателей  $M1$  и  $M2$ , соединенных последовательно, подключаются к аккумуляторной батарее  $GB$  и начинают вращаться, работая на искусственной характеристике, соответствующей максимальной величине добавочного сопротивления резисторов  $R1—R3$ . Переводя далее рукоятку главного барабана из позиции 1 в позицию 2, замыкаем контакт 4, что вызывает шунтирование первой ступени пускового резистора  $R1$  и переход электродвигателей с первой на вторую искусственную характеристику. В позиции 3 шунтируется вторая ступень пускового резистора  $R2$ , а в позиции 4 — последняя ступень с сопротивлением  $R3$ , и электродвигатели начинают работать на искусственных характеристиках, соответствующих половинной величине номинального напряжения, на которых возможно длительное движение электровоза. Позиции  $X1—X3$  являются переходными, и тяговые электродвигатели переключаются на параллельную работу. В позиции 5 вновь вводится пусковой резистор с сопротивлениями  $R1—R3$ , которые включаются последовательно с электродвигателями. В позиции 7 тяговые электродвигатели остаются включенными параллельно на полное напряжение аккумуляторной батареи, что соответствует их работе на естественных характеристиках.

Контактные электровозы на напряжение 250 В применяются на шахтах угольной промышленности, а на напряжение 550 В — на крупных рудниках цветной и черной металлургии. Рассмотрим принципиальную схему контактного электровоза 14КР2А (рис. 5.10). Она предусматривает управление электровозом в режимах пуска, торможения, движения с максимальной и промежуточной скоростями и в режиме свободного выбега. Главный контроллер имеет 16 позиций в тяговом режиме и 8 позиций в режиме электродинамического торможения. Кроме электродинамического торможения на электровозе применен механический тормоз с ручным и пневматическим приводом. Включение и отключение электродвигателя компрессора  $M3$  осуществляется автоматически с помощью реле давления  $SP$ , который подключается к сети контактором  $KM$ . Подача звукового сигнала производится кнопкой  $SB$ .

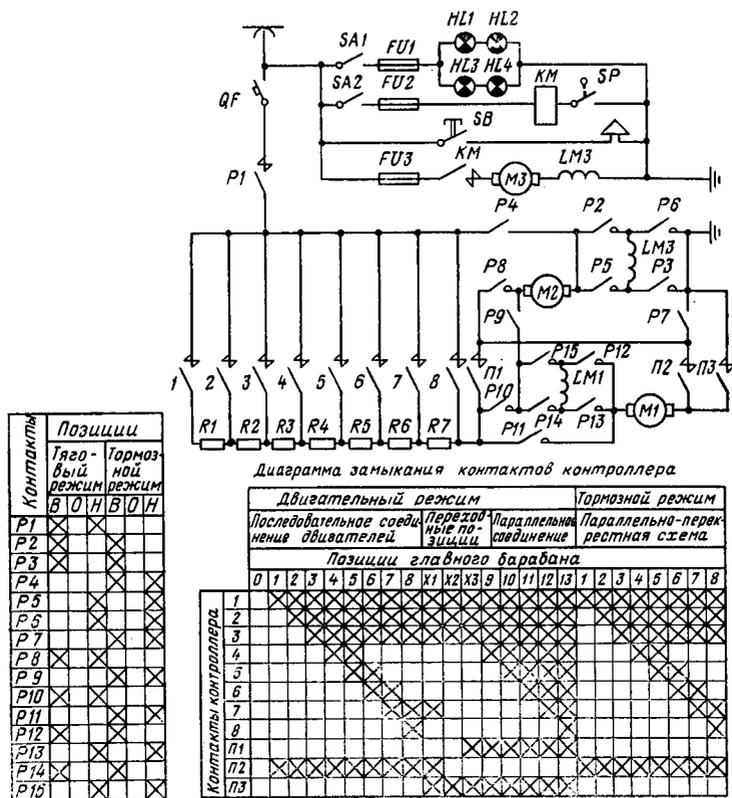


Рис. 5.10. Принципиальная электрическая схема управления контактным электровозом 14KP2

Электрическая схема электровоза работает следующим образом. Включается автомат  $QF$  и рукоятка реверсивного барабана из нулевого положения переводится в положение «Вперед» или «Назад» в зависимости от направления движения. В положении «Вперед» замыкаются контакты  $P1-P3, P8, P10, P12, P14$ , а в положении «Назад» — контакты  $P1, P5, P6, P8, P10, P13$  и  $P15$ . Затем рукоятка главного барабана переводится последовательно по мере увеличения скорости электровоза из позиции 1 до позиции 8. При этом тяговые электродвигатели в позициях 1—8 соединены последовательно и разгон ведется на искусственных электромеханических характеристиках до скорости, равной 50 % номинальной. В позициях  $X1-X3$  происходит переход от последовательного соединения электродвигателей к параллельному. Далее в позициях 9—13 электродвигатели разгоняются до максимальной частоты вращения, соответствующей естественной характеристике. При переходе в тормозной режим рукоятка реверсивного барабана переводится на

тормозную позицию 1. При этом тормозной контакт  $P1$  будет разомкнут и электродвигатели отключены от контактной сети, а в цепь якорей электродвигателей включено максимальное сопротивление резистора. Переводя рукоятку главного контроллера плавно из позиции 1 торможения в позицию 8, уменьшают значения сопротивления резистора, увеличивают ток, тормозной момент, и скорость движения электровоза снижается.

### 5.3. СХЕМЫ ТИРИСТОРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ШАХТНЫХ ЭЛЕКТРОВЗОВ

В предыдущем параграфе было показано, что основным способом регулирования скорости движения электровоза является изменение величины сопротивления в цепи якоря тягового электродвигателя. В периоды пуска и замедления в режиме электродинамического торможения электровоза этим способом пусковой или тормозной моменты тягового электродвигателя определяются как среднее значение от максимального и минимального момента переключения. Средний пусковой или тормозной момент в свою очередь зависит от числа ступеней резистора, и в конечном счете эти моменты всегда меньше предельно допустимого момента тягового электродвигателя, определяемого предельно допустимым током якоря, что приводит к недоиспользованию последнего, а следовательно, тяговой силы электровоза. Из-за введения добавочного сопротивления в цепь якоря на периоды пуска и торможения возникают потери энергии до 50 %, а если учесть, что имеется продолжительная работа на пониженных скоростях, вызванная необходимостью маневрирования, стесненностью выработок ограниченных длин, состоянием путевого хозяйства, требованиями правил безопасности, то такое регулирование скорости электровоза весьма неэкономично. Ограниченное число позиций контроллера вызывает при переводе рукоятки из одного положения в другое броски тока, а следовательно, и тягового усилия, что снижает надежность работы как электрической, так и механической части электропривода электровоза. К этому необходимо добавить наличие относительно ненадежного и громоздкого оборудования — контроллера и ящиков резисторов, а размещение крупногабаритного контроллера в кабине создает существенные неудобства при работе машиниста.

Вышесказанное определило дальнейшие пути совершенствования электропривода электровозов, направленного на создание экономичных и надежных систем с широким диапазоном плавного (бесступенчатого) регулирования скорости движения электровозов с использованием полупроводниковой техники.

Бесступенчатое регулирование частоты вращения тяговых электродвигателей шахтных электровозов может быть осуществлено импульсным методом. Сущность этого метода заключается в поочередном включении или отключении тягового элек-

тродвигателя от источника напряжения или периодическом подключении или отключении резистора в якорной цепи двигателя. В первом случае при подключении двигателя к источнику питания он развивает силу тяги больше силы сопротивления и поэтому ускоряется, а в период отключения — замедляется, так как сила тяги уменьшается. Величина средней скорости движения электровоза при этом будет зависеть от продолжительности ускоренного и замедленного движений. Поэтому частоту вращения тягового двигателя можно регулировать соответствующим изменением соотношения между длительностями ускоренного  $t_{\text{в}}$  и замедленного  $t_0$  движений.

В этом случае среднее значение напряжения на двигателе составит

$$U_{\text{ср}} = E \frac{t_{\text{в}}}{T} \quad (5.11)$$

или

$$U_{\text{ср}} = \gamma E,$$

где  $E$  — э. д. с. источника питания;  $T = t_{\text{в}} + t_0$  — период повторения, соответствующий заданной частоте следования импульсов;  $\gamma$  — скважность импульсов.

Изменение среднего значения напряжения влечет за собой изменение угловой скорости тягового двигателя согласно выражению

$$\omega = \frac{U_{\text{ср}} - R_{\text{я}} I}{c\Phi}. \quad (5.12)$$

Регулирование частоты вращения двигателя можно получить изменением значения пускового сопротивления, включенного в цепь якоря тягового двигателя, за счет периодического подключения и отключения резистора. В этом случае среднее значение его величины определяется из выражения

$$R_{\text{ср}} = R_{\text{п}} \left( 1 - \frac{t_{\text{в}}}{T} \right); \quad (5.13)$$

или

$$R_{\text{ср}} = R_{\text{п}} (1 - \gamma).$$

Изменение величины сопротивления в якорной цепи тягового двигателя приведет к изменению угловой скорости согласно выражению

$$\omega_{\text{ср}} = \frac{U - [r_{\text{я}} + R_{\text{п}} (1 - \gamma)] I}{c\Phi},$$

где  $c$  — конструктивный коэффициент электродвигателя;  $\Phi$  — магнитный поток.

На рис. 5.11 приведена схема электропривода с импульсным регулированием напряжения. В данной схеме  $VSI$  — основной

тиристор в цепи якоря тягового электродвигателя;  $VS2$  — вспомогательный тиристор в цепи коммутации;  $VD1$  — диод в цепи резонансного контура коммутации, предназначенный для колебательного перезаряда конденсатора;  $L$  и  $C$  — индуктивность и емкость колебательного контура коммутации;  $VD2$  — диод, шунтирующий якорь тягового электродвигателя и его обмотку возбуждения  $LM$ .

Регулирование угловой скорости тягового двигателя по этой схеме производится следующим образом. Вначале тиристоры  $VS1$  и  $VS2$  закрыты, а конденсатор  $C$  не заряжен. При включении привода начальный отпирающий импульс от устройства управления подается на управляющий электрод вспомогательного тиристора  $VS2$ , при открывании которого происходит заряд коммутирующего конденсатора  $C$  до напряжения источника питания. Верхняя обкладка конденсатора приобретает положительный потенциал, и после заряда конденсатора ток прекращается. Затем поочередно от системы управления подаются отпирающие импульсы на тиристоры  $VS1$  и  $VS2$ . При подаче отпирающего импульса на управляющий электрод основного тиристора  $VS1$  последний откроется и подклучит якорь тягового двигателя на полное напряжение источника питания. Ток через тиристор  $VS1$  и якорь двигателя  $M$  проходит до тех пор, пока на управляющий электрод вспомогательного тиристора  $VS2$  не поступит отпирающий импульс от управляющего устройства. Одновременно с током якоря протекает ток перезаряда конденсатора по цепи, образованной конденсатором  $C$ , индуктивностью  $L$  и диодом  $VD1$ . По окончании процесса перезарядки конденсатор  $C$  получает положительный потенциал на нижней его обкладке. При открывании вспомогательного тиристора  $VS2$  ток разряда конденсатора становится равным текущему значению тока нагрузки и к основному тиристоры  $VS1$  прикладывается обратное напряжение, вызывающее его запираение. Верхняя обкладка конденсатора вновь приобретает положительный потенциал. В период запертого состояния основного тиристора  $VS1$  ток в якорной цепи тягового двигателя под действием э. д. с. самоиндукции протекает через шунтирующий диод  $VD2$ .

