

Ю.Г.Бацеев  
В.С. Костюк

# ЭЛЕКТРОПРИВОД И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ



Ю. Г. БАЦЕЖЕВ  
В. С. КОСТЮК

# ЭЛЕКТРОПРИВОД И ЭЛЕКТРО- СНАБЖЕНИЕ

*Допущено Государственным комитетом СССР  
по народному образованию  
в качестве учебника  
для студентов вузов,  
обучающихся по специальности  
«Горные машины и оборудование»*



МОСКВА "НЕДРА" 1989

## ВВЕДЕНИЕ

---

Применение электрического привода и снабжение горных предприятий энергией от электрических станций и подстанций называют электрификацией горной промышленности, являющейся основной энергетической базой комплексной механизации и автоматизации горных работ.

На основе электрификации происходит непрерывное совершенствование техники, технологии и организации общественного производства, все более полное внедрение комплексной механизации и автоматизации производственных процессов. Большое развитие получила электрификация горных предприятий. На шахтах, рудниках и карьерах используют разнообразные виды рудничного электрооборудования в нормальном и взрывобезопасном исполнении, применяют методы, обеспечивающие электробезопасность на горных предприятиях.

За годы Советской власти наша страна заняла первое место в Европе и второе в мире по выработке электроэнергии и создала мощную электротехническую промышленность. В настоящее время за сутки в СССР производится до 4 млрд. кВт·ч электроэнергии. Планом развития страны предусматривается дальнейший рост производства электроэнергии.

Основными направлениями экономического и социального развития СССР на 1986—1990 годы и на период до 2000 года предусматривается «развитие отраслей топливно-энергетического комплекса подчинить задаче устойчивого обеспечения потребностей страны во всех видах топлива и энергии путем увеличения их добычи и производства при планомерном проведении во всех отраслях и сферах народного хозяйства целенаправленной энергосберегающей политики».

Основная часть вырабатываемой электроэнергии преобразуется в механическую посредством электропривода для обеспечения работы различных машин и механизмов.

Впервые электропривод был создан русским ученым акад. Б. С. Якоби. В 1838 г. им были проведены испытания первого в мире электропривода, установленного на небольшом катере. Созданный акад. Б. С. Якоби электродвигатель постоянного тока, получавший электрическую энергию от гальванических батарей, имел мощность около 1 кВт.

Большое влияние на развитие электропривода оказали работы выдающегося русского ученого и инженера М. О. Доливо-Добровольского. В 1888 г. им были разработаны основы системы трехфазного тока, а в 1889 г. — изобретен асинхронный двигатель. Ему принадлежат теоретические исследования и первые конструктивные разработки многих электрических машин переменного тока. В 1891 г. М. О. Доливо-Добровольским была создана и испытана первая установка, передававшая электроэнергию трехфазным током напряжением 15 000 В на дальнее расстояние (175 км). Его работы содействовали промышленному применению электричества во всем мире.

Широкому использованию электропривода несомненно способствовали значительные преимущества централизованного производства электроэнергии,

простота ее распределения и экономичность передачи по кабельным линиям, что особенно важно для горных предприятий, где отдельные машины находятся в отдаленных горных выработках

К электроприводам горных машин предъявляются определенные требования, которые обуславливаются наличием взрывоопасной среды, токопроводящей пыли, влаги, широким применением нестационарных горных машин с различными режимами работы. Однако механические и электрические свойства электроприводов независимо от области их применения подчинены общей теории электропривода, основные положения которой рассматриваются в настоящем курсе.

За последние годы в горной промышленности значительно повысилась производительность труда за счет роста технического прогресса на базе новой высокопроизводительной техники, прогрессивной технологии, улучшения условий труда и техники безопасности. Осуществление технического прогресса предъявляет новые требования к электрификации горных работ, повышению качества электрической энергии; широкому внедрению регулируемого электропривода, полупроводниковой техники, автоматизированных систем управления; повышению безопасности, надежности и экономичности систем электроснабжения.

Учебные, научно-исследовательские и проектно-конструкторские организации работают над решением проблем в области электрификации горных предприятий. Однако успешное внедрение нового рудничного электрооборудования, его безотказная, эффективная и безопасная эксплуатация зависят от качества подготовки производственного персонала, в частности, горных инженеров,

Первая часть написана В. С. Костюком; вторая — Ю. Г. Бацкевым.

# Часть первая

## ЭЛЕКТРОПРИВОД ГОРНЫХ МАШИН

---

### Глава 1

#### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

##### 1.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОНЯТИЯ «ЭЛЕКТРОПРИВОД»

В настоящее время основным типом привода во всех отраслях промышленности является электрический привод. В горной промышленности электропривод получил широкое распространение. Согласно ГОСТ 16593—79 электроприводом называется электромеханическая система, состоящая из электродвигательного, преобразовательного, передаточного и управляющего устройств, предназначенная для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления этим движением. Преобразовательное и передаточное устройства могут отсутствовать. Электродвигательное устройство преобразует электрическую энергию в механическую или наоборот и содержит один или несколько электродвигателей. Преобразовательное устройство преобразует ток, напряжение, частоту и предназначается для создания управляющего воздействия на электродвигатель. Передаточное устройство служит для передачи механической энергии от электродвигателя к исполнительному органу рабочей машины и согласования вида и скоростей их движения. Управляющее устройство предназначается для управления преобразователем, электродвигателем и передаточным устройством.

На рис. 1.1 представлена структурная схема автоматизированного электропривода. Все электроприводы делят на несколько видов. По конструктивному исполнению электроприводы разделяют на групповой, индивидуальный и взаимосвязанный.

*Групповым* называют такой электропривод, который обеспечивает движение исполнительных органов нескольких рабочих машин или нескольких исполнительных органов одной рабочей машины. Групповой вид электропривода является несовершенным ввиду невозможности раздельно управлять рабочими машинами с помощью электропривода, сложности и громоздкости механических трансмиссий и пр. В настоящее время групповой электропривод в основном уступает индивидуальному и взаимосвязанному.

Примером группового электропривода может быть угольный комбайн, у которого от одного электродвигателя приводятся в движение механизмы исполнительного органа и подачи.

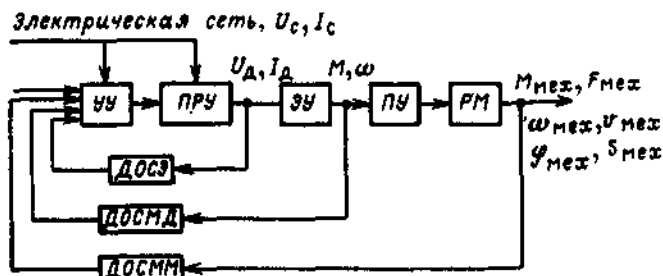


Рис 1.1. Структурная схема автоматизированного электропривода:

УУ — управляющее устройство; ПРУ — преобразовательное устройство; ЭУ — электродвигательное устройство; ПУ — передаточное устройство; РМ — рабочий механизм; ДОСЭ — датчик обратных связей электрических величин (напряжение  $U_d$  и ток  $I_d$  двигателя; ДОСМД — датчик обратных связей механических величин двигателя (вращающий момент  $M$  и угловая скорость  $\omega$  двигателя); ДОСММ — датчик обратных связей механических величин механизма (момент  $M_{мех}$ , угловая скорость  $\omega_{мех}$ , угол поворота вала  $\phi_{мех}$  или сила  $F_{мех}$ , линейная скорость  $v_{мех}$ , путь  $S_{мех}$ )

Индивидуальным называют такой электропривод, который обеспечивает движение одного исполнительного органа рабочей машины от одного электродвигателя. Этот вид привода не имеет недостатков, присущих групповому. Индивидуальный электропривод обеспечивает оптимальные режимы работы машин, при которых достигается наибольшая производительность. При этом создаются наиболее благоприятные условия для автоматизации работы машин и технологических процессов, дистанционного и радиоуправления.

Индивидуальный электропривод имеют одноковшовые и многоковшовые экскаваторы, буровые установки, шахтные подъемники, вентиляторы, водоотливные и конвейерные установки, угольные очистные комбайны, металлорежущие станки и другие машины, у которых исполнительные органы приводятся в движение от одного электродвигателя.

Взаимосвязанным называют электропривод, содержащий два или несколько электрически или механически связанных между собой электродвигателей, при работе которых поддерживается заданное соотношение их скоростей и (или) нагрузок, и (или) положения исполнительных органов рабочих машин. Появление такого электропривода обусловлено конструктивными или технологическими соображениями. Примерами взаимосвязанного электропривода в горной промышленности являются приводы цепных и ленточных конвейеров, струговых установок, фронтальных струговых агрегатов, карьерных и шахтных электровозов, копировальных металлорежущих станков, станков с программным управлением и других машин.

Одной из разновидностей взаимосвязанного электропривода является многодвигательный электропривод, электродвигательные устройства которого совместно работают на общий вал.

По виду движения электроприводы делят на вращательные и линейные. Вращательные электроприводы обеспечивают вращательное однонаправленное, вращательное реверсивное и поступательное (совместно с кулисным, винтовым, реечным или каким-либо другим преобразовательным механизмом) реверсивное движения. Линейные электроприводы обеспечивают поступательное реверсивное и неревверсивное движения. Такие приводы начинают применять для конвейерного транспорта.

По типу передаточного устройства электроприводы подразделяют на редукторные и безредукторные. По току электроприводы делят на электроприводы постоянного тока, имеющие электродвигательное устройство постоянного тока, и переменного тока, использующие электродвигательное устройство переменного тока.

## **1.2. ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГОРНЫХ МАШИН**

Электропривод выемочных и транспортных горных машин, применяемых в подземных и на открытых горных работах, эксплуатируется в сложных условиях. Поэтому рациональное использование и бесперебойная работа электропривода возможны лишь при правильном проектировании и эксплуатации его с учетом таких условий.

Специфические условия, в которых работает электропривод горных машин в подземных выработках, характеризуются следующими факторами: наличием во многих случаях взрывоопасной атмосферы в виде метана в смеси с воздухом в угольных шахтах, водорода и метана в смеси с воздухом в калийных шахтах, угольной и других видов пыли во взвешенном состоянии; размещением электрооборудования в выработках, подверженных воздействию горного давления; ограниченным пространством, обусловленным размерами горных выработок; наличием влаги за счет подземных вод; недостаточным освещением; перемещением машин и оборудования по неровной почве выработок вслед за продвижением горных работ; широким применением взрывных работ, вызывающих опасность повреждения машин; повышенной опасностью поражения электрическим током; разобщенностью горных работ, ведущихся на значительных территориях.

Электропривод шахтных стационарных машин, расположенных в закрытых помещениях на поверхности, эксплуатируется в более благоприятных условиях, чем подземные.

Для открытых горных разработок специфические условия характеризуются следующими факторами: производством работ на открытом воздухе, что связано с неблагоприятным атмосферным воздействием; перемещением рабочих машин, механизмов и электрооборудования в процессе работы, связанным с продвижением забоя по мере развития вскрышных и добычных

работ; значительной территорией и разобщенностью горных работ, что усложняет систему подвода и распределения электрической энергии; широким применением взрывных работ; повышенной опасностью поражения электрическим током; наличием тряски, вибраций, ускорений.

Характерным условием работы большинства электроприводов горных машин, применяемых как в подземных выработках, так и на открытых разработках, является изменение нагрузок в широких пределах, часто с пикообразным характером. Это обусловлено разнообразными физико-механическими свойствами разрабатываемых полезных ископаемых и вскрышных пород, их неоднородностью, наличием разнообразных включений, частыми пусками приводов и пр.

Перечисленные специфические условия работы горных машин и механизмов предъявляют к их электроприводам ряд требований, к которым относятся: взрывобезопасность исполнения электрооборудования, предназначенного для применения в подземных горных выработках, высокая механическая прочность и надежность конструкций горных машин и электрооборудования, безопасность обслуживания, защищенность электрооборудования от проникновения пыли и влаги, влагостойкость изоляционных материалов, антикоррозионность покрытий наиболее ответственных частей, минимальные габаритные размеры и масса электрооборудования, специальные виды устройств для подвода электроэнергии к подвижным рабочим машинам, возможность быстрого и удобного перемещения электрооборудования в безопасное место перед началом взрывных работ, возможность и удобство монтажа и демонтажа электрооборудования в стесненных и полевых условиях.

Основным требованием, предъявляемым к электроприводу добычных, проходческих, транспортных и ряда стационарных горных машин, является возможность регулирования угловой скорости электродвигателя и снижения пусковых токов.

Повышение производительности и надежности рабочих машин достигается благодаря автоматизации их работы путем автоматического управления электроприводами. При этом роль человека сводится к настройке систем автоматического управления, пуску и наблюдению за их работой. Автоматизация работы машин возможна лишь на основе автоматизированного электропривода. Автоматика защищает рабочие машины от поломок, сокращая тем самым число ремонтов, а также уменьшает расход энергии и материалов, снижая себестоимость продукции.

Современные системы автоматического управления электроприводами включают в себя кроме электродвигателя, электрических аппаратов, преобразовательных устройств также следующие системы, специальные программные устройства, используя



щие вычислительные и управляющие машины. Автоматизированные системы электропривода с программными устройствами применяются в горной промышленности для рудничных подъемных установок, различных транспортных комплексов, установок на обогатительных фабриках и т. д.

### Контрольные вопросы

- 1 Что называется электроприводом?
- 2 На какие основные виды подразделяют электроприводы?
- 3 Какие основные требования предъявляются к электроприводам горных машин?

## Глава 2

## ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

### 2.1. УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

При работе электродвигатель развивает либо движущий момент, который преодолевает моменты сопротивления на валу рабочей машины, либо тормозящий момент, который осуществляет торможение рабочей машины, движущейся по инерции или под действием внешних сил. Работа системы электродвигатель — рабочая машина часто сопровождается изменением скорости движения ее органов. Это обусловлено следующими причинами: пуском и торможением электропривода, колебаниями сил сопротивления, регулированием угловой скорости электродвигателя в ходе технологического процесса, изменением напряжения питающей сети и др. Всякое изменение скорости движения электропривода сопровождается изменением кинетической энергии, запасаемой во всех движущихся поступательно и вращающихся массах системы электродвигатель — рабочая машина. Характер же движения системы электродвигатель — рабочая машина зависит от соотношения между движущим моментом или силой и моментом или силой сопротивления. При равенстве этих моментов или сил движение будет установившимся с постоянной скоростью. Если же движущий момент или сила больше момента или силы сопротивления, то скорость движения системы будет возрастать, и наоборот.

Движение электромеханической системы всегда происходит во времени. Поэтому необходимо уметь определять длительность процессов пуска, торможения, перехода системы с одной скорости на другую и принимать меры в зависимости от требований к их уменьшению или увеличению.

Таким образом, для исследования характера движения системы и определения продолжительности отдельных этапов ее движения необходимо рассмотреть динамику электропривода и

рабочей машины в целом, т. е. рассмотреть связь между моментами, действующими в системе, движущимися поступательно и вращающимися массами и изменением скорости во времени. Эта связь устанавливается дифференциальным уравнением движения электропривода, иногда называемым уравнением равновесия моментов. Уравнение движения электропривода может быть получено на основании второго закона Ньютона или путем рассмотрения энергетического баланса системы.

На основании закона сохранения энергии уравнение энергетического баланса электромеханической системы имеет вид:

$$W = W_c + W_d, \quad (2.1)$$

где  $W$  — энергия, передаваемая двигателем на вал рабочей машины, Дж;  $W_c$  — энергия, расходуемая на преодоление полезных и вредных сил сопротивления движению, Дж;  $W_d$  — энергия, расходуемая на накопление кинетической энергии системы, Дж.

Уравнение кинетической энергии системы, вращающейся с угловой скоростью  $\omega$ , рад/с, имеет вид

$$W_d = J\omega^2/2, \quad (2.2)$$

где  $J = \sum_i m_i \rho_i^2$  — момент инерции всех вращающихся элементов системы, кг·м<sup>2</sup>;  $m_i$  — масса отдельного элемента системы, кг;  $\rho_i$  — приведенный радиус инерции отдельного элемента системы, м.

В большинстве случаев практики момент инерции системы — величина постоянная. Однако имеется ряд рабочих машин (приводы поршневых компрессоров, поршневых насосов и подъемных установок с переменным радиусом навивки), у которых момент инерции является функцией угла поворота. Поэтому рассмотрим наиболее общий случай, когда  $J(\varphi)$ , где  $\varphi$  — угловое перемещение, рад.

Дифференцируя (2.1) с учетом (2.2) по времени, получим

$$P = P_c + P_d, \quad (2.3)$$

где  $P$  — мощность, развиваемая двигателем, Вт;  $P_c$  — мощность, затрачиваемая на преодоление полезных и вредных сил сопротивления движению, Вт;  $P_d = J\omega(d\omega/dt) + (\omega^2/2)(dJ/dt)$  — мощность, необходимая для накопления кинетической энергии системы, Вт.

Так как вращающий момент двигателя

$$M = P/\omega, \quad (2.4)$$

то, разделив (2.3) на угловую скорость  $\omega$ , получим уравнение движения электропривода, отнесенное к валу, вращающемуся с угловой скоростью  $\omega$ ,

$$M = M_c + M_d, \quad (2.5)$$

где  $M$  — вращающий момент системы, Н·м;  $M_c$  — момент сопротивления, приведенный к угловой скорости электродвигателя, затрачиваемый на преодоление полезных и вредных сил сопротивления движению, Н·м;  $M_d = J(d\omega/dt) + (\omega/2)(dJ/dt)$  — динамический момент, необходимый для накопления кинетической энергии системы, Н·м.

Поскольку  $d\varphi/dt = \omega$  и  $dt = d\varphi/\omega$ , формула (2.5) может быть представлена в виде

$$M - M_c = J(d\omega/dt) + (\omega^2/2)(dJ/d\varphi). \quad (2.6)$$

Это выражение представляет собой общий вид уравнения движения электропривода.

В тех случаях, когда  $J = \text{const}$ , уравнение движения (2.6) упрощается:

$$M - M_c = J(d\omega/dt). \quad (2.7)$$

В каталогах на электродвигатели и других литературных источниках иногда приводятся значения частоты вращения  $n$ , об/мин, и махового момента  $GD^2$ , кгс·м<sup>2</sup> ( $G$  — вес ротора или якоря,  $D$  — его диаметр).

При этом в системе единиц СИ будем иметь

$$\omega = \pi n / 30, \quad J_{\text{дв}} = GD^2 / 4.$$

Если известны мощность электродвигателя  $P$ , кВт, и частота вращения  $n$ , об/мин, то его вращающий момент, Н·м

$$M = 9550 P / n. \quad (2.8)$$

Моменты электродвигателя и сопротивления могут иметь различное направление действия по отношению к направлению движения. Поэтому момент, действующий по направлению движения, принимают с положительным знаком, а момент, препятствующий движению, — с отрицательным.

Учитывая вышесказанное, уравнение движения электропривода можно представить в общем виде

$$\pm M \pm M_c = J(d\omega/dt). \quad (2.9)$$

Из (2.9) следует, что характер движения привода зависит от соотношения величин и знаков момента двигателя и момента сопротивления, что показано в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Соотношение величин момен- тов	$+M - M_c = M_d$	$+M + M_c = M_d$	$-M + M_c = M_d$	$-M - M_c = M_d$
	Двигательный режим		Тормозной режим	
$M > M_c$	Ускоренный	Ускоренный	Замедленный	Замедлен- ный
$M = M_c$	Установив- шийся	»	Установив- шийся	»
$M < M_c$	Замедленный	»	Ускоренный	»

Для механизмов имеющих поступательно движущиеся исполнительные органы, рассматривают уравнение сил, действующих на систему. Применяя метод энергетического баланса, получают следующее уравнение:

$$F - F_c = m \frac{dv}{dt} + \frac{v^2}{2} \frac{dm}{dt},$$

где  $F$  — движущая сила, Н;  $F_c$  — сила сопротивления механизма, Н;  $m$  — масса поступательно движущихся элементов системы, кг;  $v$  — скорость поступательного движения, м/с;  $l$  — путь, проходимый системой, м.

Если  $m = \text{const}$ , то  $F - F_c = m(dv/dt)$ .

Сказанное выше о знаках моментов и характере движения системы полностью справедливо и для сил, действующих на систему.

Уравнение движения электропривода рассмотрено выше для случаев, когда все элементы электромеханической системы являются абсолютно жесткими. Однако реальные машины и механизмы состоят из элементов, часть из которых имеет упругие свойства. При этом возникают режимы работы электропривода, отличные от поведения его при абсолютно жесткой системе. Поэтому для уточнения закона движения исполнительного органа рабочей машины или электродвигателя, а также для определения действительных величин и характера деформаций в элементах привода и рабочей машины необходимо учитывать наличие упругих элементов в системах.

Рассмотрим простейшую электромеханическую систему, состоящую из электродвигателя, соединенного упругим валом с исполнительным органом в виде диска. При резком возрастании момента сопротивления движению на валу исполнительного органа одновременное повышение момента на валу электродвигателя не происходит. Это вызвано тем, что при возрастании нагрузки на исполнительном органе будет происходить дополнительное закручивание упругого вала до тех пор,

пока его деформация не достигнет значения, соответствующего новому значению момента сопротивления движению. Момент на валу электродвигателя будет изменяться пропорционально деформации кручения вала. Следовательно, законы движения исполнительного органа и электродвигателя при увеличении нагрузки будут различными. Аналогичные явления будут происходить при уменьшении нагрузки или изменении вращающего момента электродвигателя. При этом могут появиться значительные деформации в упругом валу.

Для определения положения элементов, соединенных упругими связями, недостаточно знать закон движения только одного из них. Для этого необходимо иметь число обобщенных координат, равное числу степеней свободы системы. В рассматриваемом примере упрощенно можно считать, что система имеет две степени свободы.

В этом случае угловые перемещения ротора или якоря двигателя  $\varphi_1$  и диска  $\varphi_2$ , а также их угловые скорости  $d\varphi_1/dt$  и  $d\varphi_2/dt$  могут быть различными только за счет деформации кручения вала. С целью определения мгновенного положения этих двух элементов в качестве обобщенных координат удобно выбрать величины их угловых отклонений  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  от начального положения системы.

Для сложных систем закон движения может быть получен с помощью уравнения Лагранжа. Уравнение движения для простейших систем можно получить, используя принцип Д'Аламбера. В этом случае для каждого из элементов с сосредоточенной массой записывается уравнение равновесия действующих на него моментов и сил. При этом помимо внешних сил и реакций связей, действующих на такие элементы в статике, добавляются силы инерции, равные произведению масс на соответствующие ускорения, взятые с обратным знаком. Этот принцип применим и к абсолютно жестким системам. Поэтому уравнения моментов для отдельных элементов системы имеют вид рассмотренных выше уравнений движения электропривода и отличаются от них только наличием моментов реакций связей, являющихся моментами упругих сил, которые возникают при деформации упругих элементов.

Многие системы, в том числе и рассматриваемый случай, могут быть представлены в виде условной механической схемы, называемой эквивалентной расчетной схемой механической части электропривода, состоящей из трех элементов: 1) ротора или якоря двигателя совместно с элементами привода (муфта, шкив, редуктор и пр.) и механизма (например, барабан); 2) безынерционного упругого жесткого элемента (вал, шестерня, стрела и др.) или гибкого (канат, цепь, ремень); 3) исполнительного органа, находящегося после упругого элемента (клеть, скип, ковш и пр.). Эквивалентные расчетные схемы для

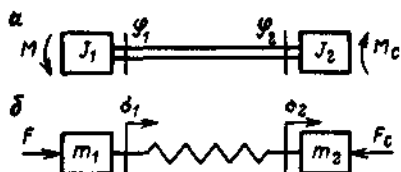


Рис 2.1. Эквивалентные расчетные схемы механической части электропривода:

$M$  — момент, развиваемый электродвигателем, Н·м;  $J_1$  и  $J_2$  — моменты инерции, приведенные к угловой скорости электродвигателя, элементов электропривода и механизма до упругого элемента и после него соответственно, кг·м<sup>2</sup>;  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  — угловые перемещения ведущего и ведомого

концов упругого элемента соответственно, рад, приведенные к скорости движения электродвигателя;  $F$  — развиваемая двигателем сила, приведенная к механизму, Н;  $m_1$  и  $m_2$  — массы, приведенные к линейной скорости движения, электропривода и механизма, разделенные упругим элементом, кг;  $\delta_1$  и  $\delta_2$  — линейные перемещения ведущего и ведомого концов упругого элемента соответственно, м, приведенные к скорости движения механизма

случаев вращательного (а) и поступательного (б) движений приведены на рис. 2.1.

Для схемы (рис. 2.1, а) уравнение движения ротора или якоря двигателя, вращающегося с угловой скоростью  $\omega_1 = d\varphi_1/dt$ , имеет вид:

$$M - M_y = J_1 (d^2\varphi_1/dt^2), \quad (2.10)$$

где  $M_y$  — момент упругих сил, создаваемый деформацией при кручении вала, Н·м.

Движение исполнительного органа с моментом инерции  $J_2$  будет происходить под действием момента упругих сил

$$M_y - M_c = J_2 (d^2\varphi_2/dt^2). \quad (2.11)$$

В соответствии с законом Гука

$$M_y = c_k \delta = c_k (\varphi_1 - \varphi_2), \quad (2.12)$$

где  $c_k$  — коэффициент жесткости кручения, определяющий величину момента, необходимого для закручивания вала на 1 рад, Н·м/рад;  $\delta = \varphi_1 - \varphi_2$  — деформация при кручении вала, рад.

Подставляя (2.12) в (2.10) и (2.11), получаем систему уравнений, описывающих движение электропривода:

$$M - c_k (\varphi_1 - \varphi_2) = J_1 (d^2\varphi_1/dt^2), \quad (2.13)$$

$$c_k (\varphi_1 - \varphi_2) - M_c = J_2 (d^2\varphi_2/dt^2).$$

Решив первое уравнение системы (2.13) относительно  $\varphi_2$ , а второе —  $\varphi_1$ , определив по значениям  $\varphi_2$  и  $\varphi_1$   $d^2\varphi_2/dt^2$  и  $d^2\varphi_1/dt^2$  и подставив их соответственно во второе и в первое уравнения, получим при  $M_c = \text{const}$ :

$$\frac{J_1 J_2}{c_k} \frac{d^4\varphi_1}{dt^4} + (J_1 + J_2) \frac{d^2\varphi_1}{dt^2} = M - M_c + \frac{J_2}{c_k} \frac{d^2 M}{dt^2}; \quad (2.14)$$

$$\frac{J_1 J_2}{c_k} \frac{d^4\varphi_2}{dt^4} + (J_1 + J_2) \frac{d^2\varphi_2}{dt^2} = M - M_c. \quad (2.15)$$

\*. Соколов М. М., Терехов В. М. Приближенные расчеты переходных процессов в автоматизированном электроприводе. — М.: Госэнергоиздат. 1963.

Преобразовав уравнения (2.14) и (2.15), получим:

$$\frac{1}{1 + J_1/J_2} T_1^2 \frac{d^3 \omega_1}{dt^3} + \frac{d\omega_1}{dt} = \frac{M - M_c + T_2^2 (d^2 M/dt^2)}{J_1 + J_2},$$

$$\frac{1}{1 + J_2/J_1} T_2^2 \frac{d^3 \omega_2}{dt^3} + \frac{d\omega_2}{dt} = \frac{M - M_c}{J_1 + J_2},$$

где  $T_1 = \sqrt{J_1/c_k}$  — механическая постоянная времени электропривода и части механизма, находящихся до упругого элемента, с;  $T_2 = \sqrt{J_2/c_k}$  — механическая постоянная времени, определяемая моментом инерции  $J_2$ , с;  $\omega_2 = d\varphi_2/dt$  — угловая скорость ведомого конца упругого элемента, приведенная к угловой скорости двигателя, рад/с.

Если разделить первое уравнение (2.13) на  $J_1$ , а второе на  $J_2$  и вычесть из первого уравнения второе, то после несложных преобразований получим дифференциальное уравнение второго порядка

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} + q^2 \delta = \frac{M}{J_1} + \frac{M_c}{J_2}, \quad (2.16)$$

где  $q = \sqrt{c_k(J_1 + J_2)/J_1 J_2}$  — частота колебаний двухмассовой упругой механической системы,  $\text{с}^{-1}$ .

Анализ уравнения (2.16) показывает, что при воздействии внешних возмущений ( $M$  или  $M_c$ ) и отсутствии в системе сил, зависящих от скорости, двухмассовая упругая механическая система представляет собой идеальное колебательное звено без затухания, причем  $q$  есть частота свободных колебаний этой системы. Однако в реальных электромеханических системах благодаря поглощению энергии в деформируемых элементах процесс носит затухающий характер.

Длительность колебаний зависит от соотношения моментов инерции  $J_1$  и  $J_2$ . При  $J_1 \gg J_2$  характер изменения деформации будет длительно колебательным, при  $J_2 \gg J_1$  колебания быстро затухают. Колебательный характер также имеют угловые скорости двигателя и исполнительного органа. Аналогичным образом можно получить дифференциальные уравнения для систем с поступательным движением (рис. 2.1, б). Двухмассовой эквивалентной расчетной схемой могут быть представлены механические части электроприводов, например, шахтных подъемных машин, одноковшовых экскаваторов, буровых установок, если учитывать только один упругий элемент (канат в первых двух случаях, вал в третьем). Механическую часть электропривода исполнительного органа фронтального стругового агрегата или конвейерной установки упрощенно можно представить также двухмассовой эквивалентной расчетной схемой, хотя такие агрегаты и установки являются системами с распределенными



Рис 2.2. Трехмассовая эквивалентная расчетная схема механической части электропривода струговой установки

параметрами и должны для большей точности представляться многомассовыми эквивалентными схемами.

Механическую часть электропривода, например, струговой установки можно представить трехмассовой эквивалентной расчетной схемой (рис. 2.2), где  $J_1$ ,  $J_2$ ,  $J_c$  — моменты инерции электроприводов и струга, приведенные к угловой скорости двигателей, взятые с учетом массы участка цепи, кг·м<sup>2</sup>;  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_c$  — угловые перемещения электродвигателей и струга, приведенные к угловой скорости двигателей, рад;  $c_1$ ,  $c_2$  — коэффициенты жесткости соответственно рабочей и обратной ветвей цепи, приведенные к угловой скорости двигателей, Н·м/рад;  $M_1$ ,  $M_2$  — вращающие моменты двигателей, Н·м;  $M_c$  — момент сопротивления движению струга, приведенный к угловой скорости двигателя, Н·м;  $M_{y1} = c_1(\varphi_1 - \varphi_c)$ ,  $M_{y2} = c_2(\varphi_2 - \varphi_1)$  — моменты упругих сил, приведенные к угловой скорости двигателей, соответственно рабочей и обратной ветвей цепи, Н·м. При наличии натяжного устройства, поддерживающего оптимальный уровень натяжения цепи, упругим моментом в холостой ветви цепи за стругом можно пренебречь (см. рис. 2.2). Тогда механическая часть электропривода струговой установки в соответствии со схемой рис. 2.2 может быть описана следующими уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} M_1 - c_1(\varphi_1 - \varphi_c) + c_2(\varphi_2 - \varphi_1) &= J_1 \frac{d^2 \varphi_1}{dt^2}; \\ M_2 - c_2(\varphi_2 - \varphi_1) &= J_2 \frac{d^2 \varphi_2}{dt^2}; \\ c_1(\varphi_1 - \varphi_c) - M_c &= J_c \frac{d^2 \varphi_c}{dt^2}. \end{aligned} \right\} \quad (2.17)$$

Анализ уравнений (2.17) показывает, что в системе имеют место упругие колебания [6]. Так как струговые установки челночного действия работают в реверсивном циклическом режиме с частыми пусками и заклиниваниями исполнительного органа, то все это приводит к возникновению значительных по амплитуде и частоте динамических нагрузок в упругих элементах и, как следствие, к усталостному их износу и обрывам тяговой цепи. Ограничение динамических нагрузок в таких установках достигается путем разработки специальных систем управления



регулируемым электроприводом, обеспечивающих демпфирование упругих колебаний [6].

Таким образом, основные задачи в области динамики электропривода заключаются в исследовании характера движения, зависящего от момента, развиваемого электроприводом, момента сопротивления и наличия упругих элементов в системе, или в нахождении условий, при которых может быть обеспечен требуемый закон движения. Решение этих задач связано с изучением момента, развиваемого электроприводом, и момента сопротивления.

Момент, развиваемый электроприводом, определяется его механическими характеристиками, а момент сопротивления зависит от конструкции рабочей машины и выполняемых ею производственных процессов.

## 2.2. ВИДЫ МОМЕНТОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Момент, создаваемый рабочей машиной на валу двигателя, условилось называть *моментом сопротивления* ( $M_c$ ). Этот момент, приведенный к угловой скорости электродвигателя, называется *приведенным моментом сопротивления*. Для того, чтобы совершалось движение с постоянной скоростью, электропривод должен развивать момент, равный  $M_c$ .

Силы сопротивления возникают при совершении полезной работы и зависят от производственного процесса и конструкции машины. Силы сопротивления обусловлены и различными потерями, возникающими при движении.

Потери на трение приближенно учитывают коэффициентом полезного действия рабочей машины. Если известна мощность, необходимая для совершения полезной работы, то мощность электродвигателя с учетом потерь на трение будет

$$P = P_n / \eta,$$

где  $P$  — мощность электродвигателя, Вт;  $P_n$  — мощность, необходимая для совершения полезной работы, Вт.

В первую категорию входят моменты, препятствующие движению при любом направлении и меняющие свой знак соответственно движущему моменту при изменении направления движения. Эти моменты создаются силами трения, резания, растяжения, сжатия и скручивания неупругих тел. Во вторую категорию входят моменты, создаваемые массой поднятых тел, сжатием, растяжением и скручиванием упругих тел. Действие потенциальных моментов связано с изменением запаса потенциальной энергии отдельных элементов системы. В противоположность реактивным потенциальные моменты сохраняют направление своего действия при изменении направления вращения. Поэтому при увеличении потенциальной энергии системы они будут препятствовать движению (подъем груза, клетки), а при уменьшении потенциальной энергии системы — способствовать ему (спуск груза, клетки).

Все рабочие машины, применяемые в горной промышленности, в зависимости от характера изменения момента сопротивления разделяют на пять основных групп.

К первой группе относятся рабочие машины, момент сопротивления которых остается постоянным или изменяется незначительно, т. е.  $M_c = \text{const}$ . Это шахтные подъемные машины с уравновешивающим хвостовым канатом, подъемные краны, конвейерные установки (ленточные, скребковые) при наличии постоянного количества груза на них, ряд металлорежущих станков с вращательным движением и пр.

Ко второй группе относятся рабочие машины, момент сопротивления которых зависит от угловой скорости, т. е.  $M_c(\omega)$ . У различных типов рабочих машин эта зависимость может быть различной. Общее выражение для момента сопротивления подобных механизмов имеет вид

$$M_c = M_0 + (\beta M_{\text{ном}} - M_0) (\omega / \omega_{\text{ном}})^k,$$

где  $M_0$  — момент, создаваемый силами трения, Н·м;  $M_{\text{ном}}$  — номинальный момент рабочей машины при номинальной скорости, Н·м;  $\beta$  — коэффициент загрузки машины;  $k$  — показатель степени относительной угловой скорости, определяющий изменение переменной части момента сопротивления при увеличении скорости.

К этой группе рабочих машин относятся механизмы центробежного типа — шахтные центробежные насосы и компрессоры, вентиляторы, центрифуги ( $k=2$ ) и др.

К третьей группе относятся рабочие машины, момент сопротивления которых  $M_c(\varphi)$  зависит от пути, т. е. от угла поворота  $\varphi$  ротора или якоря двигателя. К таким машинам относятся производственные машины, имеющие кривошипно-шатунные или эксцентровые механизмы — поршневые насосы и компрес-

соры, качающиеся конвейеры, шахтные подъемные машины с барабанами переменного радиуса наливки и без уравновешивающего каната, опрокидыватели и т. д.

К четвертой группе относятся рабочие машины, момент сопротивления которых зависит одновременно от скорости и пути, т. е.  $M_c(\omega, \varphi)$  или  $M_c(v, l)$ . Это рельсовый электрический транспорт на шахтах и карьерах.

К пятой группе относятся рабочие машины, момент сопротивления которых по производственным причинам носит случайный характер во времени  $M_c(t)$ . Это горные комбайны, струговые агрегаты и установки, проходческие машины, экскаваторы, буровые установки и т. д., момент сопротивления которых зависит от квалификации машиниста, крепости зарубаемого угля и его структуры, крепости вмещающих и вскрышных пород и других причин.

### **2.3. ПРИВЕДЕНИЕ МОМЕНТОВ И СИЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ, ИНЕРЦИОННЫХ МАСС, МОМЕНТОВ ИНЕРЦИИ**

Большинство рабочих машин требует невысоких частот вращения — примерно 100—300 об/мин. В то же время по соображениям экономичности электродвигатели конструируют на более высокие частоты вращения — от 750 до 3000 об/мин. С повышением номинальной частоты вращения при неизменной мощности снижаются масса, габаритные размеры и стоимость электродвигателей. Быстроходные электродвигатели имеют более высокие к. п. д. и коэффициент мощности, чем тихоходные. Поэтому быстроходные электродвигатели соединяют с рабочими механизмами с помощью промежуточных передач. При этом получаются системы, состоящие из элементов, вращающихся с различными угловыми скоростями. Решая вопрос о движении этих систем, потребовалось бы составить уравнения равновесия моментов для электродвигателя и рабочего механизма, а также учесть влияние каждого элемента на другой. Для упрощения расчетов моменты и силы сопротивления, моменты инерции и движущиеся массы, а также коэффициенты жесткости отдельных элементов приводят к угловой или линейной скорости, чаще всего к скорости электродвигателя.

При приведении возможны следующие два случая: 1) приведение одного вида движения к подобному, но совершающемуся с другой скоростью, т. е. поступательного к поступательному, вращательного к вращательному; 2) приведение одного вида движения к другому, т. е. поступательного к вращательному или наоборот. В первую очередь осуществляют приведение моментов или сил. При этом исходят из равенства мощностей на валах и учитывают потери в промежуточных передачах.

Рассмотрим систему, состоящую из электродвигателя и рабочего механизма, соединенных одноступенчатой зубчатой передачей. На основании равенства мощностей на валах имеем

$$M_c \omega = M_m \omega_m / \eta, \quad (2.18)$$

где  $M_m$  — момент сопротивления на валу механизма, Н·м;  $\omega$  и  $\omega_m$  — угловые скорости валов электродвигателя и механизма, рад/с;  $\eta$  — к. п. д. зубчатой передачи.

Решая (2.18) относительно момента  $M_c$ , получаем

$$M_c = M_m / i \eta, \quad (2.19)$$

где  $i = \omega / \omega_m$  — передаточное отношение.

При наличии между валами электродвигателя и механизма нескольких промежуточных передач с передаточными отношениями  $i_1, i_2, \dots, i_k$  и коэффициентами полезного действия  $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_k$

$$M_c = \frac{M_m}{i_1 i_2 \dots i_k \eta_1 \eta_2 \dots \eta_k}. \quad (2.20)$$

Выражения (2.19) и (2.20) справедливы для двигательного режима. Если же двигатель работает в тормозном режиме, то потери в передачах покрываются со стороны механизма и к. п. д. записывают в числителе выражений (2.19) и (2.20).

Все грузоподъемные машины помимо вращающихся (ротор или якорь двигателя, шестерни редуктора, барабан) имеют элементы, движущиеся поступательно (клеть, скип, канат, груз, полиспаст и т. п.). При расчетах их приводят к одному виду движения, исходя из равенства мощностей

$$M_c \omega = F_c v_m / \eta, \quad (2.21)$$

откуда

$$M_c = F_c v_m / \omega \eta,$$

где  $v_m$  — скорость механизма, м/с.

Для случая работы электродвигателя в тормозном режиме имеем

$$-M_c = -F_c v_m \eta / \omega.$$

Если же осуществляется приведение вращательного движения к поступательному, то выражение для силы сопротивления можно получить из (2.21)

$$F_c = M_c \omega \eta / v_m.$$

Динамические моменты в системах, имеющих промежуточные передачи, можно приводить к одной скорости аналогично моментам сопротивления. Однако проще приводить к одной скорости моменты инерции всех элементов, вращающихся с различными угловыми скоростями, и массы, движущиеся поступа-

тельно, а затем с помощью приведенного момента инерции всей системы определять суммарный динамический момент.

Для получения аналитического выражения приведенного момента инерции  $J_{пр}$  рассмотрим систему, состоящую из электродвигателя, редуктора, имеющего три ступени, барабана и поднимаемого груза (рис. 2.3). Обозначим через  $J$  и  $J_6$  суммарные моменты инерции всех элементов, вращающихся с угловыми скоростями валов двигателя и барабана, через  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  — угловые скорости промежуточных валов редуктора и через  $J_1$ ,  $J_2$  — моменты инерции соответствующих валов и шестерен, соединенных с ними. Тогда кинетическая энергия всей системы будет

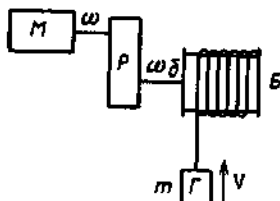


Рис. 2.3 Схема подъемной установки:

$M$  — электродвигатель,  $P$  — редуктор,  $B$  — барабан,  $r$  — груз,  $m$  — масса груза,  $v$  — скорость груза

$$W = J \frac{\omega^2}{2} + J_1 \frac{\omega_1^2}{2} + J_2 \frac{\omega_2^2}{2} + J_6 \frac{\omega_6^2}{2} + m \frac{v^2}{2}.$$

Если заменить все вращающиеся и поступательно движущиеся элементы одним эквивалентным элементом с моментом инерции  $J_{пр}$ , вращающимся с угловой скоростью  $\omega$ , то кинетическая энергия этого эквивалентного элемента  $W = J_{пр} \omega^2 / 2$  должна быть равна кинетической энергии всей реальной системы. Приравняв кинетические энергии, получим

$$J_{пр} \frac{\omega^2}{2} = J \frac{\omega^2}{2} + J_1 \frac{\omega_1^2}{2} + J_2 \frac{\omega_2^2}{2} + J_6 \frac{\omega_6^2}{2} + m \frac{v^2}{2}. \quad (2.22)$$

Разделив левую и правую части (2.22) на  $\omega^2/2$  и заменив  $\omega/\omega_1$ ,  $\omega/\omega_2$ ,  $\omega/\omega_6$  соответственно через передаточные отношения между валами электродвигателя и отдельных вращающихся элементов  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $i_6$ , получим

$$J_{пр} = J + J_1/i_1^2 + J_2/i_2^2 + J_6/i_6^2 + m v^2/\omega^2. \quad (2.23)$$

В формуле (2.23)  $m$  — сумма инерционных масс всех элементов, движущихся поступательно независимо от направления их движения.

Таким образом, под приведенным моментом инерции системы понимают момент инерции эквивалентного маховика, вращающегося с угловой скоростью двигателя и обладающего запасом кинетической энергии, равным запасу кинетической энергии всей системы.

В ряде случаев приведение инерционных масс целесообразно производить не к скорости электродвигателя, а к элементам,

движущимся поступательно. Тогда выражение для приведенной массы будет иметь вид

$$m_{np} = m + J\omega^2/v^2 + J_1\omega_1^2/v^2 + J_2\omega_2^2/v^2 + J_6\omega_6^2/v^2.$$

Под приведенной массой системы понимают массу эквивалентного элемента, движущегося со скоростью приведения и обладающего запасом кинетической энергии, равным запасу кинетической энергии всей системы.

## 2.4. ВРЕМЯ ПУСКА И ТОРМОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Для определения продолжительности пуска и торможения необходимо решить уравнение движения электропривода относительно  $dt$  и проинтегрировать его. Если моменты инерции  $J$ , двигателя  $M$  и сопротивления  $M_c$  остаются постоянными в процессе пуска, то из (2.7) имеем

$$t_n = J \int_0^{\omega_c} \frac{d\omega}{M - M_c} = J \frac{\omega_c}{M - M_c}, \quad (2.24)$$

где  $\omega_c$  — угловая скорость ротора или якоря электродвигателя, соответствующая моменту  $M_c$ , рад/с;  $t_n$  — продолжительность пуска электропривода от скорости, равной нулю, до  $\omega_c$ , с. Когда  $M_c = 0$ , время пуска  $t_n = J\omega_c/M$ .

При торможении механизма имеем

$$t_t = J \int_{\omega_c}^0 \frac{d\omega}{-M - M_c} = J \frac{\omega_c}{M + M_c}. \quad (2.25)$$

Если же торможение происходит только под действием момента сопротивления, то имеем  $t_t = J\omega_c/M_c$ . Способы определения продолжительности пуска и торможения для случаев, когда моменты  $M$  и  $M_c$  непостоянны, рассматриваются в гл. 4.

### Контрольные вопросы

1. Физический смысл составных частей уравнения движения электропривода.
2. Как учитывается наличие упругих элементов при составлении уравнений движения электропривода?
3. Как зависит продолжительность торможения от величины момента инерции системы?

### Глава 3

## ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОПРИВодОВ В УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМАХ

### 3.1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Электромеханические свойства электроприводов определяются прежде всего их механическими характеристиками.

*Механической характеристикой электропривода* называется зависимость его угловой скорости от электромагнитного момента, развиваемого электродвигательным устройством, т. е.  $\omega(M)$ .

В настоящей главе приведены механические характеристики электроприводов в установившихся режимах работы, которые называют статическими в отличие от динамических, имеющих место при переходных процессах и обусловленных механической и электромагнитной инерциями электропривода.

Динамические механические характеристики отличаются от статических. Получить эти характеристики с помощью расчета трудно. Поэтому для выявления соответствия механических свойств электропривода требованиям рабочей машины, и прежде всего ее механической характеристике, а также для сравнения между собой различных типов электроприводов при исследовательских и проектных работах пользуются статическими механическими характеристиками электроприводов.

Статические механические характеристики электроприводов определяют расчетным путем. Динамические механические характеристики определяют при исследованиях электроприводов с помощью электронных моделирующих установок или в отдельных случаях расчетным путем. Статические и динамические характеристики получают также экспериментально.

Механические характеристики являются главным критерием при выборе типа электропривода. Они могут быть линейными и нелинейными и заданы аналитически или графически.

Механические характеристики электроприводов зависят от параметров сети и электродвигателя, а также от схемы включения. При номинальных параметрах сети и электродвигателя и при схеме его включения без дополнительных реостатов и реакторов механические характеристики называются *естественными*, в остальных случаях — *искусственными*.

Для электроприводов постоянного тока вместо механических характеристик часто используют зависимость  $\omega(I_-)$ , где  $I_-$  — ток электродвигательного устройства, называемую *электромеханической характеристикой*. Такие характеристики иногда используют и для электроприводов переменного тока.

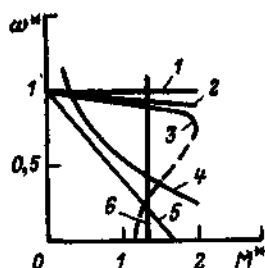


Рис. 3.1. Механические характеристики:

1 — синхронного двигателя; 2 — двигателя постоянного тока независимого возбуждения; 3 — асинхронного двигателя; 4 — двигателя постоянного тока последовательного возбуждения; 5 — двигателя постоянного тока независимого возбуждения и асинхронного с фазным ротором и большим добавочным сопротивлением в цепи якоря и ротора; 6 — двигателя постоянного тока независимого возбуждения (при питании от источника тока)

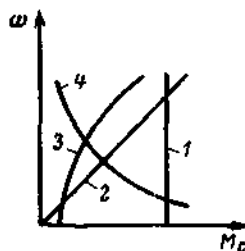


Рис. 3.2. Механические характеристики различных рабочих машин:

1 — при  $M_c = \text{const}$ ; 2 — генератора; 3 — вентилятора; 4 — электровоза

Для большинства электроприводов зависимость угловой скорости от момента двигателя является убывающей функцией. Однако степень изменения этой функции неодинакова у разных типов электроприводов. Критерием при оценке механических характеристик является *жесткость*, представляющая собой отношение разности электромагнитных моментов, развиваемых электродвигательным устройством, к соответствующей разности скоростей электропривода

$$\beta = (M_2 - M_1) / (\omega_2 - \omega_1) = \Delta M / \Delta \omega,$$

$$\beta^* = \Delta M^* / \Delta \omega^*,$$

где  $M^* = M / M_{\text{ном}}$  — относительное значение момента двигателя;  $\omega^* = \omega / \omega_{\text{ном}}$  — относительное значение угловой скорости двигателя;  $M_{\text{ном}}$  и  $\omega_{\text{ном}}$  — номинальные значения момента и скорости двигателя.

При нелинейных механических характеристиках их жесткость не остается постоянной и определяется в каждой точке как производная момента по угловой скорости  $\beta^* = dM^* / d\omega^*$ .

По степени жесткости механические характеристики электродвигателей подразделяются на следующие группы (рис. 3.1): 1. *Абсолютно жесткая* механическая характеристика (1), при которой угловая скорость остается постоянной с изменением момента двигателя ( $\beta^* = \infty$ ). 2. *Жесткая* механическая характеристика (2, 3), при которой угловая скорость незначительно изменяется с изменением момента двигателя ( $\beta^* = 50 \div 10$ ). 3. *Мягкая* механическая характеристика (4, 5), при которой угловая скорость значительно изменяется с изменением момента двигателя ( $10 > \beta^* > 0$ ). 4. *Абсолютно мягкая* механиче-



ская характеристика (6), при которой с изменением угловой скорости момент двигателя остается неизменным ( $\beta^* = 0$ ) [13].

Для правильного выбора типа электродвигателя и способа управления им должна быть известна механическая характеристика исполнительного органа рабочей машины.

*Механической характеристикой рабочей машины* называется зависимость угловой скорости от момента сопротивления машины  $\omega (M_c)$ . На рис. 3.2 показаны механические характеристики различных типов рабочих машин.

При расчетах используют так называемое номинальное сопротивление цепи якоря или ротора двигателя, которое состоит из внутреннего сопротивления обмотки и добавочного внешнего сопротивления и обеспечивает при неподвижном двигателе и номинальном напряжении сети номинальный ток. Так как при неподвижном якоре у двигателей постоянного тока э. д. с. равна нулю, то номинальное сопротивление

$$R_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} / I_{\text{ном}}.$$

Номинальное сопротивление ротора асинхронного фазного двигателя

$$R_{2\text{ном}} \approx Z_{2\text{ном}} = E_{2\text{ном}} / \sqrt{3} I_{2\text{ном}},$$

где  $E_{2\text{ном}}$  — э. д. с. неподвижного ротора при номинальном напряжении статора, В;  $I_{2\text{ном}}$  — номинальный ток ротора, А.

Известно, что любая электрическая машина может работать в двигательном и генераторном режиме. При двигательном режиме на валу машины создается вращающий момент, приводящий в движение рабочий механизм. При генераторном режиме момент, развиваемый машиной, направлен встречно по отношению к ее направлению вращения, препятствует движению, т. е. является тормозным. Следовательно, генераторный режим электрической машины является тормозным для привода. Электрическое торможение электродвигателей применяется для: быстрой остановки производственного механизма при частых пусках, опускания грузов в подъемных установках, точной остановки машины при строгой фиксации рабочих органов и других целей.

Области режимов работы электропривода в четырех квадрантах координатных осей  $\omega$ ,  $M$  показаны на рис. 3.3.



Рис. 3.3. Области режимов работы электропривода

В зависимости от схемы включения электродвигателя и условий работы привода электрическое торможение делят на рекуперативное, динамическое и торможение противовключением.

### 3.2. СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Вопрос о соответствии механической характеристики электродвигателя механической характеристике рабочей машины или производственного механизма относительно статической устойчивости системы решается с помощью так называемой совместной характеристики, представляющей собой алгебраическую сумму моментов этих характеристик. Совместная характеристика электродвигателя (2) и рабочей машины (1) (вентилатора) представлена штриховой линией на рис. 3.4.

Совместная характеристика позволяет судить о статической устойчивости работы системы электродвигатель — рабочая машина, а также определять значения установившейся угловой скорости  $\omega_{уст}$ , при которой  $M = M_c$ . Статической устойчивостью электропривода называют способность его автоматически восстанавливать установившийся режим работы в случае его нарушения без помощи каких-либо регуляторов.

Из рис. 3.4 видно, что совместная характеристика представляет собой зависимость динамического момента системы  $M_d$  от угловой скорости  $\omega$ . Очевидно, что если  $M_d = 0$  ( $M = M_c$ ,  $\omega = \omega_{уст}$ ), то режим работы установившийся, если по каким-либо причинам скорость станет больше  $\omega_{уст}$ , то при  $M_d < 0$  произойдет торможение системы и скорость снизится до значения  $\omega_{уст}$ . При  $M_d > 0$  скорость будет возрастать. Если по каким-либо причинам скорость станет меньше  $\omega_{уст}$ , то при  $M_d > 0$  произойдет увеличение скорости системы до значения  $\omega_{уст}$ , а при  $M_d < 0$  скорость уменьшится до нуля. Следовательно, система, имеющая совместную характеристику, представленную на рис. 3.4, является статически устойчивой.

О статической устойчивости системы можно судить и не прибегая к построению совместной характеристики. Общим критерием статической устойчивости является условие  $(dM_c^*/d\omega^*) > (dM^*/d\omega^*)$  для точки пересечения характеристик двигателя и рабочей машины.

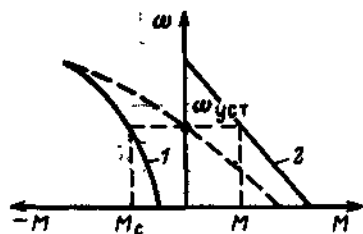


Рис. 3.4 Совместная характеристика электропривода

### 3.3. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С ДВИГАТЕЛЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Схема включения двигателя постоянного тока независимого возбуждения представлена на рис. 3.5. Для вывода уравнений электромеханической и механической характеристик двигателя используются известные уравнения:

равновесия напряжений в цепи якоря

$$U = E + I_a R, \quad (3.1)$$

э. д. с. якоря

$$E = k\omega\Phi \quad (3.2)$$

и электромагнитного момента

$$M = kI_a\Phi, \quad (3.3)$$

где  $U$  — напряжение на зажимах двигателя, В;  $I_a$  — ток якоря двигателя, А;  $R$  — сопротивление якорной цепи, Ом ( $R = R_a + R_p$ );  $R_a$  — сопротивление обмотки якоря, Ом;  $R_p$  — сопротивление реостата в цепи якоря, Ом;  $k$  — конструктивная постоянная двигателя;  $\Phi$  — магнитный поток двигателя, Вб.

Подставив значение  $E$  из (3.2) в уравнение (3.1), получим

$$U = k\omega\Phi + I_a R,$$

откуда уравнение электромеханической характеристики

$$\omega = (U - I_a R) / k\Phi = U / k\Phi - I_a R / k\Phi. \quad (3.4)$$

При расчетах на практике обычно принимают с некоторым допущением, что электромагнитный момент двигателя равен моменту на его валу. В действительности момент на валу двигателя несколько меньше электромагнитного момента за счет потерь в стали и механических. Подставив значение тока якоря из (3.3) в (3.4), получим уравнение механической характеристики

$$\omega = U / k\Phi - MR / k^2\Phi^2. \quad (3.5)$$

При идеальном холостом ходе ток якоря и вращающий момент равны нулю. При этом угловая скорость двигателя будет равна скорости идеального холостого хода. Обозначим эту

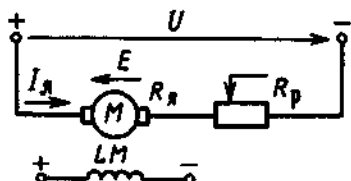


Рис. 3.5. Схема включения двигателя постоянного тока независимого возбуждения

скорость через  $\omega_0$ . Тогда при  $I_{\text{я}}=0$  и  $M=0$  на основании (3.4) и (3.5)

$$\omega_0 = U/k\Phi. \quad (3.6)$$

Второй член в правой части уравнений (3.4) и (3.5) характеризует перепад скорости относительно скорости идеального холостого хода

$$\Delta\omega = I_{\text{я}}R/k\Phi = MR/k^2\Phi^2. \quad (3.7)$$

Тогда с учетом (3.6) уравнения (3.4) и (3.5) можно представить в следующем виде:

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega.$$

Уравнения (3.4) и (3.5) соответственно могут быть приведены к виду

$$\omega = \omega_0 - A_1 I_{\text{я}}, \quad (3.8)$$

$$\omega = \omega_0 - A_2 M, \quad (3.9)$$

где  $A_1 = R/k\Phi$ ,  $A_2 = R/k^2\Phi^2$ .

Графически уравнения (3.8) и (3.9) представляют собой прямую линию, наклон которой по отношению к оси абсцисс при постоянном значении  $\Phi$  определяется сопротивлением якорной цепи. Поэтому электромеханическая и механическая характеристики двигателя независимого возбуждения при постоянном потоке имеют один и тот же вид (совпадают). Для их построения (рис. 3.6) достаточно иметь координаты двух точек ( $\omega_0$ ; 0) и ( $\omega_{\text{ном}}$ ;  $I_{\text{я. ном}}$  или  $M_{\text{ном}}$ ).

В паспорте двигателя и каталогах обычно приведены следующие номинальные данные:  $P_{\text{ном}}$ ,  $n_{\text{ном}}$ ,  $U_{\text{ном}}$ ,  $I_{\text{я. ном}}$ . Для определения скорости идеального холостого хода запишем уравнение (3.4) для номинального режима работы двигателя

$$\omega_{\text{ном}} = (U_{\text{ном}} - I_{\text{я. ном}} R_{\text{я}}) / k\Phi_{\text{ном}}. \quad (3.10)$$

Решая совместно уравнения (3.6) и (3.10) и считая, что в (3.6)  $U = U_{\text{ном}}$ , получим

$$\omega_0 = \omega_{\text{ном}} U_{\text{ном}} / (U_{\text{ном}} - I_{\text{я. ном}} R_{\text{я}}). \quad (3.11)$$

Из (3.10) имеем

$$k\Phi_{\text{ном}} = (U_{\text{ном}} - I_{\text{я. ном}} R_{\text{я}}) / \omega_{\text{ном}}. \quad (3.12)$$

Значение  $\omega_{\text{ном}}$  определяют из известного выражения

$$\omega_{\text{ном}} = \pi n_{\text{ном}} / 30,$$

а значение номинального момента — из (2.4), подставив в него номинальные значения мощности и угловой скорости:

$$M_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} / \omega_{\text{ном}}.$$

Рис. 36. Естественная механическая и электрохимическая характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения при  $U_{ном}$ ,  $\Phi_{ном}$ ,  $R_p=0$

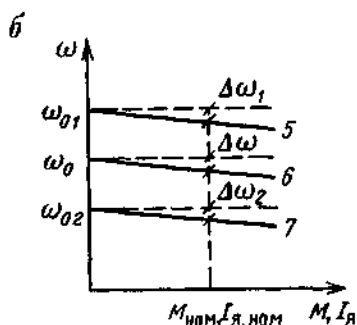
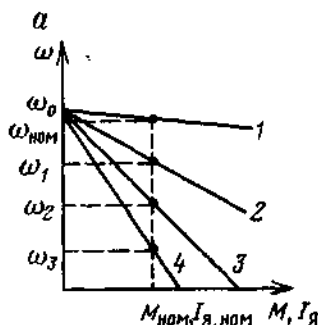


Рис. 37. Механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения при различных сопротивлениях цепи якоря (а) и напряжениях (б):

1 —  $R_p=0$ , 2 —  $R_{p1}$ , 3 —  $R_{p2}$ , 4 —  $R_{p3}$  при  $R_{p3} > R_{p2} > R_{p1}$ ; 5 —  $U_1 > U_{ном}$ , 6 —  $U_{ном}$ , 7 —  $U_2 < U_{ном}$  при  $\Delta\omega = \Delta\omega_1 = \omega_1 - \omega_0$ .

Для определения  $\omega_0$  по уравнению (3.11) необходимо знать значение  $R_{я} \approx 0,5(1 - \eta_{ном}) (U_{ном}/I_{я.ном})$ . На основании (3.4) угловая скорость двигателя на искусственной характеристике при номинальном токе якоря и напряжении

$$\omega_{и} = [U_{ном} - I_{я.ном}(R_{я} + R_p)] / k\Phi_{ном}. \quad (3.13)$$

Подставив из (3.12) значение произведения  $k\Phi_{ном}$  в (3.13), получим расчетное уравнение для определения угловой скорости на искусственной характеристике при любом  $R_p$

$$\omega_{и} = \frac{U_{ном} - I_{я.ном}(R_{я} + R_p)}{U_{ном} - I_{я.ном}R_{я}} \omega_{ном}. \quad (3.14)$$

Искусственные характеристики так же, как и естественные, прямолинейны и пересекают ось ординат в точке  $\omega = \omega_0$ , так как при  $I_{я}=0$  скорость идеального холостого хода не зависит от  $R$ . Эти характеристики приведены на рис. 37, а.

Рассмотрим теперь искусственные характеристики при различных значениях напряжения на зажимах двигателя, но при

условии, что  $R_p = 0$  и  $\Phi = \Phi_{\text{ном}} = \text{const}$ . Из формулы (3.6) видно, что  $\omega_0$  изменяется прямо пропорционально  $U$ , а  $\Delta\omega$  не зависит от  $U$  [см. формулу (3.7)]. Поэтому искусственные характеристики будут параллельны естественной характеристике двигателя (рис. 3.7, б).

Для расчета и построения искусственной характеристики необходимо прежде всего построить естественную характеристику, а затем, определив скорость идеального холостого хода для искусственной характеристики  $\omega_0'$  из соотношения

$$\omega_0'/\omega_0 = U'/U_{\text{ном}},$$

провести через значение  $\omega_0'$  прямую, параллельную естественной характеристике.

Если же изменять поток двигателя  $\Phi$ , а  $R_p = 0$  и  $U = U_{\text{ном}} = \text{const}$ , то искусственные характеристики будут заметно отличаться от характеристик, приведенных на рис. 3.7, б.

Из (3.6) видно, что  $\omega_0$  изменяется обратно пропорционально  $\Phi$ . Поэтому

$$\omega_0'/\omega_0 = \Phi_{\text{ном}}/\Phi',$$

откуда можно определить значение  $\omega_0'$ , соответствующее новому значению  $\Phi'$ .

Искусственные характеристики в этом случае также имеют прямолинейную зависимость. Для нахождения второй точки характеристики здесь удобнее пользоваться не номинальными значениями тока или момента, а значениями, соответствующими расчетному режиму короткого замыкания. Подставив в (3.4)  $\omega = 0$  и решив относительно  $I_{я}$ , получим

$$I_{я.к} = U/R_{я}, \quad (3.15)$$

где  $I_{я.к}$  — ток короткого замыкания якоря.

Как видно из (3.15),  $I_{я.к}$  не зависит от  $\Phi$ . Электромеханические характеристики двигателя для различных  $\Phi$  приведены на рис. 3.8, а. Эти характеристики практически используют при  $I_{я} \leq (2-2,5) \cdot I_{я.ном}$  по условиям коммутации коллектора.

Момент двигателя при коротком замыкании прямо пропорционален  $\Phi$ , что подтверждается формулой (3.3). Заменяя  $M$  на  $M_k$  и  $I_{я}$  на  $I_{я.к}$ , получим  $M_k = k I_{я.к} \Phi$ . Механические характеристики для различных значений  $\Phi$  приведены на рис. 3.8, б.

Для изменения направления вращения двигателя постоянного тока необходимо изменить направление магнитного потока возбуждения или тока якоря. В этом случае характеристики изображают в третьем квадранте (см. рис. 3.3). Во втором и четвертом квадрантах координатных осей  $\omega$ ,  $M$  знаки у скорости и момента различны. В этих квадрантах изображают механические характеристики любых электродвигателей во всех тормозных режимах.

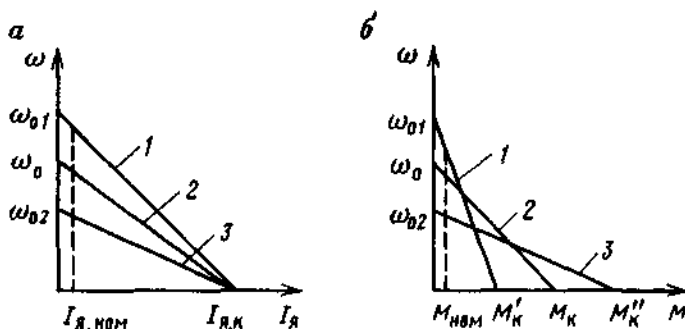


Рис. 3.8. Электромеханические (а) и механические (б) характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения при различных потоках: 1 —  $\Phi_1 < \Phi_{ном}$ , 2 —  $\Phi_{ном}$ , 3 —  $\Phi_3 > \Phi_{ном}$

Механические характеристики в тормозных режимах. Электродвигатели постоянного тока независимого возбуждения имеют все три способа электрического торможения. *Рекуперативное торможение.* Этот способ торможения осуществим в том случае, если скорость двигателя по тем или иным причинам оказывается выше скорости идеального холостого хода и его э. д. с. больше напряжения сети:  $E > U$ . Такое повышение скорости может возникнуть, например, при спуске тяжелого груза электрическим краном или подъемной машиной. Если двигатель включить в сторону спуска груза и момент, создаваемый грузом, окажется больше момента трения во всех звеньях механизма, то скорость якоря двигателя станет больше скорости идеального холостого хода и машина автоматически перейдет из двигательного режима работы в рекуперативный. В этом режиме схема включения двигателя остается той же, что и в двигательном. Но поскольку  $\omega > \omega_0$ , то, согласно выражению (3.2), э. д. с. возрастает и становится больше напряжения сети. Решив уравнение (3.1) относительно  $I_a$ , получим для двигательного режима

$$I_a = (U - E)/R. \quad (3.16)$$

Для рекуперативного торможения, так как  $E > U$ , имеем

$$-I_a = (E - U)/R. \quad (3.17)$$

Знак минус в (3.17) означает, что ток якоря меняет свое направление. Следовательно, двигатель работает генератором параллельно с сетью, которой он отдает электрическую энергию. Знак у момента двигателя также меняется, и он становится тормозным.

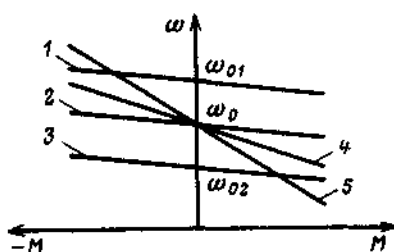


Рис. 3.9. Механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения при рекуперативном торможении:

1 —  $U_1 > U_{\text{ном}}$ ; 2 —  $U = U_{\text{ном}}$ ; 3 —  $U_2 < U_{\text{ном}}$ ;  $R_p = 0$ ;  
4 —  $R_{p1}$ ; 5 —  $R_{p2}$ ;  $U = U_{\text{ном}}$

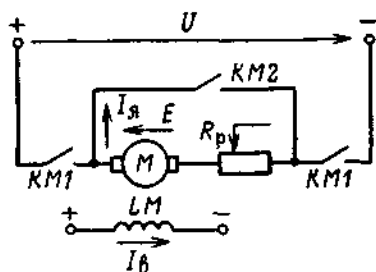


Рис. 3.10. Схема включения двигателя постоянного тока независимого возбуждения при динамическом торможении

Уравнения для момента и механической характеристики при этом будут иметь вид:

$$\begin{aligned} -M_T &= k I_{\text{я}} \Phi, \\ \omega &= \omega_0 + M_T R / k^2 \Phi^2. \end{aligned} \quad (3.18)$$

Из формулы (3.18) видно, что при  $M_T = 0$  механическая характеристика в этом режиме, так же как и в двигательном, проходит через точку, соответствующую  $\omega_0$ . На графике она является продолжением характеристики двигательного режима в область второго квадранта (рис. 3.9).

Рассмотренный способ торможения является весьма экономичным, так как он сопровождается отдачей в сеть электрической энергии (за вычетом потерь в двигателе).

**Динамическое торможение.** Схема, позволяющая перевести двигатель независимого возбуждения в режим динамического торможения, приведена на рис. 3.10. Для осуществления торможения необходимо контактором *KM1* отключить обмотку якоря двигателя от сети и контактором *KM2* замкнуть ее на реостат  $R_p$ . При этом обмотка возбуждения так же, как и в двигательном режиме, остается подключенной к сети. За счет кинетической энергии, запасенной в движущихся частях привода и рабочей машины, якорь двигателя будет продолжать вращаться. В обмотке якоря наводится э. д. с., вызывающая ток. Направление э. д. с. сохраняется, так как не изменились ни направление скорости, ни направление тока в обмотке возбуждения, а ток якоря и момент изменяют свое направление. Следовательно, двигатель будет развивать тормозной момент, направленный против движения, под действием которого произойдет его остановка. Возможно вращение якоря двигателя при динамическом торможении под действием внешних сил, например при опускании грузов в подъемных установках.



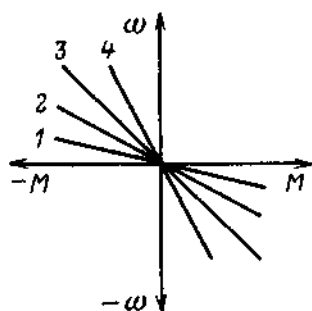


Рис. 3.11. Механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения при динамическом торможении:

1 —  $R_p = 0$ , 2 —  $R_{p1}$ , 3 —  $R_{p2}$ , 4 —  $R_{p3}$  при  $R_{p3} > R_{p2} > R_{p1}$

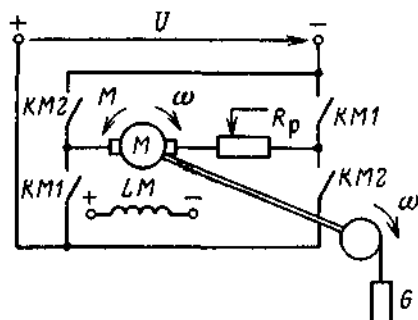


Рис. 3.12. Схема включения двигателя постоянного тока независимого возбуждения при торможении противовключением

Так как при динамическом торможении  $U=0$ , то ток якоря можно определить с помощью (3.16)

$$I_a = -E/R,$$

а уравнение механической характеристики согласно (3.5)

$$\omega = -M_a R / k^2 \Phi^2. \quad (3.19)$$

Из (3.19) следует, что при динамическом торможении механическая характеристика представляет собой прямую, проходящую через начало координат во втором или четвертом квадрантах, а наклон ее к оси абсцисс будет определяться величиной  $R$  (рис. 3.11). При динамическом торможении механическая энергия превращается в тепловую и расходуется на нагрев обмоток якоря и реостата.

По сравнению с рекуперативным торможением данный способ менее экономичен.

**Торможение противовключением.** При данном способе торможения якорь включенного в сеть двигателя вращается за счет внешнего воздействия или по инерции в направлении, противоположном тому, которому соответствует включение обмоток двигателя. Схема включения двигателя для осуществления противовключения показана на рис. 3.12.

Первый случай может иметь место в приводе грузоподъемного механизма, когда двигатель включен на подъем (контакты  $KM1$  замкнуты, см. рис. 3.12), а момент  $M_{c1}$  (рис. 3.13), развиваемый грузом, превосходит начальный пусковой момент двигателя  $M_{n1}$  или  $M_{n2}$  и вращает привод в сторону опускания груза. Механические характеристики для этого случая изображены



Следовательно, режим противовключения является наиболее неэкономичным тормозным режимом.

Электродвигатели постоянного тока независимого возбуждения в горной промышленности применяют в приводе рудничных подъемных установок (обычно при мощности более 1000 кВт), одноковшовых и многоковшовых экскаваторов средней и большой производительности, драг, буровых установок и других машин. При этом источником питания двигателей является либо генератор, либо выпрямитель.

Электродвигатели параллельного возбуждения имеют электромеханические и механические характеристики аналогичные характеристикам двигателей независимого возбуждения.

### 3.4. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С ДВИГАТЕЛЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Схема включения двигателя постоянного тока последовательного возбуждения приведена на рис. 3.14.

Для двигателя последовательного возбуждения, так же как и для двигателя независимого возбуждения, уравнение электромеханической характеристики имеет вид (3.4):

$$\omega = (U - I_a R) / k \Phi,$$

где  $R = R_a + R_b + R_p$  — общее сопротивление якорной цепи, состоящее из сопротивлений реостата, обмоток якоря и возбуждения.

В отличие от двигателя независимого возбуждения в этом случае магнитный поток  $\Phi$  является функцией тока якоря  $I_a$ , так как последний протекает также и по обмотке возбуждения.

Обозначим постоянный ток через  $I$ . Зависимость  $\Phi(I)$ , называемая вебер-амперной характеристикой магнитной цепи двигателя, приведена на рис. 3.15. Ввиду того, что отсутствует простое и точное аналитическое выражение для этой кривой, трудно получить простое и точное аналитическое выражение и

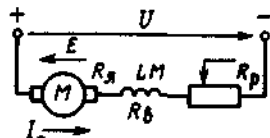


Рис. 3.14. Схема включения двигателя постоянного тока последовательного возбуждения



Рис. 3.15. Вебер-амперная характеристика двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

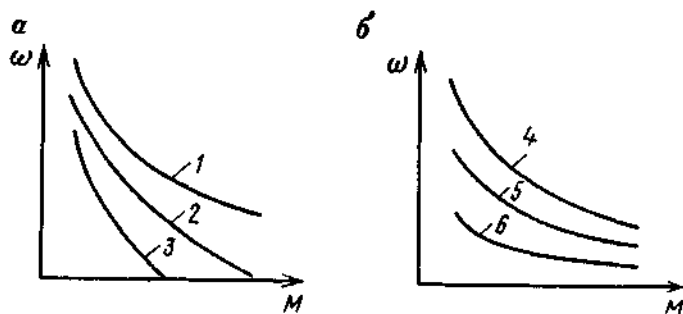


Рис. 3.16. Механические характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения при различных сопротивлениях цепи якоря (а) и различных напряжениях (б):

1 —  $R_p = 0$ , 2 —  $R_{p1}$ , 3 —  $R_{p2}$  при  $R_{p2} > R_{p1}$ , 4 —  $U = U_{\text{ном}}$ , 5 —  $U_1 < U_{\text{ном}}$ , 6 —  $U_2 < U_1$

для механической характеристики двигателя последовательного возбуждения.

Для упрощения анализа предположим, что зависимость потока от тока линейная (см. рис. 3.15). Тогда

$$\Phi = cI_-, \quad (3.21)$$

где  $c$  — коэффициент пропорциональности, Ом · с.

Подставив значение  $\Phi$  из (3.21) в (3.3), получим

$$M = kcl_-^2. \quad (3.22)$$

Откуда имеем

$$I_- = \sqrt{M/kc}. \quad (3.23)$$

Подставляя (3.21) и (3.23) в (3.4), получим уравнение механической характеристики двигателя последовательного возбуждения

$$\omega = A/\sqrt{M} - B, \quad (3.24)$$

где  $A = U/\sqrt{kc}$ ,  $B = R/kc$ .

Согласно (3.24) при  $M=0$  угловая скорость стремится к бесконечности, а при  $\omega=0$   $M=(A/B)^2$ . Следовательно, механическая характеристика не пересекается с осью скорости, являющейся асимптотой, и представляет собой гиперболу (1) (рис. 3.16, а). При малых нагрузках угловая скорость двигателя может достигнуть значения, при котором он выйдет из строя. Поэтому работа двигателя последовательного возбуждения без нагрузки недопустима.

Уравнение (3.24) позволяет произвести качественный анализ формы механической характеристики двигателя последователь-

ного возбуждения. Однако это уравнение ввиду неточности часто не может быть использовано для практических расчетов. Поэтому заводы-изготовители естественные характеристики дают в виде универсальных на основании опытных данных для каждой серии выпускаемых двигателей. Универсальные характеристики представляют собой зависимости угловой скорости и момента от тока, взятые в относительных единицах (рис. 3.17).

По универсальным характеристикам строят естественные характеристики  $\omega(I_-)$  и  $\omega(M_-)$ , зная номинальные данные двигателя и задаваясь рядом значений тока.

Введением в цепь якоря двигателя последовательного возбуждения реостата получают искусственные характеристики, называемые реостатными (см. рис. 3.16).

При одном и том же токе якорной цепи, а следовательно, при одном потоке возбуждения отношение скоростей на естественной  $\omega_e$  и искусственной  $\omega_n$  характеристиках равно отношению э. д. с. якоря, соответствующих этим скоростям:

$$\omega_e/\omega_n = E_e/E_n.$$

Выражая э. д. с. через напряжение сети и падение напряжения в якорной цепи, получим зависимость для расчета реостатных характеристик

$$\omega_n = \omega_e \frac{U_{ном} - I_- (R_a + R_b + R_p)}{U_{ном} - I_- (R_a + R_b)}. \quad (3.25)$$

С помощью (3.25) определяют точки реостатной характеристики при одном потоке возбуждения отношение скоростей на естественной характеристике соответствующие им значения угловой скорости  $\omega_e$ .

На основании (3.24) можно сделать вывод о том, что при уменьшении напряжения сети искусственные характеристики будут располагаться ниже естественной (см. рис. 3.16, б).

Двигатели последовательного возбуждения, как и двигатели независимого возбуждения, допускают кратковременные перегрузки по току по условиям коммутации до значений

$$I_{max}/I_{ном} = 2 \div 2,5.$$

Однако у двигателей последовательного возбуждения момент возрастает как за счет тока, так и за счет потока. Если бы зависимость  $\Phi(I_-)$  была прямолинейной, то зависимость между моментом и током была бы квадратичной [см. формулу (3.22)]. Ввиду насыщения при пусковом токе  $I_n = 2I_{ном}$  пусковой момент двигателя последовательного возбуждения будет

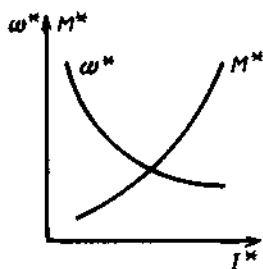


Рис. 3.17. Универсальные характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

больше номинального примерно в 3 раза. У двигателя независимого возбуждения при токе  $I_{\text{я.п}} = 2I_{\text{я.ном}}$  пусковой момент будет больше номинального только в 2 раза.

Поэтому двигатели постоянного тока последовательного возбуждения широко применяют в электроприводе рудничных и промышленных электровозов. Главным их преимуществом по сравнению со всеми другими типами электродвигателей является получение значительного пускового момента при меньших колебаниях тока в сети при пуске и перегрузках. Также преимуществом двигателей последовательного возбуждения является механическая характеристика гиперболической формы, обеспечивающая работу в режиме, близком к условию  $P = \text{const}$  при изменении нагрузки. Все это позволяет сократить продолжительность разгона поезда, тем самым повысить производительность откатки, а также облегчить электроснабжение электровозной тяги.

Механические характеристики в тормозных режимах. Электродвигатели постоянного тока последовательного возбуждения имеют два тормозных режима: динамического торможения и противовключения. Ввиду того, что э. д. с. двигателя последовательного возбуждения не может быть больше приложенного напряжения сети, рекуперативное торможение осуществить невозможно.

Динамическое торможение двигателя последовательного возбуждения можно осуществить двумя способами: с независимым возбуждением и с самовозбуждением. Схема независимого возбуждения приведена на рис. 3.18. При торможении размыкаются контакты контактора  $KM1$  и замыкаются контакты контактора  $KM2$ . Для того чтобы ограничить ток до номинального значения, обмотку возбуждения в этом случае подключают к сети через реостат  $R_{\text{рв}}$ . Схема включения двигателя на рис. 3.18 не отличается от схемы включения двигателя независимого возбуждения при динамическом торможении на рис. 3.10. Поэтому его характеристики подобны характеристикам двигателя независимого возбуждения при динамическом торможении, которые приведены на рис. 3.11.

Существенными недостатками динамического торможения рассматриваемого типа двигателя с независимым возбуждением являются: 1) отсутствие тормозного момента при аварийном отключении напряжения сети; 2) значительные потери электроэнергии в реостате  $R_{\text{рв}}$ , так как обмотка возбуждения рассчитана на значительный ток и малое напряжение.

Поэтому в приводе рудничных электровозов предпочтение оказывают динамическому торможению с самовозбуждением, при котором отсутствуют вышеперечисленные недостатки.

Схема двигателя последовательного возбуждения при динамическом торможении с самовозбуждением показана на

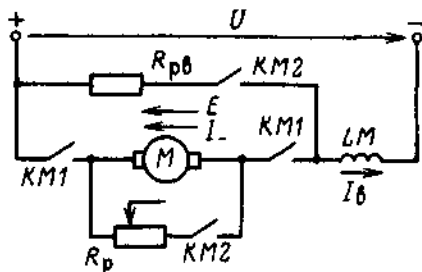


Рис. 3.18. Схема включения двигателя постоянного тока последовательного возбуждения при динамическом торможении с независимым возбуждением

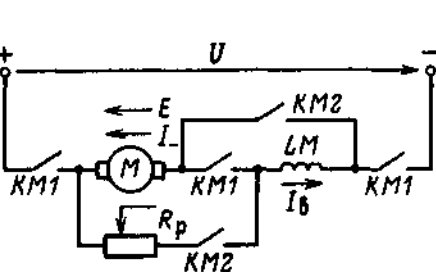


Рис. 3.19. Схема включения двигателя постоянного тока последовательного возбуждения при динамическом торможении с самовозбуждением

рис. 3.19. Якорь двигателя отключается от сети контактором  $KM1$  и вместе с обмоткой возбуждения замыкается контактором  $KM2$  на реостат  $R_p$ . Как показано на схеме, при переходе из двигательного режима в тормозной во избежание размагничивания двигателя изменяется соединение обмоток возбуждения и якоря. Самовозбуждение машины происходит за счет остаточного потока и начинается только при определенной скорости, когда э. д. с. двигателя будет больше падения напряжения в цепи самовозбуждения — обмотка якоря, обмотка возбуждения, реостат, т. е.  $E > IR$ . Механические характеристики для рассматриваемого случая приведены на рис. 3.20, а.

Режим противовключения у двигателей последовательного возбуждения осуществляется так же, как и у двигателей неза-

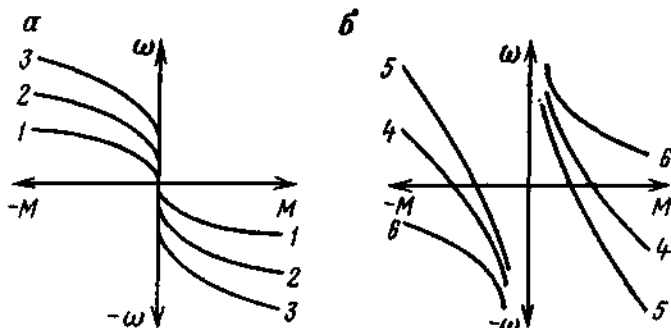


Рис. 3.20. Механические характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения при динамическом торможении с самовозбуждением (а) и при торможении противовключением (б):

1 —  $R_{p1}$ , 2 —  $R_{p2}$ , 3 —  $R_{p3}$  при  $R_{p3} > R_{p2} > R_{p1}$ , 4 —  $R_{p1}$ , 5 —  $R_{p2}$  при  $R_{p2} > R_{p1}$ , 6 — двигательный режим при  $R_p = 0$

висимого возбуждения. Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения в режиме противовключения приведены во втором и четвертом квадрантах на рис. 3.20, б.

Электродвигатели смешанного возбуждения редко применяются в горной промышленности, поэтому здесь не рассматриваются.

### 3.5. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Естественная механическая характеристика. Схема включения асинхронного двигателя с фазным ротором приведена на рис. 3.21. Для получения уравнения механической характеристики асинхронного двигателя используют упрощенную схему замещения, приведенную на рис. 3.22.

Здесь

$$s = (\omega_0 - \omega) / \omega_0; \quad (3.26)$$

$$\omega_0 = \pi n_0 / 30;$$

$$\omega_0 = 2\pi f / p, \quad (3.27)$$

где  $\omega_0$  — синхронная угловая скорость двигателя, рад/с;  $n_0$  — синхронная частота вращения двигателя, об/мин;  $f$  — частота питающей сети, Гц;  $p$  — число пар полюсов.