Второй способ регулирования угловой скорости электродвигателя за счет периодического кратковременного изменения сопротивления цепи якоря применяется при реализации режима электродинамического торможения. Принципиальная схема импульсного управления тяговым двигателем в режиме электродинамического торможения показана на рис. 5.12. Принцип работы схемы следующий. В тяговом режиме электровоза замкнуты контакты  $KM1$ ,  $KM2$ ,  $KM4$  (или  $KM3$  и  $KM5$ ) и разомкнут контакт  $KM6$ . При переходе из тягового режима в режим электродинамического торможения контакты  $KM1$ ,  $KM4$  переключателя размыкаются, а контакты  $KM3$ ,  $KM5$  — замыкаются. При закрытом тиристоре  $VS1$  ток якоря, создаваемый остаточной



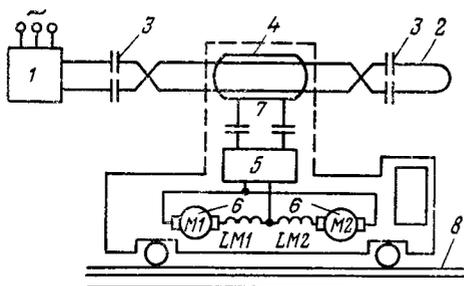


Рис. 5.13. Принципиальная электрическая схема бесконтактного высокочастотного электровоза

При реализации так называемой высокочастотной электровозной откатки (рис. 5.13) необходима преобразовательная подстанция высокой частоты 1, тяговая сеть 2, представляющая собой два высокочастотных одножильных линейных кабеля, подвешенных у кровли выработки над колеей 8 симметрично ее оси. В конце тяговой сети кабели замкнуты, а в начале — подключены к тиристорному преобразователю частоты. Расстояние между кабелями тяговой сети 400 мм. Линейные кабели перекрещиваются, чтобы снизить наводимые в рельсах, кабелях и других металлических предметах напряжения и токи. Индуктивность кабелей компенсируется конденсаторами 3, включенными через определенные промежутки последовательно с кабелем. Электромагнитное поле, возникающее вокруг кабелей, воспринимается специальным приемным устройством — энергоприемником 4, представляющим собой две плоские обмотки из нескольких витков специального высокочастотного кабеля, уложенных в незамкнутые ферритовые сердечники. Расстояние между сетью и электроприемником, расположенным в верхней части электровоза, 40—50 мм.

Преобразовательная подстанция бесконтактного электровозного транспорта шахт представляет собой тиристорный преобразователь частоты, который преобразует трехфазный ток промышленной частоты 50 Гц в однофазный ток повышенной частоты 5 кГц. Ток и частота сети стабилизированы, что обеспечивает постоянство характеристик электропривода независимо от его развиваемой мощности, места расположения и времени работы.

Для компенсации э. д. с. самоиндукции последовательно с витками энергоприемника включены конденсаторы 7. От энергоприемника энергия поступает через выпрямитель 5 к тяговым электродвигателям 6. Для регулирования угловой скорости тяговых двигателей могут использоваться либо управляемые тиристорные выпрямители, либо импульсные преобразователи, либо фазовое управление преобразователем переменного тока.

Дальнейшее развитие электропривода шахтного электровозного транспорта должно идти в направлении еще большего использования полупроводниковой техники для создания высоко-

экономичных, плавно регулируемых электроприводов. Сохранится на ближайшее время направление работ по созданию нового вида откатки высокочастотными электровозами.

#### 5.4. ШАХТНЫЕ САМОХОДНЫЕ ВАГОНЫ

##### 5.4.1. Общие сведения

В настоящее время на шахтах и рудниках находят применение системы транспорта полезного ископаемого или породы с помощью самоходных вагонов. Самоходные вагоны на пневмоколесном ходу обладают высокой производительностью. Высокая мобильность и маневренность позволяет использовать их в выработках, сильно искривленных в плане с углами уклона или подъема до  $15^\circ$ , что невозможно при применении рельсового транспорта. Самоходные вагоны могут быть использованы также при основном конвейерном транспорте как вспомогательные для доставки оборудования материалов, людей [46].

Главные механизмы самоходного вагона: ходовая часть и встроенный в днище кузова скребковый конвейер. К вспомогательным механизмам относятся приводы кабельного барабана, маслососа, компрессора.

Привод ведущих колес ходовой части самоходного вагона электрический. В качестве электропривода может быть использован двигатель постоянного или переменного тока. В приводе постоянного тока в качестве ходового используется двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением, имеющий мягкую механическую характеристику и допускающий значительные перегрузки по моменту.

Для шахтных самоходных вагонов с приводом переменного тока используются асинхронные короткозамкнутые двигатели как односкоростные, так и многоскоростные. Последние, однако, позволяют ступенчато регулировать скорость движения самоходного вагона.

Для повышения пускового момента и для выравнивания загрузки ходовых двигателей, как правило, применяются асинхронные двигатели с повышенным скольжением.

Выбор той или иной системы электропривода шахтных самоходных вагонов зависит от условий их эксплуатации. Для угольных и сланцевых шахт и калийных рудников, опасных по газу или пыли, целесообразно использовать самоходные вагоны с электродвигателями переменного тока и электродвигатели постоянного тока с питанием от аккумуляторных батарей, когда требуется взрывобезопасное исполнение электрооборудования.

В шахтах и рудниках, не опасных по газу и пыли, возможно применение самоходных вагонов с электродвигателями постоянного тока с питанием их электроэнергией через кабели. В этом случае усложняется система питания электродвигателей, требующая применения трехжильного кабеля, кабелеукладчика и

кабельного барабана. Кроме того, свобода перемещения самоходного вагона в этом случае ограничивается длиной питающего кабеля и обычно не превышает 400 м. Однако расстояние доставки груза может быть увеличено применением троллейных самоходных вагонов. Возможно также троллейно-кабельное питание электродвигателей самоходных вагонов. В этом случае движение вагонов по откаточным выработкам осуществляется при питании от контактного провода, а при движении в забое — через гибкий кабель.

Привод конвейера и маслососов гидропривода кабельного барабана осуществляется от отдельного электродвигателя постоянного или переменного тока. При электроприводе постоянного тока — это электродвигатель постоянного тока со смешанным возбуждением, а при электроприводе переменного тока — асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.

В шахтных самоходных вагонах с электроприводом постоянного тока для регулирования скорости их движения применяется резисторная схема управления. Имеются две установившиеся скорости движения. Одна получается при последовательном соединении ходовых двигателей и другая — при параллельном их соединении. Плавность пуска достигается последовательным включением двигателей и пускового резистора. После выведения пускового резистора самоходный вагон движется с промежуточной скоростью, равной половине максимальной. Дальнейшее увеличение скорости движения вагона осуществляется переходом на параллельную работу двигателей сначала с резистором в цепи якоря, а затем постепенным их шунтированием. Достоинство такой схемы — ее простота. Недостатки — большие потери энергии в пусковых резисторах; большие броски тока при пуске и регулировании скорости движения, что приводит к значительным динамическим перегрузкам в элементах привода и к ухудшению условий коммутации ходовых двигателей.

#### 5.4.2. Электропривод самоходных вагонов с приводом постоянного тока

Рассмотрим принцип работы электрической схемы самоходного вагона ИВС-20 с электроприводом постоянного тока (рис. 5.14). Для подачи питания в цепь управления и силовую цепь самоходного вагона включается линейный автомат  $QF$ . После этого получает питание двигатель постоянного тока параллельного возбуждения  $M4$ , который разгоняется и приводит во вращение генератор постоянного тока параллельного возбуждения  $G$ . При этом на якоре последнего появляется напряжение 36 В и загораются фары переднего  $EL3$  и заднего  $EL1$ ,  $EL2$  света. Загорание фар свидетельствует о наличии напряжения в цепи управления. Если педаль ногого командоконтроллера  $KH$  находится в нулевом положении, то блокировочное



реле *КБ* срабатывает и своими замыкающими контактами *КБ2* и *КБ3* подготавливает цепи управления ходовыми двигателями к работе, а контактом *КБ1* производится шунтирование нулевого положения командоконтроллера. Кроме того, получают питание катушки реле времени *КТ1* и *КТ2*, которые, включившись, размыкают свои контакты *КТ1* и *КТ2* в цепях питания катушек контакторов ускорения *КМ6* и *КМ7*. На этом подготовительные операции заканчиваются.

Для включения электродвигателей хода необходимо изменить положение педали ножного командоконтроллера *КН*. При переводе педали командоконтроллера *КН* из нулевого положения в положение 1 «Вперед» получают питание катушки контакторов *КМ1* и *КМ2*. Это вызовет их срабатывание и замыкание главных контактов *КМ1* и *КМ2* в цепях якорей электродвигателей *М1* и *М2* и размыкание блок-контакта *КМ1* в цепи катушек *КМ3* и *КМ4*, обеспечивая их электрическую блокировку. Переводя педаль командоконтроллера *КН* из положения 1 «Вперед» в положение 2 «Вперед», подается питание на катушку реле времени *КТ3*, которое срабатывает и замыкает свой контакт *КТ3* в цепи катушки контактора *КМ5*, который, включившись, замыкает свой главный контакт *КМ5* в якорной цепи двигателей и подключает их последовательно к сети при полностью введенном резисторе *Р2* и *Р3*. Двигатели *М1* и *М2* начинают вращаться и приводят в движение самоходный вагон.

Одновременно с этим размыкается контакт *КМ5* в цепи катушки контактора *КМ9*, исключая возможность его включения одновременно с контактами *КМ5* (электрическая блокировка, обеспечивающая работу двигателя либо с последовательным, либо с параллельным соединением). Размыкается также контакт реле времени *КТ3*, вызывающий обесточивание реле времени *КТ1*, которое с выдержкой времени, равной 0,7 с, замыкает свой контакт в цепи катушки контактора *КМ6*. Контактор *КМ6* срабатывает и своим контактом *КМ6* шунтирует первую ступень пускового резистора *Р2*, и скорость движения самоходного вагона увеличивается. Одновременно с этим размыкается блок-контакт *КМ6*, вызывающий обесточивание реле времени *КТ2*. Последнее с выдержкой времени, равной 0,3 с, замыкает свой контакт *КТ2* в цепи катушки контактора ускорения *КМ7* и вызывает его включение. Контактор *КМ7* своим замыкающим контактом шунтирует вторую ступень пускового резистора *Р3*, и двигатели выходят на механические характеристики с половинным напряжением, чему соответствует скорость движения вагона, равная половине максимальной.

Дальнейшее увеличение скорости движения самоходного вагона осуществляется переводом педали командоконтроллера из положения 2 в положение 3 «Вперед». При этом теряют питание катушки контакторов ускорения *КМ6* и *КМ7*, которые размыкают свои контакты *КМ6* и *КМ7*, вновь вводя ступени пускового резистора в цепи якорей электродвигателей *М1* и *М2*.

Одновременно с этим получает питание катушка контактора *КМ8*, который, срабатывая, замыкает свой главный контакт *КМ8* в цепи якоря двигателя *М1*, подключая его на полное напряжение сети с пусковой ступенью резистора *Р2*, и скорость двигателя вагона постепенно увеличивается. Контакт *КМ6* замыкает свой блок-контакт *КМ6* в цепи катушки контактора ускорения *КМ9*, не производя пока никакого действия, так как контакт *КМ5* остается разомкнутым. Размыкается также блок-контакт *КМ8* в цепи реле времени *КТ3*. Обесточивание контактора ускорения *КМ6* вызывает также замыкание его блок-контакта *КМ6* в цепи катушки реле времени *КТ2*, его включение и размыкание вновь контакта *КТ2* в цепи контактора ускорения *КМ7*.

Обесточивание реле времени *КТ3* вызывает через 0,25 с размыкание контакта *КТ3* в цепи контактора ускорения *КМ5* и замыкание контакта *КТ3* в цепи реле времени *КТ1*. Контакт *КМ5* размыкает свой главный контакт *КМ5* в цепи якорей двигателей *М1* и *М2* и блок-контакт в цепи катушки контактора ускорения *КМ9*, который, включившись, замыкает свой главный контакт *КМ9* в цепи якорей двигателей *М1* и *М2*, переводя их на параллельную работу с полным напряжением сети и последовательным включением пусковых резисторов *Р2* и *Р3*. Контакт *КМ9* размыкает также размыкающиеся блок-контакты *КМ9* в цепях катушек контактора ускорения *КМ5* и реле времени *КТ1*, замыкаются блок-контакты *КМ9* в цепях катушек контакторов ускорения *КМ6* и *КМ7*. Реле времени *КТ1*, обесточившись, через промежуток времени, равный 0,7 с, замыкает свой контакт *КТ1* в цепи катушек ускорения *КМ6* и *КМ7*, вызывая их срабатывание и замыкание их главных контактов *КМ6* и *КМ7* в цепях якорей двигателей *М1* и *М2*, производя шунтирование пусковых резисторов *Р2* и *Р3*. Ходовые двигатели *М1* и *М2* выходят на естественные механические характеристики, и вагон движется с максимальной скоростью.