На основании данной схемы замещения получим уравнение для приведенного тока ротора:

$$I_2' = \frac{U_\Phi}{Z} = \frac{U_\Phi}{\sqrt{(R_1 + R_2'/s)^2 + (x_1 + x_2')^2}}. \quad (3.28)$$

Мощность, передаваемая вращающимся с угловой скоростью  $\omega_0$  магнитным полем статора ротору, имеет вид

$$P_{эм} = M_{эм} \omega_0, \quad (3.29)$$

где  $M_{эм}$  — электромагнитный момент двигателя, Н·м.

Часть этой мощности теряется в обмотке ротора, а оставшаяся мощность  $P$  преобразуется в механическую, т. е.

$$P = P_{эм} - 3I_2'^2 R_2'. \quad (3.30)$$

Подставив в (3.30) значение  $P_{эм}$  из (3.29) и заменив  $P$  на  $M_{эм} \omega$ , получим

$$M_{эм} \omega = M_{эм} \omega_0 - 3I_2'^2 R_2',$$

а с учетом формулы (3.26)

$$M_{эм} = 3I_2'^2 R_2' / \omega_0 s. \quad (3.31)$$



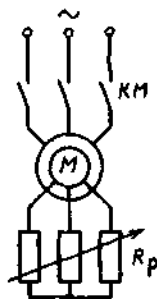


Рис 3.21 Схема включения асинхронного двигателя с фазным ротором

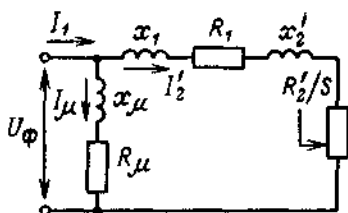


Рис. 3.22 Упрощенная схема замещения асинхронного двигателя:

$U_\phi$  — фазное напряжение сети, В;  $I_1$  — фазный ток статора, А;  $I_2'$  — приведенный ток ротора, А;  $I_\mu$  — намагничивающий ток, А;  $x_1$  — реактивное сопротивление обмотки статора, Ом;  $x_2'$  — реактивное приведенное сопротивление обмотки ротора, Ом;  $R_1$  — активное сопротивление обмотки статора, Ом;  $R_2'/s$  — активное приведенное сопротивление обмотки ротора, Ом;  $R_\mu$  и  $x_\mu$  — соответственно активное и реактивное сопротивления контура намагничивания, Ом;  $s$  — скольжение двигателя

Развиваемый на валу двигателя момент будет меньше электромагнитного на величину механических потерь:

$$M = M_{эм} - \Delta M_{мех}.$$

Потерями момента  $\Delta M_{мех}$  можно пренебречь ввиду их малости. Тогда будем считать, что  $M = M_{эм}$ .

Подставляя значение приведенного тока ротора из (3.28) в (3.31), получаем уравнение механической характеристики асинхронного двигателя

$$M = \frac{3U_\phi^2 R_2'}{\omega_0 s [(R_1 + R_2'/s)^2 + (x_1 + x_2')^2]}. \quad (3.32)$$

Анализ (3.32) показывает, что кривая  $M(s)$  имеет два максимума: один в двигательном режиме, другой в генераторном. Принимая  $dM/ds = 0$ , определяют значение критического скольжения  $s_k$ , при котором электродвигатель развивает максимальный (критический) момент

$$s_k = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + x_k^2}}, \quad (3.33)$$

где  $x_k = x_1 + x_2'$  — реактивное сопротивление короткого замыкания.

Подставляя значение  $s_k$  из (3.33) в (3.32), получаем выражение для максимального момента

$$M_k = \frac{3U_\phi^2}{2\omega_0 (R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + x_k^2})}. \quad (3.34)$$

Положительный знак в (3.33) и (3.34) относится к двигательному режиму и к режиму противовключения, отрицательный же знак относится к рекуперативному торможению.

Если в (3.32) подставить  $s=1$ , то получим выражение для начального пускового момента ( $\omega=0$ ):

$$M_{\text{п}} = \frac{3U_{\Phi}^2 R_2'}{\omega_0 [(R_1 + R_2')^2 + x_k^2]} . \quad (3.35)$$

Так как в формулы (3.32), (3.34) и (3.35) входят параметры двигателя  $R_1$ ,  $R_2'$  и  $x_k$ , которые не всегда известны, то для практических расчетов удобно пользоваться уравнением механической характеристики

$$M = \frac{2M_{\text{к}} (1 + as_{\text{к}})}{s/s_{\text{к}} + s_{\text{к}}/s + 2as_{\text{к}}} , \quad (3.36)$$

где  $a = R_1/R_2'$ .

Уравнение (3.36) называется уточненным, так как учитывается сопротивление  $R_1$ . Это уравнение получили, разделив выражение (3.32) на (3.34) и сделав несложные преобразования.

Так как у двигателей средней и большой мощности  $R_1$  значительно меньше  $x_k$ , то сопротивлением  $R_1$  можно пренебрегать.

Тогда выражения (3.32), (3.33), (3.34), (3.35) и (3.36) соответственно будут иметь более простой вид:

$$M = \frac{3U_{\Phi}^2 R_2'}{\omega_0 s [(R_2'/s)^2 + x_k^2]} , \quad (3.37)$$

$$s_{\text{к}} = \pm R_2'/x_k , \quad (3.38)$$

$$M_{\text{к}} = \pm 3U_{\Phi}^2 / 2\omega_0 x_k , \quad (3.39)$$

$$M_{\text{п}} = \frac{3U_{\Phi}^2 R_2'}{\omega_0 [(R_2')^2 + x_k^2]} , \quad (3.40)$$

$$M = \frac{2M_{\text{к}}}{s/s_{\text{к}} + s_{\text{к}}/s} . \quad (3.41)$$

Уравнение (3.41) является упрощенным уравнением механической характеристики, так как не учитывается  $R_1$ .

Отношение максимального момента к номинальному характеризует перегрузочную способность двигателя и называется кратностью максимального (критического) момента:

$$\lambda = M_{\text{к}}/M_{\text{ном}} . \quad (3.42)$$

Электродвигатели с фазным ротором, применяемые для шахтных подъемных машин, имеют  $\lambda = 1,8 \div 2,5$ . У электродви-

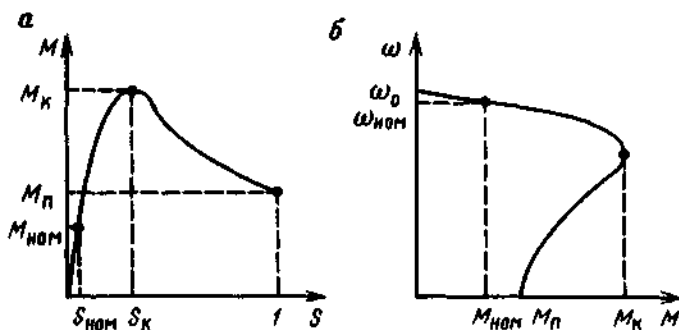


Рис. 3.23. Механические характеристики асинхронного двигателя

гателей с короткозамкнутым ротором шахтных машин и крановых  $\lambda = 2,5 \div 3,5$ .

Подставив в (3.41) вместо текущих значений  $M$  и  $s$  их номинальные значения  $M_{ном}$  и  $s_{ном}$  и заменив отношение  $M_K/M_{ном}$  через  $\lambda$  на основании (3.42), получим

$$s_K = s_{ном} (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}). \quad (3.43)$$

Разделив левую и правую части равенств (3.36) и (3.41) на  $M_{ном}$ , получим с учетом (3.42) уточненное и упрощенное уравнения механической характеристики в относительных единицах:

$$M^* = \frac{2\lambda (1 + as_K)}{s/s_K + s_K/s + 2as_K}, \quad (3.44)$$

$$M^* = \frac{2\lambda}{s/s_K + s_K/s}. \quad (3.45)$$

На рис. 3.23, а представлена естественная механическая характеристика асинхронного двигателя  $M(s)$ . Если выполнить пересчет характеристики относительно угловой скорости с помощью уравнения (3.26)

$$\omega = \omega_0 (1 - s), \quad (3.46)$$

то получим график механической характеристики в виде  $\omega(M)$  (рис. 3.23, б).

Характерными точками естественной механической характеристики асинхронного двигателя являются: 1)  $s=0$ ,  $M=0$  при  $\omega=\omega_0$ ; 2)  $s=s_{ном}$ ,  $M=M_{ном}$  — номинальный режим; 3)  $s=s_K$ ,  $M=M_K$  — максимальный момент двигателя; 4)  $s=1$ ,  $M=M_n$  — начальный пусковой момент.

Из (3.41) видно, что при малых значениях скольжения ( $s <$

$< s_k$ ) для  $M(s)$  получим уравнение прямой:  $M = 2M_k s / s_k$ . Линейная часть механической характеристики является рабочей.

При  $s > s_k$  получим уравнение гиперболы:  $M = 2M_k s_k / s$ . Эта часть характеристики является нерабочей и соответствует только пусковым режимам.

Характеристики, приведенные на рис. 3.23, являются естественными. Эти характеристики рассчитывают в следующем порядке при известных номинальных данных двигателя ( $P_{ном}$ ,  $n_{ном}$ ,  $\lambda$ ,  $p$ ): 1) определяют номинальное скольжение двигателя —  $s_{ном} = (n_0 - n_{ном}) / n_0$ , где  $n_0 = 60f/p$ ; 2) определяют  $s_k$  из формулы (3.43); 3) определяют номинальный момент двигателя, подставляя в (2.8)  $P_{ном}$  и  $n_{ном}$ ; 4) находят значение  $M_k$  из формулы (3.42); 5) определяют значение момента для различных точек характеристики с помощью уравнений (3.41) или (3.36), задавая значения  $s$ , включив в них обязательно  $s_{ном}$  и  $s_k$ .

Если механическую характеристику рассчитывают в относительных единицах, то пользуются формулой (3.45) или (3.44). Значения  $M_{ном}$  и  $M_k$  в данном случае можно не определять.

Когда не известны  $R_1$  и  $R_2'$ , то в (3.36) и (3.44) принимают  $a = 1$ , так как  $R_1 \approx R_2'$ .

Рассмотренные выше уравнения механической характеристики справедливы для двигателей с постоянными параметрами (обычно это двигатели с фазным ротором). Для двигателей с короткозамкнутым ротором, имеющих переменные параметры, пользоваться приведенными уравнениями можно только тогда, когда не требуется большая точность расчета. В остальных случаях необходимо применять заводские либо экспериментальные механические характеристики.

Важными конструктивными параметрами, характеризующими работу короткозамкнутых двигателей в системе электропривода, являются кратности начального пускового момента и начального пускового тока. На рис. 3.24 приведены естественная механическая (1) и электромеханическая (2) характеристики короткозамкнутого двигателя. Из сравнения этих характеристик видно, что короткозамкнутый двигатель, потребляя значительный ток при пуске, имеет низкий начальный пусковой момент. Такое явление объясняется значительным снижением коэффициента мощности при пуске двигателя и, следовательно, уменьшением активной составляющей тока.

Кратность начального пускового момента короткозамкнутых двигателей находится в пределах от 1 до 2. Ее определяют из выражения

$$K_M = M_n / M_{ном}. \quad (3.47)$$

Кратность начального пускового тока для рассматриваемого

Рис. 3.24. Механическая (1) и электро-механическая (2) характеристики асинхронного короткозамкнутого двигателя

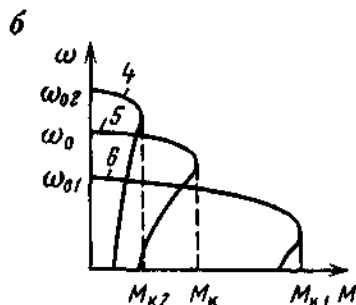
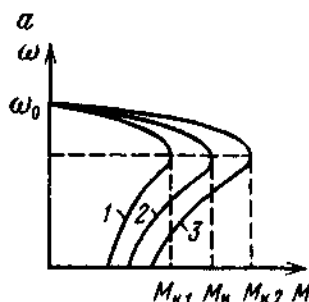
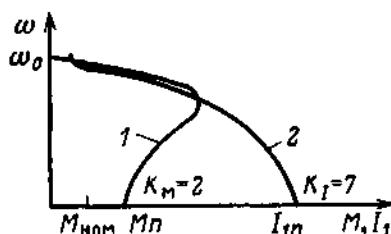


Рис. 3.25. Механические характеристики асинхронного двигателя при различных напряжениях (а) и частотах тока (б):

1 —  $U_1$ , 2 —  $U_{ном}$ , 3 —  $U_2$  при  $U_1 < U_{ном} < U_2$ ; 4 —  $f_1$ , 5 —  $f_{ном}$ , 6 —  $f_2$  при  $f_2 > f_{ном} > f_1$

типа двигателя находится в пределах от 5 до 7. Ее определяют из выражения

$$K_I = I_{п}/I_{ном}. \quad (3.48)$$

Для снижения пускового тока и повышения пускового момента выпускаются короткозамкнутые двигатели специальных конструкций (двигатели с глубоким пазом или двойной обмоткой ротора). Такие электродвигатели широко применяют в шахтных забойных машинах. Например, двигатели серий ВАО ( $K_m=1,2-2$ ;  $K_I=4,5-5,5$ ), ВР ( $K_m=1,6-2,5$ ;  $K_I=3,5-6$ ).

Искусственные механические характеристики. Рассмотренные выше естественные механические характеристики асинхронных двигателей были получены при номинальных значениях параметров сети — напряжении и частоте — и отсутствии реостатов в цепях статора или ротора. Однако в производственных условиях при перегрузке сети значения напряжения и частоты сети могут отклоняться от номинальных. В цепи статора или ротора для ограничения пусковых токов и моментов, регулирования скорости, получения специальной формы механической характеристики включают реостаты или катушки индуктивности. Поэтому искусственные

механические характеристики существенно отличаются от естественных.

Рассмотрим влияние напряжения сети на форму механической характеристики асинхронного двигателя. Из уравнений (3.32), (3.34) и (3.35) видно, что момент асинхронного двигателя при любых значениях скольжения прямо пропорционален квадрату приложенного к двигателю напряжения. Поэтому асинхронный двигатель чувствителен к колебаниям напряжения сети.

Синхронная скорость асинхронного двигателя от напряжения не зависит [см. формулу (3.27)]. Поэтому характеристики, полученные при напряжении сети, отличном от номинального, пересекают ось скорости в одной точке ( $\omega = \omega_0$ ) (рис. 3.25, а). Как следует из выражения (3.33), критическое скольжение также не зависит от напряжения сети. Поэтому максимум момента на естественной и всех искусственных характеристиках будет при одном и том же значении  $s_k$ .

Для построения искусственных характеристик, полученных при напряжении сети, отличном от номинального, необходимо прежде всего построить естественную характеристику, а затем значения моментов естественной характеристики пересчитать для искусственной:  $M' = M(U'/U_{ном})^2$ .

Кратности максимального и пускового моментов двигателя также изменяются прямо пропорционально квадрату напряжения сети.

При снижении напряжения сети и при неизменной нагрузке на валу двигателя ток ротора возрастает. Обычно частота тока промышленной сети остается неизменной либо изменяется незначительно. В некоторых случаях асинхронный двигатель должен работать при частоте тока, отличной от номинальной (например, работа двигателя при питании от автономной дизель-генераторной установки соизмеримой мощности или от преобразователя частоты). Поэтому рассмотрим влияние изменения частоты тока на форму механической характеристики асинхронного двигателя.

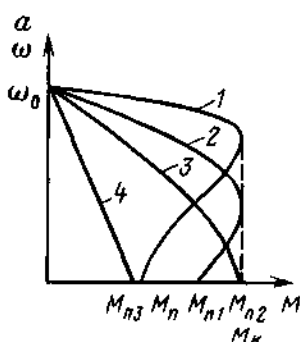
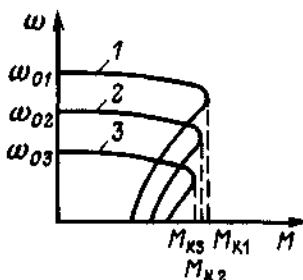
Из формул (3.27) и (3.46) видно, что  $\omega_0$  и  $\omega$  двигателя изменяются прямо пропорционально частоте тока. Если не учитывать  $R_1$ , то критическое скольжение двигателя будет изменяться обратно пропорционально частоте тока (3.38):

$$s_k = R'_2/x_k = R'_2/2\pi f_{ном}L_k,$$

где  $x_k = 2\pi f_{ном}L_k$ , Ом;  $L_k$  — индуктивность короткого замыкания, Гн.

Соответственно имеем соотношение  $s'_k/s_k = f_{ном}/f'$ , из которого  $s'_k = s_k f_{ном}/f'$ , где  $s'_k$  — критическое скольжение при частоте тока  $f'$ , отличной от номинальной.

Рис. 3.26. Механические характеристики асинхронного двигателя при изменении напряжения и частоты  $U/f = \text{const}$ :  
 1 —  $U_1, f_1$ ; 2 —  $U_2, f_2$ ; 3 —  $U_3, f_3$  при  $U_1 > U_2 > U_3$ ;  $f_1 > f_2 > f_3$



б

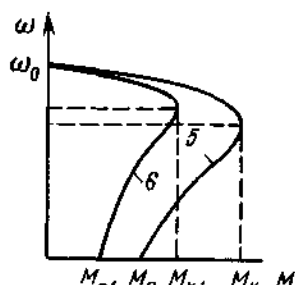


Рис. 3.27. Механические характеристики асинхронного двигателя при различных активных сопротивлениях цепи ротора (а) и включении индуктивного сопротивления в цепь статора или ротора или активного сопротивления в цепь статора (б):

1 —  $R_p = 0$ , 2 —  $R_{p1}$ , 3 —  $R_{p2}$ , 4 —  $R_{p3}$  при  $R_{p3} > R_{p2} > R_{p1}$ , 5 —  $R_c = 0$ ,  $X_p = 0$ ,  $X_c = -0$ , 6 —  $R_c$  или  $X_p$  или  $X_c$

Максимальный момент двигателя обратно пропорционален квадрату частоты тока. На основании (3.39) и (3.27) имеем

$$M_k = c_1 / f^2,$$

где  $c_1 = 3U_{\phi}^2 p / 8\pi^2 L_k = \text{const}$ .

Влияние частоты тока на пусковой момент асинхронного двигателя с фазным ротором в зависимости от сопротивления цепи ротора различно.

Механические характеристики при различных значениях частоты тока приведены на рис. 3.25, б.

Из рис. 3.25 видно, что максимальный момент двигателя различен при изменении напряжения сети или частоты тока. На практике обычно требуется неизменный максимальный момент двигателя. Поэтому необходимо одновременно с частотой изменять подводимое к двигателю напряжение по следующему закону:  $U/f = \text{const}$ . Тогда максимальный момент двигателя будет изменяться незначительно (рис. 3.26). Такой способ регулирования применяется в преобразователях частоты.

Рассмотрим влияние на форму механической характеристики изменения сопротивления реостата в цепи ротора. Из выражения (3.38) критическое скольжение для реостатной характеристики

$$s'_k = (R'_2 + R'_p) / x_k. \quad (3.49)$$

Разделив (3.49) на (3.38) со знаком «+», получим

$$s'_k / s_k = (R'_2 + R'_p) / R'_2 = (R_2 + R_p) / R_2.$$

Это справедливо и для любого значения скольжения при одном и том же значении момента двигателя

$$s' / s = (R_2 + R_p) / R_2, \quad (3.50)$$

откуда

$$s' = s c_2, \quad (3.51)$$

где  $c_2 = (R_2 + R_p) / R_2$ .

Если естественная механическая характеристика задана графически, то с помощью (3.51) можно легко построить реостатные характеристики для любых значений  $R_p$ , задаваясь значениями момента.

Поскольку  $\omega_0$  не зависит от активного сопротивления цепи ротора (3.27), все реостатные механические характеристики пересекают ось скорости в одной точке ( $\omega = \omega_0$ ). Из (3.34) видно, что максимальный момент не зависит от сопротивления реостата цепи ротора.

На величину начального пускового момента сопротивление реостата цепи ротора оказывает различное влияние. Из формулы (3.40) следует, что при  $R'_2 < x_k$  величиной  $(R'_2)^2$  можно пренебречь. Тогда  $M_n = c_3 R'_2$ , где  $c_3 = 3U_{\phi}^2 / \omega_0 x_k^2$ . Если же  $R'_2 = x_k$ , то с учетом (3.39)  $M_n = M_k$ .

А если  $R'_2 > x_k$  и пренебречь величиной  $x_k$ , то  $M_n = c_4 / R'_2$ , где  $c_4 = 3U_{\phi}^2 / \omega_0$ .

Механические характеристики при различных значениях  $R_p$  приведены на рис. 3.27, а. При включении в цепь ротора реостата пусковой момент вначале возрастает, достигая  $M_k$ , а затем уменьшается. Из формул (3.32), (3.33), (3.34) и (3.35) видно, что при включении в цепь статора или ротора индуктивности или в цепь статора реостата уменьшаются величина критического скольжения и моменты двигателя, в том числе максимальный и пусковой (рис. 3.27, б).

Механические характеристики в тормозных режимах. У асинхронных двигателей возможны все три вида торможения: рекуперативное, динамическое и противовключение.

*Рекуперативное торможение.* Этот режим возникает в том случае, если ротор двигателя вращается с угловой скоростью



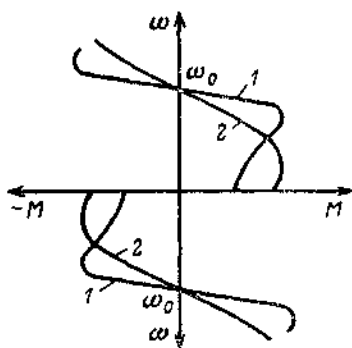


Рис. 3.28. Механические характеристики асинхронного двигателя при рекуперативном торможении:  
1 —  $R_p = 0$ , 2 —  $R_p$

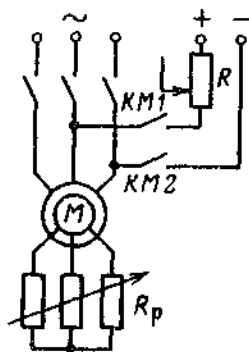


Рис. 3.29. Схема включения асинхронного двигателя при динамическом торможении с независимым возбуждением

выше синхронной в том же направлении, в каком вращается поле статора. Для режима опускания груза тормозные характеристики принято изображать в IV квадранте, для режима перехода многоскоростного двигателя на более низкую скорость — во II квадранте (рис. 3.28).

Уравнение механической характеристики (3.36), выражения для критического скольжения (3.33) и для максимального момента (3.34) (знак минус) справедливы также для режима рекуперативного торможения. Максимальный момент, как видно из формулы (3.34), будет отрицательным и по абсолютному значению больше момента в двигательном режиме. Скольжение будет отрицательным, так как при  $\omega > \omega_0$  согласно формуле (3.26) имеем

$$s = (\omega_0 - \omega) / \omega_0 = -(\omega - \omega_0) / \omega_0.$$

**Динамическое торможение.** Данный способ торможения может быть осуществлен как при независимом возбуждении обмотки статора постоянным током, так и при самовозбуждении. В ряде случаев применяют комбинированное торможение.

При независимом возбуждении динамическое торможение асинхронного двигателя осуществляется при отключенной сети переменного тока (рис. 3.29, контактор  $KM1$  разомкнут) включением обмотки статора в сеть постоянного тока (контактор  $KM2$  замкнут). При этом обмотка ротора замыкается на реостат  $R_p$ , который регулируется для получения различных тормозных характеристик.

Проходя по обмотке статора двигателя, постоянный ток создает неподвижное электромагнитное поле. При вращении

ротора в его обмотке индуцируется э. д. с., под действием которой в замкнутой цепи ротора возникает переменный ток, создающий свое электромагнитное поле. Это поле также неподвижно относительно статора. Суммарный магнитный поток, взаимодействуя с током ротора, создает тормозной момент двигателя.

Схема соединения обмоток статора при динамическом торможении, приведенная на рис. 3.29, является наиболее простой, эффективной и распространенной.

Уравнение механической характеристики при динамическом торможении имеет вид [13]:

$$M = \frac{3I_1^2 x_\mu^2 R_2'}{\omega_0 v [(R_2'/v)^2 + (x_\mu + x_2')^2]}, \quad (3.52)$$

где  $I_1$  — переменный ток, эквивалентный постоянному, А;  $I_- = 0,816 I_-$ ;  $I_-$  — постоянный ток, А;  $x_\mu$  — реактивное сопротивление намагничивающего контура, Ом;  $v$  — скольжение при динамическом торможении или относительная скорость,  $v = \omega/\omega_0$ .

Анализируя выражение (3.52), получаем, что момент имеет максимум

$$M_k = \frac{3I_1^2 x_\mu^2}{2\omega_0 (x_\mu + x_2')} \quad (3.53)$$

при критическом скольжении

$$v_k = R_2'/(x_\mu + x_2'). \quad (3.54)$$

Механические характеристики при динамическом торможении для двух различных значений сопротивления реостата в цепи ротора и для двух значений постоянного тока в цепи статора приведены на рис. 3.30. Характеристики 1 и 2 соответствуют одинаковому значению сопротивления реостата и различным значениям постоянного тока в обмотке статора, а характеристики 3 и 4 — тем же значениям тока, но большему сопротивлению реостата  $R_p$ .

Механические характеристики при динамическом торможении похожи на характеристики двигательного режима. Отличие состоит в том, что они проходят через начало координат, так как при скорости, равной нулю, тормозной момент также равен нулю.

Сходство по форме между характеристиками в тормозном и двигательном режимах подтверждает и уравнение механической характеристики, которое можно получить на основании формул (3.52), (3.53) и (3.54):

$$M = \frac{2M_k}{v/v_k + v_k/v}. \quad (3.55)$$

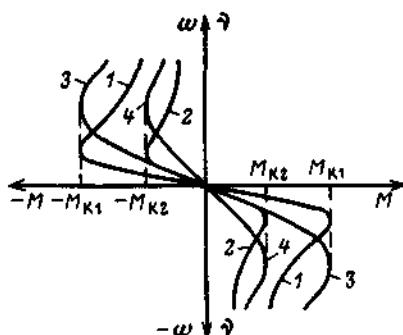


Рис. 330. Механические характеристики асинхронного двигателя при динамическом торможении с независимым возбуждением

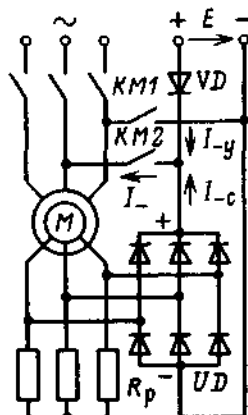


Рис. 331. Схема включения асинхронного двигателя с фазным ротором при динамическом торможении с самовозбуждением

Уравнением (3.55) пользуются при расчетах механических тормозных характеристик. Величины  $M_K$  и  $v_K$  определяют в соответствии с требованиями, предъявляемыми к приводу.

Для выбранной характеристики сопротивление реостата и ток статора определяют в следующей последовательности.

На основании формулы (3.54)  $v_K = (R_2' + R_p') / (x_\mu + x_2')$ , откуда  $R_p' = v_K(x_\mu + x_2') - R_2'$ .

Используя (3.53), можно определить ток статора:

$$I_1 = \sqrt{\frac{2\omega_0 M_K (x_\mu + x_2')}{3x_\mu^2}}.$$

Вследствие непостоянства магнитного потока асинхронного двигателя в режиме динамического торможения рассмотренная выше методика расчета механических характеристик без учета насыщения является неточной. Методика расчета характеристик с учетом насыщения более сложная и здесь не рассматривается.

Динамическое торможение асинхронных двигателей с фазным ротором и независимым возбуждением от генератора постоянного тока или полупроводникового выпрямителя получило широкое распространение в приводе шахтных подъемных машин.

Существует два способа динамического торможения асинхронных двигателей с самовозбуждением: конденсаторное торможение и торможение с использованием силовой положительной обратной связи по напряжению ротора, применяемое только

Рис. 3.33. Механические характеристики асинхронного двигателя при торможении противовключением

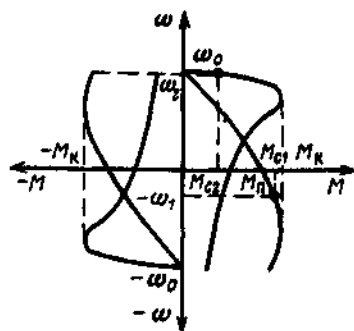
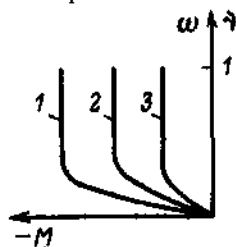


Рис. 3.32. Механические характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором при динамическом торможении с самовозбуждением:

1 —  $E_3$ , 2 —  $E_2$ , 3 —  $E_1$  при  $E_3 > E_2 > E_1$

для двигателей с фазным ротором. Конденсаторное торможение ввиду недостатков не нашло широкого применения.

При втором способе динамического торможения асинхронных двигателей с самовозбуждением (рис. 3.31) (контактор  $KM1$  разомкнут,  $KM2$  замкнут) ток возбуждения статора  $I$  складывается из тока управления  $I_{\text{у}}$ , поступающего от внешнего малоомощного источника энергии постоянного тока с э. д. с.  $E$ , и выпрямленного с помощью выпрямителя  $UD$  тока ротора  $I_{\text{с}}$ , называемого током самовозбуждения. Механические характеристики для этого способа торможения при различных значениях э. д. с.  $E$  представлены на рис. 3.32. Достоинствами способа торможения с самовозбуждением по сравнению с независимым возбуждением являются постоянный тормозной момент двигателя в широком интервале изменения скорости, меньшие стоимость, габаритные размеры и масса дополнительного электрооборудования.

**Торможение противовключением.** Для асинхронного двигателя режим противовключения может быть получен так же, как и для двигателя постоянного тока: либо при движущем моменте нагрузки (опускании груза)  $M_{c1} > M_n$ , если в цепь ротора ввести реостат со значительным сопротивлением (рис. 3.33, IV квадрант), либо при вращении двигателя по инерции с переключением на ходу обмотки статора для противоположного направления вращения (II квадрант).

Реостат при торможении противовключением вводится в цепь ротора для получения необходимого момента и ограничения тока. Ток в этом режиме возрастает потому, что ротор и поле статора вращаются в противоположных направлениях, а угловая скорость пересечения обмотки ротора полем ста-

тора определяется суммой угловых скоростей ротора и поля статора. При этом э. д. с. ротора возрастает.

К достоинствам способа относятся простота схемы (при реверсивном приводе не требуется никакой дополнительной аппаратуры управления), а также возможность получения значительных тормозных моментов во всем интервале изменения скорости, вплоть до  $\omega=0$ .

К недостаткам торможения противовключением относятся: 1) значительный расход энергии сети при торможении; 2) повышенный нагрев двигателя; 3) отсутствие плавности при включении и переходе с одной тормозной характеристики на другую.

Асинхронные двигатели короткозамкнутые и с фазным ротором благодаря ряду существенных преимуществ по сравнению с другими типами двигателей широко применяют в различных отраслях промышленности. Особенно часто используют асинхронные двигатели в горной промышленности. Асинхронный двигатель прост по конструкции и надежен в эксплуатации, поскольку не имеет коллектора. Он значительно легче и дешевле двигателя постоянного тока. Асинхронным короткозамкнутым двигателям в случаях применения их в нерегулируемом электроприводе свойственны следующие недостатки: 1) отсутствие возможности регулирования угловой скорости; 2) квадратичная зависимость момента двигателя от напряжения сети, что значительно ухудшает его работу при наличии длинных кабельных линий в шахтных условиях; 3) потребление реактивной мощности, снижающее коэффициент мощности сети; 4) наличие больших пусковых токов при малых пусковых моментах.

Применение асинхронного короткозамкнутого двигателя в системе электропривода преобразователь частоты — двигатель в основном позволяет устранить перечисленные недостатки.

В горной промышленности асинхронные двигатели с фазным ротором применяют там, где требуется кратковременное регулирование скорости или большое число включений привода в час: шахтные подъемные установки, уклонные лебедки, конвейерные установки, драги, краны и др. Двигатели с короткозамкнутым ротором в горной промышленности применяют очень широко. Особое распространение благодаря взрывобезопасному исполнению они получили в шахтных условиях. Так, все шахтные забойные машины и механизмы снабжены этими двигателями. Их также широко применяют в электроприводе насосов, вентиляторов, компрессоров, конвейеров, проходческих и погружных машин. На всех электрических экскаваторах, одноковшовых и многоковшовых, вспомогательные механизмы приводят в движение от короткозамкнутых двигателей.

В настоящее время отечественная промышленность серийно выпускает высокоэффективные асинхронные короткозамкнутые

двигатели во взрывозащищенном рудничном исполнении, предназначенные для работы в шахтных условиях. Это электродвигатели единой серии ВАО мощностью от 0,27 до 2000 кВт модификаций ВАОТ и ВАЖТ (с водяным охлаждением) для привода скребковых конвейеров, ВАМП для привода погрузочных машин, ВАО Б41-2 для привода буровых станков, ВАОК с фазным ротором для привода лебедок, подъемных машин и других механизмов в шахтах, ВАОМ для привода вентиляторов местного проветривания, ВАОЛ для привода шахтных маневровых лебедок. Это взрывобезопасные электродвигатели единой серии В, ВР мощностью от 0,25 до 110 кВт. Для различных горных машин созданы специальные типы взрывобезопасных электродвигателей. Так, например, в электроприводе комбайна 1ГШ68Е используют два электродвигателя типа ЭКВ-160-2 с водяным охлаждением мощностью по 160 кВт каждый. В электроприводе очистных и проходческих комбайнов используют электродвигатель типа ЭКВЖ4-315 мощностью 315 кВт, напряжением 1140 В, жидкостно-заполненный с водяным охлаждением корпуса. На струговых установках в качестве привода применяют электродвигатель типа ЭВ5УС мощностью 160 кВт, напряжением 660/1140 В. В качестве привода на стационарных и передвижных забойных конвейерах применяют электродвигатель типа ЭДКОФВ-53/4 мощностью 110 кВт, напряжением 660/1140 В. Электродвигатель типа ВРМ160М2 мощностью 24 кВт<sup>3</sup> предназначен для привода вентилятора местного проветривания типа ВМ6, применяемого в угольных и сланцевых шахтах, опасных по газу и пыли. Электродвигатель типа ВРП-160М4 мощностью 18,5 кВт предназначен для привода погрузочных машин, проходческих комбайнов и других механизмов в шахтах. Электродвигатель типа ВРЛ-132М4 мощностью 13 кВт применяют в приводе шахтных маневровых лебедок типа ЛВД.

Для работы во взрывобезопасной среде подземных выработок, карьеров и обогатительных фабрик предназначены асинхронные двигатели различного исполнения серии 4А общего применения.

### 3.6. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С СИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Угловая скорость синхронного двигателя не зависит от величины нагрузки. Она зависит согласно (3.27) только от частоты тока сети и числа пар полюсов двигателя. Синхронный двигатель представляет собой машину, у которой обмотка статора получает питание от сети переменного тока, а обмотка ротора — от сети постоянного тока (рис. 3.34). Одним из достоинств синхронных двигателей является наличие опережаю-

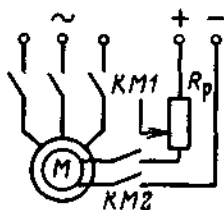


Рис. 3.34. Схема включения синхронного двигателя

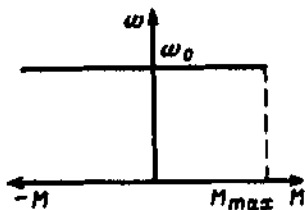


Рис. 3.35. Механическая характеристика синхронного двигателя

шего коэффициента мощности, а из недостатков — более сложный запуск, чем у асинхронных. Поэтому синхронные двигатели обычно применяют для электроприводов средней и большой мощности, не требующих регулирования скорости и частых пусков. В горной промышленности синхронные двигатели применяют в приводе насосных, вентиляторных и компрессорных установок, а также в приводе экскаваторов средней и большой производительности и подъемных машин большой мощности в качестве первичного двигателя системы генератор—двигатель (Г—Д).

Так, например, в качестве приводного двигателя преобразовательных агрегатов мощных экскаваторов применяется электродвигатель типа СДЭ2-16-46-6У2. Создаются серии бесконтактных синхронных двигателей во взрывобезопасном исполнении.

Синхронные двигатели серии СДКП2 предназначены для привода поршневых насосов; выпускаются на напряжение 6000 В мощностью 315—6300 кВт с частотами вращения 250, 300, 375, 500 об/мин.

Так как угловая скорость синхронного двигателя не зависит от нагрузки при изменении момента от 0 до  $M_{\max}$ , то механическая характеристика представляет собой прямую, параллельную оси абсцисс (рис. 3.35, I квадрант).

Перегрузочная способность его  $\lambda$  составляет от 2 до 2,5.

Торможение синхронных двигателей можно осуществлять путем динамического торможения, а также противовключением. При динамическом торможении обмотка статора отключается от сети и замыкается на реостат  $R_p$  (рис. 3.36). Обмотка возбуждения остается подключенной к сети постоянного тока. При этом режим работы машины аналогичен динамическому торможению асинхронного двигателя. Динамическое торможение синхронных двигателей применяют для остановки вентиляторных. Режим противовключения возможен лишь для тех синхронных двигателей, у которых имеется пусковая короткозамкнутая обмотка на роторе. В этом случае двигатель работает в асинхрон-

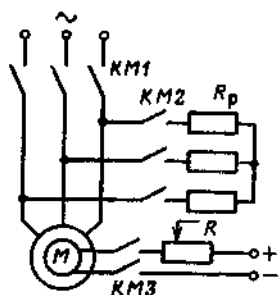


Рис 336. Схема включения синхронного двигателя при динамическом торможении

ном режиме с большим током. Поэтому этот режим практического применения не имеет.

Генераторное торможение с отдачей энергии в сеть возможно только при синхронной скорости, если частота сети неизменна. В этом случае для остановки привода этот режим нельзя применять. Этот способ торможения используют в системе Г—Д.

При использовании синхронного двигателя с преобразователем частоты возможно генераторное торможение с отдачей энергии в сеть и при остановке привода.

### Контрольные вопросы

1. Что понимают под механической характеристикой электродвигателя и чем определяется степень ее жесткости?
2. Какие возможны режимы работы двигателей постоянного и переменного тока и в каких горных машинах они применяются?
3. Какие параметры влияют на форму механических характеристик двигателей постоянного и переменного тока?
4. Как зависит максимальный момент асинхронного двигателя от напряжения и частоты сети?

## Глава 4 ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ

### 4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ

Большинство производственных машин работает с переменной нагрузкой и скоростью движения исполнительного органа. Начало работы каждой машины сопровождается ее пуском, а окончание — торможением. Во всех этих случаях происходит переход от одного режима работы к другому. Благодаря наличию в электромеханических системах различных видов инерции эти переходы происходят во времени.

Процесс перехода электропривода от одного установившегося состояния работы к другому называют переходным процессом.

Во время переходного процесса изменяются момент, скорость, мощность, ток и температура двигателя, напряжение, частота сети и т. д.



Причинами возникновения переходного процесса могут быть: 1) производственный процесс, в ходе которого может изменяться нагрузка на валу электродвигателя; 2) воздействия на электропривод при управлении им; 3) случайные явления (изменение напряжения или частоты сети, короткое замыкание и др.).

В электроприводе энергия может накапливаться в виде: механической во всех движущихся частях; электромагнитной в обмотках электрических машин; тепловой в частях электрических машин и аппаратуры управления.

В соответствии с этим переходные процессы в электроприводах делят на: 1) механический переходный процесс (учитывается изменение запаса кинетической и потенциальной энергии системы); 2) электромагнитный переходный процесс (учитывается изменение запаса электромагнитной энергии); 3) тепловой переходный процесс (учитывается изменение запаса тепловой энергии).

При работе электропривода практически все три вида переходных процессов протекают одновременно. Однако их продолжительность и влияние на работу электроприводов различны. Длительность электромагнитного переходного процесса часто бывает соизмерима с длительностью механического переходного процесса. В этом случае оба процесса рассматриваются как один, называемый электромеханическим переходным процессом. Тепловые переходные процессы протекают значительно медленнее механических и электромагнитных. Это позволяет не учитывать тепловые переходные процессы при рассмотрении электромеханических.

Изучение переходных процессов имеет большое научное и практическое значение. Характер их протекания часто оказывает существенное влияние на производительность машин, надежность работы, их долговечность, на выбор аппаратуры управления и системы управления электроприводами, на величину расхода электроэнергии при пусках и торможениях.

Анализ переходных процессов в электроприводах сводится к установлению характера изменения основных электрических и механических величин во времени и позволяет вносить необходимые изменения в конструкцию самой машины.

Изучение переходных процессов в электроприводах представляет большие трудности, так как одновременно протекают механические, электромагнитные и тепловые процессы, которые зависят друг от друга, и часто эта зависимость нелинейна.

Математический анализ переходных процессов автоматизированного электропривода сложен. Поэтому в настоящее время для исследования переходных процессов пользуются методом математического моделирования с применением электронных

аналоговых и цифровых машин. Это позволяет рассмотреть переходные процессы при широких вариациях параметров привода и выявить их оптимальные значения. Так как при моделировании возникает необходимость решения дифференциальных уравнений, описывающих переходные процессы, то надо уметь составлять эти уравнения и определять их параметры.

## 4.2. МЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Механические переходные процессы при прямолинейной механической характеристике двигателя и постоянном моменте сопротивления. Прямолинейные механические характеристики имеют асинхронные двигатели с фазным ротором в пределах рабочей части естественной и реостатных характеристик и электродвигатели постоянного тока независимого и параллельного возбуждения.

Задача состоит в определении изменения скорости, момента, тока двигателя во времени при пуске, а также при торможении электропривода. Для этого необходимо получить аналитические выражения для расчета зависимостей  $\omega(t)$ ,  $M(t)$ ,  $I(t)$ . Такие выражения получают, решая дифференциальное уравнение движения электропривода (2.7). Для решения этого уравнения необходимо знать зависимость вращающего момента  $M$  от угловой скорости. Для линейной механической характеристики согласно рис. 4.1 из подобия треугольников имеем (Мартынов М. В., Переслестин Н. Г., 1977)

$$\frac{M_k - M}{\omega} = \frac{M_k}{\omega_0}$$

или

$$M = M_k - \beta\omega, \quad (4.1)$$

где  $M_k$  — вращающий момент двигателя при  $\omega=0$ , Н·м;  $\beta = M_k/\omega_0$  — жесткость механической характеристики.