Остановка вагона осуществляется возвращением педали командоконтроллера в нулевое положение, для чего необходимо отпустить последнюю, и она под действием пружины вернется в нулевое положение. Для полной остановки необходимо наложить ручной или ножной механический тормоз.

Для изменения направления движения самоходного вагона необходимо педаль командоконтроллера последовательно переводить в положения 1, 2, 3 «Назад». В данном случае вместо контакторов *КМ1* и *КМ2* включаются контакты *КМ3* и *КМ4*, а вся остальная аппаратура управления работает аналогично движению «Вперед».

Для включения конвейера необходимо нажать на кнопку *SB3*. При этом замыкается контакт в цепи катушки контактора *К1*. Срабатывание контактора *К1* вызывает замыкание его главного контакта *К1* в цепи якоря двигателя *М3*, который начинает разгоняться с последовательно включенным в цепь его

якоря добавочным резистором  $R1$ . Одновременно замыкаются блок-контакты  $K1$ : один в цепи катушки контактора  $K2$ , а другой в цепи, шунтирующей кнопку  $SB3$ . Контактор  $K2$ , включившись, замыкает свой главный контакт  $K2$ , шунтирующий резистор  $R1$  в цепи якоря двигателя  $M3$ , переводя его на естественную механическую характеристику, и конвейер работает с максимальной скоростью. Размыкается также блок-контакт  $K2$  в цепи катушки блокировочного реле  $KB$ , исключая возможность движения вагона при работающем конвейере.

Останов конвейера производится нажатием на кнопку  $SB2$ .

В схеме предусмотрена защита от токов к. з., которая осуществляется: максимальными реле  $KA1$  и  $KA2$  для двигателя конвейера и ходовых двигателей; плавкими предохранителями  $FU2$ ,  $FU3$  цепей освещения и управления; плавким предохранителем  $FU1$  якорной цепи двигателя  $M4$ .

### 5.4.3. Электропривод самоходного вагона с электродвигателями переменного тока

Принципиальная электрическая схема электропривода самоходного вагона с асинхронными двигателями показана на рис. 5.15. Для подготовки схемы к работе необходимо сначала включить линейный автомат  $QF$ , а затем нажать на кнопку  $SB2$  «Пуск» штрекового пускателя, и на вагон подается напряжение переменного тока напряжением 660 В по пятижильному кабелю. Подача напряжения контролируется загоранием ламп передних фар  $EL3$  и  $EL4$ . Штрековый пускатель остается включенным и после отпускания кнопки  $SB2$ , так как она шунтируется резистором  $R$ .

Рассмотрим режим движения самоходного вагона. Прежде чем запустить ходовые двигатели, необходимо включить двигатель маслонасоса  $M3$ , для чего нажимают на кнопку  $SB5$ . При этом катушка контактора  $KM8$  обтекается током, срабатывает контактор и своими главными контактами  $KM8$  подключает двигатель  $M3$  к сети. При этом схема соединения обмоток статора обеспечивает его работу с минимальной частотой вращения. Одновременно с этим замыкаются блок-контакты  $KM8.1$ ,  $KM8.2$  и размыкается блок-контакт  $KM8.3$ .

Теперь необходимо перевести двигатель  $M3$  на максимальную частоту вращения. Для этого необходимо нажать на кнопку  $SB6$ . При этом катушка контактора  $KM8$  обесточивается, а через катушки контакторов  $KM7$  и  $KM9$  начинает проходить ток. Контакторы  $KM7$  и  $KM9$  срабатывают и замыкают свои контакты  $KM7$  и  $KM9$  в цепи статора двигателя  $M3$ , переводя его на максимальную частоту вращения, так как обмотки статора соединены в двойную звезду. Включение контакторов  $KM7$  и  $KM9$  приводит также к размыканию блок-контакта  $KM9.3$  (электрическая блокировка) и к замыканию блок-контактов  $KM9.1$ ,  $KM9.2$  и  $KM7.1$ . Последний подготавливает цепь

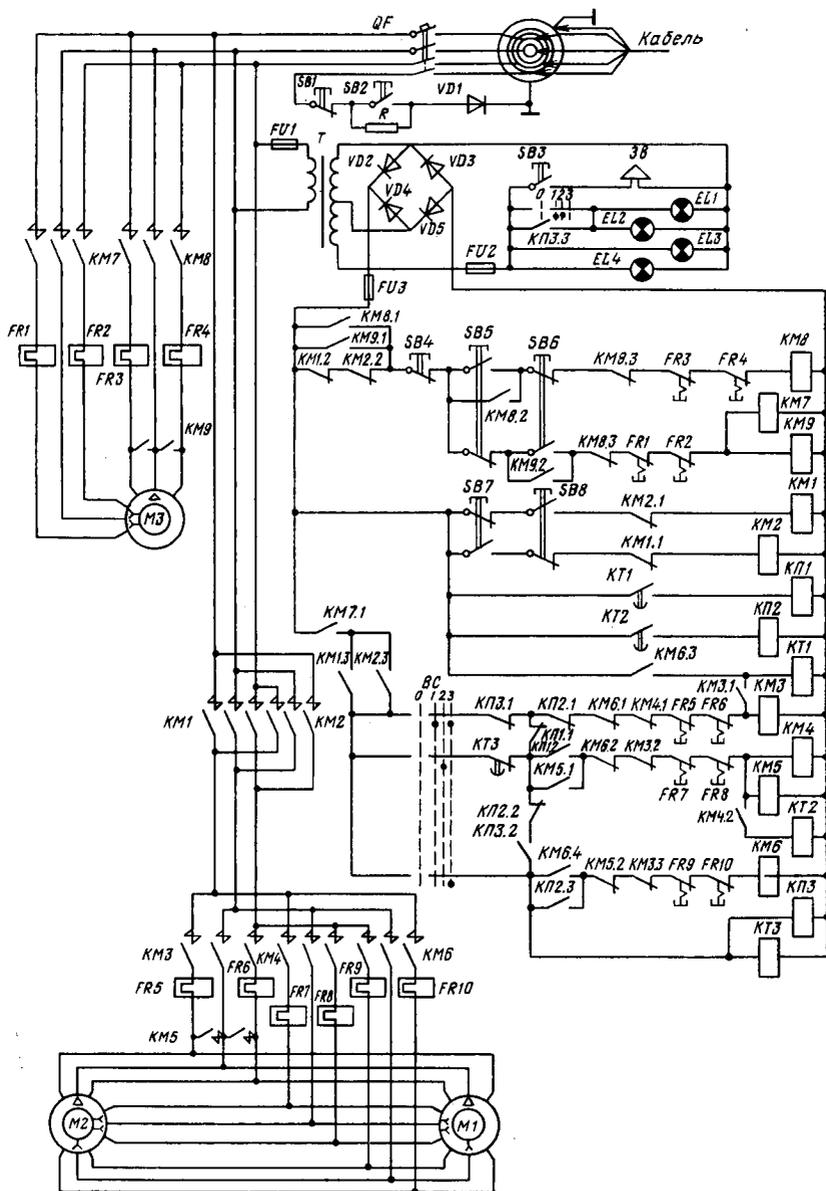


Рис. 5.15. Принципиальная электрическая схема самоходного вагона с приводом переменного тока

управления ходовыми двигателями. Таким образом, запуск ходовых двигателей возможен лишь при максимальной частоте вращения двигателя маслососа, без которого невозможна работа гидротормозов, усилителя рулевого колеса и привода кабельного барабана.

Для запуска ходовых двигателей сначала выбирают направление движения вагона. Затем нажимают педаль, соответствующую выбранному направлению движения. При этом, например, замыкается контакт *SB8* и катушка контактора *KM1* начинает обтекаться током. Это вызывает его срабатывание и замыкание главных контактов *KM1* и блок-контакта *KM1.3* в цепи управления контакторами хода и размыкание блок-контактов *KM1.1* и *KM1.2* (электрическая блокировка). Вагон имеет три фиксированные скорости движения (низшую, среднюю и высшую). Для движения с низшей скоростью необходимо командоконтроллер выбора скоростей *BC* перевести из левого положения в положение *1*. При этом срабатывает контактор *KM3*, так как его катушка начинает обтекаться током, и своими главными контактами *KM3* подключает обмотки статоров двигателей *M1* и *M2* к сети, и вагон приходит в движение с низшей скоростью. Контактор *KM3*, сработав, замыкает блок-контакт *KM3.1*, подающий питание на катушку реле времени *KT1*, размыкает блок-контакты *KM3.2*, *KM3.3* (электрическая блокировка против включения других скоростей). Реле времени с необходимой выдержкой времени своим контактом *KT1* включает промежуточное реле *KП1*, которое контактом *KП1.1* разрывает цепь катушки контактора *KM3*, а контактом *KП1.2* подготавливает цепь для катушки контактора *KM4*.

Увеличение скорости движения вагона производится переводом командоконтроллера *BC* из положения *1* в положение *2*. Этому положению соответствует обесточивание катушек контактора *KM3* и реле времени *KT1*. Их отключение приводит вновь к замыканию контакта *KM3.2*, что образует цепь для катушек контакторов *KM4* и *KM5*. Они срабатывают и главными контактами *KM4* и *KM5* переводят двигатели *M1* и *M2* на среднюю скорость движения, а блок-контакт *KM4.1* разрывает цепь катушки контактора *KM3* (электрическая блокировка); замыкающим блок-контактом *KM5.1* шунтируется контакт *KП1.2*, так как он разомкнется после отпадания якоря промежуточного реле *KП1*; блок-контакт *KM5.2*, размыкаясь, обеспечивает блокировку от одновременной работы двигателей на высшей скорости. Блок-контакт *KM4.2* подключает к источнику питания реле времени *KT2*, которое с выдержкой времени своим замыкающим контактом *KT2* подает питание на промежуточное реле *KП2*, которое, включившись, размыкает контакты *KП2.1*, *KП2.2*, *KП2.3*.

И наконец, для получения высшей скорости движения вагона командоконтроллер *BC* переводится в положение *3*. Контактors *KM4* и *KM5* и реле времени *KT2* обесточиваются, и их

контакты и блок-контакты возвращаются в исходные положения. Образуется цепь питания для катушки контактора *КМ6*, который, включившись, замыкает главные контакты *КМ6* в цепях статоров двигателей *М1* и *М2*, переводя их на работу с высшей скоростью. Одновременно срабатывают промежуточное реле *КПЗ* и реле времени *КТЗ*. Высшей скорости движения вагона соответствуют следующие положения контактов и блок-контактов контактора *КМ6*, промежуточного реле *КПЗ* и реле времени *КТЗ*: контакт *КПЗ.1* — разомкнут, контакт *КПЗ.2* — замкнут, контакты *КПЗ.3* и *КТЗ* — разомкнуты, блок-контакты *КМ6.1* и *КМ6.2* — разомкнуты, блок-контакты *КМ6.3* и *КМ6.4* — замкнуты.

Останов двигателей хода производится в обратном порядке переводом командоконтроллера последовательно из положения *3* в положения *2*, *1* и *0*. Для этого необходимо отпустить педаль, и под давлением пружины командоконтроллер возвращается в нулевое положение. В этом положении вагон движется по инерции за счет запасенной кинетической энергии. Окончательное торможение вагона производится гидротормозом.

Для движения в обратную сторону нажимается кнопка *SB7* «Назад». В этом случае срабатывает контактор *КМ2*, который своими контактами подключает двигатели *М1* и *М2* к сети для другого направления вращения. Переход с низшей скорости к высшей производится аналогично движению «Вперед».

Подача звукового сигнала осуществляется нажатием на кнопку *SB3*, установленную на пульте управления.

Конвейер приводится в движение двигателем *М3* через фрикционную муфту, а поэтому, как и двигатель маслонасоса, имеет две скорости движения тягового органа.

Ходовые двигатели, двигатели конвейера и маслонасоса защищены от перегрузок тепловыми реле *FR1—FR10*, размыкающие контакты которых находятся в цепях управления контакторами ходовых двигателей и двигателей конвейера.

Плавкими предохранителями *FU1—FU3* защищены от токов к. з. цепи управления и освещения.