Подставляя в формулу (2.7) значение момента из (4.1), получаем

$$J(d\omega/dt) + \beta\omega = M_k - M_c. \quad (4.2)$$

При  $M_c = \text{const}$ , разделив уравнение (4.2) на  $\beta$ , получим

$$T_m(d\omega/dt) + \omega = \omega_{уст}, \quad (4.3)$$

где  $T_m = J/\beta$  — электромеханическая постоянная времени электропривода, с;  $\omega_{уст} = (M_k - M_c)/\beta$  — установившееся значение угловой скорости, рад/с.

Подставляя вместо  $\beta$  его значение, получаем

$$T_m = J (\omega_0 / M_k). \quad (4.4)$$

На основании (4.4) можно сказать, что электромеханическая постоянная времени есть время, в течение которого электропривод при  $M_c = 0$  с моментом инерции  $J$  и постоянным пусковым моментом  $M_n = M_k$  разгоняется до скорости  $\omega_0$ .

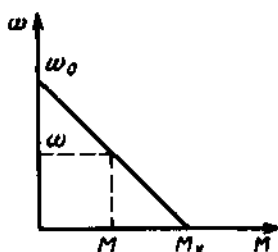


Рис. 4.1. Линейная механическая характеристика

Для двигателей постоянного тока независимого возбуждения значение  $T_m$  определяют по известным параметрам двигателя. Если в (4.4) подставить значение  $M_k$ , полученное при  $\omega = 0$  из выражения (3.5) с учетом (3.6), то

$$T_m = J (R / k^2 \Phi^2). \quad (4.5)$$

Электромеханическую постоянную времени для асинхронного двигателя определяют по его номинальным параметрам. Подставив в формулу (4.4) значение  $M_k$ , найденное из подобия треугольников (см. рис. 4.1), получим

$$T_m = J (\omega_0 s_{ном} / M_{ном}). \quad (4.6)$$

Из выражений (4.5) и (4.6) видно, что величина  $T_m$  зависит от сопротивления реостата в цепи якоря двигателя постоянного тока независимого возбуждения ( $R = R_{я} + R_p$ ) и в цепи ротора асинхронного фазного двигателя согласно (3.50).

Решив линейное дифференциальное уравнение первого порядка (4.3), получим

$$\omega = \omega_{уст} + K e^{-t/T_m}, \quad (4.7)$$

где  $K$  — постоянная интегрирования, определяемая из начальных условий конкретного переходного процесса.

В общем случае при  $t = 0$  угловая скорость двигателя  $\omega = \omega_{нач}$ . При этом из выражения (4.7) имеем

$$K = \omega_{нач} - \omega_{уст}.$$

Тогда решение уравнения (4.3) в общем виде будет

$$\omega = \omega_{уст} (1 - e^{-t/T_m}) + \omega_{нач} e^{-t/T_m}. \quad (4.8)$$

В частном случае при пуске двигателя, когда  $\omega_{нач} = 0$ , выражение (4.8) имеет вид

$$\omega = \omega_{уст} (1 - e^{-t/T_m}), \quad (4.9)$$

а при торможении, когда  $\omega_{уст} = 0$ ,

$$\omega = \omega_{нач} e^{-t/T_m}. \quad (4.10)$$

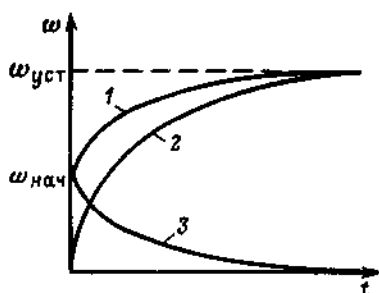


Рис. 4.2. График изменения угловой скорости при переходном процессе:

1 —  $\omega_{\text{нач}} \neq 0$ ; 2 —  $\omega_{\text{нач}} = 0$ ; 3 —  $\omega_{\text{уст}} = 0$

Таблица 4.1

Продолжительность времени, с	Отношение текущего значения угловой скорости к конечному (установившемуся)	Разность текущего значения угловой скорости и установившегося, %
0	0,0	--
$T_m$	0,632	36,8
$2T_m$	0,865	13,5
$3T_m$	0,950	5,0
$4T_m$	0,982	1,8
$5T_m$	0,993	0,7

Из полученных выражений (4.8), (4.9) и (4.10) видно, что изменение угловой скорости при переходных процессах происходит по экспоненциальному закону (рис. 4.2).

Время изменения угловой скорости двигателя от  $\omega_{\text{нач}}$  до  $\omega$  определяют с помощью выражения, полученного на основании (4.8),

$$t = T_m \ln [(\omega_{\text{нач}} - \omega_{\text{уст}})/(\omega - \omega_{\text{уст}})]. \quad (4.11)$$

Длительность переходного процесса, как следует из формулы (4.11), теоретически равна бесконечности, так как при  $\omega = \omega_{\text{уст}}$  значение  $t = \infty$ .

Однако уже по истечении времени, равного (4—5)  $T_m$ , угловая скорость практически достигает установившегося значения. Подставив последовательно в выражение (4.9) ряд значений времени, кратных  $T_m$ , получим данные, приведенные в табл. 4.1.

Из табл. 4.1 видно, что при  $t = 4T_m$  угловая скорость двигателя отличается от установившегося значения на 1,8 %, а при  $t = 5T_m$  — всего на 0,7 %. Поэтому считают, что переходный процесс практически заканчивается при  $t = (4 \div 5)T_m$ . Следует отметить, что значение установившейся скорости определяют на графике точкой пересечения механических характеристик двигателя и рабочей машины.

При переходном процессе одновременно с угловой скоростью изменяется и величина вращающего момента двигателя (зависимость линейная). В соответствии с формулой (4.1) имеем

$$\omega = (M_k - M)/\beta; \quad \omega_{\text{нач}} = (M_k - M_{\text{нач}})/\beta; \quad \omega_{\text{уст}} = (M_k - M_{\text{уст}})/\beta.$$

Подставляя эти значения угловых скоростей в (4.8), получаем выражение для вращающего момента

$$M = M_{\text{уст}}(1 - e^{-t/T_m}) + M_{\text{нач}}e^{-t/T_m}. \quad (4.12)$$

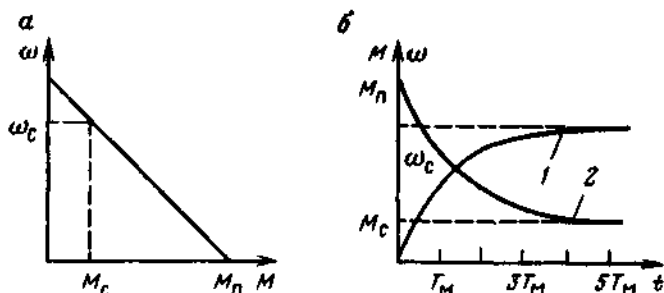


Рис. 4.3. Графики  $M(t)$  и  $\omega(t)$  (б) при пуске двигателя с линейной механической характеристикой (а):

$$1-\omega=\omega_c(1-e^{-t/T_m}); \quad 2-M=M_c(1-e^{-t/T_m})+M_n e^{-t/T_m}$$

Для двигателя постоянного тока независимого возбуждения, у которого ток якоря пропорционален вращающему моменту (3.3), на основании (4.12) имеем

$$I_a = I_{уст}(1-e^{-t/T_m}) + I_{нач}e^{-t/T_m}. \quad (4.13)$$

Следовательно, вращающий момент и ток двигателей, имеющих линейную механическую характеристику, при  $M=\text{const}$  изменяются при переходных процессах по экспоненциальному закону. Экспоненциальные кривые  $\omega(t)$  и  $M(t)$  при пуске двигателя с линейной механической характеристикой (рис. 4.3, а) при постоянных  $M_c$  и  $R_p$  приведены на рис. 4.3, б. Здесь  $\omega_{нач}=0$ ;  $\omega_{уст}=\omega_c$ ;  $M_{нач}=M_n$ ;  $M_{уст}=M_c$ .

При торможении двигателей, имеющих линейную механическую характеристику, уравнение движения электропривода при наличии на валу реактивного момента имеет вид:  $-M - M_c = J(d\omega/dt)$ . Интегрируя это уравнение, получаем выражение (4.8) и далее, заменяя  $\omega$  на  $M$  — (4.12), с тем только отличием, что перед  $\omega_{уст}$  и  $M_{уст}$  будет стоять знак минус.

Как видно из выражений (2.24), (2.25), (4.4) и (4.11) продолжительность пуска, торможения и перехода с одной скорости на другую электроприводов прямо пропорциональна приведенному моменту инерции системы, угловой скорости, до которой происходит разгон, и обратно пропорциональна динамическому моменту системы. Поэтому для повышения производительности циклично работающих машин стремятся по возможности уменьшить момент инерции и увеличить динамический момент электропривода.

Таким образом, переходные процессы в электроприводах, имеющих линейные механические характеристики, при постоян-

ном  $M_c$  рассчитывают аналитически с помощью приведенных выше зависимостей.

Механические переходные процессы при нелинейной механической характеристике электропривода и переменном моменте сопротивления. В этом случае пользоваться полученными выше аналитическими зависимостями для расчета переходных процессов нельзя, так как при интегрировании уравнения движения привода учитывалась линейность зависимости  $M(\omega)$  при  $M_c = \text{const}$ . Если же учитывать нелинейность этих зависимостей, то интегрирование уравнения движения привода становится затруднительным. Поэтому в таких случаях пользуются приближенными графическими или графоаналитическими методами расчета переходных процессов. Рассмотрим наиболее распространенный метод расчета переходных процессов — метод конечных разностей.

При этом методе рассматривают отдельные участки движения системы. Действительные кривые  $M(\omega)$  и  $M_c(\omega)$  условно заменяют ступенчатыми. На каждом участке значения момента двигателя и момента сопротивления или их алгебраической суммы принимаются постоянными и равными их среднему значению на этом участке. Уравнение движения привода используют многократно применительно к каждому участку.

Существуют два варианта метода конечных разностей: метод пропорций и метод последовательных интервалов. Рассмотрим второй вариант, так как первый является менее точным. Уравнение движения привода (2.7) можно представить следующим образом:

$$M_{cp} - M_{c, cp} = J \Delta \omega / \Delta t = M_d, \quad (4.14)$$

где  $M_{cp}$  и  $M_{c, cp}$  — соответственно средние значения момента двигателя и момента сопротивления на рассматриваемом участке.

Для графического построения зависимостей  $\omega(t)$  и  $M(t)$ , например, при пуске вентилятора с приводом от асинхронного короткозамкнутого двигателя вначале делают построение графиков механических характеристик двигателя и вентилятора (рис. 4.4, а). Разгон двигателя будет происходить до установившейся скорости  $\omega_{уст}$ , при которой  $M_d = 0$ ,  $M = M_c$ . Вертикальную ось  $\omega$  от 0 до  $\omega_{уст}$  делят на  $k$  равных участков ( $\Delta \omega_1 = \Delta \omega_2 = \dots = \Delta \omega_k$ ). Через точки деления проводят горизонтали, продолжая их на рис. 4.4, б. На каждом участке проводят вертикали через точки характеристик  $\omega(M)$  и  $\omega(M_c)$ , соответствующие средним значениям момента. Далее определяют из графика средние значения динамического момента для каждого участка —  $M_{d1}, M_{d2}, M_{d3}, \dots, M_{dk}$  ( $M_d = M_{cp} - M_{c, cp}$ ). Значения  $\Delta \omega$

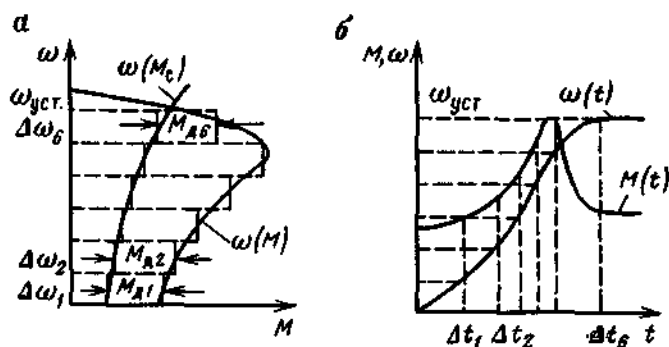


Рис 4.4. Графики  $M(t)$  и  $\omega(t)$  (б) при пуске двигателя с нелинейной механической характеристикой (а)

и  $M_d$  соответственно для каждого участка подставляют в выражение (4.14), откуда

$$\Delta t = J \Delta \omega / M_d. \quad (4.15)$$

На оси времени (см. рис. 4.4, б) откладывают полученные по формуле (4.15) значения  $\Delta t_1, \Delta t_1 + \Delta t_2, \dots, \Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_k$ , через которые проводят штрихом вертикальные линии до пересечения с горизонтальными, проходящими через соответствующие значения скорости  $\Delta \omega_1, \Delta \omega_1 + \Delta \omega_2, \dots, \Delta \omega_1 + \Delta \omega_2 + \dots + \Delta \omega_k$ . Полученные точки пересечения соединяются плавной кривой, которая и будет представлять собой зависимость  $\omega(t)$  в процессе пуска двигателя. Расчет сводят в табл. 4.2.

Из рис. 4.4 видно, что каждому моменту времени при пуске соответствует определенное значение моментов  $M, M_c$  и  $M_d$ . Поэтому построение зависимостей  $M(t), M_c(t)$  и  $M_d(t)$  не представляет каких-либо трудностей. Зависимость  $M(t)$  показана на рис. 4.4, б.

Таблица 4.2

Среднее значение $M_d$	Приращение угловой скорости на участке $\Delta \omega$	Конечная скорость на участке $\omega$	Длительность $\Delta t$	Суммарное время $t$
$M_{d1}$	$\Delta \omega_1$	$\omega_1 = \Delta \omega_1$	$\Delta t_1$	$t_1 = \Delta t_1$
$M_{d2}$	$\Delta \omega_2$	$\omega_2 = \omega_1 + \Delta \omega_2$	$\Delta t_2$	$t_2 = t_1 + \Delta t_2$
$M_{dk}$	$\Delta \omega_k$	$\omega_k = \omega_{k-1} + \Delta \omega_k$	$\Delta t_k$	$t_k = t_{k-1} + \Delta t_k$

### 4.3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Электромагнитные переходные процессы в электрических машинах обусловлены изменением электромагнитной энергии, пропорциональной индуктивности их цепей и квадрату тока. Так как длительность электромагнитных переходных процессов у асинхронных двигателей невелика — порядка нескольких периодов питающего напряжения, а у двигателей постоянного тока достигает нескольких секунд, то электромагнитные переходные процессы обычно учитывают для машин постоянного тока.

Однако исследования последних лет показали, что электромагнитными переходными процессами у асинхронных двигателей часто пренебрегать нельзя. Это зависит от соотношения параметров приводов машин. Так, например, узкозахватные очистные комбайны имеют такое соотношение параметров приводов, при котором необходимо учитывать электромагнитную инерцию асинхронных двигателей при исследовании динамических процессов в электромеханической системе комбайна [11].

Основные способы регулирования скорости, пуска и торможения двигателей постоянного тока (изменением подводимого напряжения и магнитного потока двигателя) связаны с изменением тока возбуждения питающего генератора либо двигателя. Для генератора или двигателя независимого возбуждения электромагнитные переходные процессы в цепи обмотки возбуждения можно рассматривать изолированно от остальных процессов, происходящих в приводе, если пренебречь реакцией якоря и влиянием вихревых токов.

Переходные процессы в цепях возбуждения в этом случае (рис. 4.5) будут определяться следующим выражением:

$$U = I_{\text{уст}} R + L (dI/dt), \quad (4.16)$$

где  $U$ ,  $I_{\text{уст}}$  — напряжение (В) и ток цепи возбуждения, А;  $L$ ,  $R$  — индуктивность (Гн) и омическое сопротивление цепи возбуждения, Ом.

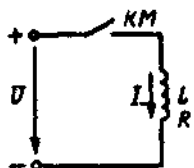


Рис. 4.5. Схема цепи возбуждения электрической машины

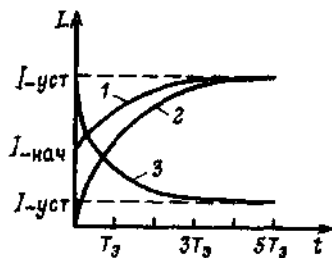


Рис. 4.6. Графики  $I(t)$  при переходных процессах в цепях возбуждения:

$$1 \text{ и } 3 - I = I_{\text{уст}} \left( 1 - e^{-t/T_{\text{э}}} \right) + I_{\text{нач}} e^{-t/T_{\text{э}}}; \quad 2 - I = I_{\text{уст}} \left( 1 - e^{-t/T_{\text{э}}} \right)$$



Индуктивность обмотки возбуждения во многих случаях не является величиной постоянной, а может изменяться в широких пределах в зависимости от насыщения магнитной цепи. В этих случаях определение характера изменения тока возбуждения во времени — задача нелинейная и решается графо-аналитическими методами.

Когда же работа электрической машины соответствует линейной части кривой намагничивания, можно считать, что  $L = \text{const}$ . При этом решении уравнения (4.16) будет

$$I_- = I_{\text{уст}}(1 - e^{-t/T_0}) + I_{\text{нач}}e^{-t/T_0}, \quad (4.17)$$

где  $I_{\text{уст}} = U/R$  — установившийся ток в цепи возбуждения, А;  $T_0 = L/R$  — электромагнитная постоянная времени цепи возбуждения, с;  $I_{\text{нач}}$  — начальное значение тока возбуждения при  $t = 0$ , А.

Как следует из выражения (4.17), наличие индуктивности в цепи возбуждения приводит к тому, что ток при подаче напряжения на обмотку возбуждения не изменяется мгновенно, а нарастает или снижается во времени по экспоненте (рис. 4.6). Продолжительность переходного процесса определяется значением электромагнитной постоянной времени. Переходный процесс практически завершается при истечении времени  $t = (4 \div 5)T_0$ . Замедленное изменение тока возбуждения двигателей и генераторов постоянного тока независимого возбуждения положительно влияет на работу электрифицированного агрегата. Действительно, при регулировании скорости изменением магнитного потока двигателя вследствие замедленного увеличения и уменьшения тока возбуждения снижаются максимальные значения тока в цепи якоря, а в системе Г — Д замедленное изменение тока возбуждения ограничивает темп нарастания э. д. с. генератора, а следовательно, и тока якорной цепи. Все это приводит в результате к плавному изменению момента двигателя и снижению его максимальных значений при переходных процессах, что существенно влияет на повышение надежности и долговечности машин.

Электромагнитная постоянная времени обмоток возбуждения машин постоянного тока может иметь значение от десятых долей секунды до нескольких секунд.

В ряде случаев (например, электропривод постоянного тока шахтных подъемных машин и экскаваторов) ввиду вышеуказанных причин привод может работать настолько плавно и при этом длительность переходных процессов будет настолько велика, что производительность машин циклического действия может снижаться. К тому же наличие существенного запаздывания в системе автоматического регулирования электроприводом (постоянная времени  $T_0$ ) приводит к усилению колебательных процессов в электромеханической системе, что снижает ее

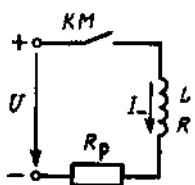


Рис. 4.7. Схема цепи возбуждения электрической машины при включении резистора  $R_p$

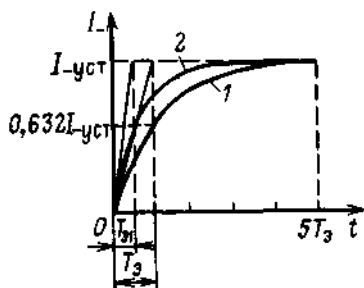


Рис. 4.8. Графики  $I_-(t)$  без резистора в цепи возбуждения (1) и с его включением (2)

надежность и долговечность. Поэтому принимают меры к ускорению процесса нарастания тока за счет применения специальных систем возбуждения. Необходимо отметить, что выбор системы возбуждения определяет не только длительность переходного процесса, но и его характер.

Рассмотрим способы ускорения процесса нарастания тока в цепях возбуждения машин постоянного тока. Первый способ заключается в том, что в цепь возбуждения последовательно включается резистор (рис. 4.7). При этом электромагнитная постоянная времени уменьшается  $T_{a1} = L/(R + R_p)$ .

Очевидно, чтобы сохранить заданное значение установившегося тока в цепи возбуждения  $I_{уст} = U/R$  неизменным, необходимо увеличить подводимое к цепи напряжение в  $(R + R_p)/R$  раз. На рис. 4.8 приведены графики изменения тока для двух случаев при  $I_{нач} = 0$ . Недостатками данного способа являются нелинейный характер изменения тока, что приводит в результате к нелинейному изменению тока якоря и момента двигателя, и увеличение потерь.

Второй способ, лишенный вышеуказанных недостатков, заключается в применении метода форсированного изменения тока возбуждения, который называется «форсировкой возбуждения». Форсировка возбуждения осуществляется за счет приложения повышенного напряжения к цепи возбуждения генератора. Предположим, что к обмотке возбуждения генератора приложено напряжение в  $\alpha$  раз большее, чем необходимо для создания требуемого тока возбуждения  $I_{уст} = U/R$ . Тогда на основании формулы (4.17) ток возбуждения при  $I_{нач} = 0$  будет изменяться согласно равенству

$$I_- = (\alpha U/R)(1 - e^{-t/T_2}).$$

При токе, равном  $I_{уст}$ , напряжение генератора достигнет требуемого значения и форсировка должна быть снята.

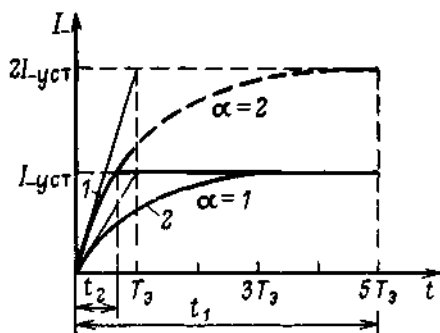


Рис. 4.9. Графики  $I_{-}(t)$  при форсировке возбуждения (1) и без нее (2)

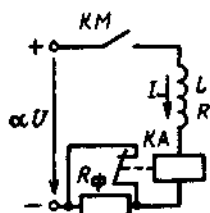


Рис. 4.10. Схема цепи возбуждения электрической машины при форсировке

Из рис. 4.9 видно, что при наличии форсировки ток возбуждения нарастает до значения  $I_{уст}$  в значительно более короткое время  $t_2$ , чем при нормальном напряжении. Длительность процесса нарастания тока при отсутствии форсировки можно принять равной  $t_1 = 5T_3$ . Известно, что при  $\alpha = 2$   $t_2 \approx t_1/7$ . При этом график нарастания тока при наличии форсировки до значения  $I_{уст}$  близок к линейному.

Следует отметить, что при форсировке возбуждения электромагнитная постоянная времени остается неизменной, так как индуктивность и сопротивление цепи возбуждения постоянны.

Снятие форсировки в требуемый момент времени может быть осуществлено с помощью схемы, приведенной на рис. 4.10. После замыкания контакта  $KM$  к обмотке возбуждения приложено напряжение  $\alpha U$ , так как форсировочный резистор с сопротивлением  $R_\phi$  зашунтирован контактом реле тока  $KA$ . При увеличении тока возбуждения  $I_{-}$  до значения  $U/R$  реле тока срабатывает, так как оно настраивается на этом токе, и вводится в цепь возбуждения резистор  $R_\phi$ , ограничивающий дальнейшее нарастание тока.

Величину  $R_\phi$  определяют из выражения  $R_\phi = R(\alpha - 1)$ . Таким образом, при расчете электроприводов постоянного тока необходимо учитывать электромагнитную инерцию цепей возбуждения. Электромагнитной инерционностью обладают также и якорные цепи машин постоянного тока, хотя в значительно меньшей степени. В тех случаях, когда время протекания электромагнитных переходных процессов соизмеримо со временем протекания механических переходных процессов, необходимо учитывать и влияние электромагнитной инерции якорной цепи. На рис. 4.11 представлены графики  $\omega(t)$  и  $I_a(t)$ , полученные

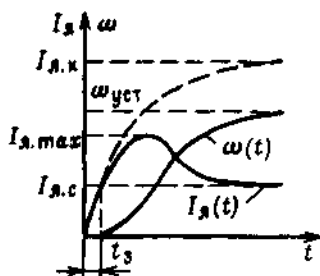


Рис. 4.11. Графики  $I_{\text{я}}(t)$  и  $\omega(t)$  при пуске двигателя постоянного тока с учетом механических и электромагнитных переходных процессов

при пуске двигателя постоянного тока независимого возбуждения для  $U_c = \text{const}$  с учетом индуктивности якоря.

Как видно из рис. 4.11, двигатель неподвижен до тех пор, пока ток в якорной цепи не достигнет величины, необходимой для создания момента запуска. В этот период времени рост тока зависит от скорости протекания электромагнитного процесса. Если бы якорь двигателя оставался заторможенным, то ток нарастал бы по кривой, показанной на рис. 4.11 штрихом, до значения короткого замыкания  $I_{\text{я.к}}$ . Если же происходит пуск двигателя с моментом  $M_c$ , которому соответствует ток  $I_{\text{я.с}}$ , то через время запаздывания  $t_z$  двигатель начнет вращаться. С увеличением скорости двигателя э. д. с., возникающая в якоря, оказывает влияние на ток якоря. Теперь электромагнитный и механический переходные процессы протекают совместно, составляя единый электромеханический переходный процесс пуска двигателя. При этом ток якорной цепи возрастает до максимального значения  $I_{\text{я.макс}}$ , а затем по мере разгона двигателя уменьшается до значения  $I_{\text{я.с}}$ . Скорость возрастает до своего установившегося значения  $\omega_{\text{уст}}$ .

#### 4.4. ТЕПЛОВЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Нагревание электродвигателей происходит за счет потерь энергии при их работе. Учет всех явлений тепловых процессов, имеющих место в электродвигателях и других электрических машинах, представляет значительные трудности, которые вызваны различием свойств материалов, используемых для изготовления машины (электротехническая сталь, медь, изоляция, литая сталь и др.), условиями работы (детали неподвижные или вращающиеся) и сложностью процессов обмена тепла между отдельными частями машины.

Если упрощенно представить электрическую машину как систему, состоящую из четырех частей (ротор, медь и сталь статора, корпус), связанных взаимными тепловыми потоками, то тепловой процесс даже при постоянных потерях описывается сложной системой дифференциальных уравнений. При режиме нагрузки с переменными потерями трудности решения диффе-

ренциальных уравнений значительно возрастают и делают расчет тепловых переходных процессов практически невозможным.

Поэтому для приближенных проверочных расчетов тепловых режимов электродвигателей при заданных условиях нагрузки пользуются более простыми методами. При этом реальная машина условно заменяется однородным твердым телом, которое имеет большую теплопроводность, благодаря чему температура во всех точках машины в любой момент времени одинакова. Данному телу в единицу времени по всему объему сообщается количество тепла, выделяющееся за счет потерь  $\Delta P_1 = (P_2/\eta) - P_2$ , где  $P_2$  — полезная мощность на валу двигателя;  $\eta$  — к. п. д. двигателя при данной нагрузке.

Часть тепла рассеивается в окружающую среду, а другая идет на нагрев двигателя. С увеличением температуры двигателя возрастает количество тепла, отдаваемое в окружающую среду. При определенной температуре наступает равновесие, при котором количество тепла, выделяющееся в двигателе, становится равным теплу, отдаваемому в окружающую среду. В этом случае возрастание температуры двигателя прекращается и она устанавливается на неизменном уровне.

Отдача тепла телом может происходить тремя способами: путем лучеиспускания, конвекцией и за счет теплопроводности.

Тепло, отдаваемое в результате лучеиспускания, пропорционально разности четвертых степеней абсолютных температур тела и среды. Но так как температура нагрева электрических машин невелика, то количество тепла, отдаваемое в результате лучеиспускания, будет мало и им обычно пренебрегают. Тепло, отдаваемое за счет конвекции, пропорционально разности температур тела и среды в степени, равной 1,25, а тепло, отдаваемое за счет теплопроводности, пропорционально этой разности в первой степени. Так как главную роль в теплоотдаче играют теплопроводность и конвекция, то для упрощения в дальнейшем примем, что отдаваемое тепло пропорционально разности температур двигателя и окружающего воздуха.

В соответствии с принятыми допущениями можно записать следующее уравнение теплового равновесия:

$$Qdt = A\tau dt + Cdt, \quad (4.18)$$

где  $Q$  — количество тепла, выделяющееся в двигателе в единицу времени, ккал/с;  $A$  — теплоотдача двигателя, т. е. количество тепла, отдаваемое двигателем в окружающую среду в 1 с при разности температур  $1^\circ\text{C}$ , ккал/ $^\circ\text{C} \cdot \text{с}$ ;  $\tau$  — перегрев, т. е. превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды,  $^\circ\text{C}$ ;  $C$  — теплоемкость двигателя, т. е. количество тепла, необходимое для повышения температуры двигателя на  $1^\circ\text{C}$ , ккал/ $^\circ\text{C}$ .

Разделив левую и правую части уравнения (4.18) на  $A \cdot dt$ , получим линейное неоднородное дифференциальное уравнение первого порядка

$$T_n (d\tau/dt) + \tau = \tau_{уст}, \quad (4.19)$$

где  $T_n = C/A$  — постоянная времени нагрева, с;  $\tau_{уст} = Q/A$  — установившееся значение перегрева, °C.

Решением уравнения (4.19) будет

$$\tau = \tau_{уст} (1 - e^{-t/T_n}) + \tau_{нач} e^{-t/T_n}, \quad (4.20)$$

где  $\tau_{нач}$  — начальное значение перегрева при  $t=0$ , °C.

Если в начальный момент времени превышение температуры двигателя над окружающей средой  $\tau_{нач} = 0$ , то получим

$$\tau = \tau_{уст} (1 - e^{-t/T_n}). \quad (4.21)$$

Можно считать, что продолжительность нагрева до установившейся температуры составляет  $4T_n$  или  $5T_n$ , так как по истечении этого времени значение  $\tau$  будет отличаться от  $\tau_{уст}$  примерно на 2 или 0,5 % соответственно.

Кривые нагрева согласно выражениям (4.20) и (4.21) приведены на рис. 4.12.

Дифференциальное уравнение, описывающее процесс охлаждения, будет таким же, как и при нагревании (4.20), только  $\tau_{нач} > \tau_{уст}$ .

Если двигатель отключен от сети, то  $Q=0$  и  $\tau_{уст}=0$ . Тогда получим

$$\tau = \tau_{нач} e^{-t/T_n}. \quad (4.22)$$

Кривая процесса охлаждения в соответствии с (4.22) показана на рис. 4.12.

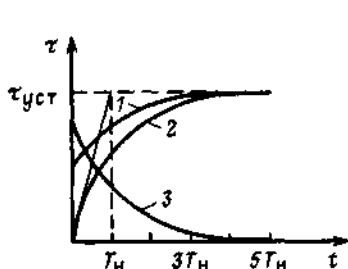


Рис. 4.12. Графики  $\tau(t)$  при нагревании (1, 2) и охлаждении (3) электродвигателя

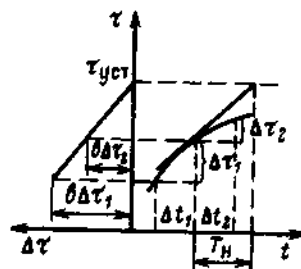


Рис. 4.13. Определение  $\tau_{уст}$  и  $T_n$  с помощью экспериментальной зависимости  $\tau(t)$

При переменной нагрузке на двигателе кривая нагрева будет представлять собой ломаную, состоящую из различных отрезков экспоненциальных кривых нагрева и охлаждения.

Постоянная времени нагрева представляет собой время, в течение которого перегрев электродвигателя при отсутствии отдачи тепла в окружающую среду достиг бы значения, равного установившемуся при нормальных условиях теплоотдачи.

Постоянную времени нагрева определяют экспериментально ввиду сложности и неточности нахождения ее расчетным путем.

С этой целью по данным опыта нагревания электродвигателя строят кривую перегрева в зависимости от времени  $\tau(t)$  и проводят асимптоту, соответствующую установившемуся превышению температуры  $\tau_{уст}$ . Не всегда удается довести нагрев двигателя до установившейся температуры. Поэтому для упрощения эксперимента установившееся значение превышения температуры  $\tau_{уст}$  находят с помощью вспомогательного построения.

Для этого строят по экспериментальным данным кривую  $\tau(t)$  (рис. 4.13). Достаточно трех точек, полученных через равные промежутки времени. Через эти точки проводят горизонтальные прямые. На этих прямых влево от оси ординат откладывают отрезки, пропорциональные приращению температуры  $\Delta\tau_1$  и  $\Delta\tau_2$  за соответствующие промежутки времени  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$ . Точка пересечения прямой, проведенной через концы отрезков  $b\Delta\tau_1$  и  $b\Delta\tau_2$ , и оси ординат дает значение  $\tau_{уст}$ .

Для того чтобы определить постоянную времени нагрева, проводят касательную к любой точке кривой нагрева и продолжают ее до пересечения с асимптотой  $\tau_{уст} = \text{const}$  (см. рис. 4.13). Отрезок на оси  $t$ , отсекаемый двумя вертикалями, проведенными через точку касания и через точку пересечения касательной с асимптотой, дает величину постоянной времени нагрева  $T_n$ .

### Контрольные вопросы

1. Что понимают под переходными процессами электропривода?
2. Что такое электромеханическая постоянная времени и постоянная времени нагрева, каковы их размерности и физический смысл?
3. Какие существуют способы ускорения электромагнитных переходных процессов?

## Глава 5

# ВЫБОР ПО МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

### 5.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Правильный выбор по мощности электродвигателей имеет большое экономическое значение. Величина мощности двигателя должна быть выбрана в полном соответствии с предполагаемой нагрузкой и режимом работы. Установка двигателей недостаточной мощности приводит к преждевременному выходу их из строя, возникновению аварий, простоя рабочей машины и снижению производительности. Применение двигателя завышенной мощности приводит к увеличению капитальных затрат, мощности трансформатора и преобразователя, повышенному расходу энергии за счет снижения к. п. д. и снижению коэффициента мощности (последнее для асинхронного двигателя).

Практические задачи выбора по мощности двигателей возникают как на стадии проектирования при предварительном выборе двигателей для производственных механизмов и при проверке их по нагреву после окончательного расчета системы, так и в процессе эксплуатации.

Во всех случаях выбор или проверка двигателя по условиям нагрева состоит в сопоставлении (эквивалентировании) параметров режима работы, для которого двигатель проектировался и изготовлялся (этот режим называется номинальным), с параметрами реального режима, в котором двигатель работает в конкретной системе привода.

Данные, содержащиеся в паспорте электрической машины, относятся к определенному номинальному режиму и называются номинальными данными двигателя. Заводы-изготовители гарантируют при работе двигателя в номинальном режиме при номинальной нагрузке полное его использование по допустимому нагреву.

Физическая суть взаимосвязи между механической нагрузкой на валу двигателя (соответственно и мощностью) и его нагревом состоит в том, что с возрастанием нагрузки увеличивается и ток, протекающий по обмоткам двигателя (см. гл. 3). Известно, что количество тепла, выделяющегося в обмотках электродвигателей, как и в любых проводниках, пропорционально квадрату тока, протекающего по этим обмоткам. Следовательно, нагрев двигателей зависит в основном от потерь энергии в их обмотках. Также на нагрев двигателей оказывают влияние и другие виды потерь — в стали, механические и добавочные.



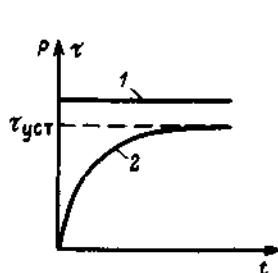


Рис. 5.1 График работы электропривода при продолжительном режиме с постоянной нагрузкой.

1 —  $P(t)$ , 2 —  $\tau(t)$

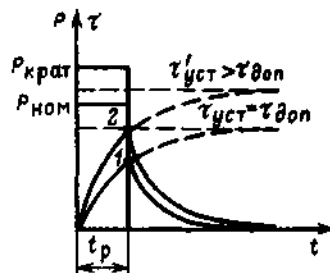


Рис. 5.2. График работы электропривода при кратковременном режиме:

1 —  $\tau(t)$  при  $P_{ном}$ ; 2 —  $\tau(t)$  при  $P_{крат}$ ;  $\tau'_{уст}$  — установившееся значение температуры перегрева при длительном действии нагрузки  $P_{крат}$

Для выпускаемых в настоящее время электрических двигателей ГОСТом предусматриваются восемь номинальных режимов, которые в соответствии с международной классификацией имеют условные обозначения S1—S8. Рассмотрим краткую характеристику режимов [4].

1. *Продолжительным номинальным режимом работы (S1)* электрической машины называется режим работы ее при неизменной нагрузке такой продолжительностью, что превышения температуры всех частей электрической машины достигают установившихся значений. Зависимости мощности на валу двигателя (1) и температуры перегрева (2) от времени для этого режима приведены на рис. 5.1. В паспортных данных двигателя такого режима указываются номинальные мощность, частота вращения, напряжение, ток. Из рис. 5.1 видно, что продолжительному номинальному режиму работы соответствует простейший график превышения температуры с установившимся значением  $\tau_{уст}$ , равным допустимому.

2. *Кратковременным номинальным режимом работы (S2)* электрической машины называется режим, при котором период  $t_p$  неизменной номинальной нагрузки ( $P_{ном}$ ) чередуется с периодом отключения машины, при этом периоды нагрузки не настолько длительны, чтобы превышения температуры машины могли достигнуть установившихся значений ( $\tau_{уст}$ ), а периоды отключения настолько длительны, что все части ее охлаждаются до температуры окружающей среды (рис. 5.2).

3. *Повторно-кратковременным номинальным режимом работы (S3)* электрической машины называется режим, при котором кратковременные периоды неизменной номинальной нагрузки ( $P_{ном}$ ), рабочие периоды ( $t_p$ ), чередуются с периодами

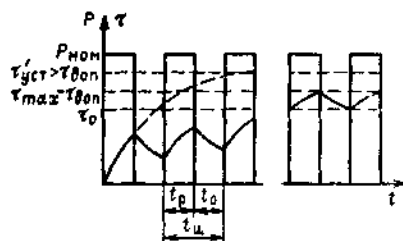


Рис. 5.3. График работы электропривода при повторно-кратковременном режиме

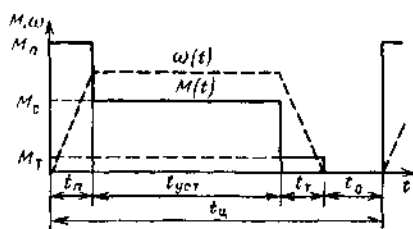


Рис. 5.4. Нагрузочная диаграмма  $M(t)$  и тахограмма  $\omega(t)$  электропривода

отключения машины — паузами ( $t_0$ ), причем как рабочие периоды, так и паузы не настолько длительны, чтобы превышения температуры ( $\tau$ ) частей машины могли достигнуть установившихся значений ( $\tau'_{уст}$ ) (рис. 5.3). К этому режиму работы относятся режимы с продолжительностью цикла  $t_u \leq 10$  мин.

Режимы  $S1-S3$  являются основными, номинальные данные на которые включаются в паспорт машины и каталоги.

Номинальные режимы  $S4-S8$  вводят для того, чтобы впоследствии упростить задачу эквивалентирования произвольного реального режима номинальным. Исходной информацией для расчета параметров реального режима, необходимой для выбора двигателей по мощности, являются зависимости от времени момента сопротивления  $M_c$  на валу двигателя на всех этапах работы и данные о характере движения электропривода, задаваемые в виде зависимости  $\omega(t)$  (тахограммы). График  $M_c(t)$  называется нагрузочной диаграммой механизма, которая может быть задана на основании данных, позволяющих построить расчетный график  $M_c(t)$ , или экспериментальных.

Параметры реального режима, необходимые для проверки двигателя по нагреву, содержит нагрузочная диаграмма электропривода, представляющая собой зависимость вращающего момента, мощности или тока двигателя от времени. На этапах установившегося режима работы двигателя  $M = M_c$ , а при переходных процессах момент двигателя определяется и динамическим моментом  $M_d$ . Поэтому согласно (2.7) имеем:

$$M(t) = M_c(t) + J_{np}(d\omega/dt).$$

В качестве примера простейшая нагрузочная диаграмма и тахограмма электропривода шахтной двухскиповой подъемной машины с уравновешивающим хвостовым канатом приведены на рис. 5.4, где  $M_n$  — пусковой момент двигателя,  $M_c$  — момент двигателя, равный моменту сопротивления,  $M_t$  — момент двигателя при торможении механизма;  $t_n$  — время пуска,  $t_{уст}$  —

время установившегося движения,  $t_1$  — время торможения,  $t_0$  — время паузы,  $t_{\Sigma}$  — время всего цикла.

Допустимая температура нагрева двигателей определяется нагревостойкостью применяемых изоляционных материалов. В условиях эксплуатации максимальная температура изоляции не должна превышать допустимого значения. В противном случае наступает преждевременный выход двигателя из строя. Более нагревостойкие материалы изоляции позволяют увеличить номинальный ток двигателя и соответственно при тех же размерах увеличить его мощность. Лучшее использование электродвигателя может быть достигнуто также благодаря применению более совершенной системы его охлаждения.

С целью упрощения тепловых расчетов в настоящее время принята стандартная температура окружающей среды, равная  $40^{\circ}\text{C}$  (раньше  $35^{\circ}\text{C}$ ). Поэтому мощность двигателя, указанная на его щитке, соответствует температуре окружающей среды, равной  $40^{\circ}\text{C}$ . При более низкой температуре окружающей среды двигатель может быть нагружен несколько выше номинальной мощности, а при более высокой — загрузка двигателя должна быть уменьшена, если не применены специальные меры для усиления его охлаждения.

Для каждого класса изоляции устанавливается допустимое превышение температуры (разность между температурами допустимой и стандартной). Далее рассмотрены способы выбора по мощности двигателей для основных режимов работы ( $S1$ — $S3$ ).

## **5.2. ВЫБОР ПО МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ ( $S1$ )**

При реальном продолжительном режиме работы нагрузка на валу двигателя для различных типов рабочих машин может либо оставаться примерно постоянной, либо изменяться. В первом случае выбор по мощности двигателя является наиболее простым. По каталогу выбирают двигатель для режима  $S1$  с номинальной мощностью, равной мощности, требуемой для работы машины. Если в каталоге нет двигателя, мощность которого соответствует необходимой величине, то выбирают ближайший больший по мощности двигатель.

Большая часть рабочих машин и механизмов работает с переменной нагрузкой. В этом случае выбор по мощности двигателя более сложен.

Рассмотрим нагрузочную диаграмму рабочей машины с переменной нагрузкой, приведенную на рис. 5.5.

Казалось, можно было бы выбрать двигатель по средней мощности или среднему току. Однако это было бы ошибкой, так как средняя мощность не учитывает квадратичной зависимости между переменными потерями и током двигателя.

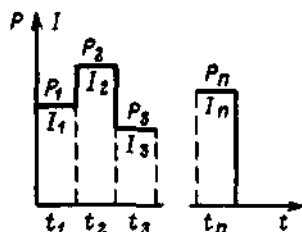


Рис. 5.5. Диаграмма рабочей машины при продолжительном режиме с переменной нагрузкой

Только лишь при небольших изменениях нагрузки можно выбирать двигатель по среднему значению мощности.

При больших колебаниях нагрузки мощность двигателя выбирают либо методом средних потерь, либо методом эквивалентных величин (тока, момента и мощности двигателя).

Сущность первого метода состоит в нахождении средних потерь двигателя  $\Delta P_{\text{ср}}$  или  $Q_{\text{ср}}$  ( $Q_{\text{ср}} = 0,24 \Delta P_{\text{ср}}$ ) при заданной нагрузочной диаграмме и сравнении величины  $\Delta P_{\text{ср}}$  или  $Q_{\text{ср}}$  с номинальными потерями  $\Delta P_{\text{ном}}$  или  $Q_{\text{ном}}$ , на которые рассчитан двигатель для режима *SI*. В этом случае исходят из того, что при равенстве потерь  $\Delta P_{\text{ср}} = \Delta P_{\text{ном}}$ ,  $Q_{\text{ср}} = Q_{\text{ном}}$  электродвигатель будет работать при допустимой для него температуре, так как  $\tau_{\text{уст}} = \tau_{\text{доп}} = Q_{\text{ср}}/A = Q_{\text{ном}}/A$ .

Расчет проводят методом последовательных приближений. Порядок расчета: 1) на основании нагрузочной диаграммы (см. рис. 5.5) определяют среднюю мощность

$$P_{\text{ср}} = \frac{P_1 t_1 + P_2 t_2 + \dots + P_n t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n};$$

- 2) предварительно по каталогу выбирают двигатель для режима *SI* с номинальной мощностью  $P_{\text{ном}} = (1,1 \div 1,3) P_{\text{ср}}$ ;
- 3) с помощью зависимости к. п. д. выбранного двигателя от мощности на его валу  $\eta(P)$  для каждого участка нагрузочной диаграммы определяют потери мощности:  $\Delta P_i = (P_i / \eta_i) - P_i$ ;
- 4) далее находят средние потери

$$\Delta P_{\text{ср}} = \frac{\Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \dots + \Delta P_n t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}; \quad (5.1)$$

- 5) определяют номинальные потери мощности

$$\Delta P_{\text{ном}} = (P_{\text{ном}} / \eta_{\text{ном}}) - P_{\text{ном}};$$

- 6) сравнивают средние потери  $\Delta P_{\text{ср}}$  с номинальными потерями  $\Delta P_{\text{ном}}$ . Если  $\Delta P_{\text{ср}} \leq \Delta P_{\text{ном}}$ , то двигатель по нагреву выбран правильно. В противном случае необходимо выбрать ближайший больший по мощности двигатель и повторить расчет.

Метод средних потерь можно применять для любого типа двигателей. Однако он требует кропотливой работы и поэтому

применяется лишь в тех случаях, когда необходимо точно определить мощность двигателя.

Широкое распространение получили методы средних квадратичных или эквивалентных величин. Эти методы являются менее точными.

Метод эквивалентного тока основан на том, что проходящий в двигателе и изменяющийся по величине фактический ток заменяется в расчетах эквивалентным током  $I_s$ , который вызывает в двигателе те же потери, что и действительный ток.

Потери в двигателе делят на постоянные и переменные. Постоянные потери  $\Delta P_0$  не зависят от нагрузки и представляют собой потери в стали, механические потери в подшипниках и вентиляционные потери трения о воздух. Переменные потери — это потери на нагревание обмоток, равные  $I^2 R$ . Следовательно, полные потери на каждом участке нагрузочной диаграммы

$$\Delta P_i = \Delta P_0 + I_i^2 R, \quad (5.2)$$

а средние потери

$$\Delta P_{cp} = \Delta P_0 + I_s^2 R. \quad (5.3)$$

Подставляя формулы (5.2) и (5.3) в выражения (5.1), исключив  $\Delta P_0$ , после ряда преобразований получаем

$$I_s = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}. \quad (5.4)$$

Если величины токов на нагрузочной диаграмме не остаются постоянными в отдельные периоды времени, то вычисление эквивалентного тока представляет известные трудности. Для нелинейного графика нагрузки эквивалентный ток определяют по формуле

$$I_s = \sqrt{\frac{1}{\sum t} \int_0^{\sum t} I^2 dt}. \quad (5.5)$$

Эквивалентный ток в этом случае определяют приближенным методом путем кусочно-линейной аппроксимации действительной кривой тока  $I(t)$ . Эквивалентный ток  $I_{s,i}$  вычисляют: а) для прямоугольных участков по формуле (5.4); б) для участков, имеющих вид треугольника, на основании (5.5) по выражению  $I_{s,i} = I_i / \sqrt{3}$ ; в) для участков, имеющих вид трапеции, также на основании (5.5) по выражению

$$I_{s,i} = \sqrt{(I_{i-1}^2 + I_{i-1} I_i + I_i^2) / 3}.$$

При выборе мощности двигателя обычно бывает задана нагрузочная диаграмма привода в виде зависимости вращающего момента от времени. Учитывая, что при неизменном магнитном

потоке имеет место прямая пропорциональная зависимость между моментом и током, и считая электромагнитный момент примерно равным вращающему моменту на валу, можно на основании (5.4) получить выражение для эквивалентного момента:

$$M_s = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}. \quad (5.6)$$

Для электродвигателей, у которых угловая скорость при изменении нагрузки меняется незначительно, можно непосредственно определить эквивалентную мощность. Так как мощность двигателя при постоянной скорости зависит только от вращающего момента и пропорциональна ему, то на основании формулы (5.6) получим

$$P_s = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}. \quad (5.7)$$

Методами эквивалентных величин (тока, момента, мощности) нельзя пользоваться при выборе мощности электродвигателя в тех случаях, когда постоянные потери в двигателе или его параметры при работе значительно меняются (асинхронные короткозамкнутые двигатели с глубоким пазом или двойной клеткой), а также при значительном изменении напряжения или частоты питающей сети для всех асинхронных двигателей. В этих случаях необходимо применять метод средних потерь.

Методами эквивалентного момента и эквивалентной мощности также нельзя пользоваться в тех случаях, когда отсутствует прямая пропорциональная зависимость между током и моментом двигателя (двигатели постоянного тока последовательного возбуждения, пусковые и тормозные режимы асинхронных короткозамкнутых двигателей). Методом эквивалентной мощности, кроме того, нельзя пользоваться, если в процессе работы при изменении нагрузки значительно изменяется угловая скорость двигателя.

С учетом изложенных ограничений для каждого случая выбирают соответствующий метод. Таким образом, рассчитанные величины эквивалентных тока, момента или мощности сопоставляют соответственно с номинальными током, моментом или мощностью двигателя, выбранного для режима *SI*. Электродвигатель по нагреву выбран правильно, если  $I_s \leq I_{ном}$ , или  $M_s \leq M_{ном}$ , или  $P_s \leq P_{ном}$ .

После этого двигатель должен быть проверен по допустимой нагрузке. Для двигателей постоянного тока должно быть соблюдено следующее условие:  $I_{max}/I_{ном} \leq \lambda_{\Gamma}$ , где  $I_{max}$  — мак-

симальный ток из нагрузочной диаграммы,  $A$ ;  $\lambda_I$  — коэффициент допустимой нагрузки по току (для двигателей постоянного тока нормального исполнения  $\lambda_I = 2 \div 2,5$ ).

Для двигателей переменного тока соблюдают следующее условие:  $M_{\max} \leq M_k$ , где  $M_{\max}$  — максимальный момент в нагрузочной диаграмме.

Для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором дополнительным условием возможности его применения является  $M_{\text{нач}} < M_n$ , где  $M_{\text{нач}}$  — момент сопротивления в период пуска, взятый из нагрузочной диаграммы.

Если окажется, что рассмотренные выше условия не поддерживаются, то необходимо выбрать двигатель большей мощности, руководствуясь при этом уже не условиями нагревания, а перегрузочной способностью или величиной пускового момента двигателя.

Следует отметить, что методы средних потерь и эквивалентных величин справедливы в тех случаях, когда продолжительность работы двигателя на отдельных участках нагрузочной диаграммы значительно меньше постоянной времени нагрева двигателя.

Методы средних потерь и эквивалентных величин основаны на анализе потерь, возникающих в двигателе и вызывающих его нагревание. Однако условия нагревания и охлаждения для самовентилируемого двигателя зависят и от его угловой скорости. При понижении скорости теплоотдача двигателя ухудшается. Поэтому если в рассматриваемый период входит работа двигателя при низких скоростях или имеют место остановки, то это необходимо учесть при расчете по формулам (5.1), (5.4) и (5.6). Выражение (5.7) в этих случаях вообще не применимо. Такой учет выполняется путем уменьшения продолжительности соответствующих интервалов времени, входящих в знаменатели выражений (5.1), (5.4) и (5.6). Для этого продолжительность работы двигателя с пониженной частотой вращения умножают на коэффициенты  $\alpha$  (при пуске и торможении) и  $\beta$  (во время паузы). Величины этих коэффициентов, учитывающих ухудшенные условия охлаждения, принимают  $\alpha = 0,75$ ;  $\beta = 0,5$ .

### **5.3. ВЫБОР ПО МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ КРАТКОВРЕМЕННОМ (S2) И ПОВТОРНО- КРАТКОВРЕМЕННОМ (S3) РЕЖИМАХ РАБОТЫ**

Упрощенный график кратковременного режима работы представлен на рис. 5.2. Если двигатель рассчитан на работу в продолжительном режиме с нагрузкой  $P_{\text{ном}}$ , то при кратковременном режиме с этой нагрузкой превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды в конце периода

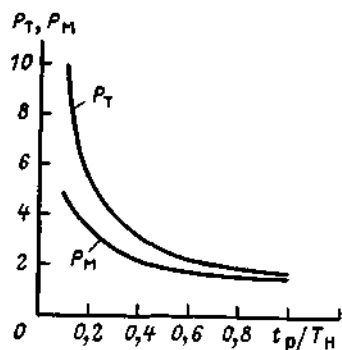


Рис. 5.6. Графики зависимостей  $p_T(t_p/T_n)$  и  $p_M(t_p/T_n)$

работы  $t_p$  (1) не достигнет установившегося значения  $\tau_{уст}$ , равного допустимому перегреву  $\tau_{доп}$ .

Следовательно, двигатель будет недоиспользован по нагреву. Поэтому при кратковременном режиме работы для этого же двигателя можно допустить большую нагрузку  $P_{крат}$ . Эту нагрузку необходимо выбирать таким образом, чтобы в конце рабочего периода  $t_p$  перегрев  $\tau$  был равен допустимому  $\tau_{доп}$  (2). Очевидно, что потери в двигателе при кратковременном режиме  $\Delta P_{крат}$  будут больше номинальных потерь для длительной нагрузки  $\Delta P_{ном}$ . Отношение этих потерь называют коэффициентом термической перегрузки:  $p_T = \Delta P_{крат} / \Delta P_{ном}$ .

Так как установившееся превышение температуры пропорционально потерям, коэффициент термической перегрузки можно выразить через соответствующие значения  $\tau'_{уст}$  и  $\tau_{уст}$  (см. рис. 5.2).

Принимая  $\tau_{уст} = \tau_{доп}$ , получаем

$$p_T = \tau'_{уст} / \tau_{доп}. \quad (5.8)$$

Соотношение (5.8) позволяет определить коэффициент термической перегрузки через величины  $T_n$  и  $t_p$ . В конце рабочего периода при  $t = t_p$  имеем:  $\tau = \tau_{доп}$ . Подставив эти значения в (4.21), получим  $\tau_{доп} = \tau'_{уст} (1 - e^{-t_p/T_n})$ , откуда с учетом (5.8)

$$p_T = \frac{1}{1 - e^{-t_p/T_n}}. \quad (5.9)$$

График зависимости коэффициента  $p_T$  от  $t_p/T_n$ , построенный с помощью формулы (5.9), приведен на рис. 5.6.

Величиной, характеризующей кратковременный режим работы, является также коэффициент механической перегрузки, представляющий собой отношение допустимой по нагреву двигателя мощности при кратковременной нагрузке  $P_{крат}$  к номинальной его мощности при длительной нагрузке  $P_{ном}$ ,

$$p_M = P_{крат} / P_{ном}. \quad (5.10)$$



Для выявления взаимозависимости между коэффициентами  $\sigma_T$  и  $\rho_m$  необходимо выразить соотношение для коэффициента термической перегрузки через постоянные и переменные потери:

$$\rho_T = \frac{P_{\text{крат}}}{\Delta P_{\text{ном}}} = \frac{\Delta P_0 + \Delta P_{\text{п. ном}} (P_{\text{крат}}/P_{\text{ном}})^2}{\Delta P_0 + \Delta P_{\text{п. ном}}} = \frac{\alpha + \rho_m^2}{\alpha + 1}, \quad (5.11)$$

где  $\Delta P_{\text{п. ном}}$  — переменные потери (потери в меди  $I_{\text{ном}}^2 R$ ) при номинальной нагрузке, Вт;  $\alpha = \Delta P_0 / \Delta P_{\text{п. ном}}$ .

Решая уравнение (5.11) относительно  $\rho_m$ , получаем

$$\rho_m = \sqrt{\rho_T (\alpha + 1) - \alpha}. \quad (5.12)$$

Если пренебречь постоянными потерями, то  $\alpha = 0$  и выражение (5.12) примет вид

$$\rho_m = \sqrt{\rho_T}. \quad (5.13)$$

Подставив в (5.12) значение  $\rho_T$  из выражения (5.9), получим

$$\rho_m = \sqrt{\frac{\alpha + 1}{1 - e^{-t_p/T_n}} - \alpha}. \quad (5.14)$$

На рис. 5.6 представлена зависимость  $\rho_m(t_p/T_n)$ , построенная с помощью (5.14) при  $\alpha = 1$ .

Полученные соотношения характеризуют физическую сущность тепловых процессов и дают возможность рассчитать мощность двигателя для кратковременного режима работы. Порядок расчета: 1) при заданных значениях  $t_p$  и  $T_n$  с помощью формулы (5.9) определяют значение  $\rho_T$ ; 2) с помощью выражения (5.12) или (5.13) находят значение  $\rho_m$ ; 3) при заданном значении  $P_{\text{крат}}$  определяют значение  $P_{\text{ном}}$  из формулы (5.10).

Использование двигателей, предназначенных для продолжительной работы, в кратковременном режиме не является желательным, так как почти всегда пределы использования ограничиваются перегрузочной способностью двигателя, а по нагреву двигатель оказывается недоиспользованным.

Электрические двигатели для кратковременной работы режима S2 рассчитываются заводами-изготовителями иначе, чем двигатели номинального продолжительного режима работы. Они обеспечивают большую перегрузочную способность, коллектор и обмотки возбуждения усилены. Продолжительность работы двигателей, предназначенных для кратковременного режима S2, нормируется значениями 15, 30, 60 и 90 мин, их выбирают по специальному каталогу.

Повторно-кратковременный режим работы S3 характеризуется коэффициентом относительной продолжительности рабо-

чего периода, под которым понимают отношение длительности работы двигателя  $t_p$  к длительности рабочего цикла  $t_u$

$$\epsilon = t_p/t_u = t_p/(t_p + t_0),$$

где  $t_0$  — длительность паузы, с.

Электромашиностроительные заводы и проектные организации для характеристики повторно-кратковременного режима работы используют понятие продолжительности включения:  $PВ = \epsilon \cdot 100 \%$ .

ГОСТом предусмотрены стандартные значения ПВ, равные 15, 25, 40 и 60 %. Нагрузочная диаграмма и графики изменения превышения температуры для повторно-кратковременного режима работы были приведены ранее (см. рис. 5.3).

Как видно из рис. 5.3, при повторно-кратковременном режиме, как и при кратковременном, было бы неправильно выбирать двигатель на заданную мощность  $P$ , так как последний был бы недоиспользован по нагреву.

Если двигатель выбран правильно, то наибольшая температура не достигнет значения  $\tau'_{уст}$ , а будет стремиться после значительного числа циклов к  $\tau_{max} = \tau_{доп}$ . Исходя из этих условий, необходимо рассчитывать мощность двигателя при повторно-кратковременном режиме работы. Значение коэффициента термической перегрузки находят в этом случае на том основании, что и для цикла работы, весьма удаленного от начала включения двигателя, температура последнего изменяется от  $t_0$  до  $\tau_{max}$  (см. рис. 5.3) и определяется по известному выражению

$$p_t = (1 - e^{-t_p/T_n \epsilon}) / (1 - e^{-t_p/T_n}). \quad (5.15)$$

Если считать  $t_0 = \infty$ , что соответствует кратковременному режиму работы, то выражение (5.15) примет вид формулы (5.9). Расчеты показывают, что при  $\epsilon > 0,6$  допустимая термическая перегрузка незначительна, а коэффициент механической перегрузки  $p_m \approx \sqrt{p_t}$  еще меньше. Поэтому для значений  $\epsilon > 0,6$  необходимо выбрать двигатель номинального продолжительного режима работы.

Если нагрузочная диаграмма при реальном повторно-кратковременном режиме работы представляет двухступенчатый или многоступенчатый график, что часто встречается на практике, то построение кривых нагрева для выбора мощности двигателя вызывает значительные затруднения (громоздкость и неточность метода). Кроме того, необходимо экспериментально определять постоянную времени нагрева  $T_n$ , так как в каталогах значения  $T_n$  отсутствуют. Поэтому мощность двигателя при повторно-кратковременном режиме работы рассчитывается методами, при которых исключается построение графиков нагрева.

В повторно-кратковременном режиме работают электроприводы многих горных машин и механизмов. Это электроприводы одноковшовых экскаваторов, шахтных подъемных машин, кранов, погрузочных машин, вагоноопрокидывателей и др. Работа этих электроприводов отличается частыми пусками, торможением, реверсированием и значительными перегрузками. Поэтому электродвигатель должен быть надежным, иметь повышенные значения пускового и максимального моментов и высокий к. п. д. Этим требованиям наиболее полно удовлетворяют двигатели, специально сконструированные для повторно-кратковременного режима работы и выпускаемые отечественными заводами: краново-металлургические, экскаваторные, для шахтных погрузочных машин и др. Номинальная мощность этих двигателей нормируется согласно ГОСТу для ПВ 25 или 40 %. Для повторно-кратковременного режима используются также двигатели нормального исполнения, предназначенные для номинального продолжительного режима работы.

Методы расчета мощности двигателя зависят от того, для какого режима работы предназначен применяемый тип двигателя. Рассмотрим сначала случай, когда применяется двигатель, предназначенный для продолжительного режима работы  $SI$ . Для одноступенчатого графика с помощью формул (5.15) и (5.13), пренебрегая постоянными потерями, если они неизвестны, определяют значения коэффициентов  $\rho_T$  и  $\rho_M$ , а затем с помощью формулы (5.10) находят значение номинальной мощности двигателя:  $P_{ном} = P_{крат}/\rho_M$ . Если значение  $P_{ном}$  не превышает фактической номинальной мощности для продолжительного режима работы предварительно выбранного типа двигателя, то последний по нагреву выбран правильно.

При многоступенчатом графике нагрузки вначале определяется эквивалентная нагрузка с помощью выражения (5.7) или (5.6) за рабочий период, а затем по этой величине и допустимому коэффициенту перегрузки  $\rho_M$  вычисляют номинальную мощность двигателя:

$$P_{ном} = P_3/\rho_M, \text{ где } P_3 = M_3\omega_{ном}/9550. \quad (5.16)$$

Если неизвестно значение постоянной времени нагрева  $T_n$ , то пользуются выражением (5.6) с учетом длительности паузы  $t_0$

$$M_3 = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n + t_0}}. \quad (5.17)$$

Затем определяют эквивалентную мощность по (5.16) и сравнивают с номинальной мощностью выбранного двигателя. Если  $P_3 \leq P_{ном}$ , то двигатель проходит по нагреву.

При выборе самовентилируемых двигателей, как указывалось выше, необходимо вводить поправки для соответствующих

периодов цикла. С учетом этих поправок выражение (5.17) имеет вид

$$M_3 = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{\alpha(t_1 + t_n) + t_2 + \dots + \beta t_0}},$$

где  $t_1$  — продолжительность пуска, с;  $t_2, \dots, t_{n-1}$  — продолжительность работы на ступенях графика нагрузки, с;  $t_n$  — продолжительность остановки, с.

Рассмотрим расчет мощности для повторно-кратковременного режима, если применяется двигатель, предназначенный для повторно-кратковременного режима работы СЗ. Такой двигатель в зависимости от ПВ допускает разную нагрузку. Значение  $P_{ном}$  для стандартных величин ПВ указывается в каталогах и на щитке.

На основании нагрузочной диаграммы по (5.6) определяют эквивалентный момент за рабочее время, а также фактическую продолжительность включения (%):

$$ПВ_{факт} = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n + t_0} 100.$$

Затем по (5.16) находят  $P_э$  и пересчитывают ее на ближайшее стандартное значение ПВ<sub>ст</sub> с помощью следующего известного соотношения

$$P_{э.ст} = P_э \sqrt{\frac{ПВ_{факт}}{ПВ_{ст}}}.$$

Для самовентилируемых двигателей

$$ПВ_{факт} = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_n}{\alpha(t_1 + t_n) + t_2 + \dots + \beta t_0} 100.$$

Наконец, эквивалентная мощность, пересчитанная на стандартное значение ПВ, сравнивается с каталожной номинальной мощностью двигателя при этом же значении ПВ. Если  $P_{э.ст} \leq P_{ном}$ , то двигатель по нагреву выбран правильно.

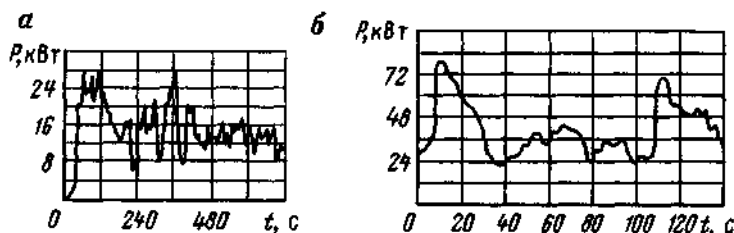


Рис. 5.7. Нагрузочные диаграммы при случайной нагрузке

Затем двигатель проверяют по допустимой перегрузке и пусковому моменту, как это указывалось выше.

Как видно из вышеннеложенного, построение нагрузочной диаграммы является необходимым этапом расчета мощности электропривода.

При построении нагрузочных диаграмм электропривода исходными являются нагрузочные диаграммы рабочих машин. Последние строят на основании известных данных производственного процесса: продолжительности рабочих периодов, холостого хода и пауз, величин моментов сопротивления и мощностей.

Нагрузочные диаграммы горных машин могут быть представлены в зависимости от времени (угольные комбайны, струговые установки, экскаваторы), либо от пути или времени (шахтные подъемные машины, лебедки), либо от угла поворота кривошипа (поршневые компрессоры). Нагрузочные диаграммы электроприводов для всех машин и механизмов должны быть представлены в зависимости от времени. При установившихся режимах нагрузочные диаграммы приводов совпадают с нагрузочными диаграммами рабочих машин.

Многие горные машины имеют случайный характер изменения момента сопротивления. Так, например, на рис. 5.7 представлены нагрузочные диаграммы врубовой машины (а) и угольного комбайна (б). Для этих машин трудно построить нагрузочную диаграмму с помощью расчета. Выбор мощности электродвигателя в этих случаях проводят на основании практических данных о потребляемой мощности из сети при работе в различных условиях и с помощью специальных методов расчета [11].

### Контрольные вопросы

1. Что такое нагрузочная диаграмма механизма и электропривода?
2. Что называется продолжительным, кратковременным и повторно-кратковременным номинальным режимом работы электродвигателя?
3. Как проводят пересчет мощности электродвигателя от одного значения ПВ к другому?

## Глава 6

# ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

### 6.1. ФУНКЦИИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ, ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ И ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К НИМ ТРЕБОВАНИЯ

Задачами управления электроприводами являются: осуществление пуска, регулирование скорости, торможение, реверсирование рабочей машины, поддержание ее режима работы в соответствии с требованиями технологического процесса, управление положением рабочего органа машины. При этом должны быть обеспечены наибольшая производительность машины или механизма, наименьшие капитальные затраты и расход электроэнергии.

Конструкция рабочей машины, вид электропривода и система его управления связаны между собой. Поэтому выбор, проектирование и исследование системы управления электроприводом должны осуществляться с учетом конструкции рабочей машины, ее назначения, особенностей и условий работы. Кроме основных функций системы управления электроприводами могут выполнять некоторые дополнительные функции, к которым относятся сигнализация, защита, блокировки и пр. Обычно системы управления одновременно выполняют несколько функций.

Системы управления электроприводами делят на различные группы в зависимости от главного признака, положенного в основу классификации. По способу управления различают системы ручного, полуавтоматического (автоматизированного) и автоматического управления. Ручным называется управление, при котором оператор непосредственно воздействует на простейшие аппараты управления. Недостатками такого управления являются необходимость расположения аппаратов вблизи электропривода, обязательное присутствие оператора, низкие точность и быстродействие системы управления. Поэтому ручное управление находит ограниченное применение.

Управление называется полуавтоматическим, если его осуществляет оператор путем воздействия на различные автоматические устройства, выполняющие отдельные операции. При этом обеспечивается высокая точность управления, возможность дистанционного управления, снижается утомляемость оператора. Однако при таком управлении ограничено быстродействие, так как оператор может затрачивать время на принятие решения о требуемом режиме управления в зависимости от изменившихся условий работы. В настоящее время системы по-

луавтоматического управления наиболее широко распространены в горной и других отраслях промышленности.

Управление называется автоматическим, если все операции управления осуществляются автоматическими устройствами без непосредственного участия человека. В этом случае обеспечиваются наибольшие быстродействие и точность управления. Системы автоматического управления по мере развития средств автоматики получают все большее распространение.

По роду выполняемых в производственном процессе основных функций системы полуавтоматического и автоматического управления электроприводами можно разделить на несколько групп.

К первой группе относятся системы, обеспечивающие автоматические пуск, остановку и реверсирование электропривода. Скорость таких приводов не регулируется, поэтому они называются нерегулируемыми. В горной промышленности такие системы применяются в электроприводах насосов, вентиляторов, компрессоров, конвейеров, лебедок вспомогательных механизмов и т. п.

Ко второй группе относятся системы управления, которые кроме выполнения функций, обеспечиваемых системами первой группы, позволяют регулировать скорость электроприводов. Подобного рода системы электроприводов называются регулируемыми и применяются в грузоподъемных устройствах, транспортных средствах и пр.

К третьей группе относятся системы управления, обеспечивающие кроме вышеуказанных функций возможность регулирования и поддержания определенной точности, постоянства различных параметров (скорости, ускорения, тока, мощности и т. д.) при изменяющихся производственных условиях.

Такие системы автоматического управления, содержащие обычно обратные связи, называются системами автоматической стабилизации. В горной промышленности эти системы применяются на мощных шахтных подъемных установках, экскаваторах и т. д.

К четвертой группе относятся системы, которые обеспечивают слежение за сигналом управления, закон изменения которого заранее не известен. Такие системы управления электроприводами называют следящими. Параметрами, за которыми обычно осуществляется слежение, являются линейные перемещения, температура, количество воды или воздуха и пр. В горной промышленности такие системы применяют для обеспечения движения горных комбайнов в соответствии с гипсометрией пласта, для управления рабочими органами горных машин при селективной выемке полезных ископаемых.

К пятой группе относятся системы управления, обеспечивающие работу отдельных машин и механизмов или целых комп-

лексов по заранее заданной программе, называемые программными. Первые четыре группы систем управления обычно входят как составные части в систему пятой группы. Кроме того, эти системы снабжаются программными устройствами, датчиками и другими элементами. Такие системы начинают широко применять на многоковшовых экскаваторах, транспортных комплексах, обогатительных фабриках и т. д.

К шестой группе относятся системы управления, которые обеспечивают не только автоматическое управление электроприводами, включая системы первых пяти групп, но и автоматический выбор наиболее рациональных режимов работы машин. Такие системы называются системами оптимального управления или самонастраивающимися. Они обычно содержат вычислительные машины, которые анализируют ход технологического процесса и вырабатывают командные сигналы, обеспечивающие наиболее оптимальный режим работы.

Иногда классификацию систем автоматического управления осуществляют по типу применяемых аппаратов. Так, различают системы релейно-контакторные, электромашинные, магнитные, электронно-ионные, полупроводниковые. Важнейшей дополнительной функцией управления является защита электропривода. К системам автоматического управления предъявляются следующие основные требования: обеспечение режимов работы, необходимых для осуществления технологического процесса машиной или механизмом; простота системы управления; надежность системы управления; экономичность системы управления, определяемая стоимостью аппаратуры, затратами энергии, а также надежностью; гибкость и удобство управления; удобство монтажа, эксплуатации и ремонта систем управления.

По необходимости предъявляются дополнительные требования: взрывобезопасность, искробезопасность, бесшумность, стойкость к вибрации, значительным ускорениям и пр.

## **6.2. УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ И ПРИНЦИПЫ НАЧЕРТАНИЯ СХЕМ**

Для возможности конструирования, понимания принципа действия, монтажа и эксплуатации систем управления электроприводами пользуются их электрическими схемами. Для упрощения начертания схем принято небольшое количество условных обозначений элементов различных электрических машин и аппаратов. Необходимо пользоваться условными графическими обозначениями, установленными для схем государственными стандартами.

Согласно ЕСКД (ГОСТ 2.701—84) все электрические схемы делят на следующие типы: структурные, функциональные, принципиальные (полные), эквивалентные, соединений (монтаж-



ные), общие, подключения, расположения, объединенные: электрооборудования и проводки, электроснабжения и связи.

На принципиальных схемах изображают все элементы машин и аппаратов, входящих в данную схему. Независимо от действительного пространственного размещения элементы машин и аппаратов располагают на схеме в порядке, удобном для чтения ее и анализа принципа работы системы управления электроприводом. Каждому аппарату и машине присваивается буквенное или буквенно-цифровое обозначение в соответствии с его назначением. Причем различные элементы (катушки, контакты, блок-контакты) одного и того же аппарата должны иметь одинаковые обозначения, принятые для данного аппарата.

В соответствии с ГОСТом применяются следующие буквенные обозначения аппаратов и машин: *KM* — контактор, магнитный пускатель; *KL* — реле промежуточное; *KT* — реле времени; *KK* — реле электротепловое; *KV* — реле напряжения; *SP* — реле давления; *SA* — командоконтроллер; *SB* — выключатель кнопочный; *SQ* — путевой выключатель; *U* — преобразователь; *UZ* — преобразователь частотный; *SBC* — кнопка «Пуск»; *SBT* — кнопка «Стоп»; *Q* — выключатель; *QF* — выключатель автоматический; *FU* — предохранитель; *C* — конденсатор; *R* — резистор; *M* — двигатель; *TA* — трансформатор тока; *VD* — диод; *VS* — тиристор.

На монтажных схемах машины, аппараты и их элементы изображают в соответствии с их действительным конструктивным расположением. Каждый аппарат со всеми его элементами и соединениями изображают в одном месте и обозначают одним символом. На монтажной схеме указывают сечение и марку проводов и способы их прокладки.

Электрические цепи делят на две категории: цепи главного тока и вспомогательные. К первым относят силовые цепи двигателей и генераторов, цепи возбуждения и распределительных устройств, ко вторым — цепи управления, защиты, сигнализации, блокировки и пр. Цепи главного тока вычерчивают утолщенными линиями. Все элементы и аппараты на схемах изображают в положении, в котором они находятся при отсутствии воздействия на них, т. е. при отсутствии напряжения на катушках или нажатия на кнопку, при нулевом положении командоаппарата и т. д.

На начальном этапе проектирования какой-либо рабочей машины разрабатывают принципиальную схему, представляющую основу электрической части технического проекта. В ходе выполнения рабочего проекта составляют монтажные схемы в соответствии с конструкцией и расположением электрооборудования, разрабатывают схемы подключения. Кроме этого, выполняют схемы расположения электрооборудования, проводки,

электроснабжения, чертежи панелей, шкафов и других электроконструкций, документацию на различные технологические операции и пр.

Кроме рассмотренных типов электрических схем при анализе работы систем управления электроприводами применяют функциональные и структурные схемы. Различают разомкнутые и замкнутые системы автоматического управления электроприводами. Разомкнутые системы управления отличаются тем, что изменение возмущающих воздействий (нагрузка на валу двигателя) приводит к изменению режима работы привода (изменяется угловая скорость). Замкнутые системы управления независимо от состояния возмущающих воздействий обеспечивают с заданной точностью поддержание требуемого режима работы электропривода. В этих системах при пуске, торможении и регулировании угловой скорости привода может быть обеспечено непрерывное изменение тока, момента и скорости.

### **6.3. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ПУСКА, ТОРМОЖЕНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ**

Пуск и остановка являются неотъемлемыми операциями при работе любой рабочей машины и механизма. При пуске происходит разгон системы электропривод — исполнительный орган рабочей машины до необходимой скорости. В процессе этого разгона без нагрузки ( $M_c=0$ ) электрическая энергия, потребленная двигателем из сети, за вычетом потерь превращается в кинетическую энергию, запасенную во вращающихся и поступательно движущихся частях электропривода и исполнительного органа. После отключения электродвигателя от сети вся система продолжает движение по инерции. При этом кинетическая энергия расходуется на преодоление всех видов сопротивлений движению. Поэтому скорость системы через промежуток времени, в течение которого будет израсходована вся кинетическая энергия, становится равной нулю. Такая остановка рабочей машины при движении по инерции называется свободным выбегом. Многие машины и механизмы, работающие в продолжительном режиме или со значительными нагрузками, останавливают путем свободного выбега. В тех же случаях, когда продолжительность свободного выбега значительна и оказывает влияние на производительность машин (работа с частыми пусками), для сокращения времени остановки применяют искусственный метод преобразования кинетической энергии, запасенной в движущейся системе, называемый торможением.

Все способы торможения можно разделить на два основных вида: механическое и электрическое. При механическом торможении кинетическая энергия преобразуется в тепловую, за счет которой происходит нагрев трущихся и прилегающих к ним

частей механического тормоза. При электрическом торможении кинетическая энергия преобразуется в электрическую и в зависимости от способа торможения двигателя либо отдается в сеть, либо преобразуется в тепловую энергию, идущую на нагрев обмоток двигателя и реостатов.

Производительность машин, работающих циклично (экскаваторы одноковшовые, подъемные машины, транспортные средства, краны и пр.), в значительной степени зависит от продолжительности периодов пуска и торможения механизмов. Поэтому логичным является стремление повысить интенсивность процессов пуска и торможения. Однако при значительной интенсивности в деталях машин могут возникнуть опасные по величине динамические напряжения, снижающие надежность работы машины. Поэтому необходимо выбирать способы пуска и торможения и при этом параметры схем такие, при которых обеспечивается минимальная продолжительность этих процессов при заданных допустимых динамических нагрузках в деталях механизмов (механизмы экскаватора) или допустимых ускорениях и замедлениях машины (подъемно-транспортные средства).

Продолжительность процессов пуска и торможения, динамические нагрузки и ускорения зависят от соотношения моментов двигателя и сопротивления и инерционных масс системы, что следует из уравнения движения электропривода (2.6).

При пуске момент двигателя всегда должен быть больше момента сопротивления (см. рис. 5.4). В случае  $M_n \leq M_c$  система не придет в движение. Следует отметить, что при замедлении момент двигателя может быть как отрицательным, так и положительным. Положительный момент двигателя при замедлении необходимо создавать в том случае, если под действием только момента сопротивления электропривод останавливается очень быстро. При этом по абсолютному значению момент двигателя должен быть меньше момента сопротивления (см. рис. 5.4). Во всех остальных случаях при замедлении момент двигателя должен быть отрицательным. Величина его зависит от условий торможения.

Пусковой момент двигателя выбирают в зависимости от величины момента сопротивления и инерционных масс всей системы.

Нагрузка механизма

	$M_n$
$M_c = 0$ ; небольшие инерционные массы	$(0,2 \div 0,4) M_{ном}$
$M_c = 0$ ; большие инерционные массы	$(0,5 \div 0,7) M_{ном}$
$M_c = M_n$ ; небольшие инерционные массы	$(1,2 \div 1,7) M_{ном}$
$M_c = M_n$ ; большие инерционные массы	$(2,0 \div 2,5) M_{ном}$

Пуск называют «легким», если  $M_c = (0,1 \div 0,4) M_{ном}$ , «нормальный», если  $M_c = (0,5 \div 0,75) M_{ном}$ , «тяжелым», если  $M_c \geq M_{ном}$ .

Для облегчения условий пуска (сокращения продолжительности работы двигателя с пусковыми токами и снижения его нагрева) часто применяют различные муфты сцепления или скольжения. При этом двигатель запускают вхолостую и после достижения им полной скорости включают муфту, передавая тем самым движение исполнительному органу рабочей машины.

При проектировании электроприводов необходимо учитывать, что пусковой ток двигателя не зависит от величины нагрузки на его валу. Пусковой ток определяется только параметрами двигателя и сети, а от величины нагрузки зависит лишь длительность его протекания по обмоткам и в сети.

Если включить двигатель постоянного тока на полное напряжение сети, то это равносильно режиму внезапного короткого замыкания, поскольку в первый момент времени якорь неподвижен и э. д. с. двигателя равна нулю. Поэтому возникает недопустимо большой пусковой ток, называемый током короткого замыкания.

В режиме противовключения при полном напряжении сети может возникнуть ток больше тока короткого замыкания. Чрезмерно большие токи в обмотках двигателей, а следовательно, и моменты недопустимы по следующим причинам электрического и механического характера: пусковые токи вызывают значительное падение напряжения в питающей сети, ухудшая тем самым как условия пуска включаемого двигателя, так и условия работы других потребителей, питающихся от этой же сети; большие пусковые токи создают значительные электродинамические усилия в лобовых частях обмотки двигателя, приводящие к механическому повреждению изоляции; несмотря на кратковременность действия, большие токи вызывают перегрев обмоток, что приводит к быстрому износу изоляции; у двигателей постоянного тока при значительных пусковых токах ухудшаются условия коммутации, поэтому пусковой ток у них не должен превышать значения  $(2 \div 2,5) I_{\text{ном}}$ ; возможны поломки или преждевременный износ передач и механизмов, буксование колес электровозов, соскальзывание ремней со шкивов.

Пусковые моменты двигателей, работающих в продолжительном режиме, ограничивают до возможно минимальных значений, повышая тем самым долговечность механизма, передачи, двигателя и аппаратуры управления. В тех же случаях, когда требуются форсированные режимы ускорений и замедлений (механизмы с повторно-кратковременным режимом работы), значения пусковых моментов выбирают согласно допустимым токам.

Наиболее совершенными считают такие пуск и торможение, при которых механические напряжения в элементах рабочей машины незначительны. Такие пуск и торможение называют плавными.

Ограничение пусковых и тормозных токов и моментов осуществляется в электроприводе главным образом за счет введения реостатов в цепи якоря, ротора или статора либо уменьшения напряжения, подводимого к двигателю. В некоторых случаях в цепь ротора или статора асинхронных двигателей включают реакторы или дроссели с индуктивным сопротивлением.

Если принять в приводе очень большое количество ступеней реостата, то требуемый момент двигателя в процессе разгона до рабочей скорости можно сохранить почти постоянным. Однако такое решение вопроса на практике невозможно по той причине, что получится дорогостоящая, малонадежная и громоздкая схема управления. Поэтому при проектировании электроприводов число пусковых ступеней реостата выбирают обычно не более десяти. В связи с этим момент двигателя при пуске или торможении на каждой пусковой ступени изменяется от максимального до минимального, колеблясь вокруг среднего расчетного значения. Максимальное значение момента  $M_1$  называют пиковым, а минимальное значение  $M_2$ , при котором происходит переключение ступени реостата, — моментом переключения.

Момент двигателя при пуске представляет среднее значение между  $M_1$  и  $M_2$ . Поэтому связь между ними устанавливается как средняя геометрическая зависимость

$$M_{п. ср} = \sqrt{M_1 M_2} \quad (6.1)$$

или как средняя арифметическая

$$M_{п. ср} = (M_1 + M_2)/2. \quad (6.2)$$

Величину момента двигателя при пуске определяют с помощью уравнения движения электропривода

$$M_{п. ср} = M_c + J_{пр} \omega_c / t_{пус},$$

если задано время пуска  $t_{пус}$ , или

$$M_{п. ср} = M_c + J_{пр} \varepsilon_{ср},$$

если задано среднее ускорение при пуске  $\varepsilon_{ср}$ .