Силовые цепи электродвигателей *М1—М3* защищены от токов к. з. автоматическим выключателем *QF*.

### 6.1. УСЛОВИЯ РАБОТЫ, РЕЖИМЫ И НАГРУЗКИ ОСНОВНЫХ МЕХАНИЗМОВ ОЧИСТНЫХ КОМБАЙНОВ

Очистные комбайны предназначены для разрушения угля и навалки его на забойный конвейер или другое средство доставки. Привод исполнительных органов, которых может быть один или два, осуществляется от одного или двух электродвигателей. Механическая энергия от электродвигателя к исполнительному органу передается через цилиндрические или конические зубчатые передачи.

Исполнительные органы очистных комбайнов в процессе работы испытывают нагрузки, носящие резко переменный стохастический характер, и определяются коэффициентами вариации  $\vartheta_{1и}$ — $\vartheta_{5и}$  [36]:  $\vartheta_{1и}$  — коэффициент, характеризующий особенности конструкции исполнительного органа;  $\vartheta_{2и}$  — коэффициент вариации силы резания на одном резае, зависящий от изменчивости хрупкопластичных свойств угля;  $\vartheta_{3и}$  — коэффициент вариации, зависящий от различной сопротивляемости угля резанию в сечении лавы;  $\vartheta_{4и}$  — коэффициент вариации с частотой изменения  $10^{-2}$ — $10^{-3}$  Гц, зависящий от сопротивляемости угля резанию по длине лавы;  $\vartheta_{5и}$  — коэффициент вариации с частотой изменения 1—3 Гц, зависящий от неравномерности подачи на забой.

Суммарные коэффициенты  $\vartheta_{н.с}$  и  $\vartheta_{в.с}$  вариации сил резания на исполнительном органе соответственно по низкой и высокой частотам согласно [36] равны:

$$\vartheta_{н.с} = \sqrt{\left(\vartheta_{1и} \frac{M_i}{M_{об}}\right)^2 + \left(\vartheta_{5и} \frac{M_i}{M_{об}}\right)^2}; \quad (6.1)$$

$$\vartheta_{в.с} = \sqrt{\left(\vartheta_{2и} \frac{M_i}{M_{об}}\right)^2 + \left(\vartheta_{3и} \frac{M_i}{M_{об}}\right)^2}, \quad (6.2)$$

где  $M_i$  — крутящий момент, соответствующий средней нагрузке, расходуемой на разрушение угля  $i$ -ым исполнительным органом;  $M_{об}$  — суммарный крутящий момент, соответствующий средней нагрузке, расходуемой на разрушение угля всеми исполнительными органами комбайна.

Кроме нагрузок, действующих на исполнительный орган комбайна, существенное влияние на режим работы его электродвигателя оказывают продолжительность его включения (ПВ)

средняя скорость подачи комбайна при нормальной эксплуатации;  $\omega_{\text{ном}}$  — номинальная угловая скорость ротора электродвигателя.

При проработке режущего органа после останова комбайна

$$M_0 = A10^3/\omega_{\text{ном}}.$$

Нормальному течению режима пуска способствует также условие

$$U_{\text{п. ф}} \geq 0,8U_{\text{ном}}; \quad M_0 = A10^3/\omega_{\text{ном}}, \quad (6.6)$$

где  $U_{\text{п. ф}}$  — фактическое напряжение на зажимах электродвигателя в период пуска;  $U_{\text{ном}}$  — номинальное напряжение сети.

Если пуск электродвигателя состоялся, то его продолжительность будет зависеть как от величины момента сопротивления, так и от приложенного напряжения. Продолжительность пуска сказывается на тепловом состоянии двигателя, так как тепло, выделяемое в нем, пропорционально квадрату пускового тока, протекающего по его обмоткам.

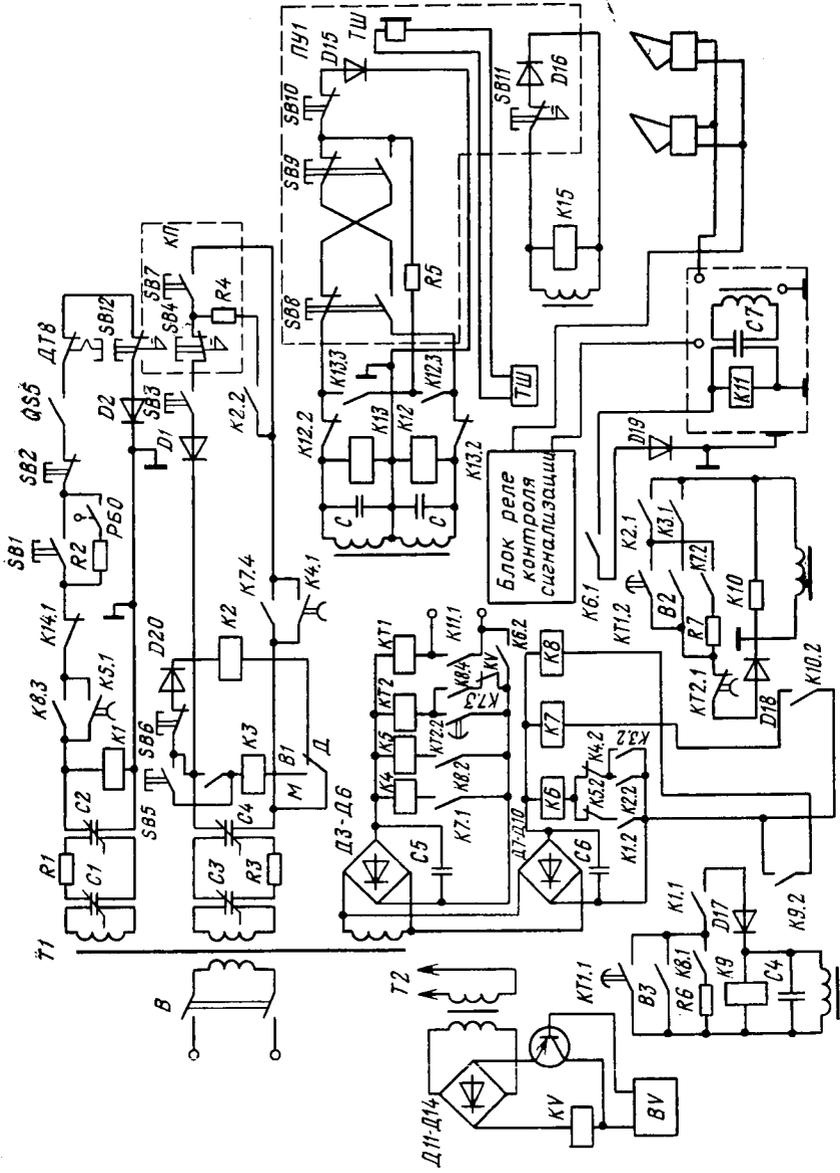
## 6.2. НЕРЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ЗАБОЙНЫХ МАШИН

Наиболее простой электропривод основных механизмов очистных и проходческих комбайнов и стругов — электропривод переменного тока на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Такой электропривод целесообразно использовать на исполнительных органах очистных и проходческих комбайнах, работающих в забоях с незначительными колебаниями крепости угля или породы. Мощность электродвигателя исполнительного органа в этом случае выбирается из расчета работы комбайна в самых тяжелых условиях, и поэтому двигатель большую часть времени будет работать с недогрузкой, но этот недостаток окупается простотой и надежностью схемы управления.

В качестве примера нерегулируемого электропривода исполнительного органа и механизма подачи рассмотрим схему управления комбайном «Кировец». Эта схема предусматривает: дистанционное управление пускателем комбайна и конвейера с пульта комбайна, управление пускателем предохранительной лебедки, дистанционное аварийное отключение комбайна, автоматическое выключение электродвигателя комбайна при срабатывании реле блокировки орошения, блокировку от включения комбайна и конвейера при проведении ремонтных работ и автоматическое отключение электродвигателя комбайна при его опрокидывании или несостоявшемся пуске.

Принципиальная электрическая схема управления комбайном «Кировец» показана на рис. 6.1. Управление пускателями





всех электродвигателей осуществляется в соответствии с заданной технологической последовательностью аппаратурой управления и сигнализации.

Для приведения аппаратуры в исходное положение необходимо включить автоматический выключатель *QF1* и разъединители *QS1—QS5*. Понижающие трансформаторы *T1—T3* получают питание. Включение реверсора двигателя исполнительного органа *M1* приводит к замыканию как силовых его контактов, так и блок-контакта *QS5* в цепи промежуточного реле *K1*.

Для пуска двигателя исполнительного органа нажимается кнопка *SB1*. При этом катушка промежуточного реле *K1* обтекаетя однополупериодным выпрямленным током, значения которого достаточно для срабатывания этого реле. Реле *K1*, включившись, замыкает свои замыкающие контакты *K1.1* и *K1.2*: первый — в цепи контактора *K9*, подготавливая его к работе, а второй — в цепи реле *K6*. Катушка реле *K6*, оказавшись под током, вызывает его срабатывание и замыкание контактов *K6.1* и *K6.2*. Первый — подключает катушку реле предупредительного сигнала *K11*, а второй — подготавливает цепь питания для реле времени *KT1*. Реле *K11* срабатывает и замыкает свой контакт *K11.1* в цепи реле времени *KT1*.

Реле времени *KT1*, получив питание, с выдержкой времени, равной 6 с, замыкает свои контакты *KT1.1* и *KT1.2* в цепях промежуточных реле *K9* и *K10*. Реле *K9* срабатывает и своим контактом *K9.1* подключает катушку контактора *KM1* к источнику питания, а через его линейные контакты *KM1.1* асинхронный двигатель *M1* исполнительного органа подключается к сети переменного тока. Одновременно замыкается контакт *K9.2* и срабатывает реле *K8*, которое контактом *K8.1* шунтирует контакт реле времени *KT1.1*, а контактом *K8.2* подключает реле *K5* к источнику постоянного тока. Контакт *K8.3* шунтирует размыкающий контакт *K5.1*. Реле *K5*, получив питание, замыкает контакт *K5.1* в цепи реле *K1*. Разомкнувшийся контакт *K5.2* обесточивает реле *K6*, которое своими контактами *K6.1* и *K6.2* снимает предупредительный сигнал и обесточивает реле времени *KT1*. Разомкнувшийся контакт *KT1.1* не нарушает питания реле *K9*, которое осуществляется по цепочке: обмотка трансформатора — резистор *R6* — контакты *K8.1* и *K1.1* — диод *D17*.

Управление пускателем конвейера можно осуществлять как с пульта управления комбайна, так и с кнопочного поста *KП*, расположенного на погрузочном пункте откаточного штрека. Для управления пускателем конвейера с пульта комбайна используется промежуточное реле *K3*, а с кнопочного поста — промежуточное реле *K2*. Выбор режима управления производится переключателем *B1* установкой его в положение *M* (местное) или *D* (дистанционное).

При дистанционном управлении пуск конвейера производится нажатием на кнопку *SB3*, после чего промежуточное реле

обтекается однополупериодным выпрямленным током, значение которого достаточно для его срабатывания. Реле своим замыкающим контактом *K2.1* подает однополупериодный выпрямленный ток на катушку реле *K10*, которое, сработав, замыкает контакт *K10.1* в цепи контактора *KM2*. Последний своими главными контактами *KM2.1* подключает обмотки статора двигателя конвейера *M4* к сети переменного тока. Контроль за процессом запуска конвейера ведется с помощью реле скорости *BV* и реле времени *KT2*. При нормальном пуске реле скорости *BV*, контролирующее скорость движения тягового органа, срабатывает раньше, чем включается реле времени *KT2*. При затяжке пуска конвейера, вызванной обрывом или перекосом тяговой цепи, на вход реле времени сигнал не подается и оно не включается. Тогда реле времени срабатывает, так как контакт *K7.3* замкнут, и размыкает контакт *KT2.1* в цепи промежуточного реле *K10*, вызывая его обесточивание и через контакты *KM2.1* отключение двигателя конвейера *M4* от сети. Контакт *KT2.2* реле времени *KT2* самоблокируется. Поэтому повторный пуск конвейера возможен только после отключения реле времени *KT2* от источника питания. Для этого необходимо одновременно снять и вновь подать напряжение питания, пользуясь при этом переключателем *B*.