Если же задано максимальное ускорение, то определяют пиковый момент

$$M_1 = M_c + J_{пр} \varepsilon_{мах}.$$

Когда известно значение момента  $M_{п. ср}$ , то, задавшись моментом  $M_1$  или  $M_2$ , с помощью зависимости (6.1) или (6.2) определяют соответственно значение момента  $M_2$  или  $M_1$ . В каких же пределах можно задаться значением момента  $M_1$  или  $M_2$ ? Значение пикового момента для двигателей постоянного тока из условий коммутации выбирают не более  $2 \div 2,5$ -кратного значения номинального момента, а для асинхронных

двигателей — не более 0,9 критического момента, что связано с допустимым падением напряжения сети на 5 %, при пуске двигателя. Момент переключения выбирают для любого типа двигателя на  $10 \div 20$  % больше  $M_c$ . Таким образом, можно установить следующую область расположения моментов  $M_1$  и  $M_2$  на положительной части оси абсцисс зависимости  $\omega(M)$ : а) для двигателей постоянного тока  $(1,1 \div 2,2) M_c \leq M_2 < < M_{п. ср} < M_1 \leq (2 \div 2,5) M_{ном}$ ; (6.3); б) для асинхронных двигателей  $(1,1 \div 1,2) M_c \leq M_2 < M_{п. ср} < M_1 \leq 0,9 M_k$ ; (6.4).

Возможен и другой подход при выборе моментов  $M_1$  и  $M_2$ . Если необходимо иметь форсированный пуск, то задаются значением  $M_1 = 2,5 M_{ном}$  для двигателей постоянного тока или  $M_1 = 0,9 M_k$  для асинхронных двигателей, выбирают число ступеней реостата и проверяют величину момента переключения согласно условию (6.3) или (6.4). Если же необходимо иметь нормальный пуск, то задаются значением  $M_2 = 1,15 M_c$ , выбирают число ступеней реостата и проверяют величину пикового момента согласно условию (6.3) или (6.4). В случаях, когда величина момента  $M_1$  окажется больше допустимого значения или величина момента  $M_2$  меньше момента сопротивления, необходимо изменить число ступеней реостата и задаться другими значениями этих моментов.

Пуск и торможение, при которых момент двигателя изменяется от значения  $M_1$  до значения  $M_2$ , называются ступенчатыми. При таком пуске и торможении в элементах рабочей машины возникают дополнительные механические нагрузки циклического характера, увеличивающие износ частей машины. При расчете машины эти дополнительные нагрузки учитывают увеличением коэффициента запаса прочности, что вызывает утяжеление и удорожание машины.

Бесступенчатый пуск или торможение, при котором отношение пикового момента к моменту переключения приближается к единице, можно получить за счет применения жидкостного реостата или путем управления двигателем с помощью выпрямителя или преобразователя частоты. При торможении примером также может служить схема динамического торможения асинхронного двигателя с самовозбуждением, позволяющая получить легко регулируемый тормозной момент, незначительно изменяющийся при изменении угловой скорости в широких пределах. Причем в этой схеме тормозной момент при включении нарастает плавно во времени от нуля до максимального значения за счет индуктивности обмотки статора.

В горной промышленности встречается значительное количество производственных машин, работающих в зависимости от технологического процесса с различной скоростью. К таким машинам относятся подъемные установки, экскаваторы, электровозы, краны и пр. Так, в подъемных и транспортных уста-

новках скорость необходимо снижать при подходе к пункту остановки, чтобы обеспечить точную остановку в требуемом месте. Скорость движения подъемной установки при проверке канатов, спуске взрывчатых веществ и в ряде случаев должна быть значительно меньше номинальной. Скорость, с которой должен работать копающий механизм экскаватора, определяется условиями забоя и должна изменяться в довольно широких пределах в зависимости от изменившихся условий.

Необходимость регулирования скорости электроприводов горных машин обусловлена требованиями, предъявляемыми со стороны технологического процесса. Регулируемый электропривод призван обеспечить максимальную производительность машин при высокой экономичности их работы и высоком качестве продукции.

Применение на машинах регулируемого электропривода приводит часто к коренному изменению конструкции самой рабочей машины, освобождая ее от множества громоздких механических передач. Что же подразумевают под понятием «регулирование скорости»? Регулированием скорости называют принудительное изменение скорости электропривода в зависимости от требований технологического процесса и независимо от величины и характера нагрузки. Не следует смешивать понятие регулирование скорости с естественным изменением угловой скорости двигателя, которое возникает при изменении нагрузки на его валу, колебаниях напряжения сети и т. д. Регулирование скорости осуществляется за счет изменения параметров двигателя или сети. Поэтому регулирование скорости по существу сводится к изменению формы механической характеристики двигателя.

Основными технико-экономическими показателями, характеризующими различные способы регулирования угловой скорости электроприводов, являются: диапазон регулирования, направление регулирования скорости, плавность, экономичность, стабильность работы двигателя на заданной скорости, допустимая по условиям нагрева нагрузка при регулировании скорости.

*Диапазоном регулирования угловой скорости* называют отношение максимальной скорости к минимальной при установившемся режиме и номинальном токе и моменте двигателя,  $D = \omega_{\max} / \omega_{\min}$ .

Диапазон выражается отношением чисел, например: 2:1; 5:1; 10:1; 20:1 и т. д. *Направление регулирования* означает возможность увеличения или уменьшения скорости по отношению к основной скорости и зависит от способов регулирования. Основная скорость соответствует скорости на естественной механической характеристике при номинальной нагрузке двигателя.

**Плавность** регулирования характеризуется количеством устойчивых скоростей, которые можно получить в данном диапазоне регулирования скорости, и оценивается коэффициентом плавности, представляющим отношение двух соседних значений угловых скоростей:  $k_{пл} = \omega_k / \omega_{k-1}$ . Плавность будет тем выше, чем большее число скоростей имеет электропривод, т. е. чем ближе будет стремиться коэффициент  $k_{пл}$  к единице. При  $k_{пл} = 1$  регулирование будет бесступенчатым.

**Экономичность** регулирования определяется капитальными затратами, связанными с созданием данной системы электропривода, и потерями энергии при регулировании скорости. От величины потерь  $\Delta P$  зависит к. п. д. привода:  $\eta = P_2 / (P_2 + \Delta P)$ , где  $P_2$  — полезная мощность на валу двигателя. Если двигатель работает на различных угловых скоростях с различными промежутками времени, то необходимо определять средневзвешенный к. п. д. за регулировочный цикл, состоящий из  $m$  ступеней:

$$\eta_{ср} = \sum_1^m P_{2k} t_k / \sum_1^m (P_{2k} + \Delta P_k) t_k.$$

Важным экономическим показателем работы электропривода является коэффициент мощности  $\cos \varphi = P / \sqrt{P^2 + Q^2}$ , где  $P$  и  $Q$  — активная и реактивная мощность.

При работе электропривода на различных скоростях определяется средневзвешенный  $\cos \varphi_{ср}$ . Для различных способов регулирования потери энергии будут различны.

**Стабильность** угловой скорости характеризуется величиной ее приращения при различных нагрузках. Изменение скорости при изменении момента, как известно, зависит от жесткости механической характеристики. При жесткой механической характеристике величина приращения скорости будет незначительной даже при больших колебаниях нагрузки, а при мягкой характеристике и тех же нагрузках скорость двигателя будет изменяться существенно.

**Допустимая по условиям нагрева нагрузка** двигателя при регулировании скорости зависит от способов регулирования последней и охлаждения двигателя. Так, например, у двигателей с независимой вентиляцией допустимая нагрузка остается постоянной при любой скорости, так как условия охлаждения двигателя не меняются. У двигателей с самовентиляцией количество охлаждающего воздуха пропорционально угловой скорости движения. Поэтому отводимое тепло возрастает вместе с увеличением скорости, что вызывает необходимость уменьшения нагрузки двигателя при снижении скорости.



## Контрольные вопросы

1. Дайте классификацию систем управления электроприводами.
2. Какие требования предъявляются к системам управления электроприводами?
3. Основные технико-экономические показатели, характеризующие различные способы регулирования угловой скорости электроприводов.

## Глава 7

# РАЗОМКНУТЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

### 7.1. ПУСК И ТОРМОЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Пуск электроприводов с двигателями постоянного тока. Пуск двигателей постоянного тока независимого возбуждения может осуществляться тремя способами: 1) прямым включением на полное напряжение сети; 2) с помощью пускового реостата, включаемого в цепь якоря; 3) плавным повышением напряжения на зажимах якоря.

Первый способ пуска осуществим для двигателей малой мощности до 1 кВт, которые имеют большое сопротивление обмотки якоря и небольшие инерционные массы. Пусковой ток у этих двигателей при прямом включении на номинальное напряжение сети несколько меньше тока короткого замыкания ввиду наличия индуктивности обмотки якоря. Все же значение этого тока значительно и составляет примерно  $(3 \div 4) I_{\text{ном}}$ . Поэтому необходимо соблюдать следующие условия: 1) источник постоянного тока, от которого питается двигатель, должен допускать  $3 \div 4$ -кратные перегрузки по току; 2) колебания напряжения сети при этом не должны влиять на работу других потребителей электроэнергии; 3) инерционные массы с целью сокращения продолжительности пуска должны быть возможно минимальными. Прямой пуск двигателя может быть осуществлен как при полном потоке возбуждения, так и при включении якоря одновременно с обмоткой возбуждения. В последнем случае величина пускового тока якоря будет выше, так как вначале за счет большой индуктивности обмотки возбуждения будет незначительной э. д. с. двигателя. Второй способ пуска и торможения обычно применяется для двигателей средней мощности.

Третий способ пуска используется при значительных мощностях двигателей в системах с управляемыми преобразователями энергии (например, системы Г—Д, УВ—Д) и рассматривается в разд. 7.2. Пуск двигателей постоянного тока последовательного возбуждения осуществляется теми же способами, что и двигателей независимого возбуждения.

Пуск и торможение электроприводов с асинхронными двигателями с фазным ротором. Пусковые свойства асинхронных двигателей характеризуются коэффициентом пуска  $K_n = K_l / K_m$ . Наиболее благоприятными считают условия пуска, если  $K_n = 1$ . Индуктивное сопротивление обмотки ротора  $x_2$  асинхронных двигателей при пуске ввиду повышенной частоты тока ротора существенно превосходит активное сопротивление ротора  $R_2$ . Поэтому при пуске уменьшается коэффициент мощности ротора двигателя, равный  $\cos \varphi_2 = R_2 / \sqrt{R_2^2 + x_2^2}$ .

Вследствие этого во время пуска при значительном токе ротора его активная составляющая, которой пропорционален момент двигателя, имеет малое значение.

С целью уменьшения пускового и тормозного тока в цепь ротора асинхронного двигателя с фазным ротором включают реостаты.

Хотя общий ток ротора в этом случае снижается, активная его составляющая возрастает из-за увеличения  $\cos \varphi_2$ . Поэтому увеличиваются пусковой и тормозной (в режиме противовключения) моменты двигателя. При  $R_2 + R_n = x_2$  пусковой момент будет равен максимальному моменту двигателя. При этом коэффициент мощности будет иметь максимальное значение:

$$\cos \varphi_2 = 1 / \sqrt{2} = 0,71.$$

Дальнейшее увеличение активного сопротивления цепи ротора приведет к тому, что  $\cos \varphi_2$  будет повышаться в меньшей степени, чем снижаться ток ротора. Поэтому начнет уменьшаться активная составляющая тока и соответственно пусковой момент двигателя.

На рис. 7.1 представлена упрощенная схема (силовая часть без цепей управления) пуска и торможения асинхронного двигателя с фазным ротором. При пуске замыкаются контакты  $KM1$ . При этом контакты  $KM4$  должны быть предварительно замкнуты. В процессе разгона двигателя поочередно замыкаются контакты  $KM5$ ,  $KM6$  и  $KM7$ . При торможении замыкаются контакты  $KM2$ . В процессе торможения двигателя поочередно замыкаются контакты  $KM3$  и  $KM4$ . Такое поочередное замыкание контактов  $KM5$ — $KM7$  и  $KM3$ — $KM4$ , при котором пусковой момент двигателя изменяется от  $M_1$  до  $M_2$ , обеспечивает оптимальные условия пуска и торможения, т. е. изменение ускорения и замедления в заданных допустимых пределах.

При отключенном реостате после завершения пуска двигатель будет работать на естественной характеристике. Обычно при пуске и торможении реостаты выводят одновременно во всех трех фазах. Такой способ называется симметричным.

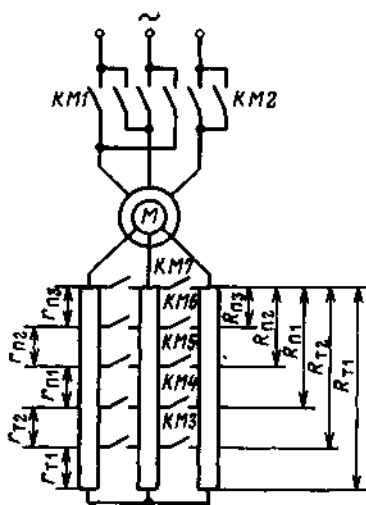
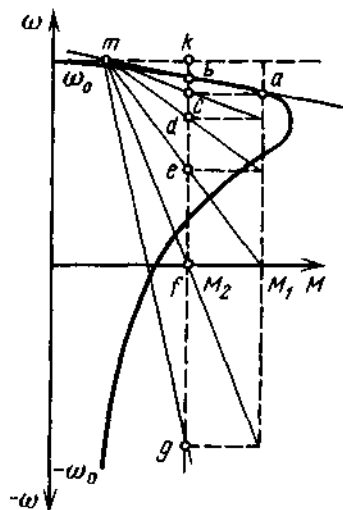


Рис. 7.1. Схема включения асинхронного двигателя с фазным ротором при пуске и торможении



**Рис. 72** Графический метод расчета пусковых и тормозных реостатов асинхронного двигателя с фазным ротором

Иногда применяют несимметричный способ, заключающийся в поочередном выведении реостатов по фазам.

Существуют графические и аналитические методы расчета пусковых и тормозных реостатов асинхронных двигателей с фазным ротором. Рассмотрим наиболее простой графический метод. В зависимости от требований расчет можно выполнять либо точным, либо приближенным способом. При первом способе учитывается кривизна механической характеристики в рабочей ее части, а при втором — эта часть характеристики принимается прямой.

Рассмотрим первый способ. Вначале строят естественную механическую характеристику двигателя. Определив значение пикового момента  $M_1$  и момента переключения  $M_2$ , откладывают их на горизонтальной оси (рис. 7.2). Через точки значений этих моментов проводят вертикали до пересечения с естественной характеристикой в точках  $a$  и  $b$ . Далее проводят через точки  $a$  и  $b$  прямую до пересечения с горизонтальной прямой при скольжении  $s=0$  (точка  $m$ ). Основываясь на свойстве механических характеристик асинхронного двигателя (прямые, проведенные через две точки на естественной или искусственной характеристике, соответствующие одним и тем же для различных характеристик двум произвольно выбранным моментам, пересекаются в одной точке, лежащей на горизонтальной прямой при  $s=0$ ), проводят соответствующие лучи через точку  $m$ .

С помощью формулы (3.50) определяют полные сопротивления фазы ротора для каждой искусственной характеристики

$$R_{\text{полн}} = R_2 + R_n = R_2 s_1 / s, \quad (7.1)$$

где  $s$  и  $s_1$  — скольжения на естественной и искусственной характеристиках при одном и том же значении момента.

На основании выражения (7.1) и рис. 7.2 имеем

$$R_{r1} = R_2 (kg/kb) - R_2 = R_2 (bg/kb);$$

$$R_{r2} = R_2 (kf/kb) - R_2 = R_2 (bf/kb);$$

$$R_{r3} = R_2 (ke/kb) - R_2 = R_2 (be/kb);$$

$$R_{n2} = R_2 (kd/kb) - R_2 = R_2 (bd/kb);$$

$$R_{n3} = R_2 (kc/kb) - R_2 = R_2 (bc/kb).$$

Сопротивления отдельных выключаемых ступеней будут:

$$r_{r1} = R_{r1} - R_{r2} = R_2 (fg/kb);$$

$$r_{r2} = R_{r2} - R_{n1} = R_2 (ef/kb);$$

$$r_{n1} = R_{n1} - R_{n2} = R_2 (de/kb);$$

$$r_{n2} = R_{n2} - R_{n3} = R_2 (cd/kb);$$

$$r_{n3} = R_{n3} = R_2 (bc/kb).$$

Выведение ступеней реостатов при пуске и торможении электродвигателей осуществляется автоматически. Ручное управление в этом случае затруднено, так как продолжительность работы электродвигателя на каждой ступени составляет обычно менее одной секунды. Автоматизация процессов пуска и торможения облегчает управление электроприводами, устраняет возможные ошибки при ручном управлении, повышает производительность рабочей машины, особенно при повторно-кратковременных режимах работы (шахтные подъемные машины, транспортные средства и пр.). Путем автоматического выключения ступеней реостатов в процессе пуска и торможения асинхронных двигателей с фазным ротором регулируется величина пускового момента в допустимых пределах (от  $M_1$  до  $M_2$ ).

Автоматизация процессов пуска и торможения электроприводов. Существуют различные способы автоматизации процессов пуска и торможения. Из рассмотрения пусковой диаграммы (рис. 7.3) асинхронного двигателя с фазным ротором видно, что выключение ступеней реостата должно осуществляться через промежутки времени ( $\Delta t_1$ ,  $\Delta t_2$ ,  $\Delta t_3$ ) при определенных моменты ( $M_2$ ) и угловой скорости двигателя ( $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$ ). Поэтому управление пуском двигателя может быть осуществлено либо в функции времени, либо тока, либо скорости. Очевидно, что автоматизацию процесса пуска можно осуществить также и в функции пути, и в функции ускорения. Наибольшее распространение на практике получили системы автоматизации в функции времени и тока.

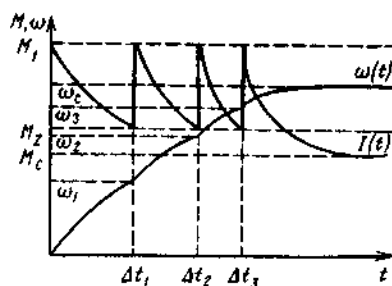
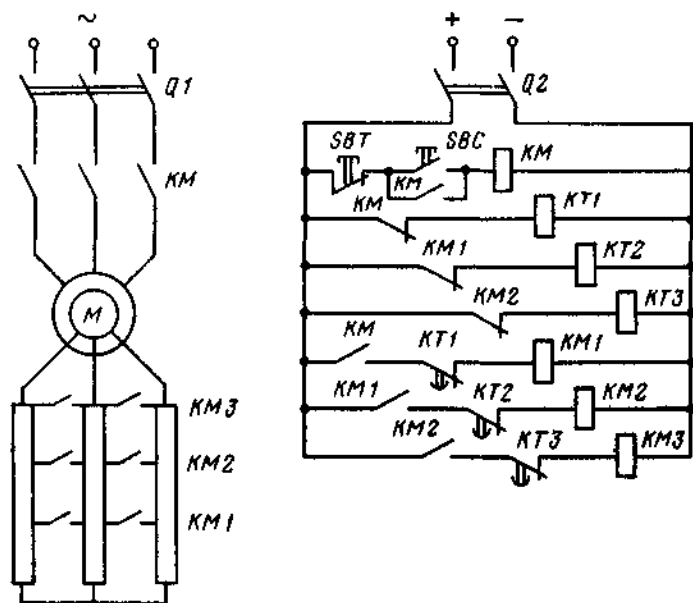


Рис. 7.3 Пусковая диаграмма асинхронного двигателя с фазным ротором

Рис. 7.4 Схема автоматического управления пуском асинхронного двигателя в функции времени



Автоматизация процесса пуска в функции времени производится с помощью какого-либо типа реле времени. Требуемую выдержку времени каждого реле определяют с помощью пусковой диаграммы (см. рис. 7.3). При этом необходимо учитывать время включения контакторов (выдержка реле времени равна разности времени пуска на каждой ступени и включения контактора).

Схема пуска двигателя переменного тока в функции времени с использованием электромагнитных реле времени показана на рис. 7.4.

При замыкании выключателя Q2 по катушкам электромагнитных реле времени  $KT1$ ,  $KT2$  и  $KT3$  начинает протекать ток.

При этом якоря реле притягиваются и размыкают свои контакты  $KT1$ ,  $KT2$  и  $KT3$  в цепях катушек контакторов  $KM1$ ,  $KM2$  и  $KM3$ . После включения  $Q1$  и нажатия на кнопку  $SBC$  срабатывает линейный контактор  $KM$ , который своими главными контактами включает двигатель, нормально закрытым блок-контактом размыкает цепь питания катушки первого реле времени  $KT1$  (реле начинает отсчитывать заданную выдержку времени), нормально открытыми контактами подготавливает цепь питания катушки контактора  $KM1$  и шунтирует кнопку  $SBC$ . Когда угловая скорость ротора двигателя достигает значения  $\omega_1$  (см. рис. 7.3) при моменте  $M_2$ , реле времени  $KT1$  (по истечении заданного промежутка времени  $\Delta t_1$ ) отпускает свой якорь и замыкает контактом  $KT1$  цепь катушки контактора  $KM1$ . Контактор  $KM1$  срабатывает и своими силовыми контактами  $KM1$  шунтирует первую ступень реостата  $r_{п1}$ . При этом нормально закрытый блок-контакт  $KM1$  размыкает цепь питания катушки второго реле времени  $KT2$ , а нормально открытый блок-контакт  $KM1$ , замыкаясь, подготавливает цепь питания катушки контактора  $KM2$ .

Через промежуток времени  $\Delta t_2$  при угловой скорости  $\omega_2$  отключается реле  $KT2$  и срабатывает контактор  $KM2$ , шунтируя вторую ступень реостата  $r_{п2}$ . И наконец, еще через промежуток времени  $\Delta t_3$  при угловой скорости  $\omega_3$  отключается реле  $KT3$  и срабатывает контактор  $KM3$ , шунтируя последнюю ступень реостата  $r_{п3}$ . Двигатель начинает работать на естественной характеристике. Его угловая скорость после завершения переходного процесса достигает значения  $\omega_c$  (см. рис. 7.3).

Выдержки времени реле  $\Delta t_1$ ,  $\Delta t_2$  и  $\Delta t_3$  определяются при расчете переходных процессов электропривода. Так как магнитная система реле при номинальном напряжении насыщена, то на величину выдержки времени изменение напряжения сети практически не влияет. При колебании напряжения сети соответственно изменяются момент и ток при пуске двигателя.

На выдержку реле времени не влияет изменение нагрузки и момента инерции системы. В этом случае изменяется только величина тока и момента. Увеличение момента инерции системы или момента сопротивления приводит к увеличению значений тока и момента при замыкании ступеней реостата, а их уменьшение вызывает снижение тока и момента двигателя.

Недостатком схемы является необходимость применения значительного количества аппаратов (контакторов и реле), что усложняет монтаж схемы, ее обслуживание в эксплуатации и снижает надежность в работе.

Достоинством схемы является безотказность при изменении условий работы сети и электропривода от расчетных и возможность применения однотипных реле времени. В этой схеме для защиты от чрезмерных токов в ряде случаев дополнительно

устанавливаются максимальные токовые реле. Такие схемы используют в приводе шахтных подъемных машин, роторных экскаваторов, ленточных конвейеров и т. д.

Пуск электроприводов с асинхронными короткозамкнутыми двигателями. Рассмотренный выше эффективный способ пуска асинхронных двигателей с фазным ротором неприменим для двигателей с короткозамкнутым ротором. Пуск этих двигателей осуществляется включением на полное или пониженное напряжение сети.

Для пуска двигателя при номинальном напряжении сети требуется только один пускатель, т. е. количество пусковой аппаратуры минимально. Однако это не всегда может быть применено ввиду больших пусковых токов двигателя. Поэтому каждый раз необходимо проверять возможность пуска двигателя при номинальном напряжении. Приблизительно считают, что условия пуска будут удовлетворительными, если мощность высоковольтного двигателя в киловаттах не превосходит 3 % мощности установившегося трехфазного короткого замыкания сети в киловольт-амперах и если мощность низковольтного двигателя в киловаттах при редких пусках не более 30 %, а при частых пусках не более 20 % мощности питающего трансформатора в киловольт-амперах. Если же двигатель получает питание от автономной электростанции соизмеримой мощности, то для обеспечения нормальных условий пуска считают, что мощность двигателя в киловаттах не должна быть более 10—12 % мощности генератора в киловольт-амперах.

В тех случаях, когда пуск асинхронных короткозамкнутых двигателей при номинальном напряжении невозможен, применяют пониженное напряжение, которое получают следующими способами: 1) переключением на время пуска обмотки статора двигателя со схемы «треугольник» на «звезду»; 2) включением в цепь обмотки статора реостата или реактора; 3) автотрансформаторами; 4) бесконтактными тиристорными пускателями; 5) преобразователями частоты.

Первый способ применим в тех случаях, если двигатель предназначен для работы со схемой «треугольник». В период пуска с помощью дополнительной аппаратуры двигатель включают со схемой «звезда». При этом к каждой фазе двигателя подводится напряжение в  $\sqrt{3}$  меньше, чем при схеме «треугольник». Поэтому пусковые ток в сети и момент двигателя снижаются в три раза. После окончания пуска обмотка статора двигателя автоматически переключается на схему «треугольник».

При втором способе пуска обычно во все три фазы включают реостаты или реакторы с одинаковым сопротивлением.

Расчет сопротивлений реостата  $R_p$  и реактора  $X_p$  выполняют следующим образом. Если необходимо уменьшить пусковой ток

в  $\alpha$  раз, то при неизменном напряжении сети полное сопротивление короткого замыкания  $Z_k$  необходимо увеличить также в  $\alpha$  раз. Так как для асинхронного двигателя

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + x_k^2},$$

где  $R_k = R_1 + R_2'$  — активное сопротивление короткого замыкания, то сопротивление  $Z_{k\alpha}$  при включении реостата

$$Z_{k\alpha} = \sqrt{(R_k + R_p)^2 + x_k^2},$$

или при включении реактора

$$Z_{k\alpha} = \sqrt{R_k^2 + (x_k + X_p)^2}.$$

Откуда получим

$$R_p = \sqrt{(Z_{k\alpha})^2 - x_k^2} - R_k, \quad (7.2)$$

или

$$X_p = \sqrt{(Z_{k\alpha})^2 - R_k^2} - x_k. \quad (7.3)$$

В (7.2) и (7.3) значения  $Z_k$ ,  $R_k$  и  $x_k$  определяют с помощью следующих выражений:  $Z_k = U_{ном}/\sqrt{3}I_n$ ;  $R_k = Z_k \cos \varphi_k$ ;  $x_k = Z_k \sin \varphi_k$ .

Если в каталоге не указан коэффициент мощности короткого замыкания  $\cos \varphi_k$ , то его можно принять равным  $0,4 \div 0,6$ . Поскольку у асинхронных двигателей существует квадратичная зависимость между моментом двигателя и напряжением сети, то при уменьшении пускового тока в  $\alpha$  раз пусковой момент уменьшится в  $\alpha^2$  раз, т. е.

$$M_{пк} = M_n/\alpha^2,$$

где  $M_{пк}$  — пусковой момент при включении реостатов или реакторов.

Третий способ пуска состоит в том, что обмотка статора короткозамкнутого двигателя подключается к сети через пусковой автотрансформатор, понижающий напряжение до необходимой величины. Автотрансформаторы выпускаются промышленностью на вторичные напряжения, составляющие от номинального 25, 35, 45, 55, 65 и 75 %.

При снижении автотрансформатором напряжения в  $\alpha$  раз во столько же раз уменьшается ток в обмотке статора двигателя. Пусковой момент двигателя и пусковой ток в сети при этом снижаются в  $\alpha^2$  раз. Таким образом, если требуется уменьшить пусковой момент в  $k$  раз, то необходимо выбирать автотрансформатор с коэффициентом трансформации  $\tau = \sqrt{k}$ . При этом пусковой ток в обмотке двигателя уменьшится в  $\sqrt{k}$  раз, а в сети — в  $k$  раз.



Четвертый способ пуска состоит в том, что в цепь статора двигателя взамен обычного пускателя включают бесконтактный пускатель, состоящий из трех тириستоров и трех диодов. За счет изменения угла регулирования тиристоров величина напряжения изменяется бесступенчато от нуля до значения напряжения сети. При этом обеспечивается плавный пуск короткозамкнутого асинхронного двигателя с заданным пусковым током. Одновременно по сравнению с магнитными пускателями эти имеют следующие преимущества: отсутствие коммутирующих контактов, высокое быстродействие, большой срок службы, возможность большого числа включений в час и пр.

Пятый способ пуска рассмотрен в разд. 7.3.

Ввиду неудовлетворительных пусковых свойств асинхронных короткозамкнутых двигателей нормального исполнения для привода шахтных забойных машин отечественными электромашиностроительными заводами выпущен ряд серий короткозамкнутых двигателей специального исполнения с глубоким пазом или двойной клеткой в роторе.

Такого типа двигатели за счет повышенного активного сопротивления ротора в период пуска имеют значительно больший начальный пусковой момент и меньший пусковой ток, чем двигатели обычного исполнения. Увеличение активного сопротивления обмотки ротора с глубоким пазом обусловлено явлением вытеснения тока проводника в области, расположенные ближе к воздушному зазору. В электродвигателях с двойной клеткой ток вытесняется во внешнюю клетку, которая имеет более высокое активное сопротивление, чем внутренняя. Вытеснение тока в данном случае вызвано различной величиной индуктивного сопротивления проводника по его высоте в период пуска, когда частота тока ротора значительно больше, чем после завершения процесса пуска и выхода двигателя в установившийся режим работы.

Пуск электроприводов с синхронными двигателями. Благодаря своей конструкции синхронный двигатель не способен самостоятельно разогнаться за счет основного движущего момента, действующего при синхронной скорости ротора. Поэтому он нуждается во вспомогательных средствах, которые обеспечивают разгон до скорости, близкой к синхронной.

Синхронные двигатели малой мощности при прямом включении обмотки статора в сеть разгоняются за счет пускового момента, возникающего от вихревых токов, наводимых вращающимся полем статора в полюсных наконечниках ротора. Создаваемый таким образом пусковой момент очень мал и обеспечивает разгон только маломощных двигателей без нагрузки. Для более мощных двигателей этот момент недостаточен для разгона даже вхолостую. Поэтому большинство выпускаемых

в настоящее время синхронных двигателей имеет специально выполненную короткозамкнутую пусковую обмотку в роторе. Такие двигатели пускаются как асинхронные. На период пуска обмотка возбуждения двигателя должна быть отключена от источника постоянного тока и замкнута на реостат, величина сопротивления которого должна превышать собственное активное сопротивление обмотки возбуждения в 8—10 раз. Замыкание обмотки возбуждения накоротко в этом случае недопустимо, так как вследствие наведенной в ней э. д. с. за счет вращающегося поля статора в этой обмотке будет протекать значительный ток, вызывающий снижение момента двигателя при скорости, близкой к полусинхронной. Если при этом момент сопротивления будет значительным, то может возникнуть установившийся асинхронный режим работы с указанной скоростью и разгон до требуемой скорости не будет завершен. Пуск с разомкнутой обмоткой возбуждения приводит к возникновению высокого напряжения на ее зажимах, что может вызвать перенапряжение между витками обмотки и пробой изоляции, а также создать опасность для обслуживающего персонала.

После того как скорость двигателя в процессе разгона достигнет примерно 95—98 % синхронной, обмотка возбуждения подключается к источнику постоянного тока. Ввиду взаимодействия вращающегося поля статора и поля ротора двигатель входит в синхронный режим. Если обмотка возбуждения подключается к источнику постоянного тока при скорости меньше 95 % синхронной, то двигатель не может войти в синхронный режим. Поэтому синхронный двигатель с помощью пусковой обмотки должен развивать при скорости 95—98 % синхронный момент несколько больше момента сопротивления при этой скорости. Момент двигателя, при котором он входит в синхронный режим, называется входным или подсинхронным.

Таким образом, работа синхронного двигателя характеризуется тремя моментами: пусковым моментом при скорости, равной нулю; входным моментом при скорости, равной 95 % синхронной; максимальным моментом, соответствующим максимальной мощности двигателя при синхронной скорости и номинальных напряжении сети и токе возбуждения.

При выборе типа синхронного двигателя для привода конкретной рабочей машины необходимо согласовывать пусковую характеристику двигателя с механической характеристикой рабочей машины. Например, для приводов вентиляторных и водотливных установок, имеющих момент сопротивления, который нарастает пропорционально квадрату скорости, входной момент должен быть больше момента  $M_c$  при  $\omega = 0,95 \omega_0$ .

Асинхронный пуск синхронных двигателей производят как от номинального, так и пониженного напряжения сети. Пуск при

пониженном напряжении осуществляют для уменьшения пускового тока и связанного с ним падения напряжения в сети. Ограничение пускового тока также необходимо для снижения динамических нагрузок в обмотках и их нагрева. Уменьшение напряжения достигают либо включением в цепь статора реактора, либо с помощью автотрансформатора.

Ввиду высоких технико-экономических показателей эксплуатации синхронных двигателей, особенно при значительных мощностях электроприводов, эти двигатели находят широкое распространение в различных отраслях промышленности, в том числе и в горной. Поэтому разработаны новые, более простые способы пуска синхронных двигателей. Созданы специальные конструкции синхронных двигателей, у которых ротор снабжен когтеобразными выступами, а обмотка возбуждения расположена на неподвижной части двигателя. Такая конструкция синхронного двигателя исключает необходимость в контактной системе возбуждения — кольцевом токощетнике.

Таким образом, простота, отсутствие искрящих частей и надежность современных конструкций синхронных двигателей при высоких экономических показателях позволяют более широко применять их в приводе горных машин. В ряде случаев синхронные двигатели могут оказаться конкурентоспособными с асинхронными короткозамкнутыми двигателями.

Понятие о динамике пуска и торможения электроприводов. Известно, что в любой рабочей машине имеют место кинематические зазоры между отдельными звеньями механизма или слабина канатов, цепей и пр. Наличие слабину, зазоров, а также упругих элементов вызывает при пуске и торможении электроприводов значительные механические напряжения в частях машин. Часто эти напряжения достигают высоких значений, при которых происходит выход из строя той или иной части механизма. Процессы, происходящие при этом, очень сложны, носят колебательный характер. Эти вопросы требуют специального рассмотрения. Здесь же следует отметить, что снижение динамических нагрузок в элементах привода и исполнительного органа рабочей машины при пуске и торможении достигают на практике за счет уменьшения приведенного кинематического зазора механизма и начального пускового момента электродвигателя.

Начальная величина приведенного кинематического зазора определяется технологией изготовления машин и с увеличением срока эксплуатации ввиду износа возрастает. Поэтому наиболее эффективным способом уменьшения механических напряжений является искусственное понижение начального момента двигателя до значений, меньших момента сопротивления, примерно  $(0,3 \div 0,5) M_c$ . Такой момент двигателя называется предварительным. При включении двигателя с предварительным моментом

выбирают только кинематический зазор и слабины в гибких элементах установки. При этом исполнительный орган рабочей машины остается неподвижным. Поэтому при дальнейшем увеличении момента двигателя и возрастании скорости механизма отсутствуют значительные перегрузки.

Ступень с предварительным моментом предусматривается в электроприводе шахтных подъемных машин с асинхронным фазным двигателем за счет введения в цепь ротора реостата со значительным сопротивлением.

У электроприводов постоянного тока момент двигателя при пуске возрастает плавно от нуля до максимального значения во времени. При таком пуске удары отсутствуют. Ступень двигателя с предварительным моментом в таких случаях не требуется.

## 7.2. РЕГУЛИРОВАНИЕ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Из уравнения электромеханической характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения (3.4) следует, что возможны три способа регулирования его угловой скорости: 1) регулирование за счет изменения величины сопротивления реостата в цепи якоря  $R_p$ ; 2) регулирование за счет изменения потока возбуждения двигателя  $\Phi$ ; 3) регулирование за счет изменения подводимого к обмотке якоря двигателя напряжения  $U$ . Ток в цепи якоря  $I_a$  и момент  $M$ , развиваемый двигателем, зависят только от величины нагрузки на его валу.

Рассмотрим первый способ регулирования скорости изменением сопротивления в цепи якоря. Схема включения двигателя для этого случая при условии, что  $U = \text{const}$  и  $I_b = \text{const}$ , представлена на рис. 3.5, а электромеханические и механические характеристики — на рис. 3.7, а. Изменяя сопротивление реостата в цепи якоря  $R_p$ , можно получить при номинальной нагрузке различные угловые скорости электродвигателя на искусственных характеристиках —  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ . Угловую скорость на искусственной характеристике рассчитывают с помощью выражения (3.14). Если же задана угловая скорость, то сопротивление реостата можно определить с помощью уравнения (3.14), решив его относительно  $R_p$ :

$$R_p = (\omega_{\text{ном}} - \omega_k) (U_{\text{ном}} - I_{a, \text{ном}} R_a) / \omega_{\text{ном}} I_{a, \text{ном}}.$$

Проведем анализ данного способа регулирования угловой скорости с помощью основных технико-экономических показателей. Так как при данном способе регулирования изменяется жесткость характеристик в широких пределах, то при скоростях менее половины номинальной стабильность работы двига-

теля резко ухудшается. По этой причине диапазон регулирования скорости ограничен ( $D=2\div 3$ ).

Скорость при данном способе можно регулировать в сторону уменьшения от основной, о чем свидетельствуют электро-механические и механические характеристики (см. рис. 3.7, а). Высокую плавность регулирования трудно обеспечить, так как потребовалось бы значительное количество ступеней регулирования и соответственно большое число контакторов. Полное использование двигателя по току (нагреву) в этом случае достигается при регулировании с постоянным моментом нагрузки.

Недостатком рассматриваемого способа является наличие значительных потерь мощности при регулировании, которые пропорциональны относительному изменению угловой скорости. Достоинством рассмотренного способа регулирования угловой скорости являются простота и надежность схемы управления.

Учитывая большие потери в реостате при малых скоростях, данный способ регулирования скорости применяется для приводов с кратковременным и повторно-кратковременным режимами работы.

При втором способе регулирование угловой скорости двигателей постоянного тока независимого возбуждения осуществляется изменением величины магнитного потока за счет введения в цепь обмотки возбуждения дополнительного реостата  $R_{\text{в}}$ . Согласно формулам (3.4) и (3.6), при ослаблении потока угловая скорость двигателя как при нагрузке, так и при холостом ходе возрастает, а при усилении потока — уменьшается. Практически возможно изменение скорости только в сторону увеличения ввиду насыщения двигателя.

При увеличении скорости ослаблением потока допустимый момент двигателя изменяется по закону гиперболы, а мощность остается постоянной. Диапазон регулирования скорости для данного способа  $D=2\div 4$ .

Электро-механические и механические характеристики для различных значений потока двигателя приведены на рис. 3.8, а и 3.8, б, из которых видно, что характеристики в пределах номинального тока имеют высокую степень жесткости.

Обмотки возбуждения двигателей постоянного тока независимого возбуждения обладают значительной индуктивностью. Поэтому при ступенчатом изменении сопротивления реостата в цепи обмотки возбуждения ток, а следовательно, и поток будут изменяться по экспоненциальному закону. В связи с этим регулирование угловой скорости будет осуществляться плавно.

Существенными преимуществами данного способа регулирования скорости являются его простота и высокая экономичность.

Данный способ регулирования используют в приводах в качестве вспомогательного, обеспечивающего повышение скорости при холостом ходе механизма.

Третий способ регулирования скорости заключается в изменении напряжения, подводимого к обмотке якоря двигателя. Электромеханические и механические регулировочные характеристики при  $R = \text{const}$ ,  $\Phi = \text{const}$  и  $U = \text{var}$  совпадают по форме и показаны на рис. 3.7, б. Угловая скорость двигателя независимо от нагрузки изменяется прямо пропорционально напряжению, подводимому к якорю. Поскольку все регулировочные характеристики являются жесткими, а степень их жесткости остается для всех характеристик неизменной, работа двигателя является стабильной на всех угловых скоростях и, следовательно, обеспечивается широкий диапазон регулирования скорости независимо от нагрузки.

Этот диапазон равен 10 и может быть расширен за счет специальных схем управления.

При данном способе угловую скорость можно уменьшать и увеличивать относительно основной. Повышение скорости ограничено возможностями источника энергии с регулируемым напряжением и  $U_{\text{ном}}$  двигателя.

Если источник энергии обеспечивает возможность непрерывного изменения подводимого к двигателю напряжения, то регулирование скорости двигателя будет плавным.

Данный способ регулирования является экономичным, так как регулирование угловой скорости осуществляется без дополнительных потерь мощности в силовой цепи якоря. Рассмотрим регулирование скорости при постоянной нагрузке.

Заменим полезную мощность через момент и угловую скорость, а затраченную мощность — через напряжение и ток. Тогда получим

$$\eta = P_2/P_1 = M\omega/I_\alpha U.$$

С учетом выражений (3.1) и (3.2) будем иметь

$$\eta = \frac{M\omega}{k\Phi\omega I_\alpha + I_\alpha^2 R}.$$

Поэтому при  $\Phi = \text{const}$ ,  $M = \text{const}$  и  $I_\alpha = \text{const}$  при уменьшении угловой скорости  $\omega$  к. п. д. двигателя будет уменьшаться незначительно. Расчеты показывают, что при снижении скорости в 10 раз к. п. д. двигателя уменьшается примерно на 15 %.

Таким образом, по всем перечисленным выше показателям данный способ регулирования по сравнению с первым и вторым наилучший.

Недостатком этого способа является необходимость наличия

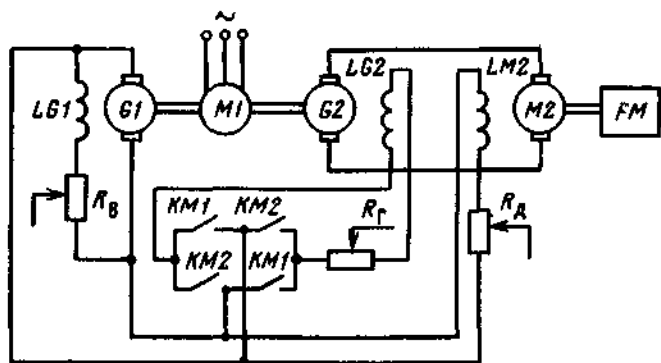


Рис. 7.5. Схема электропривода по системе Г—Д

индивидуального источника электроэнергии постоянного тока с регулируемым выходным напряжением. Поэтому по капитальным затратам этот способ хуже первых двух.