Пуск, реверсирование и останов электродвигателя предохранительной лебедки производится кнопками *SB8—SB10* с пульта управления *ПУ1*. Аварийное отключение всех механизмов производится кнопкой *SB11*. При нажатии на эту кнопку происходит обесточивание реле *K15*, которое своим контактом *K15.1* подключает отключающую катушку *OK* и вызывает отключение автоматического выключателя *QF1*.

Защита электродвигателя исполнительного органа от опрокидывания или затянутающегося пуска (более 2,2 с) осуществляется исполнительным реле, контакт которого *K14.1* включен в цепь промежуточного реле *K1*.

Блокировка, не допускающая включение комбайна при работе в зоне действия его исполнительного органа, осуществляется кнопкой *SB12* поста управления. Блокировка, не допускающая включения конвейера при проведении ремонтных работ на конвейере, осуществляется кнопкой *SB4*.

При отсутствии давления в системе орошения контакт *PBO* размыкается и электродвигатель исполнительного органа останавливается.

Схема управления комбайном предусматривает телефонную связь *ТШ* между машинистом комбайна и обслуживающим персоналом погрузочного пункта на штреке.

Нагрузка на электродвигатель исполнительного органа забойной машины изменяется в широких пределах и зависит от условий зарубки (крепость угля и породы, затупление зубков, скорости резания и подачи). Поэтому регулировать нагрузку на исполнительном органе можно как изменением скоростей

подачи или резания, так и одновременным их изменением. В этом случае требуется применение регулируемого электропривода либо исполнительного органа, либо механизма подачи.

### 6.3. РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ЗАБОЙНЫХ МАШИН

#### 6.3.1. Регулируемый привод очистного комбайна с гидравлической подающей частью

В настоящее время наибольшее распространение нашли очистные комбайны с регулируемой скоростью подачи и постоянной скоростью резания.

На рис. 6.2 показана функциональная схема автоматического поддержания заданной нагрузки исполнительного органа очистного комбайна с гидравлической подающей частью. Рассмотрим работу схемы в автоматическом режиме. В этом случае переключатель *П1* должен находиться в положении «Авт», а переключатель *П2* — в положении «На забой».

Контроль за нагрузкой асинхронного двигателя исполнительного органа очистного комбайна ведется датчиком нагрузки *ДН*, сигнал с которого подается на блок сравнения *БС*. В блоке *БС* происходит сравнение сигнала, пропорционального действительной нагрузке, с эталонным сигналом, пропорциональным заданной нагрузке. Если нагрузка на исполнительном органе комбайна выше заданной, то блок сравнения вырабатывает сигнал, который, поступая на блок триггеров *Т*, вызывает включение триггера *Т1*. Последний выдает сигнал, поступающий на логический элемент *И*, а с него — на датчик ограничения скорости *ДОС*, если на его второй вход подан сигнал

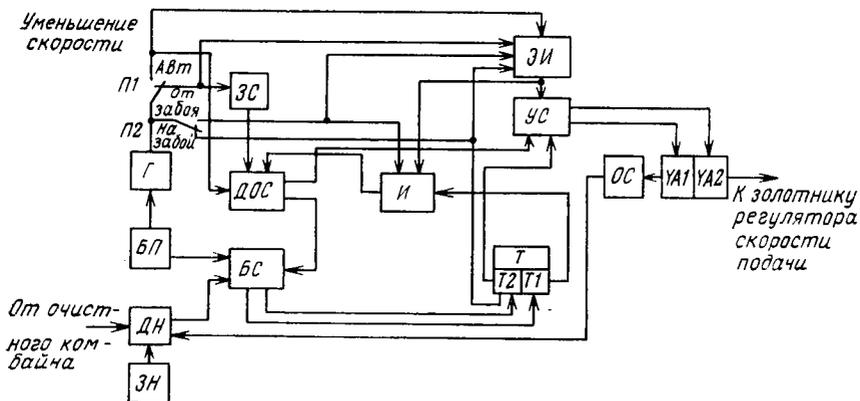


Рис. 6.2. Функциональная схема автоматического поддержания заданной нагрузки исполнительного органа очистного комбайна с гидравлической подающей частью

с элемента *ЭИ—ИЛИ*. На вход усилителя сигналов *УС* поступает управляющее напряжение через датчик ограничения скорости *ДОС*, если он находится в положении, соответствующем скорости подачи, отличной от нуля. В противном случае он сигнала не пропускает.

После усиления сигнала в блоке *УС* он подается на катушку электромагнита *УА1*, воздействующего на золотник управления скоростью подачи в сторону ее уменьшения. С уменьшением скорости подачи будет уменьшаться и нагрузка на исполнительном органе, что приведет к снижению величины сигнала, подаваемого с датчика нагрузки *ДН* на блок сравнения *БС*. Когда сигнал с *ДН* сравнивается с задающим, катушка электромагнита *УА1* потеряет питание и отключится, а катушка электромагнита *УА2* начинает получать питание и, включившись, переставляет золотник на увеличение скорости подачи.

Скорость подачи будет увеличиваться до тех пор, пока нагрузка двигателя исполнительного органа не достигнет заданной величины. При этом подача сигнала на триггер *Т2* прекращается, а от него и к блоку усиления *УС*. Катушка электромагнита *УА2* обесточивается и отключается. Если скорость подачи достигла заданного значения при неперегруженном двигателе исполнительного органа, то комбайн будет двигаться с постоянной скоростью.

Переход от одного режима работы к другому осуществляется автоматически. Предельные значения нагрузки двигателя исполнительного органа и скорости подачи комбайна устанавливаются задатчиком нагрузки *ЗН* и скорости *ЗС*. Устройство отрицательной обратной связи *ОС* по положению золотника служит для улучшения качества регулирования при малых величинах рассогласования сигналов датчика нагрузки и датчика задания.

Блок питания *БП* служит для подачи напряжения на блок сравнения *БС* и генератор *Г*.

Таким образом, рассмотренная схема обеспечивает стабилизацию нагрузки электродвигателя исполнительного органа комбайна изменением скорости подачи.

### **6.3.2. Регулируемый привод очистного комбайна с электрической подающей частью**

Применение для подающей части автономного двигателя дает возможность вынести привод подачи на штрек, разгрузить двигатель исполнительного органа и рациональнее использовать его мощность.

На рис. 6.3 показана принципиальная электрическая схема комбайна с автономным электроприводом подающей части. Схема предусматривает автоматическое регулирование скорости подачи комбайна при изменении нагрузки на исполнительном органе. Для этой цели в качестве электропривода подающей части принят электродвигатель постоянного тока *М2* с после-

довательным возбуждением. Регулирование скорости последнего осуществляется с помощью управляемого выпрямителя  $U1$ , собранного по трехфазной мостовой полууправляемой схеме. Согласование напряжения питающей сети с входным напряжением выпрямителя обеспечивается трансформатором  $T1$ . Первичная обмотка трансформатора  $T1$  подключается к питающей сети через автоматический выключатель  $QF$ . Реверс двигателя подачи  $M2$  производится линейными контактами  $KM1$  и  $KM2$ .

Регулирование скорости подачи комбайна производится изменением напряжения, подводимого к якорию двигателя  $M2$  от выпрямителя  $U1$ . Это достигается фазосдвигающим устройством  $ФСУ$ , на вход которого от суммирующего магнитного усилителя подается управляющий сигнал. Магнитный усилитель  $AM$  имеет четыре обмотки управления: задающая обмотка  $L1AM$ , обмотка обратной связи по току  $L2AM$  асинхронного двигателя  $M1$ , обмотка смещения  $L3AM$  и обмотка обратной связи по току  $L4AM$  двигателя  $M2$ . Выходной сигнал (напряжение)  $AM$  может изменяться как вручную, так и автоматически. При ручном управлении изменяется положение движка потенциометра  $RP1$ , что приводит к изменению тока в задающей обмотке управления  $L1AM$  магнитного усилителя, а следовательно, к изменению вы-

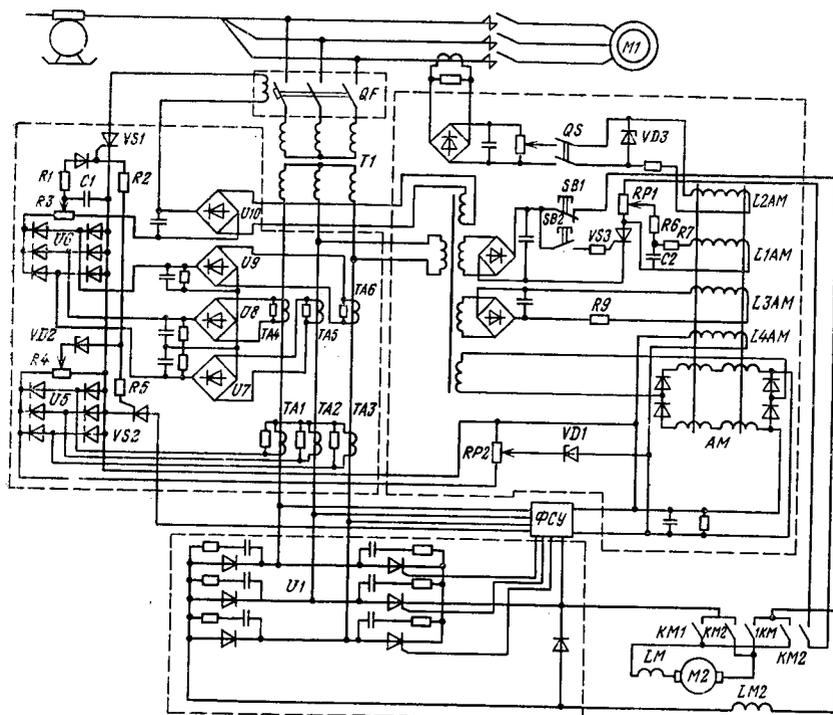


Рис. 6.3. Принципиальная электрическая схема комбайна с автономным электроприводом подающей части

ходного напряжения  $AM$ . Изменение входного напряжения  $\Phi СУ$  приводит к изменению выпрямленного напряжения, подаваемого на якорь двигателя  $M2$ , и скорости подачи.

Для автоматического регулирования скорости подачи в зависимости от нагрузки двигателя исполнительного органа включается цепь обратной связи переключателем  $QS$ . При этом через обмотку обратной связи  $L2AM$  начинает протекать выпрямленный ток, пропорциональный току статора асинхронного двигателя  $M1$  привода резания. Параметры задающей обмотки  $L1AM$  и обмотки обратной связи по току асинхронного двигателя  $L2AM$  подбираются так, чтобы при номинальной нагрузке двигателя резания скорость двигателя подачи также была равна номинальной. Таким образом, результирующая н. с. магнитного усилителя, определяемая как разность намагничивающих сил обмоток  $L1AM$  и  $L2AM$ , создает на его выходе напряжение, которое обеспечивает при номинальной нагрузке двигателя номинальную скорость подачи комбайна. Перегрузка двигателя резания приводит к увеличению тока статора, а следовательно, и тока в обмотке управления  $L2AM$ . А так как н. с. этой обмотки действует встречно н. с. задающей обмотки, то результирующая н. с. магнитного усилителя уменьшается и приводит к снижению напряжения на якоре двигателя  $M2$  и скорости подачи. При снижении нагрузки двигателя резания  $M1$  процесс протекает аналогично, с той лишь разницей, что напряжение выпрямителя и скорость подачи возрастают. Такой способ регулирования позволяет поддерживать мощность двигателя резания постоянной.

Защита электродвигателя подачи  $M2$  и тягового органа от перегрузок производится с помощью отрицательной задержанной обратной связи по току. Эта обратная связь реализуется следующим образом. Ток нагрузки двигателя  $M2$  измеряется трансформаторами  $TA1—TA3$ , вторичные напряжения которых подаются на трехфазный мостовой выпрямитель  $U5$ . Выпрямленное напряжение  $U5$  прикладывается к потенциометру  $RP2$ , движок которого служит для установки значения тока отсечки. Отсутствие тока в обмотке  $L4AM$  при допустимых нагрузках двигателя  $M2$  достигается включением в цепь обратной связи стабилизатора  $VD1$ . Если ток двигателя подачи  $M2$ , а следовательно, и усилие в тяговом органе превышает предельное значение, то напряжение, снимаемое с потенциометра  $RP2$ , становится выше пробивного напряжения стабилизатора  $VD1$ , который начинает пропускать ток. Этот ток, проходящий по обмотке  $L4AM$ , создает н. с., направленную встречно н. с. задающей обмотки  $L1AM$ . Результирующая н. с. магнитного усилителя уменьшается и вызывает снижение выпрямленного напряжения на якоре двигателя подачи  $M2$ . При этом скорость двигателя подачи снижается до ликвидации причины перегрузки. Отсечка действует не только в статических, но и в переходных режимах, обеспечивая защиту двигателя подачи в периоды пуска, ограничивая пуско-

вые токи предельно допустимыми значениями. В период пуска двигателя подачи  $M2$  при ручном управлении, когда напряжение на задающую обмотку  $L1AM$  подается ступенчато, возможны броски тока в якорной цепи. Во избежание этого в цепь обмотки  $L1AM$  введен задатчик интенсивности, благодаря которому устанавливается допустимая, по условиям работы привода, скорость нарастания напряжения на выходе преобразователя  $U1$ . В рассматриваемой схеме задатчик интенсивности реализуется резистором  $R7$  и конденсатором  $C2$ .

Для защиты двигателя подачи от токов к. з. в силовой цепи постоянного тока и от работы на одной или двух фазах на стороне переменного тока служит блок защиты. При коротком замыкании в силовой цепи резко возрастает ток, протекающий через трансформаторы  $TA1—TA3$ . Пропорционально этим токам возрастает напряжение на резисторе  $R4$ , которое при определенном значении пробивает стабилитрон  $VD2$ , подавая управляющий сигнал на открытие сначала тиристора  $VS2$ , а затем — тиристора  $VS1$ . Такая последовательность открывания тиристоров достигается соответствующим подбором сопротивлений резисторов  $R5$  и  $R2$ . Тиристор  $VS2$ , открывшись, запирает преобразователь  $U1$  (двигатель подачи  $M2$  обесточивается). Отпирание тиристора  $VS1$  приводит к протеканию тока от выпрямителя  $U10$  через катушку расцепителя автоматического выключателя и к его отключению.

Выход одного или двух вентилях или тиристоров преобразователя  $U1$ , фазосдвигающего устройства  $\Phi CV$ , обрыв одной из фаз на стороне переменного напряжения приводят к аварийному режиму работы преобразователя. Защита последнего от таких режимов осуществляется следующим образом. Нормальная работа выпрямителя  $U1$  сопровождается протеканием одинаковых по фазам токов. При этом во вторичных обмотках трансформаторов тока  $TA4—TA6$  наводятся одинаковые по величине э. д. с., которые после выпрямления в преобразователях  $U7—U9$  сравниваются. Этому режиму работы соответствует напряжение на выходе выпрямителя  $U1$ , равное нулю. Нарушение нормального режима работы приводит к тому, что токи, протекающие в фазах, становятся разными, а следовательно, напряжение на выходе преобразователя  $U6$  отличается от нуля. Это приводит к отпиранию тиристора  $VS1$  и к отключению автомата  $QF$ .

Защита вентилях преобразователя  $U1$  от перенапряжения производится цепочками  $RC$ .

Как показал опыт эксплуатации, основной недостаток нерегулируемого электропривода исполнительного органа состоит в том, что при проведении технологических операций производится большое число сконцентрированных во времени включений главного асинхронного двигателя. Это приводит к сокращению срока службы как самого электродвигателя, так и привода комбайна в целом.

Такая схема электропривода не обеспечивает также поддержания оптимальных параметров резания и максимальной производительности. Кроме того, при работе комбайна по мягким углям наблюдается заштыбовка исполнительного органа и, как следствие, увеличение удельных энергозатрат.

Применение регулируемого электропривода исполнительного органа позволит улучшить условия работы питающей сети за счет ликвидации пусковых токов и пиковых нагрузок, сопровождающихся протеканием токов семи-, десятикратной величины по сравнению с номинальной при работе заторможенного или реверсируемого неостановленного двигателя.

На рис. 6.4 показана схема тиристорного электропривода очистного комбайна с двигателями постоянного тока последовательного возбуждения. Питание двигателей исполнительного органа  $M1$  и подачи комбайна  $M2$  осуществляется от трехфазных мостовых выпрямителей  $U1$  и  $U2$ . Реверс двигателя подачи — контакторный, осуществляемый линейными контактами  $KM1$  и  $KM2$ .

Управление выпрямителями  $U1$  и  $U2$  производится фазосдвигающими устройствами, выполненными на полупроводниковых элементах. Выпрямленное напряжение регулируется от 0 до  $U_{ном}$  изменением входного напряжения управления  $AU1$  и  $AU2$ .

Схема предусматривает два режима управления приводом комбайна: ручное и автоматическое. При ручном управлении скорость резания и подачи регулируется потенциометрами  $RP1$  и  $RP2$  в цепях задающих сигналов. Автоматическое регулирование режимов резания и подачи производится автоматическими регуляторами  $RA1$  и  $RA2$ , входными сигналами для ко-

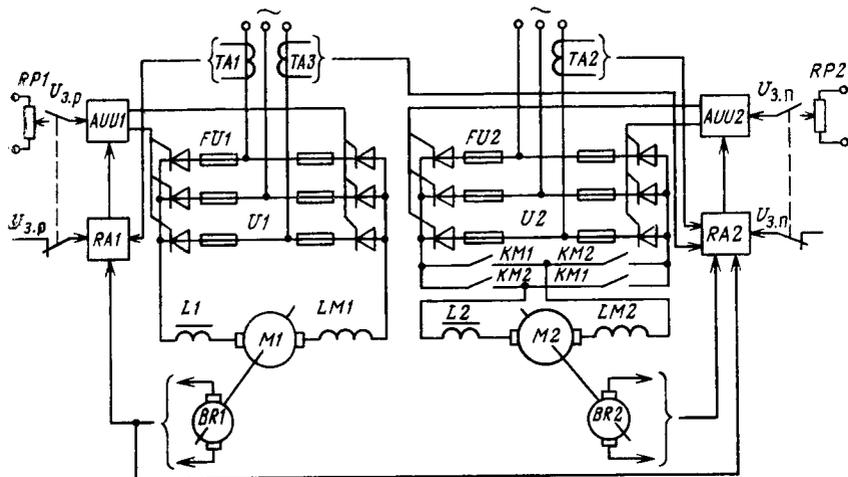


Рис. 6.4. Принципиальная схема тиристорного электропривода очистного комбайна

торых служат сигналы нагрузок двигателей резания и подачи и скоростей резания исполнительного органа и подачи комбайна. Автоматические регуляторы *RA1* и *RA2* вырабатывают сигналы управления, поддерживающие постоянство соотношения скоростей резания и подачи оптимальным ( $V_p/V_{II}$ )<sub>опт.</sub>

При таком способе регулирования обеспечивается высокая сортность угля, так как толщина стружки, являющаяся важным параметром работы очистного комбайна, постоянна. Устраняется заштыбовка, снижаются удельные энергозатраты.

Защита тиристоров от перенапряжений осуществляется цепочками *RC*, а от токов к.з.— быстродействующими плавкими предохранителями *FU1*, *FU2*.

#### 6.4. ЭЛЕКТРОПРИВОД ПРОХОДЧЕСКИХ КОМБАЙНОВ

Проходческие комбайны, в отличие от очистных угольных комбайнов, предназначены для проходки горных выработок как в угле, так и в мягких породах. Одновременно с операциями по выемке угля или породы проходческий комбайн выполняет операции по уборке и погрузке материала на соответствующие транспортные устройства (конвейер или вагонетки).

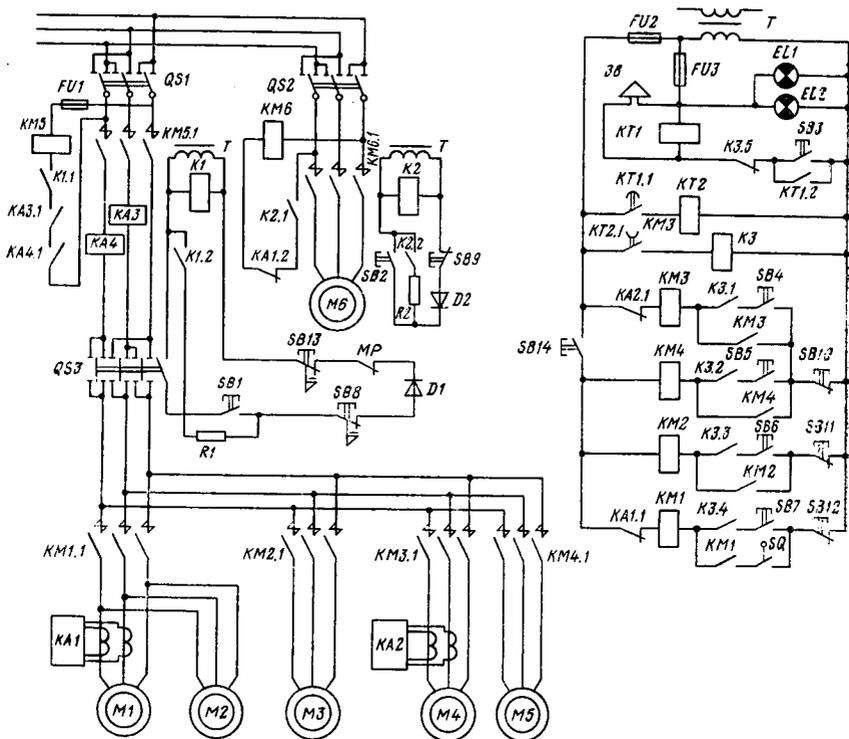


Рис. 6.5. Принципиальная электрическая схема проходческого комбайна 4ПУ

В качестве примера рассмотрим электропривод проходческого комбайна 4ПУ (рис. 6.5). В станцию управления комбайном входят: два пускателя (дистанционной подачи напряжения на машину *QS1* и управления двигателем насосной установки *QS2*), четыре контактора *KM1—KM4* для управления электродвигателями исполнительного органа *M1*, маслонасоса *M3*, скребкового конвейера *M4* и перегружателя *M5*. Схема управления комбайном обеспечивает: дистанционную подачу напряжения на машину, управление токоприемниками, подачу звукового предупредительного сигнала, защиту от затянувшегося пуска или опрокидывания электродвигателя исполнительного органа, конвейера, блокировку, исключающую возможность включения двигателя исполнительного органа при проведении работ в его зоне, блокировку, исключающую возможность работы двигателя исполнительного органа при снижении расхода и давления воды в системе орошения ниже допустимой нормы.

Для подготовки комбайна к работе необходимо включить разъединители: *QS1—QS3*. При этом замыкается контакт *QS3* в цепи кнопки *SB1* и контакт *SB14* в цепи управления. Далее включается контакторная катушка *K1* нажатием на кнопку *SB1*, а контакторная катушка *K2* — кнопкой *SB2*. При этом на машину подается напряжение, о чем свидетельствует включение фар *EL1* и *EL2*, и начинает работать электродвигатель насоса *M6*. Давление в трубопроводе поднимается, и замыкается контакт *SQ* в цепи контактора *KM1* управления электродвигателем исполнительного органа *M1*. До запуска любого двигателя необходимо подать предупредительный сигнал, что производится кнопкой *SB3*. При этом цепь sireны *Зв* становится замкнутой и звучит предупредительный сигнал. Одновременно с этим получает питание катушка реле времени *KT1*, которое своими контактами *KT1.1* и *KT1.2* подключает к источнику питания катушку реле времени *KT2* и шунтирует кнопку *SB3*. Подключение реле времени *KT2* происходит через 10 с, а в течение этого времени подается предупредительный сигнал. Реле времени *KT2*, включившись, замыкает свой замыкающий контакт *KT2.1* в цепи катушки промежуточного реле *K3*, которое, получив питание, срабатывает и замыкает свои замыкающие контакты *K3.1—K3.4* в цепях катушек контакторов *KM1—KM4*. Одновременно размыкается контакт *K3.5*, отключающий сирену и обесточивающий катушку реле времени *KT1*. Контакт *KT1.1* реле времени *KT1* вновь размыкается и обесточивает катушку реле времени *KT2*, которое в свою очередь обесточивает промежуточное реле *K3*. Реле находится во включенном состоянии всего 3—5 с, а поэтому за данный промежуток времени все электродвигатели должны быть включены, иначе замыкающие контакты *K3.1—K3.4* размыкаются и последующий пуск электродвигателей будет невозможен.