Рассмотрим применяемые в горной промышленности (экскаваторы, драги, подъемные машины) системы электропривода постоянного тока, в которых использован способ регулирования угловой скорости двигателя изменением подводимого к якорю напряжения. К таким электроприводам относится прежде всего система генератор—двигатель (Г—Д). На рис. 7.5 представлена упрощенная схема системы Г—Д. В качестве преобразователя электроэнергии и регулятора напряжения в этой системе применяется генератор постоянного тока  $G2$ , приводимый во вращение первичным двигателем переменного тока  $M1$ . В качестве первичного двигателя обычно используются либо асинхронные короткозамкнутые двигатели для средних мощностей, либо синхронные двигатели для больших мощностей. На одном валу с первичным двигателем  $M1$  и генератором  $G2$  находится возбудитель  $G1$ , представляющий собой генератор постоянного тока с самовозбуждением и обеспечивающий питание обмоток возбуждения генератора  $G2$  и двигателя  $M2$ . Обмотка якоря двигателя  $M2$  соединена непосредственно без пусковых или регулировочных реостатов с обмоткой якоря генератора  $G2$ .

Система Г—Д в рассмотренном виде обеспечивает диапазон регулирования угловой скорости двигателя, равный 10, за счет изменения напряжения генератора. За счет уменьшения тока возбуждения двигателя может быть достигнут диапазон регулирования скорости 3. Таким образом, за счет двух способов регулирования система Г—Д обеспечивает диапазон, равный 30.

Несмотря на то, что регулирование в системе Г—Д осуществляется без потерь мощности в реостатах, все же общий к. п. д. ее ввиду трехкратного преобразования энергии в первичном двигателе, генераторе и двигателе при любых скоростях и длительности регулирования составляет примерно  $0,7 \div 0,75$ .

Обладая достоинствами, система Г—Д в то же время требует значительных капитальных затрат, имеет большую массу и габариты электрооборудования, так как суммарная установленная мощность машин в системе Г—Д составляет более 300 %, если принять мощность приводного двигателя за 100 %.

Поэтому система Г—Д применяется для приводов средней и большой мощности, требующих широкого диапазона регулирования скорости, плавности пуска и большой частоты включений. В горной промышленности система Г—Д находит применение в приводе мощных шахтных подъемных машин, экскаваторов, драг.

Отмеченные выше недостатки системы Г—Д в основном устраняются при питании двигателя постоянного тока независимого возбуждения через управляемые выпрямители.

На рис. 7.6 приведена принципиальная схема управления двигателем постоянного тока  $M$  по системе управляемый выпрямитель—двигатель (УВ—Д). Тиристорный выпрямитель  $UD$  состоит из шести тиристоров, включенных по трехфазной мостовой схеме, и подключается к сети переменного тока контактором  $KM$ . Изменение направления вращения двигателя осуществляется контакторами  $KM1$  и  $KM2$ . Для того чтобы устранить из схемы эти контакторы и осуществлять изменение направления вращения двигателя бесконтактным путем, а также обеспечить быстрый переход в тормозные режимы, в схему необходимо включать двойной комплект тиристорных выпрямителей, уравнивательные дроссели. Это приводит к существенному усложнению схемы.

Для формирования требуемых управляющих импульсов напряжения для тиристоров схема снабжается блоком управления БУ (см. рис. 7.6). Дроссель  $L$  предназначен для сглаживания пульсаций тока в цепи якоря двигателя. Выходное напряжение преобразователя регулируется за счет изменения угла регулирования тиристоров. Механические характеристики системы УВ—Д при различных углах регулирования  $\alpha$  приведены на рис. 7.7.

Так как тиристор является безынерционным прибором, то тиристорное управление является наиболее гибким и позволяет с помощью сигналов малых мощностей бесконтактной аппаратуры формировать как в установившихся режимах, так и при переходных процессах требуемые характеристики двигателей. В тех электроприводах, где не используется это преимущество тиристорного управления, оно является предпочтительным



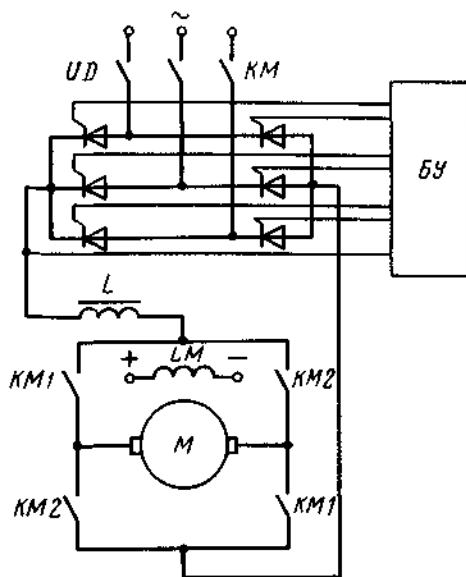
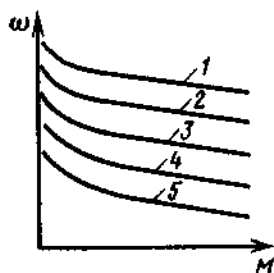


Рис. 7.6 Схема электропривода по системе УВ — Д

Рис. 7.7. Механические характеристики системы УВ—Д:  
1 —  $\alpha_1$ , 2 —  $\alpha_2$ , 3 —  $\alpha_3$ , 4 —  $\alpha_4$ , 5 —  $\alpha_5$   
при  $\alpha_5 > \alpha_4 > \alpha_3 > \alpha_2 > \alpha_1$



в силу других известных свойств: экономии электроэнергии, постоянной готовности к работе, надежности, бесшумности, облегчения обслуживания и пр.

Пуск двигателя осуществляется плавным изменением (увеличением) напряжения на выходе управляемого выпрямителя (изменением угла регулирования тиристоров). Такое регулирование обычно осуществляется автоматически и обеспечивает заданное значение пускового тока и пускового момента двигателя.

Недостатком тиристорного управления является низкий коэффициент мощности при регулировании угловой скорости двигателя.

Уравнение электромеханической характеристики (3.4) для всех типов двигателей постоянного тока является общим. Поэтому для двигателя последовательного возбуждения возможны те же три способа регулирования угловой скорости, что и для двигателя независимого возбуждения. Схема включения двигателя последовательного возбуждения при регулировании скорости введением реостата в цепь якоря приведена на рис. 3.14.

При этом способе регулирования скорость можно только уменьшать относительно основной, что следует из рассмотрения регулировочных характеристик двигателя (см. рис. 3.16, а). Естественные характеристики этих двигателей являются мягкими, а при введении реостата в цепь якоря они становятся еще мягче. Поэтому при малых скоростях и малых нагрузках

работа двигателя становится неустойчивой, а диапазон регулирования скорости составляет  $2 \div 3$ . При данном способе регулирования в реостате, так же как и в случае двигателя независимого возбуждения, возникают значительные потери мощности, пропорциональные относительному изменению скорости.

Несмотря на значительные потери мощности, благодаря своей простоте этот способ регулирования угловой скорости двигателей широко применяется в электровозной тяге и крановых установках.

Поскольку у рассматриваемого типа двигателя обмотки возбуждения и якоря соединены последовательно, регулирование угловой скорости изменением потока возбуждения машины осложнено и применяется редко.

Регулирование угловой скорости двигателя постоянного тока последовательного возбуждения изменением подводимого напряжения может быть осуществлено как с помощью отдельного регулируемого источника постоянного тока, так и последовательно-параллельным включением двигателей при условии, что привод является многодвигательным. Регулирование с помощью отдельного источника постоянного тока применяется очень редко. Этот способ находит применение в горной промышленности в электровозной тяге и вообще в гражданском и промышленном транспорте. Этот способ применяется обычно в сочетании со способом регулирования угловой скорости изменением сопротивления, вводимого в цепь якоря реостата.

Регулирование угловой скорости двигателей постоянного тока смешанного возбуждения осуществляется теми же способами, что и для двигателей независимого и последовательного возбуждения.

### **7.3. РЕГУЛИРОВАНИЕ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВодОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

В соответствии с формулами (3.26) и (3.27) имеем  $\omega = (2\pi f/p)(1-s)$ , откуда видно, что все способы регулирования угловой скорости асинхронных электроприводов можно разделить на две основные группы. К первой группе относятся способы регулирования скорости, при которых изменяется угловая скорость вращающегося поля статора двигателя. Это получают изменением частоты тока питающей сети  $f$  (частотное регулирование) или числа пар полюсов двигателя  $p$ .

Ко второй группе относятся способы, при которых изменяется величина скольжения двигателя  $s$ . Это получают введением в цепь ротора или статора двигателя реостатов или катушек индуктивностей или в цепь ротора внешней противо — э. д. с., изменением напряжения, подводимого к статору двигателя.

Исходя из конструктивных особенностей асинхронных двигателей, способ регулирования изменением числа пар полюсов применяется только для короткозамкнутых двигателей, а способы введением в цепь ротора реостатов, катушек индуктивности и противо-э. д. с. применяются только для двигателей с фазным ротором. При частотном регулировании более целесообразным является использование короткозамкнутых двигателей, которые по сравнению с двигателями с фазным ротором проще, надежнее и не имеют токосъемных колец и щеток.

Способ регулирования скорости асинхронных двигателей с фазным ротором введением реостатов в цепь ротора по сравнению с другими способами является наиболее простым. Поэтому данный способ широко применяют как в горной, так и в других отраслях промышленности.

Из механических регулировочных характеристик при введении в цепь ротора реостатов (см. рис. 3.27, а) видно, что жесткость характеристик по мере уменьшения скорости значительно снижается. В связи с этим широкий диапазон регулирования скорости не обеспечивается. Стабильное регулирование скорости находится в диапазоне 3. При снижении нагрузки диапазон регулирования скорости уменьшается. При холостом ходе регулирование скорости невозможно. При нагрузке регулирование возможно только в сторону уменьшения скорости. Плавность регулирования зависит от количества ступеней реостата. В случае применения жидкостного реостата возможно бесступенчатое регулирование. Существенным недостатком этого способа регулирования, так же как и для двигателей постоянного тока, являются значительные потери мощности в роторной цепи, которые пропорциональны скольжению. Поэтому наиболее благоприятным является регулирование скорости при вентиляторном моменте нагрузки. Регулирование скорости при постоянном моменте и длительной работе на пониженных скоростях является неэкономичным и поэтому не применяется.

Данный способ регулирования применяется в приводах малой и средней мощности, когда требуется кратковременное снижение скорости. В горной промышленности этот способ используется в приводах шахтных подъемных машин, уклонных лебедок, крановых установок.

Способы регулирования угловой скорости асинхронных двигателей введением реостатов в цепь статора, катушек индуктивностей в цепь статора или ротора и изменением напряжения без введения обратных связей не применяются, так как при этом обеспечивается крайне ограниченный диапазон регулирования скорости (см. рис. 3.27, б; 3.25, а).

Регулирование угловой скорости асинхронных двигателей введением в цепь ротора внешней противо — э. д. с. можно осуществить с помощью каскадных схем включения асинхронных

двигателей с фазным ротором. Несмотря на большое разнообразие таких схем, все они отличаются тем, что энергия скольжения ротора не расходуется на нагрев реостата, а возвращается или на вал регулируемого двигателя (электромеханический каскад), или за вычетом потерь в промежуточных элементах возвращается в сеть (электрический каскад), благодаря чему обеспечивается высокий к. п. д. привода.

В большинстве каскадных схем энергия скольжения преобразуется сначала в энергию постоянного тока с помощью либо машинных преобразователей (электромашинные каскады), либо статических преобразователей (вентильно-машинные каскады).

В последнее время электрические вентильно-машинные каскады вытесняются асинхронно-вентильными каскадами, которые являются наиболее перспективными, так как не имеют дополнительных вращающихся машин.

Наиболее целесообразной областью применения асинхронно-вентильного каскада является электропривод горных машин с вентиляторной нагрузкой. Возможно его применение в приводе ленточных конвейеров и подъемных машин.

Регулирование угловой скорости асинхронных двигателей иногда достигается созданием систем привода, состоящих из двух электрических машин. К таким системам относятся двухдвигательный привод и электропривод с асинхронной муфтой скольжения.

Двухдвигательный привод состоит из двух двигателей, работающих совместно на один вал, и применяется с целью получения от асинхронных двигателей устойчивых низких скоростей в подъемно-транспортных механизмах. В частности, в горной промышленности такой привод находит применение в рудничном подъеме.

Обычно двигатели при этом находятся в различных режимах: один работает в двигательном, другой — в тормозном, чаще в режиме динамического торможения. Результирующая механическая характеристика представляет собой алгебраическую сумму механических характеристик двигательного режима и тормозного. В цепь ротора при этом, как правило, включаются реостаты. Этот способ является весьма неэкономичным и применяется только для кратковременного снижения скорости.

Из уравнения (3.27) видно, что угловую скорость асинхронного двигателя можно регулировать изменением числа пар полюсов, причем чем больше число пар полюсов, тем меньше синхронная скорость. Применяются двух-, трех- и четырехскоростные двигатели, которые конструктивно выполняются так, что изменение числа пар полюсов осуществляется переключением схемы соединения статорной обмотки. Многоскоростные двигатели выполняют с короткозамкнутым ротором. В этом случае

при изменении числа пар полюсов статора в обмотке ротора автоматически устанавливается требуемое число пар полюсов. У двигателей с фазным ротором потребовалось бы переключение как обмоток статора, так и обмоток ротора.

Для четырехскоростных двигателей можно получить следующие синхронные частоты вращения (об/мин): 3000/1500/1000/500; 3000/1500/750/375; 1500/1000/750/500; 1000/750/500/375. Поэтому диапазон регулирования достигает 8. При этом регулирование скорости является ступенчатым, т. е. плавность перехода с одной ступени на другую не обеспечивается. Вместе с тем данный способ является весьма экономичным, а механические характеристики в рабочей части обладают достаточной жесткостью.

Частотное регулирование скорости асинхронных короткозамкнутых двигателей является наиболее перспективным в горной промышленности. Это объясняется преимуществами применения короткозамкнутых двигателей по сравнению с электродвигателями других типов, а также высокими технико-экономическими показателями этого способа регулирования.

Так как для управления двигателем применяется регулирование частоты, которую можно плавно изменять в широких пределах, то обеспечивается широкий диапазон регулирования угловой скорости. Регулирование в данном случае осуществляется без потерь энергии скольжения ротора, поэтому способ является экономичным. Механические характеристики (см. рис. 3.25, б и 3.26) в данном случае жесткие в рабочей части, поэтому обеспечивается высокая стабильность работы двигателя на заданной скорости.

При частотном регулировании обычно регулируется еще и подводимое к двигателю напряжение (см. рис. 3.26). В качестве преобразователей частоты применяются как электромашины, так и статические.

Электропривод с электромашинами преобразователями частоты по сложности и громоздкости превосходит привод по системе Г—Д, поэтому не находит применения в горной промышленности. Статические преобразователи частоты, состоящие из полупроводниковых вентилей (тиристоров и диодов), обладают рядом преимуществ по сравнению с электромашинами: имеют меньшие габариты и массу, более высокий к. п. д., не имеют вращающихся частей, не требуют фундамента для установки, бесшумны, обладают более высоким быстродействием. Поэтому их применение в горной промышленности для регулируемых приводов шахтных и карьерных горных машин является в перспективе наиболее целесообразным. Следует отметить, что применение частотного способа регулирования асинхронного короткозамкнутого двигателя необходимо не только для регулирования скорости. При этом будет обеспечен также и плавный, без

потерь энергии скольжения, пуск электропривода при значительно меньших пиковых значениях тока, потребляемого из сети. Последнее обстоятельство имеет особо важное значение для забойных горных машин, работающих с частыми пусками, перегрузками и имеющих для питания электродвигателя кабели различной длины. В настоящее время шахтные забойные машины, снабженные нерегулируемым электроприводом с короткозамкнутым двигателем, находятся в исключительно тяжелых условиях, так как обеспечение нормальных условий электроснабжения (поддержание постоянного напряжения на зажимах двигателя на заданном уровне) крайне затруднено. При включении двигателя значительный пусковой ток создает уменьшение напряжения на зажимах двигателя на 20—30 % номинального. Это приводит к уменьшению пускового момента двигателя на 35—50 % и резкому снижению в итоге производительности машин.

Статические преобразователи частоты делят на две основные группы: 1) с непосредственной связью и 2) с промежуточным звеном постоянного тока. Во втором случае вначале производится преобразование переменного тока промышленной частоты в постоянный ток (выпрямление), а затем постоянный ток преобразуется в переменный ток регулируемых частоты и напряжения (инвертирование). В первом же случае функции выпрямления и инвертирования выполняются одновременно.

Достоинствами преобразователей с непосредственной связью являются: отсутствие коммутирующих конденсаторов, однократное преобразование энергии (к. п. д. примерно 0,98), свободный обмен реактивной и активной энергией из сети к двигателю и обратно, возможность независимого регулирования амплитуды напряжения на выходе от частоты. К недостаткам этих преобразователей относятся: ограниченные пределы регулирования выходной частоты (до 50 % частоты сети), сниженный коэффициент мощности (примерно 0,8), большое число силовых вентилях и сложная схема управления ими. Такие преобразователи находят ограниченное применение.

Наибольшее применение в промышленности, а в перспективе в горной промышленности, может иметь преобразователь частоты с промежуточным звеном постоянного тока. К достоинствам таких преобразователей следует отнести возможность регулирования частоты как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения сетевой частоты, значительное быстродействие, высокий к. п. д. (до 0,96), бесшумность в работе и высокая надежность.

Структурная схема такого преобразователя приведена на рис. 7.8 [13]. Преобразователь состоит из двух силовых элементов — управляемого выпрямителя  $УВ$  и автономного инвер-

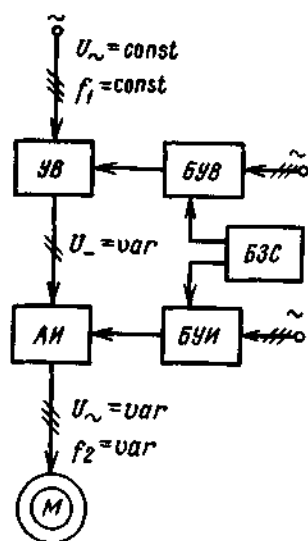


Рис. 7.8. Структурная схема электропривода по системе ПЧ—Д с преобразователем частоты, имеющим звено постоянного тока

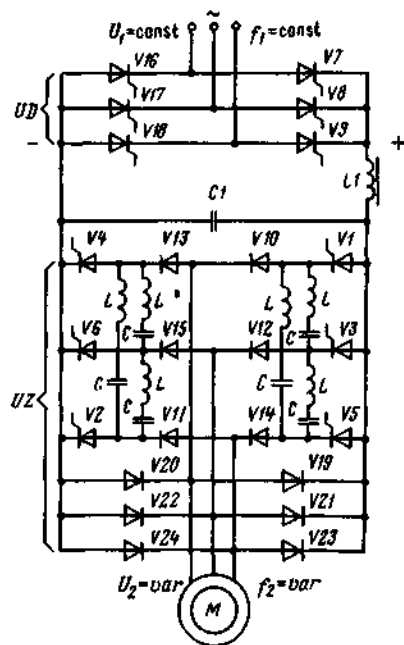


Рис. 7.9. Принципиальная схема силовой части преобразователя частоты со звеном постоянного тока и АИИ

тора **АИ**. На вход **УВ** подается нерегулируемое напряжение переменного тока промышленной частоты. С выхода **УВ** регулируемое напряжение постоянного тока подается на инвертор **АИ**, в котором за счет открывания и закрывания тиристоров с определенной частотой, скважностью (отношение длительности периода следования импульсов к длительности импульса) и очередностью напряжение постоянного тока преобразуется в напряжение переменного тока регулируемой амплитуды и частоты. Кроме того, преобразователь содержит систему управления, состоящую из блока управления выпрямителем **БУВ** и блока управления инвертором **БУИ**. В такой схеме осуществляется раздельное регулирование амплитуды и частоты выходного напряжения.

Это позволяет с помощью блока задания скорости **БЗС** осуществлять требуемое соотношение между действующим значением напряжения и частотой на зажимах асинхронного двигателя **М**.

Принципиальная схема силовой части преобразователя частоты с промежуточным звеном постоянного тока показана на рис. 7.9 [13].

В качестве управляемого выпрямителя  $UD$  применяется шесть тиристоров ( $V7, V8, V9, V16, V17, V18$ ), которые включены по трехфазной мостовой схеме для получения выпрямленного напряжения, среднее значение которого регулируется за счет изменения угла включения тиристоров. Пульсации постоянного тока сглаживаются катушкой индуктивности  $LI$  и конденсатором  $CI$ .

Автономный инвертор напряжения  $UZ$  (см. рис. 7.9) состоит из шести тиристоров ( $V1—V6$ ), шести диодов ( $V10—V15$ ), которые включены последовательно с тиристорами, шести диодов ( $V19—V24$ ), включенных по трехфазной мостовой схеме, и шести колебательных контуров  $LC$ .

Преобразование напряжения постоянного тока в трехфазное переменного тока осуществляется коммутацией тиристоров  $V1—V6$  в определенной последовательности. Время открытого состояния каждого тиристора составляет  $\frac{2}{3}$  полупериода выходного напряжения. Последовательность включения тиристоров соответствует их нумерации по схеме, т. е. вначале включается  $V1$ , через  $60^\circ$  включается  $V2$  и т. д. до  $V6$ . После  $V6$  вновь включается  $V1$  и т. д. через каждую  $\frac{1}{6}$  периода выходного напряжения. В каждый момент времени вне коммутации открыты одновременно два тиристора. Включение тиристорov осуществляется подачей положительного импульса на управляющий электрод от БУИ. Для выключения тиристорov необходимо токи, протекающие через них, довести до нуля. Это достигается с помощью коммутирующих контуров  $LC$ . Так, например, при включении  $V3$  через ранее открытый  $V1$  происходит разряд конденсатора  $C$  и  $V1$  закрывается.

Выходное напряжение при активной нагрузке имеет ступенчатую форму, и длительность каждой ступени соответствует  $\frac{1}{6}$  периода выходного напряжения. При питании от преобразователя асинхронного двигателя форма выходного напряжения искажается и зависит от коэффициента мощности, который определяется нагрузкой на валу двигателя.

Диоды  $V10—V15$  служат для отделения коммутирующих конденсаторов от нагрузки, что дает возможность существенно снизить их емкость по сравнению с обычным параллельным инвертором. Через мост  $V19—V24$  реактивная энергия двигателя возвращается конденсатору  $CI$ . Напряжение на выходе инвертора регулируется управляемым выпрямителем, а частота — изменением частоты подачи импульсов на тиристоры. Механические характеристики при частотном управлении асинхронного двигателя и  $U/f = \text{const}$  приведены на рис. 3.26.

Электротехнической промышленностью освоен выпуск пре-



образователей частоты серии ЭКТ2 мощностью до 264 кВт·А и серии ПЧТ мощностью до 528 кВт·А.

Для синхронных двигателей возможен один способ регулирования угловой скорости — изменением частоты тока питающей сети. Электроприводы с синхронными двигателями и преобразователями частоты серии ПЧВН изготавливает электротехническая промышленность на номинальные мощности от 800 до 25 000 кВт с диапазоном регулирования угловой скорости 10 и 17. Основные области применения таких электроприводов: механизмы с вентиляторной характеристикой момента сопротивления (дымососы, воздухоподувки, центробежные насосы, вентиляторы и компрессоры и пр.).

#### 7.4. ТИПОВЫЕ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМИ КРОТКОЗАМКНУТЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Для управления асинхронными короткозамкнутыми двигателями используются магнитные пускатели. Простейшая типовая схема управления нереверсивным электроприводом с асинхронным короткозамкнутым двигателем показана на рис. 7.10. В схеме предусмотрено питание силовых цепей и цепей управления от источника одного и того же напряжения. Возможно питание цепей управления от источника пониженного напряжения.

Применение воздушного автоматического выключателя *QF* исключает возможность обрыва одной фазы от срабатывания защиты при однофазном коротком замыкании, как это имеет место при установке предохранителей. Также не требуется замены элементов, как в предохранителях при сгорании их плавкой вставки.

В схеме рис. 7.10 предусмотрена защита двигателя тепловыми реле *KK1* и *KK2*, а цепь управления защищена от коротких замыканий плавкими предохранителями *FU*. Здесь же осуществлена так называемая нулевая защита, которая при исчезновении или значительном снижении напряжения в сети отключает двигатель от сети. После восстановления номинального напряжения в сети самопроизвольного пуска двигателя не происходит.

Порядок включения схемы следующий. Первоначально включают автоматический выключатель *QF*, чем готовят схему к работе. При этом двигатель *M* еще не разгоняется, так как контакты *KM* пускателя разомкнуты. Для подачи напряжения на статор двигателя нажимают на кнопку *SBC*. При этом получает питание катушка контактора *KM*, контактор срабатывает, замыкает свои главные контакты *KM* в силовой цепи и статор двигателя подключается к сети. Одновременно в цепи управления закрывается замыкающий вспомогательный

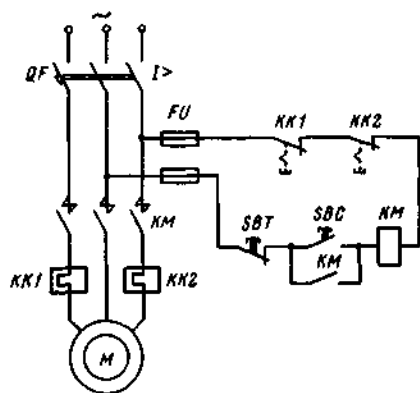


Рис. 7.10. Схема управления нерев-  
сивным электроприводом с асин-  
хронным короткозамкнутым двига-  
телем

контакт *КМ*, блокирующий кнопку *СВС*, после чего эту кнопку не нужно больше удерживать в нажатом состоянии, так как цепь катушки контактора *КМ* остается замкнутой.

Нажатием на кнопку *СВТ* обесточивается катушка контактора *КМ*, он отключается, размыкая свои силовые контакты *КМ* в цепи статора и вспомогательный контакт *КМ*. Двигатель отключается и самопроизвольно не может включиться.

Схема управления реверсивным электроприводом с асинхронным короткозамкнутым двигателем показана на рис. 7.11. Вначале вклю-

чают автоматический выключатель *QF*. Включение электродвигателя для одного направления вращения осуществляется нажатием на кнопку *СВС1*. При этом получает питание катушка

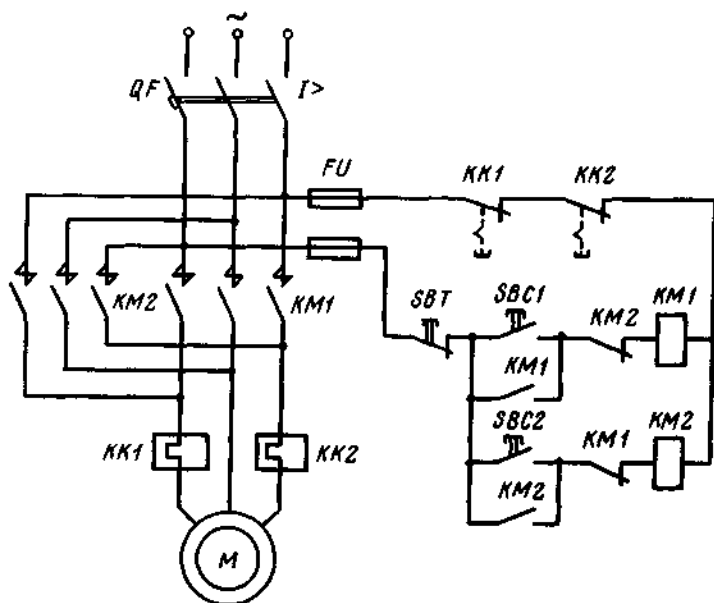


Рис. 7.11. Схема управления реверсивным электроприводом с асинхронным короткозамкнутым двигателем

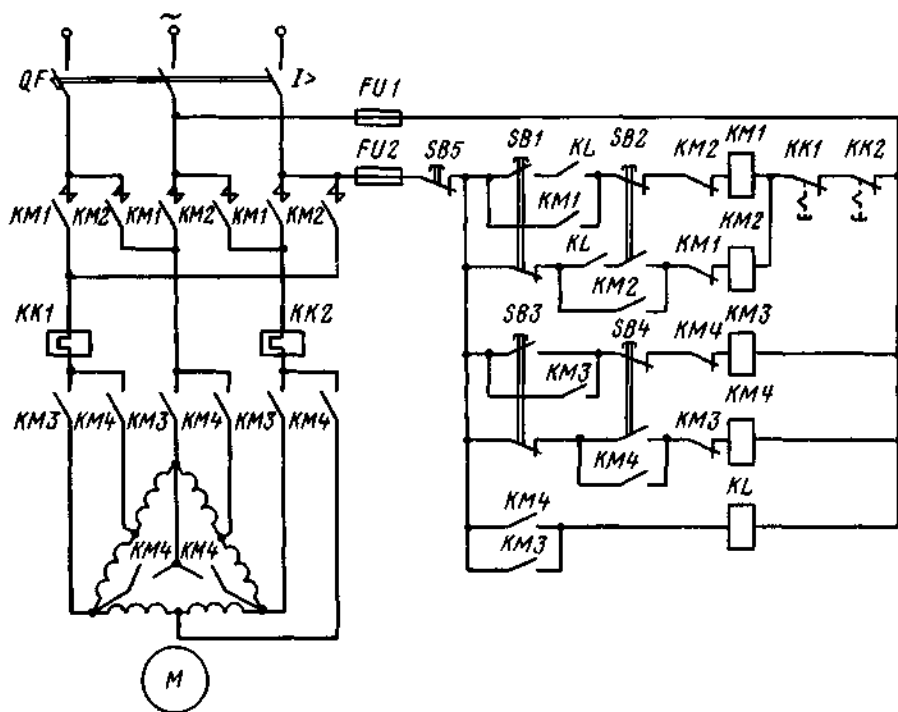


Рис. 7.12. Схема управления реверсивным электроприводом с двухскоростным асинхронным короткозамкнутым двигателем

контактора *KM1*. Контактор срабатывает и замыкающими главными контактами *KM1* присоединяет двигатель к сети.

Для включения двигателя на противоположное направление вращения нажимают на кнопку *SBT*, а затем на кнопку *SBC2*. Это приводит к отключению контактора *KM1* и включению контактора *KM2*. При этом две фазы на статоре переключаются.

Во избежание короткого замыкания в цепи статора вследствие ошибочного одновременного нажатия на обе кнопки (*SBC1* и *SBC2*) реверсивные магнитные пускатели снабжены механической блокировкой (на схеме не показана), препятствующей втягиванию одного контактора, если включен другой. Для большей надежности в схеме (см. рис. 7.11) предусмотрена также электрическая блокировка с помощью размыкающих вспомогательных контактов *KM1* и *KM2*.

Схема управления реверсивным электроприводом с двухскоростным асинхронным короткозамкнутым двигателем приведена на рис. 7.12. Такой привод обеспечивает две скорости: первая

из них получается при соединении обмоток статора в «треугольник», что осуществляется нажатием на кнопку *SB3* и включением контактора *KM3*, вторая — при соединении обмоток статора в двойную «звезду», что выполняется нажатием на кнопку *SB4* и включением контактора *KM4*. До включения контакторов *KM3* и *KM4* включают автоматический выключатель *QF*. После предварительного соединения обмоток статора производится пуск двигателя при помощи контакторов *KM1* или *KM2* в одном или другом направлении, цепи катушек которых подготавливаются к работе замыканием контактов промежуточного реле *KL*, которое включается замыкающим контактом контактора *KM3* или *KM4*. Включение контактора *KM1* или *KM2* осуществляется соответственно нажатием на кнопку *SB1* или *SB2*. Применение двухцепных кнопок *SB1—SB4* позволяет осуществить дополнительную электрическую блокировку, исключающую одновременное включение контакторов *KM1* и *KM2*, а также *KM3* и *KM4*.

В рассмотренной схеме управления предусмотрена возможность переключения с одной скорости на другую при вращении двигателя в одном или другом направлении, а также защита двигателя тепловыми реле *KK1* и *KK2* и защита цепи управления от коротких замыканий плавкими предохранителями *FU1* и *FU2*.

Все угольные комбайны имеют нерегулируемый электропривод исполнительного органа от асинхронного короткозамкнутого двигателя. Изменение производительности этих комбайнов осуществляется за счет регулируемой подачи. Электрооборудование очистных комбайнов имеет взрывобезопасное исполнение. Подключение комбайнов к сети производится семижильными экранированными кабелями марки ГРШЭ через штупсельные разъемы. Конструкцией очистных комбайнов предусматривается механическая блокировка штупсельного разъема с крышкой камеры электроблоков, благодаря которой предотвращается доступ к токоведущим частям, находящимся под напряжением. Комбайны, оборудованные реверсивными выключателями приводного электродвигателя, снабжены механической блокировкой, позволяющей рассоединить штупсельный разъем только при отключенном выключателе.

Электрическая часть современных очистных комбайнов, предназначенных для работы на пологих и наклонных пластах, обеспечивает: 1) дистанционное включение и отключение пускателя комбайна и конвейера с пульта комбайна (стационарного или переносного); 2) дистанционное включение и отключение пускателя конвейера оператором погрузочного пункта; 3) автоматическую подачу предупредительного сигнала перед включением пускателей комбайна и конвейера; 4) отключение пускателя конвейера с комбайна и погрузочного пункта лавы

независимо от места включения этого пускателя; 5) блокировку, исключающую одновременное включение конвейера с комбайна и погрузочного пункта лавы; 6) автоматическое включение насоса орошения перед пуском комбайна; 7) контроль процесса запуска забойного конвейера и его отключение при порыве или недопустимом перекосе скребковой цепи; 8) возможность отключения пускателя конвейера и автоматического выключателя из ряда точек лавы; 9) двустороннюю симплексную громкоговорящую связь в лаве; 10) блокировку от включения пускателей комбайна и конвейера с помощью кнопки «Стоп» с фиксацией, установленной на комбайне в зоне исполнительного органа; 11) автоматическое открывание и закрывание трубопровода системы орошения комбайна при включении и отключении пускателя насоса орошения; 12) автоматическое отключение электродвигателя комбайна при его опрокидывании или несостоявшемся пуске; 13) контроль давления и расхода воды в системе орошения комбайна; 14) реверсирование и аварийное отключение электродвигателя комбайна; 15) защиту от токов к. з.; 16) нулевую защиту; 17) контроль безопасной величины сопротивления цепи заземления; 18) защиту от потери управляемости при замыкании проводов цепи управления между собой; 19) контроль прохождения предупредительного сигнала; 20) возможность включения пускателей комбайна и конвейера без подачи предупредительного сигнала, если промежуток времени между двумя следующими друг за другом включениями этих пускателей не превышает 3 с [19].

Функции, указанные в пп. 1—9, 19 и 20, выполняет аппаратура управления, громкоговорящей связи и предупредительной сигнализации типа АУС.

### Контрольные вопросы

1. Какие существуют способы пуска электродвигателей постоянного и переменного тока?
2. Как влияет колебание напряжения сети на пусковой момент асинхронного короткозамкнутого двигателя?
3. Основные способы регулирования скорости электроприводов постоянного и переменного тока.
4. Чем отличается система электропривода УВ—Д от системы Г—Д?

## Глава 8

# ЗАМКНУТЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

### 8.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Современные замкнутые системы управления электроприводами горных машин предназначены так же, как и рассмотренные в гл. 7 разомкнутые системы управления, для осуществления автоматического пуска, торможения, реверсирования машин и механизмов, регулирования их скорости, ускорения, тока, момента и т. п. Однако замкнутые системы управления позволяют сформировать эти режимы управления таким образом, чтобы более точно удовлетворить требованиям технологического процесса.

Замкнутые системы управления при взаимосвязанном электроприводе горных машин (например, одноковшовые экскаваторы, струговые установки) позволяют существенно снизить колебательные процессы и соответственно динамические усилия в элементах конструкции машин. В результате, например, устраняются срезания предохранительных штифтов, порывы цепи струговых установок и канатов одноковшовых экскаваторов. Все это приводит к повышению производительности горных машин, улучшению условий труда обслуживающего персонала и повышению безопасности ведения горных работ. Замкнутые системы управления благодаря ограничению заданными значениями ускорений, усилий, моментов, токов, высокой плавности работы механизмов позволяют существенно повысить надежность и долговечность исполнительных органов и электроприводов горных машин.

При работе электропривод испытывает воздействие различных факторов: нагрузки на валу, сигналов управления, напряжения или частоты питающей сети. Эти факторы представляют собой внешние воздействия и называются входными сигналами, которые соответственно делятся на возмущающие и управляющие. Точки приложения входных сигналов называются входами автоматической системы, под которой понимают объект управления вместе с системой управления.

Входные сигналы влияют на работу объекта управления (электродвигателя), характеризующуюся следующими величинами: угловой скоростью, ускорением, моментом, током и др., которые называют выходными сигналами. Точки, в которых могут быть определены выходные сигналы, называются выходами автоматической системы.

Управление электроприводом при разомкнутых системах обычно осуществляется оператором, который с помощью рукоятки аппарата устанавливает требуемое значение какого-либо

выходного сигнала. Подача последнего может быть осуществлена и автоматическим устройством.

По причине изменения других входных сигналов (нагрузки на валу, напряжения сети) фактическая угловая скорость электродвигателя может отличаться от заданной. В этом случае оператор сравнивает фактическое значение выходного сигнала с заданным. По разности этих значений оператор определяет величину и направление перемещения рукоятки аппарата управления, необходимые для получения выходного сигнала, соответствующего заданному значению.

Если требуется высокая точность поддержания постоянства того или иного выходного сигнала при быстром и частом изменении входных сигналов, такая система управления оказывается непригодной.

Эту задачу решают автоматические системы, быстро реагирующие на изменение выходного сигнала. Эти системы должны обеспечивать: получение информации о задачах управления и подачу на вход системы необходимого задающего сигнала; получение информации о результатах управления путем измерения действительного значения выходного сигнала; сравнение действительного и заданного значений выходных сигналов и определение соответствующего управляющего сигнала; изменение величины ранее заданного входного сигнала.

Следовательно, управляющий сигнал является причиной изменения состояния электродвигателя, характеризующего выходным сигналом. В то же время на управляющий сигнал оказывают влияние значения выходного сигнала. Такая взаимная связь, обеспечивающая зависимость входного управляющего сигнала от выходного сигнала системы автоматического управления, называется обратной связью.

Обратные связи широко применяются в различных системах автоматического управления электроприводами. Поэтому эти системы называются системами управления по замкнутому циклу, или замкнутыми системами автоматического управления.

Существуют различные виды обратных связей. Обратные связи, которые действуют согласно с основным управляющим сигналом, называются положительными обратными связями, которые действуют встречно — отрицательными. Обратные связи, действующие как в установившихся режимах, так и при переходных процессах, называются жесткими, а обратные связи, действующие только при переходных процессах, — гибкими.

В простейших системах управления анализ информации осуществляется путем сравнения требуемых и действительных значений выходных сигналов. Разность между этими значениями называется рассогласованием, или сигналом ошибки. Сигнал управления, от которого зависит величина управляющего воздействия, определяется значением сигнала ошибки.

Источниками информации в системах автоматического управления являются так называемые чувствительные элементы или датчики. Сигналы, поступающие от датчиков, являются входными сигналами системы.

Исполнительные устройства представляют собой либо источники энергии, либо исполнительные двигатели, применяемые для целей управления. Они осуществляют управляющее воздействие на объект управления (приводной двигатель) с целью обеспечения характера движения в соответствии с требуемым законом.

Кроме рассмотренных элементов в системах автоматического управления с целью усиления и суммирования сигналов используют различные типы усилителей (электромашинные, магнитные, электронные, полупроводниковые).

В зависимости от влияния основного возмущающего воздействия (нагрузка на валу двигателя) системы управления могут быть:

статическими, у которых при неизменной величине задающего сигнала установившееся значение выходного сигнала зависит от нагрузки и меняется при ее изменении;

астатическими, у которых значение нагрузки не влияет на установившееся значение выходного сигнала.

По характеру функциональной зависимости выходного сигнала систем управления от входного сигнала их делят на линейные и нелинейные. Большинство реальных систем автоматического управления имеет в своем составе нелинейные элементы. При расчетах для упрощения задач прибегают к линеаризации систем с большей или меньшей степенью точности, заменяя нелинейные элементы линейными, или для сохранения точности расчетов используют ЭВМ.

## **8.2. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ С ДВИГАТЕЛЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Рассмотрим, в чем состоят принципы построения замкнутых систем автоматического управления электроприводами.

В практике наибольшее применение получили следующие два типа построения замкнутых систем управления: с одним общим суммирующим усилителем (рис. 8.1) и с  $n$  последовательными суммирующими усилителями — системы подчиненного регулирования с последовательной коррекцией (рис. 8.2) [13].

Отличительной особенностью систем, построенных по типу структурной схемы рис. 8.1, является наличие одного суммирующего усилителя  $A$ , на вход которого подается алгебраическая сумма сигналов задающего и всех обратных связей (жестких и гибких). Выходной сигнал усилителя, подаваемый на вход преобразователя  $UD$  (электромашинного или тиристорного), за-



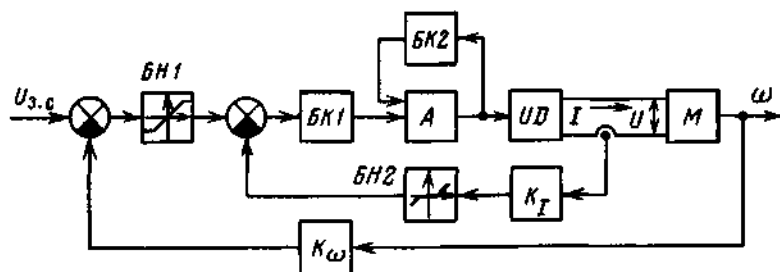


Рис. 8.1. Структурная схема замкнутой системы регулирования с общим суммирующим усилителем

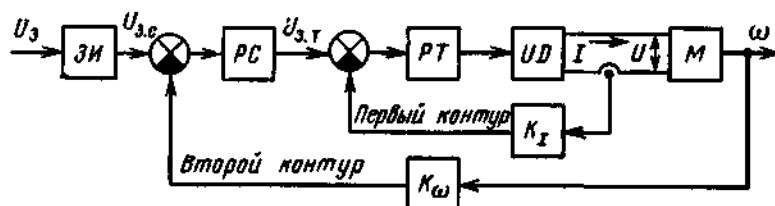


Рис. 8.2. Структурная схема системы подчиненного регулирования с последовательной коррекцией

висит одновременно от нескольких переменных, что не позволяет регулировать какую-либо одну переменную независимо от других.