При необходимости реверса двигателя конвейера производят переключение реверсора *QS3*. При этом размыкается контакт

*SB14*, который снимает питание с катушек контакторов управления двигателями исполнительного органа *M1*, вентилятора *M2*, маслонасоса *M3* и перегружателя *M5*.

Защита электродвигателей исполнительного органа и конвейера от токов к. з. осуществляется токовыми реле *KA1* и *KA2*, контакты которых находятся в цепях управления катушек контакторов *KM1* и *KM3*, а также в цепи контактора *KM6* двигателя насоса.

Цепи управления от токов к. з. защищаются плавкими предохранителями *FU1—FU3*.

В схеме предусмотрена блокировка, запрещающая подачу напряжения на комбайн при недопустимой концентрации метана в забое. В этом случае контакт метан-реле *MP* размыкается и цепь питания катушки промежуточного реле становится разомкнутой.

Аварийное снятие напряжения со станции, а следовательно, и останов всех электроприводов производится кнопками *SB8*, *SB13*.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Автоматизация и автоматизированные системы управления в угольной промышленности*/Под ред. Б. Ф. Братченко. М., Недра, 1976.
2. *Автоматизация производственных процессов угольных шахт*/Н. Г. Попович, Г. И. Данильчук, В. С. Лисовский и др. Киев, Вища школа, 1978.
3. *Автоматизация технологических процессов на горнорудных предприятиях*/Под ред. В. С. Виноградова. М., Недра, 1984.
4. *Автоматизация шахтных вентиляторных установок*/Б. Х. Богопольский, М. А. Левин, К. П. Бочаров и др. М., Недра, 1976.
5. *Автоматизированный электропривод в народном хозяйстве*/Под общ. ред. М. Г. Чиликина, И. И. Петрова, М. М. Соколова. Тр. V Всесоюзной конференции по автоматизированному электроприводу. Т. 2. М., Энергия, 1971.
6. *Алексеев Н. И.* Оптимизация систем электрической тяги в подземных выработках шахт. М., Недра, 1979.
7. *Башарин А. В., Новиков В. А., Соколовский Г. Г.* Управление электроприводами. Л., Энергоиздат, 1982.
8. *Бежок В. Р., Калинин В. Г., Чайка Б. Н.* Аппаратура защиты и блокировки шахтных подъемных установок. М., Недра, 1974.
9. *Васильев М. В., Волотковский В. С., Кармаев Г. Д.* Конвейеры большой протяженности на открытых работах. М., Недра, 1977.
10. *Взрывобезопасное электрооборудование на 1140 В для угольных шахт*/Под ред. Е. С. Траубе. М., Недра, 1982.
11. *Взрывобезопасные асинхронные электродвигатели новой серии ВР для угольной промышленности*/А. И. Быков, Б. С. Гнилицкий, Н. Ф. Шевченко и др. М., Недра, 1977.
12. *Взрывозащитные асинхронные двигатели*/Под ред. В. А. Яковенко. М., Энергия, 1977.
13. *Виравов А. А.* Шахтные электровозы и гировозы. М., Недра, 1972.
14. *Волотовский С. А.* Рудничная электровозная тяга. М., Недра, 1981.
15. *Гальперин И. Я., Бежок В. Р.* Модернизация электропривода и автоматизация шахтных подъемных машин. М., Недра, 1984.
16. *Гарнов В. К., Рабинович В. Б., Вишневский Л. М.* Унифицированные системы автоуправления электроприводом в металлургии. М., Металлургия, 1971.
17. *Глушко В. В.* Характеристики режимов работы горных машин и их автоматическое управление. М., Недра, 1983.
18. *Дзюбан В. С., Риман Я. С., Маслий А. К.* Справочник энергетика угольной шахты. М., Недра, 1983.
19. *Импульсный регулируемый электропривод с фазными электродвигателями*/Э. В. Шикуть, М. И. Крайсберг, П. А. Фукс и др. М., Энергия, 1972.
20. *Капунцов Ю. Д., Елисеев В. А., Ильяшенко Л. А.* Электрооборудование и электропривод промышленных установок. М., Высшая школа, 1979.
21. *Католиков В. Е., Динкель А. Д., Седуни А. М.* Автоматизированный электропривод подъемных машин глубоких шахт. М., Недра, 1983.
22. *Кондратьев В. Н., Резинский С. Р., Евзеров И. Х.* Тиристорные преобразователи ТП/ТВ, АТ, АТР. М., Энергия, 1978.
23. *Киричок Ю. Г., Чермалых В. М.* Привод шахтных подъемных установок большой мощности. М., Недра, 1972.
24. *Ключев В. И., Терехов В. М.* Электропривод общепромышленных механизмов. М., Энергия, 1980.
25. *Лейбзон Я. И.* Монтаж и эксплуатация контактных и бесконтактных муфт скольжения. М., Энергия, 1978.
26. *Маргинов М. В., Переслегин Н. Г.* Автоматизированный электропривод в горной промышленности. М., Недра, 1977.

27. *Маслий А. К.* Электрооборудование шахтной электровозной откатки. М., Недра, 1977.
28. *Мелькумов Л. Г., Найман А. Е., Травкин Е. К.* Автоматизация пневматического хозяйства шахт и рудников. М., Недра, 1977.
29. *Новые комплекты электрооборудования и автоматики для шахтного подъема/Е. С. Траубе, А. К. Маслий, Стороженко М. А. и др.* М., Недра, 1976.
30. *Онищенко Г. Б., Локтева И. Л.* Асинхронные вентиляльные каскады и двигатели двойного питания. М., Энергия, 1979.
31. *Правила безопасности в угольных и сланцевых шахтах.* М., Недра, 1973.
32. *Свириденко П. А., Шмелев А. Н.* Основы автоматизированного электропривода. М., Высшая школа, 1979.
33. *Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями/О. В. Слежановский, Л. Х. Дацковский, И. С. Кузнецов и др.* М., Энергоатомиздат, 1983.
34. *Соколов М. М.* Автоматизированный электропривод общепромышленных механизмов. М., Энергия, 1976.
35. *Справочник по автоматизированному электроприводу/Под ред. В. А. Елисеева и А. В. Шинянского.* М., Энергоатомиздат, 1983.
36. *Старилов Б. Я., Азарх В. Л., Рабинович Э. М.* Асинхронный электропривод очистных комбайнов. М., Недра, 1981.
37. *Стационарные установки шахт/Под ред. Б. Ф. Братченко.* М., Недра, 1977.
38. *Супрунов В. Ф.* Привод постоянного тока шахтных подъемных машин. М., Недра, 1978.
39. *Типовой электропривод промышленных установок/Под ред. С. А. Волотковского.* Киев., Вища школа, 1983.
40. *Тиристорный электропривод рудничного подъема/А. Д. Динкель, В. Е. Католиков, В. И. Петренко и др.* М., Недра, 1977.
41. *Толпежников Л. И.* Автоматизация подземных горных работ. М., Недра, 1976.
42. *Чермалых В. М. Родькин Д. И., Каневский В. В.* Системы электропривода и автоматики рудничных стационарных машин и установок. М., Недра, 1976.
43. *Чиликин М. Г., Ключев В. И., Сандлер А. С.* Теория автоматизированного электропривода. М., Энергия, 1979.
44. *Шахтные вентиляторные установки главного проветривания. Справочник/Г. А. Бабак, К. П. Бочаров, А. Т. Волхов и др.* М., Недра, 1982.
45. *Электрооборудование и электроснабжение участка шахты. Справочник/Р. Г. Беккер, В. В. Дегтярев, Л. В. Седаков и др.* М., Недра, 1983.
46. *Электропривод и электроснабжение шахтных самоходных машин/С. А. Волотковский, В. К. Козло, В. Д. Фурсов и др.* М., Недра, 1977.
47. *Электротехнический справочник. Т.2/Под ред. В. Г. Герасимова, П. Г. Грудинского, Л. А. Жукова, М., Энергоатомиздат, 1981.*

## ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Автоматизация периода дотягивания** 108  
— — замедления 100  
— — пуска 85
- Автотрансформатор** 20
- Барaban кабельный** 252  
— натяжной 213  
— приводной 192
- Блокировка дуговая** 88  
— механическая 37  
— электрическая 248
- Вагон самоходный** 1BC-20 245  
— — 5BC-15 250
- Вентилятор главного проветривания** 10  
— местного — 8  
— центробежный 175
- Возбудитель** 20
- Время паузы** 56, 255  
— работы 56, 255  
— цикла 56, 255
- Выключатель автоматический** 31  
— быстродействующий 32  
— конечный 139  
— — бесконтактный 140  
— масляный 31
- Выпрямитель однофазный мостовой**  
полууправляемый 106  
— трехфазный — 102  
— — — полууправляемый 264
- Генератор постоянного тока незави-  
симого возбуждения** 19, 46  
— — — смешанного — 13
- Датчик индуктивный** 140  
— напряжения 70  
— тока максимального 106  
— — номинального 31
- Двигатель асинхронный комбайновый** 14  
— — конвейерный 16  
— — короткозамкнутый 12, 47  
— — многоскоростной 21  
— — с повышенным пусковым мо-  
ментом 20  
— — — скольжением 20  
— — с фазным ротором 21  
— встроенный 14  
— постоянного тока независимого  
возбуждения 12, 19  
— — — последовательного — 13, 21  
— — — смешанного — 246  
— синхронный 13  
— тяговый 225
- Диаграмма замыкания контактов** 237  
— скорости 56, 80  
— усилий 82, 94
- Диск ретардирующий** 96
- Дроссель сглаживающий** 26  
— уравнивающий 26
- Жесткость механической связи** 59  
— — характеристики 65, 205, 216
- Задатчик интенсивности** 70, 132
- Защита максимальная** 217  
— от затянувшегося пуска 173, 221  
— от напуска каната 147  
— от обратного направления вра-  
щения 149
- Защита от перегрузки** 217, 253  
— от превышения скорости 141
- Звено безынерционное** 53  
— интегрирующее 45  
— колебательное 45  
— чистого запаздывания 52
- Инвертор автономный** 27
- Индуктор** 198
- Инерционность компенсируемая** 71
- Кабелеукладчик** 18, 245
- Каскад асинхронный вентиляльный** 116  
— — машинно-вентильный 165
- Командоаппарат кулачковый** 36  
— сельсинный 37, 39
- Комбайн очистной** 257  
— проходческий 268
- Компрессор** 177
- Коммутация искусственная** 206
- Конвейер ленточный** 10, 192  
— скребковый 192
- Контактор выбора направления дви-  
жения** 40  
— линейный 223, 264  
— ускорения 89, 144
- Контроллер ГР-9А-1** 37  
— КВС-201 35  
— КМГ-3110 37  
— кулачковый 36
- Коррекция параллельная** 66  
— последовательная 70
- Коэффициент динамичности** 62
- Коэффициент жесткости** 58  
— отсечки 64  
— сцепления 194  
— трения 92

- усиления 43
- Кривая намагничивания 43
- Лебедка подъемная 18
- Магнитный усилитель 58, 126
- Машина подъемная 12
- Модуль жесткости механической характеристики 65
- Момент на валу двигателя 179, 227
  - электромагнитный 49
- Муфта гидравлическая 197
  - предохранительная 196
  - электромагнитная 198
- Нагрузка вентиляторная 166
  - динамическая 58, 196
  - пульсирующая 178
  - статическая 57, 211
- Насос центробежный 188
- Неточность останова 92
- Нуль-орган 52
- Обратная связь 68, 119
- Объект регулирования 71
- Опрокидыватель 55
- Оптimum симметричный 79
  - технический 73
- Останов точный 92
- Охлаждение двигателя водяное 15
  - — — воздушное 15
  - — — принудительное 19
- Передаточная функция 43
- Переключатель обходной 139
  - универсальный 119, 175
- Подача 153
- Подстанция 244
- Поле электромагнитное 244
- Постоянная времени механическая 45
  - — — электромагнитная 44, 47
- Предохранитель плавкий 217
  - быстродействующий 32
- Преобразователь вентильный 22, 51
  - — — частоты со звеном постоянного тока 26
  - — — с непосредственной связью 27
  - статический 22
  - электромагнитный 22
- Процесс переходный 59
- Пуск конвейерной линии 221
  - тяжелый 12
- Разъединитель 32
- Реактор уравнивающий 24
  - токоограничивающий 29
- Регулятор напряжения 73
  - операционный дифференциальный 54
  - интегральный 54
- — пропорциональный 54
- — пропорционально - интегральный 54
- — пропорционально - интегрально - дифференциальный 55
- тока 75
- скорости 75
- Режим работы кратковременный 14
  - — повторно-кратковременный 17, 21
- Режим работы продолжительный 14, 18
  - прерывистых токов 26
  - свободного выбега 106
- Резистор металлический 33
  - жидкостный 34
- Реле времени 42
  - дуговой блокировки 42, 88
  - защиты 41
  - контроля поля 119
  - — цепи 143
  - напряжения 103, 120
  - ограничения скорости 144
  - промежуточное 41
  - скорости 103
  - трехобмоточное 87
  - форсировки 173
- Рывок 83
- Связь механическая жесткая 58
  - — упругая 59
  - обратная с отсечкой 120
  - — гибкая 68
  - — жесткая 68
  - — задержанная 68
- Система Г—Д 5
  - — с ЭМУ и ПМУ 123
  - — с СМУ и ПМУ 126
  - — с ТВ 128
  - УВ—Д 132
  - импульсно-фазового управления 51
  - регулирования блочная унифицированная 70
- Система электропривода замкнутая 66
  - — разомкнутая 78
- Способность перегрузочная 14
- Схема выпрямления неререверсивная 24
  - — реверсивная 25
  - функциональная 202
- Тахогенератор 93, 143
- Термосигнализатор 19
- Торможение динамическое 97
- Тормоз предохранительный 139
  - рабочий 97
- Ток вихревой 44
  - уравнивающий 26, 28
- Трансформатор тока 32

- трехобмоточный 24
- согласующий 31, 76
- Угол регулирования 26
- Управление преобразователями раздельное 25
  - — совместное 25
  - — — несогласованное 25
  - — — согласованное 25
- Уравнение движения электропривода 64
  - Лагранжа 59
- Усилитель магнитный 52
  - операционный 53
  - электронный 52
- Установка непрерывного действия 57
  - циклического — 55
- Устройство входное 52
  - дугогасительное 42
- Устройство корректирующее 66
  - переключающее логическое 26
  - стабилизации 69

Формула Л. Эйлера 213

Характеристика механическая 15, 100

- — естественная 57
- — искусственная 33
- — резисторная 101
- — электромеханическая 230
- экскаваторная 64

Цикл работы 56, 255

Электропривод автономный 263

- асинхронный с жидкостным резистором 90
- — с импульсным управлением в цепи ротора 206
- — — — статора 208
- непереворачиваемый 192
- нерегулируемый 12
- реверсивный 55
- регулируемый 13, 67

Элемент пассивный 67

|   |            |
|---|------------|
| Предисловие . . . . .   | 3          |
| Введение . . . . .  | 4          |
| <b>Глава 1. Общие сведения о специфике работы автоматизированного электропривода машин и установок шахт и рудников . . . . .</b>      | <b>11</b>  |
| 1.1. Условия эксплуатации электроприводов машин и установок шахт и рудников . . . . .   | 11         |
| 1.2. Основные виды электроприводов и области их применения . . . . .  | 12         |
| 1.3. Электрические машины . . . . .   | 14         |
| 1.4. Преобразовательные устройства . . . . .  | 21         |
| 1.5. Резисторы . . . . .  | 33         |
| 1.6. Контроллеры и командоаппараты . . . . .  | 35         |
| 1.7. Релейно-контакторная аппаратура . . . . .  | 41         |
| 1.8. Математическое описание элементов автоматизированного электропривода . . . . .   | 42         |
| 1.9. Рациональные режимы управления электроприводами . . . . .  | 55         |
| 1.10. Способы ограничения динамических нагрузок в электромеханических системах машин и установок для подземных горных работ . . . . . | 62         |
| 1.11. Замкнутые системы управления электроприводами . . . . .   | 66         |
| <b>Глава 2. Автоматизированный электропривод подъемных машин и лебедок . . . . .</b>  | <b>80</b>  |
| 2.1. Режимы работы подъемной установки и требования, предъявляемые к автоматизированному электроприводу . . . . .                     | 80         |
| 2.2. Автоматическое управление пуском подъемной машины с асинхронным двигателем . . . . .   | 85         |
| 2.3. Автоматическое управление пуском по времени с коррекцией по току . . . . .   | 86         |
| 2.4. Управление пуском асинхронного двигателя с жидкостным реостатом . . . . .  | 90         |
| 2.5. Автоматическое управление замедлением подъемной машины . . . . .   | 92         |
| 2.6. Автоматизация периода дотягивания подъемных сосудов . . . . .  | 109        |
| 2.7. Перспективы развития асинхронного привода подъемных машин . . . . .  | 113        |
| 2.8. Шахтные подъемные установки с приводом постоянного тока . . . . .  | 117        |
| 2.9. Силовые схемы привода с тиристорными преобразователями . . . . .   | 133        |
| 2.10. Область применения электроприводов переменного и постоянного тока шахтных подъемных машин . . . . .                             | 134        |
| 2.11. Выбор электрооборудования рудничной подъемной машины . . . . .  | 136        |
| 2.12. Аппараты защиты и блокировки шахтных подъемных установок . . . . .  | 138        |
| <b>Глава 3. Электропривод вентиляторных, компрессорных и насосных установок . . . . .</b>   | <b>152</b> |
| 3.1. Условия работы, характер нагрузки и требования к электроприводу вентилятора . . . . .  | 152        |
| 3.2. Регулирование режима работы шахтных вентиляторов . . . . .   | 155        |
| 3.3. Электропривод вентиляторных установок с постоянной скоростью . . . . .   | 156        |
| 3.4. Электропривод вентилятора главного проветривания с плавным регулированием скорости . . . . .                                     | 164        |
| 3.5. Типовые схемы управления электроприводом вентиляторов главного проветривания . . . . .   | 170        |
| 3.6. Условия работы, характер нагрузки и требования к электроприводу компрессора . . . . .  | 176        |

|   |            |
|---|------------|
| 3.7. Регулируемый электропривод турбокомпрессора с двигателем двойного питания . . . . .          | 179        |
| 3.8. Электропривод насосов . . . . .  | 188        |
| <b>Глава 4. Электропривод конвейерных установок . . . . .</b>                                     | <b>191</b> |
| 4.1. Общие сведения . . . . .   | 191        |
| 4.2. Режим и условия работы конвейерных установок . . . . .                                       | 192        |
| 4.3. Однодвигательный электропривод конвейеров . . . . .  | 196        |
| 4.4. Многодвигательный электропривод конвейеров . . . . .   | 204        |
| 4.5. Определение мощности электродвигателя конвейера . . . . .                                    | 211        |
| 4.6. Типовые схемы управления электроприводом конвейеров . . . . .                                | 217        |
| 4.7. Схема автоматического управления электроприводом поточно-транспортной линии . . . . .        | 221        |
| <b>Глава 5. Электропривод электровозного транспорта и транспортных устройств . . . . .</b>        | <b>225</b> |
| 5.1. Условия работы, нагрузки и режимы работы электропривода электровозного транспорта . . . . .  | 225        |
| 5.2. Типовые схемы управления электроприводами аккумуляторных и контактных электровозов . . . . . | 237        |
| 5.3. Схемы тиристорного электропривода шахтных электровозов . . . . .                             | 240        |
| 5.4. Шахтные самоходные вагоны . . . . .  | 244        |
| <b>Глава 6. Электропривод забойных горных машин . . . . .</b>                                     | <b>254</b> |
| 6.1. Условия работы, режимы и нагрузки основных механизмов очистных комбайнов . . . . .           | 255        |
| 6.2. Нерегулируемый электропривод забойных машин . . . . .  | 257        |
| 6.3. Регулируемый электропривод забойных машин . . . . .  | 262        |
| 6.4. Электропривод проходческих комбайнов . . . . .   | 268        |
| Список литературы . . . . .   | 271        |
| Предметный указатель . . . . .  | 273        |

УЧЕБНИК

**Анатолий Кузьмич Малиновский**

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД МАШИН  
И УСТАНОВОК ШАХТ И РУДНИКОВ**

Редактор *Е. Г. Вороновская*  
Художественный редактор *О. Н. Зайцева*  
Технический редактор *Н. В. Жидкова*  
Корректор *Р. Т. Баканова*

ИБ № 6981

---

Сдано в набор 21.07.86. Подписано в печать 14.10.86. Т-18593. Формат 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага тип. № 2. Гарнитура Литературная. Печать высокая. Усл.-печ. л. 17,5. Усл. кр.-отт. 17,5. Уч.-изд. л. 18,40. Тираж 8200 экз. Заказ № 1999/1134—6. Цена 95 коп.

---

Ордена «Знак Почета» издательство «Недра»,  
125047, Москва, пл. Белорусского вокзала, 3.

Ленинградская типография № 4 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 191126, Ленинград, Социалистическая ул., 14.

**САМОЙЛОВИЧ И. С., СИТНИК И. В.**

**Линии электропередачи карьеров.**

17 л. 1 р. 20 к.

Изложена теория и даны рекомендации по проектированию, эксплуатации, оценке технического уровня и выбору рационального варианта исполнения передвижных линий электропередачи напряжением до 35 кВ открытых горных работ. Рассмотрены новые виды и способы защиты обслуживающего персонала, рекомендованы меры по повышению технического уровня линий электропередачи. Уделено внимание эксплуатации карьерных линий электропередачи с применением ЭВМ. Предложены решения по сооружению линий для электроснабжения глубоких горизонтов.

Для инженерно-технических работников электромеханической службы карьеров и проектировщиков электроснабжения открытых горных работ.

(План 1987 г., № 197)

*Интересующие Вас книги можно приобрести или заказать в магазинах Книготорга, распространяющих научно-техническую литературу, и в магазинах — опорных пунктах издательства «Недра», адреса которых приведены в аннотированном плане, а также через отдел «Книга — почтой» (г. Ленинград, магазин № 17).*

Адреса центральных магазинов:

№ 115—117334, Москва, Ленинский проспект, 40. Дом научно-технической книги;

№ 17 — 199178, Ленинград, В. О., Средний проспект, 61

Издательство «Недра»

**АВИЛОВ-КАРНАУХОВ Б. П., ЗЮБРОВСКИЙ Л. Г.**  
**Экономия электроэнергии на рудобогагательных фабриках.**  
12 л.— (Экономия топлива и электроэнергии).— 60 к.

Изложена теория и даны практические расчеты энергетических характеристик как основных зависимостей для определения энергопотребления механизмов с электроприводом. Приведены энергетические характеристики некоторых механизмов, работающих на фабриках по обогащению руд черных металлов, полученные на основе многочисленных экспериментов. Показан расчет возможного экономического эффекта от экономии электроэнергии при работе шаровых мельниц в оптимальном режиме на рудобогагательной фабрике.

Для инженерно-технических работников энергомеханической службы обогагательных фабрик, ГОКов, проектно-конструкторских институтов, занятых расчетами и нормированием электроэнергии.  
(План 1987 г., № 182)

**БИНУС М. С., МИРОШКИН П. П.**  
**Новые виды электрооборудования в нормальном  
рудничном исполнении.**  
7 л. 35 к.

Описаны особенности условий эксплуатации электрооборудования на шахтах, карьерах и рудоперерабатывающих фабриках, а также конструктивные решения, обеспечивающие его надежную работу, способствующую росту производительности труда и безопасности работ. Приведены технические данные, конструкции, рекомендации по установке, эксплуатации и техническому обслуживанию электрооборудования, методика выбора и проверки уставок максимальной токовой и тепловой защит, встраиваемых в силовую коммутационную аппаратуру. Рассмотрены новые виды электрооборудования, имеющего более высокий уровень технических показателей.

Для инженерно-технических работников электромеханических служб горных предприятий и проектных организаций.

(План 1984 г., № 184)