Напряжение преобразователя  $UD$  подается на обмотку якоря двигателя  $M$ . Для разделения действия обратных связей по току и скорости используются отсечки с помощью блоков нелинейностей  $БН1$  и  $БН2$ . Но и при этом единственный задающий сигнал  $U_{з.с}$  не определяет заданного значения выбранной для регулирования переменной. Придание системе требуемых динамических свойств (устранение колебательных процессов, минимальное время изменения регулируемой величины при допустимом значении перерегулирования) при таком построении системы достигается применением сложных корректирующих блоков, включаемых либо в цепь сигнала управления при малой мощности управления (см. рис. 8.1, блок  $БК1$ , последовательная коррекция), либо параллельно некоторым блокам системы (см. рис. 8.1, блок  $БК2$ , параллельная коррекция, осуществляемая с помощью гибкой отрицательной обратной связи). В таких системах невозможно осуществлять независимую настройку качества регулирования переменных. При этом получить оптимальное качество регулирования весьма затруднительно, а в некоторых случаях и невозможно.

Несмотря на отмеченные недостатки, указанные системы все

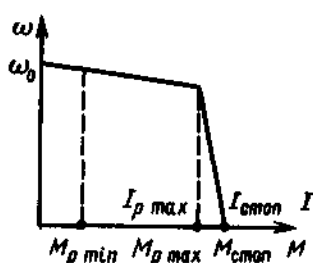


Рис. 8.3 Механическая характеристика двигателя экскаваторной формы

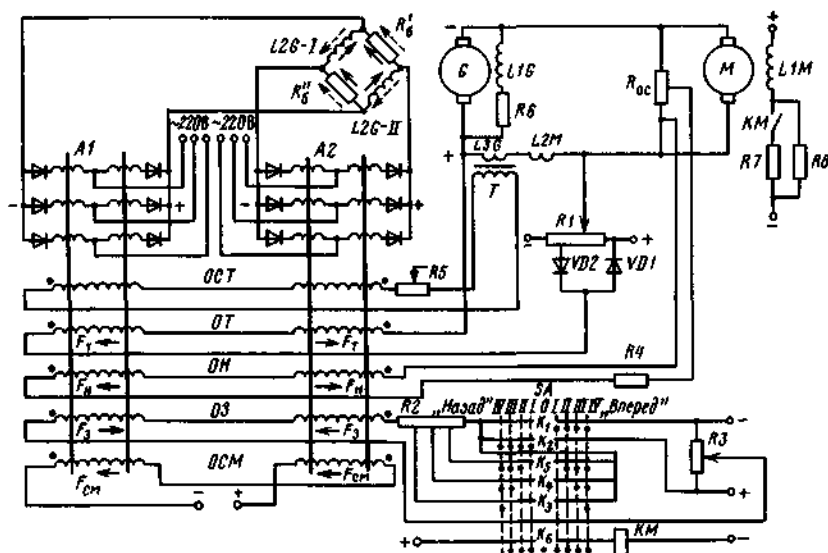


Рис. 8.4. Принципиальная схема системы Г—Д с силовыми магнитными усилителями

еще широко применяют на практике либо ввиду простоты реализации при использовании электромашинных и магнитных усилителей, либо когда не предъявляются высокие требования к качеству переходных процессов и не требуется раздельное регулирование переменных.

Рассмотрим одну из наиболее распространенных в горной промышленности замкнутых систем автоматического управления—систему Г—Д с обратными связями, построенную по типу структурной схемы, приведенной на рис. 8.1. Применение обратных связей в системе Г—Д прежде всего обеспечивает возможность получения специальной формы механической характеристики двигателя, так называемой экскаваторной формы (рис. 8.3). Такая характеристика необходима для всех глав-

ных механизмов одноковшовых и многоковшовых экскаваторов. Отличительной особенностью этой характеристики является то, что в пределах рабочих нагрузок от  $M_{p\min}$  до  $M_{p\max}$  она должна быть достаточно жесткой для обеспечения высокой производительности, а при перегрузках угловая скорость двигателя должна снижаться до нуля при стопорном моменте  $M_{\text{стоп}}$  (и токе  $I_{\text{стоп}}$ ), который является расчетным из условий прочности механизма. Величина  $M_{\text{стоп}}$  определяется условиями коммутации коллектора двигателя ( $M_{\text{стоп}} = 2,5 M_{\text{ном}}$ ).

Принципиальная схема системы Г—Д с силовыми магнитными усилителями (СМУ) представлена на рис. 8.4. Синхронный двигатель, с валом которого соединен генератор  $G$ , на схеме не показан. Генератор  $G$  имеет параллельную обмотку возбуждения  $L1G$  и независимую  $L2G$ . Обмотка  $L2G$  состоит из двух одинаковых частей  $L2G-I$  и  $L2G-II$ , включенных по мостовой схеме с балластными резисторами  $R_6'$  и  $R_6''$ . При этом сопротивления обмоток равны между собой и равны сопротивлениям балластных резисторов. Если в системе Г—Д применяют два последовательно включенных генератора и несколько двигателей, что часто делают в мощных приводах, то независимая обмотка каждого генератора не делится на две части и включается в одно из плеч моста.

Для питания обмоток возбуждения (см. рис. 8.4) используют два магнитных усилителя  $A1$  и  $A2$ .

Такая схема включения обмоток и усилителей обеспечивает бесконтактное изменение направления тока в обмотке возбуждения генератора и называется двухтактной мостовой. Изменение направления тока обеспечивает изменение направления вращения двигателя  $M$ . Усилители  $A1$  и  $A2$  являются трехфазными и имеют выход на постоянном токе. При включении усилителя  $A1$  ток в обмотках протекает в направлении, указанном сплошными стрелками, а при включении усилителя  $A2$  — в противоположном направлении. При этом не происходит разрыв цепей питания обмоток возбуждения, обладающих значительной индуктивностью. Контакторы в таких цепях работают ненадежно, постоянно требуют ухода. Каждый магнитный усилитель имеет по 5 обмоток управления постоянного тока. Обмотки смещения  $ОСМ$  служат для первоначальной настройки усилителей. Обмотки  $ОЗ$  являются задающими, питаются от командоконтроллера  $SA$ . От величины и направления тока в этих обмотках зависят величина и полярность напряжения на выходе усилителей, а следовательно, величина и направление угловой скорости двигателя  $M$ .

В системе Г—Д с помощью обратных связей по напряжению и току формируется экскаваторная механическая характеристика двигателя (см. рис. 8.3). Обмотки напряжения  $ОН$  подключают к резистору  $R_{oc}$  и выполняют функции жесткой отри-

цательной обратной связи по напряжению генератора. С помощью этой обратной связи обеспечивается повышение жесткости механической характеристики двигателя в рабочей части (см. рис. 8.3, характеристики при  $M_{p\min} < M < M_{p\max}$ ), форсировка процесса пуска и гашение поля остаточного намагничивания. Обмотки тока  $OT$  подключаются параллельно к обмоткам дополнительных полюсов генератора  $L3G$  и двигателя  $L2M$  и выполняют функции жесткой отрицательной обратной связи по току якоря двигателя. Эта обратная связь является задержанной, так как в цепь обмоток  $OT$  включено встречное напряжение, создаваемое потенциометром  $R1$ . При этом ток в обмотках  $OT$  возникает в том случае, когда падение напряжения на обмотках  $L3G$  и  $L2G$  будет больше, чем встречное напряжение потенциометра  $R1$ , т. е. когда значение тока якоря превысит максимальное рабочее значение  $I_{p\max}$ . Обратная связь по току формирует нерабочую часть экскаваторной характеристики двигателя (см. рис. 8.3, от  $M_{p\max}$  до  $M_{\text{стоп}}$ ), защищая двигатель от перегрузок и механизм от поломок. Диоды  $VD1$  и  $VD2$  выполняют роль запорных вентилях, препятствующих прохождению тока в этой цепи в обратном направлении, когда падение напряжения на обмотках  $L3G$  и  $L2M$  меньше напряжения потенциометра  $R1$ , а также обеспечивают нормальную работу цепи при изменении полярности напряжения генератора. Стабилизирующие обмотки  $OCT$  подключаются к вторичной обмотке стабилизирующего трансформатора  $T$ , первичной обмоткой которого обычно служит обмотка  $L3G$ , и выполняют роль гибкой отрицательной обратной связи по току якоря. Ток в этих обмотках возникает только при переходных процессах, и намагничивающая сила их направлена таким образом, чтобы ограничить скорость нарастания тока якоря и обеспечить устойчивость работы всей системы.

На схеме рис. 8.4 видно, что задающие обмотки усилителей  $A1$  и  $A2$  включены между собой встречно, т. е. при включении рукоятки командоконтроллера  $SA$  в положение «Вперед» намагничивающая сила  $F_z$  усилителя  $A1$  направлена встречно с намагничивающей силой обмотки смещения  $F_{\text{см}}$ . Поэтому будет открытым усилитель  $A1$ , а усилитель  $A2$  останется закрытым. Остальные обмотки управления магнитных усилителей включены между собой аналогично задающим обмоткам. Направления намагничивающих сил показаны на схеме сплошными стрелками для положения рукоятки  $SA$  «Вперед». Для этого же положения показана полярность генератора. При положении рукоятки  $SA$  «Назад» направление намагничивающих сил обмоток  $OZ$ ,  $OH$  и  $OT$  изменится на противоположное.

При холостом ходе механизма обеспечивается примерно двухкратная скорость движения в системе  $\Gamma - Д$  за счет ослабления магнитного поля двигателя. Для подъемного механизма

экскаватора, например, такая скорость требуется при опускании порожнего ковша. Поэтому на схеме (см. рис. 8.4) в положении рукоятки  $SA$  IV «Назад» обесточивается катушка контактора  $KM$ , размыкается контакт  $KM$  в цепи обмотки возбуждения двигателя  $LIM$  и соответственно возрастает угловая скорость двигателя.

С помощью командоконтроллера  $SA$  здесь обеспечивается четыре ступени скорости. В настоящее время широко используются сельсинные командоконтроллеры, позволяющие регулировать бесступенчато угловую скорость двигателя.

Схема, приведенная на рис. 8.4, отличается от структурной схемы, приведенной на рис. 8.1, тем, что обратная связь по скорости заменена обратной связью по напряжению генератора и что использована гибкая отрицательная связь не по напряжению усилителя, а по току якоря двигателя.

Часто для мощных электроприводов с целью повышения коэффициента усиления системы (отношение мощности на выходе усилителя к мощности, подведенной к его обмотке управления) используют каскад усилителей — два последовательно включенных усилителя.

Порядок включения электропривода системы Г — Д следующий (см. рис. 8.4). Включают первичный двигатель, приводящий во вращение генератор  $G$  (подключающая аппаратура и первичный двигатель не показаны). Так как в обмотках возбуждения генератора  $G$  токи отсутствуют, то э.д.с. генератора еще равна нулю. Затем подают напряжение на обмотку возбуждения  $LIM$  двигателя  $M$ . Это подготовительные операции. Для включения двигателя на подъем, например, машинист переводит рукоятку командоконтроллера  $SA$  в одно из четырех положений «Вперед». При этом начинает работать магнитный усилитель  $AI$ , возбуждая генератор  $G$ . Напряжение на якоре генератора, плавно возрастаая, подводится к якору двигателя  $M$ . Двигатель плавно разгоняется до заданной командоконтроллером скорости. Перемещая рукоятку командоконтроллера в последующие положения, повышают угловую скорость двигателя  $M$  и соответственно скорость механизма. Перемещением рукоятки обратно снижают скорость двигателя, а установкой ее в нулевое положение обеспечивают полную остановку двигателя. При этом двигатель  $M$  работает в режиме генератора, рекуперирова с помощью генератора  $G$  и первичного двигателя энергию в сеть переменного тока. Для противоположного направления вращения двигателя рукоятку командоконтроллера переводят в одно из положений «Назад».

С появлением тиристорных преобразователей с малой мощностью управления и малогабаритных интегральных операционных усилителей появилась возможность создания систем подчиненного регулирования с последовательной коррекцией, в ко-

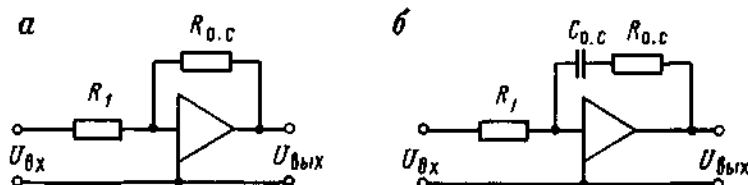


Рис. 8.5. Схемы П-регулятора (а) и ПИ-регулятора (б)

торых используется  $n$  последовательных суммирующих усилителей (см. рис. 8.2). Эти усилители не только суммируют и усиливают сигналы, но и выполняют другие математические операции над сигналами. Поэтому такие операционные усилители называют регуляторами.

Чаще всего применяют следующие два типа регуляторов: пропорциональный (П-регулятор) и пропорционально-интегральный (ПИ-регулятор).

Операционный усилитель — это усилитель с нечетным числом каскадов усиления и значительным коэффициентом усиления (более 1000), имеющий сильную отрицательную обратную связь и практически без дрейфа нуля. Выполняемые усилителем математические операции зависят от вида сопротивлений входной цепи и обратной связи.

На рис. 8.5 показаны схемы П- и ПИ-регуляторов. Сигнал на выходе П-регулятора пропорционален входному (рис. 8.5, а), т. е.

$$U_{вых} = kU_{вх}, \quad (8.1)$$

где  $k = R_{0с}/R_1$ .

Сигнал на выходе ПИ-регулятора пропорционален входному сигналу и интегралу от входного сигнала по времени (рис. 8.5, б), т. е.

$$U_{вых} = \frac{k}{T_0} \int U_{вх} dt + kU_{вх}. \quad (8.2)$$

В операторной форме в виде передаточных функций выражения (8.1) и (8.2) соответственно будут иметь вид:

$$W_n(p) = k, \\ W_{пн}(p) = \frac{U_{вых}(p)}{U_{вх}(p)} = k \frac{1 + T_0 p}{T_0 p} = \frac{1 + T_0 p}{T_{01} p} = k + \frac{1}{T_{01} p},$$

где  $T_0 = R_{0с}C_{0с}$ ;  $T_{01} = T_0/k = R_1C_{0с}$ ;  $p$  — оператор.

Сигнал на выходе ПИ-регулятора перестает изменяться во времени и сохраняет некоторое постоянное значение при условии, что входной сигнал равен нулю. Если на вход этого регулятора поступают задающий сигнал и сигнал обратной связи,

то в установившемся режиме эти сигналы равны и разность их равна нулю. Это соответствует принципу астатического регулирования — выходной сигнал изменяется регулятором до тех пор, пока не будет достигнуто равенство задающего сигнала и сигнала обратной связи, т. е. пока не будет устранена ошибка регулирования.

Система подчиненного регулирования (см. рис. 8.2) состоит из ряда контуров, число которых равно числу регулируемых переменных (или числу больших постоянных времени системы, таких, как постоянные времени обмоток якоря, возбуждения, подлежащих компенсации), причем каждый внутренний контур регулирования подчинен следующему по порядку внешнему (по отношению к внутреннему) контуру [13]. Эта подчиненность выражается в том, что заданное значение регулируемой переменной любого внутреннего контура определяется выходным сигналом регулятора следующего по порядку контура. В результате все внутренние контуры работают как подчиненные задаче регулирования выходной координаты системы. Каждый контур строится по принципу регулирования по отклонению (по ошибке) и имеет свою обычно жесткую отрицательную обратную связь по регулируемой переменной и свой регулятор (суммирующий усилитель). Для каждого внешнего контура внутренний (или несколько внутренних контуров) входит в состав объекта регулирования.

Показанная на рис. 8.2 типовая структура системы привода постоянного тока с двигателем независимого возбуждения имеет два контура регулирования: первый (внутренний) контур регулирования тока якоря двигателя содержит регулятор тока  $PT$ , преобразователь  $UD$ , якорную цепь двигателя и жесткую отрицательную обратную связь по току якоря с коэффициентом передачи  $K_I$ , второй (внешний, которому подчинен первый) контур регулирования угловой скорости двигателя содержит регулятор скорости  $PC$ , первый контур, двигатель  $M$  и жесткую отрицательную обратную связь по скорости с коэффициентом передачи  $K_\omega$ . Задающим сигналом для второго контура является сигнал задания угловой скорости  $U_{\omega, \text{с}}$ , а для первого — сигнал с выхода регулятора скорости  $U_{\omega, \text{т}}$ . Первоначальный задающий сигнал  $U_\omega$ , подаваемый оператором, поступает на задатчик интенсивности  $ЗИ$ , обеспечивающий требуемую интенсивность нарастания регулируемой величины ( $\omega$ ).

В системе подчиненного регулирования обеспечивается возможность раздельного регулирования переменных и раздельной настройки контуров (начиная с первого, самого внутреннего контура) и коррекции переходных процессов в каждом контуре, что существенно упрощает как расчетную работу, так и техническую реализацию коррекции и практическую (в наладке) настройку системы.

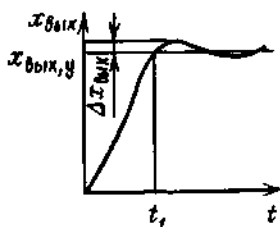


Рис. 8.6. График технически оптимального переходного процесса

Настройку контура (расчет и выбор элементов последовательных корректирующих цепей, т. е. выбор типа регулятора и расчет его параметров) обычно проводят так, чтобы получить технически оптимальный переходный процесс (настройка на технический оптимум). Технически оптимальным переходным процессом считается такой процесс, при котором время  $t_1$  изменения регулируемой величины от 0 до установившегося значения было бы минимальным при перерегулировании  $\Delta x_{\text{вых}}$ , не превышающем допустимого значения порядка  $4 \div 10\%$  (рис. 8.6). Такой переходный процесс при скачке задания является компромиссным между процессом более быстрым, но с большим перерегулированием и процессом с меньшим перерегулированием, но более медленным.

Из теории автоматического регулирования известно, что характер переходного процесса замкнутой системы определяется соотношением постоянных времени системы, и оптимальному переходному процессу соответствует оптимальное соотношение постоянных времени. Математически это выражается определенным (оптимальным) соотношением коэффициентов характеристического уравнения системы.

Для системы, состоящей из  $n$  подчиненных контуров, содержащих только безынерционные, инерционные и интегрирующие звенья (это ограничение не касается регуляторов), характеристические уравнения в зависимости от порядка системы (числа контуров) должны иметь соотношения коэффициентов, указанные в табл. 8.1 [13]. При таких характеристических уравнениях переходные процессы в системе по управляющему воздействию будут технически оптимальными.

В уравнениях табл. 8.1 принято:  $T_1$  — наименьшая постоянная времени первого (самого внутреннего) контура системы. Указанные в табл. 8.1 значения  $t_1$  и  $\sigma$  (см. рис. 8.6) относятся

Таблица 8.1

Полное характеристическое уравнение	Вырожденное характеристическое уравнение	Время регулирования $t_1$ , с	Перерегулирование $\sigma$ , %
$2T_1 p (T_1 p + 1) + 1$	$2T_1 p (T_1 p + 1) + 1$	$4,7T_1$	4,33
$4T_1 p [2T_1 p (T_1 p + 1) + 1] + 1$	$4T_1 p (2T_1 p + 1) + 1$	$7,6T_1$	8
$8T_1 p [4T_1 p [2T_1 p (T_1 p + 1) + 1] + 1] + 1$	$8T_1 p (4T_1 p + 1) + 1$	$14,4T_1$	6,2



к случаю скачкообразного изменения входного (задающего) сигнала  $U_{з.с.}$ . Таблица может быть продолжена и для более высоких порядков уравнений. При указанном в табл. 8.1 соотношении коэффициентов характеристических уравнений переходный процесс определяется не всеми членами уравнения, а вырожденным характеристическим уравнением второго порядка. Особенность этих вырожденных уравнений состоит в том, что все они (для любого порядка полного уравнения) характеризуются коэффициентом затухания ( $\sqrt{2}/2=0,707$ ), что обеспечивает требуемый технически оптимальный характер переходного процесса.

Заданная исходная система обычно не обладает оптимальным соотношением постоянных времени, поэтому, используя коррекцию, нужно изменять постоянные времени системы, т. е. для настройки контура на технический оптимум нужно подобрать такой тип регулятора и с такими параметрами, чтобы получить характеристические уравнения системы, приведенные в табл. 8.1. Как видно из этой таблицы, уравнения не содержат никаких других постоянных времени, кроме  $T_1$ , по значению больших ее в  $2^n$  раз. Следовательно, все другие постоянные времени нужно устранить (компенсировать). Естественно, что физически существующую инерционность можно устранить, только изъяв из системы элемент, обладающий этой инерционностью, что невозможно. Но можно компенсировать влияние больших инерционностей системы, используя форсировку переходного процесса в данном элементе за счет увеличения напряжения (момента и т. п.) на время переходного процесса, подобно тому, как это делается для форсирования процесса возбуждения генератора. Полная компенсация при этом невозможна, поэтому и производят операцию замены большей постоянной времени меньшей, но требуемого значения.

Рассмотрим принципиальную схему управления неререверсивным приводом по системе УВ — Д с подчиненным регулированием и последовательной коррекцией (рис. 8.7). Эта схема соответствует структурной схеме, приведенной на рис. 8.2. Якорь электродвигателя  $M$  получает питание от неререверсивного тиристорного выпрямителя  $UD$ , включенного по мостовой схеме. С валом двигателя соединен тахогенератор  $BR$ , обеспечивающий жесткую отрицательную обратную связь по угловой скорости двигателя ( $U_{ос} = K_{с\omega}$ ). Задающий сигнал поступает к системе управления от бесконтактного командоконтроллера  $SA$  через задатчик интенсивности  $ЗИ$ . Данная схема является двухконтурной. Внешним контуром является контур регулирования скорости, а внутренним — контур регулирования тока якоря двигателя. Сигнал жесткой отрицательной обратной связи по току  $U_{от} = K_{I\alpha}$  снимается с датчика тока  $ДТ$  и вводится на вход регулятора тока  $РТ$ . Этот сигнал вычитается из сигнала

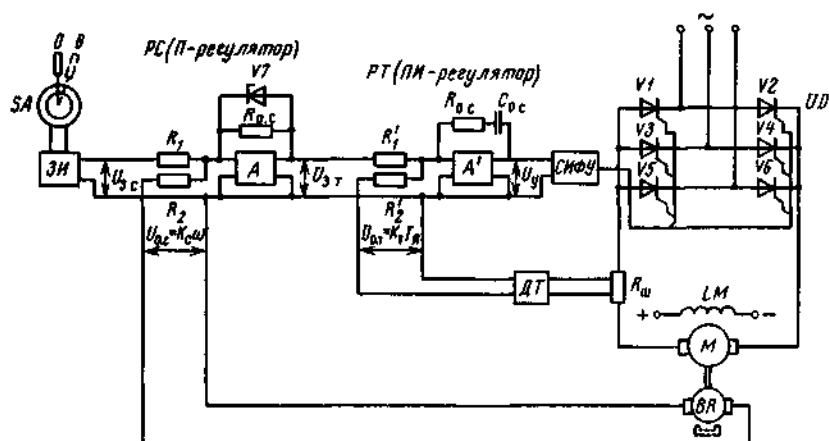


Рис 87. Принципиальная схема электропривода по системе УВ — Д с подчиненным регулированием и последовательной коррекцией

на выходе *РС*. Выходной сигнал *РС* является задающим для регулятора *РТ*. На выходе *РТ* формируется сигнал  $U_y$ , который подается в систему импульсно-фазового управления СИФУ тиристорного выпрямителя *UD*. Регуляторы *РС* и *РТ* реализованы на базе операционных усилителей *A* и *A'*.

Для ограничения тока якоря при пуске в цепь обратной связи *РС* включен стабилитрон *V7*. Задатчик интенсивности *ЗН* обеспечивает заданную скорость нарастания сигнала, подаваемого на вход *РС*, и соответственно интенсивность разгона электродвигателя. Схемы, аналогичные рассмотренной, и с другими вариантами выбора обратных связей обычно в реверсивном исполнении (два комплекта *UD*) применяют в электроприводе одноковшовых экскаваторов, драг, шахтных подъемных машин.

### 8.3. АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ С АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

В настоящее время на базе серийно выпускаемых преобразователей частоты созданы электроприводы переменного тока по системе ПЧ — Д с асинхронными короткозамкнутыми и синхронными двигателями с подчиненным регулированием. Такие системы электроприводов являются перспективными для применения в различных горных машинах (одноковшовые экскаваторы, буровые, струговые и конвейерные установки, фронтальные агрегаты и др.).

Преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока выпускаются с автономными инверторами тока или напряжения.

Схема с автономным инвертором напряжения (АИН) была рассмотрена ранее (см. рис. 7.9). В приводах, работающих циклично (с частыми пусками и торможением), более целесообразным является применение преобразователей частоты с автономным инвертором тока (АИТ) — рекуперация энергии в сеть при торможении осуществляется при более простой силовой схеме.

Рассмотрим схему автоматического управления асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором, управляемым тиристорным преобразователем с автономным инвертором тока (рис. 8.8) [13]. Силовая часть преобразователя состоит из управляемого выпрямителя  $UD$  с системой управления выпрямителем  $СУВ$ , инвертора  $UZ$  (АИТ) с системой управления инвертором  $СУИ$  и реактора  $L$ . Блок регулирования, включающий систему подчиненного регулирования, формирует необходимую связь между током и скольжением в статических и динамических режимах.

Входными сигналами блока регулирования являются: задающее напряжение  $U_{з.с.}$ , определяющее частоту  $UZ$ , напряже-

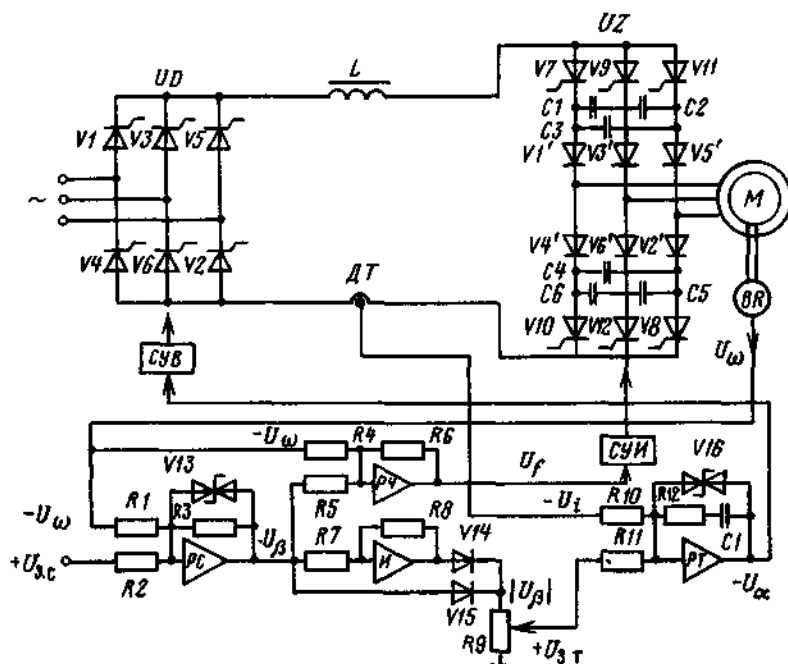


Рис 8.8 Принципиальная схема электропривода по системе ПЧ — Д и АИТ

ние жесткой отрицательной обратной связи по выпрямленному току  $U_i$ , снимаемое с датчика тока  $DT$ , и напряжение  $U_\omega$  жесткой отрицательной обратной связи по угловой скорости двигателя, снимаемое с датчика  $BR$ . Блок регулирования состоит из четырех операционных усилителей. Регулирование выпрямленного тока (и, следовательно, тока статора двигателя) осуществляется с помощью регулятора тока  $PT$ , воздействующего через  $CUB$  на угол включения тиристоров  $UD$ . Регулятор  $PT$  собран на операционном усилителе по схеме ПИ-регулятора. Через резисторы  $R10$  и  $R11$  на его вход подаются сигналы отрицательной обратной связи по току  $U_i$  и задающий сигнал  $U_{з.т.}$ , пропорциональный модулю скольжения двигателя. Независимо от выходной частоты  $UZ$  регулятор  $PT$  обеспечивает в статике точное соответствие тока статора задающему сигналу  $U_{з.т.}$ .

Регулятор скольжения  $PC$  собран на операционном усилителе по схеме П-регулятора. С его помощью осуществляется вычитание из  $U_{з.с.}$  сигнала  $U_\omega$  и усиление разности этих сигналов, которая пропорциональна величине скольжения двигателя. Так как выпрямленный ток не меняет своего знака независимо от режима работы двигателя, а изменяет свой знак скольжение, то знак  $U_{з.с.}$  должен сохраняться неизменным. Операция выделения модуля напряжения  $|U_\beta|$  осуществляется с помощью диодов  $V14$  и  $V15$  и инвертора знака, выполненного на усилителе  $I$ .

На входе регулятора частоты  $PЧ$  суммируются сигналы скольжения (с выхода  $PC$ ) и угловой скорости (с датчика  $BR$ ). Напряжение  $U_i$  с выхода  $PЧ$  подается на  $CУИ$ , управляющую выходной частотой  $AИТ$ . Следовательно, регуляторы  $PT$  и  $PЧ$  подчинены регулятору скольжения  $PC$ .

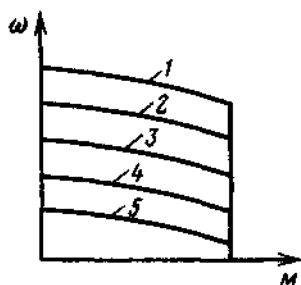
Стабилитрон  $V13$  служит для ограничения скольжения и соответственно тока в переходных и аварийных режимах.

Параметры  $PЧ$  выбраны так, что при увеличении нагрузки на валу двигателя частота на выходе  $UZ$  сохраняется постоянной. Пропорционально увеличению сигнала скольжения возрастает ток двигателя. Поэтому жесткость механической характеристики остается такой же, как и у естественной. При увеличении момента нагрузки до максимально допустимого значения открывается стабилитрон  $V13$ . При этом момент, ток и скольжение двигателя остаются постоянными, а частота на выходе  $UZ$  и угловая скорость двигателя снижаются, что соответствует вертикальному участку механической характеристики (рис. 8.9).

При подаче скачком задающего напряжения  $U_{з.с.}$  открывается стабилитрон  $V13$ . С увеличением угловой скорости происходит частотный пуск двигателя при постоянном скольжении и соответствующих ему постоянных токе статора и моменте двигателя. По окончании пуска напряжение  $U_\omega$ , поступающее со стороны датчика угловой скорости, становится близким к за-

Рис. 8.9. Механические характеристики асинхронного короткозамкнутого двигателя при частотном управлении:

1 —  $f_1$ , 2 —  $f_2$ , 3 —  $f_3$ , 4 —  $f_4$ , 5 —  $f_5$  при  $f_1 > f_2 > f_3 > f_4 > f_5$



дающему сигналу  $U_{з.с.}$  Стабилитрон  $V13$  закрывается и угловая скорость привода устанавливается в соответствии с задающим сигналом.

При отключении напряжения  $U_{з.с.}$  осуществляется торможение электропривода с отдачей энергии в сеть. При этом открывается стабилитрон  $V13$ , но уже при другом знаке сигнала скольжения по сравнению с пуском, и на входе  $PЧ$  сигнал скольжения теперь вычитается из сигнала угловой скорости, частота на выходе  $U_Z$  уменьшается и двигатель переходит в генераторный режим (величина скольжения стала отрицательной). Торможение происходит при неизменных значениях тока, момента и скольжения двигателя.

При реверсировании двигателя (изменение полярности  $U_{з.с.}$ ) вначале осуществляется торможение до полной остановки с последующим бесконтактным переключением чередования фаз на выходе  $АИТ$ , осуществляемым посредством системы управления инвертором, после чего двигатель разгоняется в обратную сторону.

Стабилитроны  $V16$ , установленные в цепи обратной связи регулятора тока, ограничивают максимальный уровень сигнала управления выпрямителем  $U_{\omega}$ , т. е. максимальные значения э.д.с. в выпрямительном и инверторном режимах его работы.

#### 8.4. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ В ОБЛАСТИ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГОРНЫХ МАШИН

Современное состояние развития электропривода промышленных установок и рабочих машин основных отраслей производства характеризуется широким внедрением регулируемого тиристорного электропривода постоянного и переменного тока.

Горная промышленность отличается наиболее тяжелыми и специфическими условиями эксплуатации электрооборудования. В связи с этим широкое внедрение регулируемого тиристорного электропривода на горных машинах задерживается.

На открытых горных разработках, характеризующихся более

благоприятными условиями эксплуатации электрооборудования по сравнению с подземными, регулируемый электропривод в виде системы генератор — двигатель (Г—Д) с электромашинным преобразователем применяется давно (одноковшовые и многоковшовые экскаваторы, драги, буровые установки и др.). Однако система Г—Д, обладающая рядом существенных недостатков, заменяется регулируемым тиристорным электроприводом.

На подземных же горных разработках положение дел с применением регулируемого электропривода существенно отличается. Стесненные и взрывоопасные условия эксплуатации электрооборудования в подземных горных выработках обусловили повсеместное применение для добычных, проходческих, транспортных и других горных машин и механизмов нерегулируемого электропривода с асинхронным короткозамкнутым двигателем.

Этот тип привода, несмотря на его достоинства (малые габариты и масса, отсутствие искрящих контактов, простота запуска и пр.), обладает следующими существенными недостатками: 1) отсутствует возможность регулирования угловой скорости двигателя, что требуется при изменившихся условиях забоя, вспомогательных технологических операциях, профилактических работах и в других случаях; 2) при пуске электродвигателя возникает очень большой пусковой ток, который вызывает в шахтной сети значительное падение напряжения и соответственно снижение напряжения на зажимах запускаемого и других двигателей, питающихся от одного и того же трансформатора; 3) отсутствует возможность защиты механизмов от поломок при внезапных перегрузках; 4) не используется установленная мощность электродвигателя, так как при перегрузках возрастает его ток, снижается напряжение, повышается скольжение и возрастает нагрев; 5) при взаимосвязанном электроприводе не обеспечивается равномерное распределение нагрузки между электродвигателями; 6) автоматизация работы машин и агрегатов затруднена; 7) существует необходимость применения передвижных трансформаторных подстанций во взрывобезопасном исполнении; 8) значительные пусковые токи вызывают электродинамические усилия в лобовых частях обмоток двигателя, что приводит к преждевременному выходу из строя их изоляции; 9) не обеспечивается плавный разгон электродвигателей и др.

Дальнейшее сохранение в горных машинах нерегулируемого электропривода с перечисленными недостатками становится препятствием при повышении производительности очистных забоев и создании средств выемки угля без постоянного присутствия людей в очистном забое.

Основой энергетического перевооружения угольных шахт и

рудников, так же как и карьеров, является регулируемый тиристорный электропривод повышенного напряжения.

Современные тиристорные электроприводы постоянного и переменного тока имеют следующие преимущества по сравнению с нерегулируемым приводом переменного тока при их применении для горно-шахтного оборудования:

более высокую перегрузочную способность, что важно при резко переменном характере нагрузки, свойственном горным машинам; значительное снижение потерь (тепловых) при перегрузке двигателя и работе его на упор; исключение увеличения момента, возникающего за счет электромагнитного переходного процесса при пуске электродвигателя, разрушающе действующего на поверхность зубьев шестерен редуктора; обеспечение пуска электродвигателей со значительно меньшим пусковым током; осуществление равномерного распределения нагрузки между двумя или четырьмя электродвигателями горных машин; возможность активного управления динамикой горных машин в направлении ее ограничения; осуществление профилактических работ в режиме ползучей скорости с последующей проверкой их качества на малой скорости вместо ведения этих работ в толчковом режиме с последующей проверкой качества профилактики сразу на полной скорости (повышается качество профилактики, снижается опасность механического и электрического травматизма, улучшаются условия труда); возможность размещения трансформаторных подстанций и другого энергетического оборудования на сборном штреке или на поверхности шахты, где можно использовать электрооборудование в нормальном общепромышленном исполнении; возможность осуществления автоматической связности механических операций при подземных горных работах за счет повышения полезно реализуемой электровооруженности и управляемости машин.

На основе указанных преимуществ регулируемого электропривода горных машин становится возможным числовое программное управление с применением управляющих вычислительных машин. Совершенствование этих средств в дальнейшем позволит исключить постоянное пребывание людей в призабойном пространстве.

Таким образом, основными направлениями в области дальнейшего развития электропривода горных машин являются:

обоснование целесообразности областей применения того или иного вида регулируемого электропривода с учетом необходимости обеспечения нормального функционирования систем электроснабжения, автоматики, телемеханики, управления и связи;

сосредоточение научно-исследовательских, проектно-конструкторских и опытно-промышленных работ в направлении со-

здания и внедрения тиристорного привода постоянного и переменного тока с асинхронным короткозамкнутым и вентильным двигателями средств механизации очистных, проходческих работ и внутришахтного транспорта;

определение влияния тиристорных электроприводов на качество электрической энергии и на электробезопасность;

устранение снижения коэффициента мощности в питающей сети при тиристорных электроприводах;

создание законченных систем машин и приборов шахтной автоматики и телемеханики, позволяющих комплексно механизировать и автоматизировать очистные и проходческие работы в различных горно-геологических условиях, полностью используя при этом возможности, создаваемые высокой управляемостью тиристорного привода;

применение тиристорных преобразователей в общепромышленном исполнении с рудничными защитами при расположении их на поверхности и разработка тиристорных преобразователей в рудничном взрывобезопасном исполнении с искробезопасными цепями управления и связи при расположении их в подземных выработках;

комплексная поставка с заводской наладкой при выпуске тиристорных электроприводов;

разработка тиристорных приводов переменного тока малой мощности с частотным управлением на базе транзисторов для вспомогательных механизмов горных машин и средней мощности с частотным управлением с широтно-импульсной модуляцией для главных механизмов горных машин в рудничном взрывобезопасном исполнении с искробезопасными цепями управления и связи;

разработка систем управления электроприводами на базе элементов серии «Логика-И», на базе микропроцессорной техники;

разработка в последующем автоматических систем управления технологическими процессами (АСУТП) очистных, проходческих и транспортных работ с входящими в их состав многими тиристорными приводами;

создание в конечном итоге средств выемки угля без постоянного присутствия людей в очистных забоях.

#### **Контрольные вопросы**

1. В чем состоят основные принципы построения замкнутых систем автоматического управления электроприводами?

2. Какие обратные связи осуществляются в электроприводах системы Г—Д и как они влияют на механические свойства электропривода?

3. Перспективы применения для горных машин частотно-регулируемого электропривода.

4. Роль регулируемого электропривода при совершенствовании горных машин.



## Часть вторая

# ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ГОРНЫХ МАШИН

---

### Глава 9

## СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

### 9.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Современные горнопромышленные районы получают электроэнергию от энергосистем и реже от местных электростанций. Последний вид электроснабжения относится только к вновь осваиваемым районам, удаленным от энергосистем. Если горное предприятие, питающееся от местной электростанции, находится в районе, обслуживаемом энергосистемой, то для уменьшения резервов предусматривается их совместная работа.

Типичная схема электроснабжения горнопромышленного района включает обычно несколько электростанций, связанных между собой подстанциями и линиями электропередачи 110 и 220 кВ. Линии связи между энергосистемами работают при более высоких напряжениях — 380, 500, 750, 1150 кВ.

Подстанции, получающие питание по трем и более направлениям, называют узловыми. Подстанции, включенные в рассечку линии, называют проходными, а подстанции, присоединенные в конце тупиковых линий, — конечными, или тупиковыми. На подстанциях энергосистемы устанавливают двух- или трехобмоточные трансформаторы.

Распределительное устройство генераторного напряжения электростанции или распределительное устройство вторичного напряжения понизительной подстанции энергосистемы, к которому присоединены распределительные сети данного района, называют центром питания. Линию, питающую ряд трансформаторных подстанций от центра питания, называют распределительной. Питающей называют линию, подающую к подстанции электроэнергию от центра питания без распределения электроэнергии по ее длине.

Выбор схемы питания горного предприятия от энергосистемы и схем распределения электроэнергии на территории горного предприятия производят на базе экономического сравнения вариантов с учетом требований, предъявляемых к надежности и безопасности электроснабжения.

## 9.2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА И ЕЕ СОСТАВНЫЕ ЧАСТИ

В соответствии с Правилами устройства электроустановок (ПУЭ) [10] совокупность электростанций, линий электропередач, подстанций и тепловых сетей, связанных в одно целое общностью режима и непрерывностью производства и распределения электрической и тепловой энергии, называют *энергетической системой*. Для возможности передачи электроэнергии из одного района в другой между энергетическими системами строят линии электропередачи высокого напряжения, так называемые *межсистемные связи*.

Составными частями типовой энергетической системы являются: электрические станции, подстанции, линии электропередачи и тепловые сети. *Электрическими станциями* называются электроустановки, служащие для производства электрической и тепловой энергии из других видов энергии. Электростанции сооружают с учетом возможности широкого использования природных энергетических ресурсов.

*Подстанциями* называются электроустановки, служащие для преобразования и распределения электроэнергии и состоящие из трансформаторов или других преобразователей энергии, распределительных устройств, аккумуляторной батареи, устройств управления и вспомогательных сооружений.

*Распределительным устройством* называется электроустановка, служащая для приема и распределения электроэнергии и состоящая из коммутационных аппаратов, устройств защиты и автоматики, измерительных приборов, сборных и соединительных шин и вспомогательных устройств.

*Линиями электропередачи* называется система проводов, служащих для передачи электроэнергии от генераторов электростанций к местам потребления и для распределения ее между электроприемниками.

*Тепловыми сетями* называется система трубопроводов, служащих для передачи тепловой энергии (пар, горячая вода) от теплоэлектроцентрали к потребителю. Часть энергетической системы, состоящая из генераторов, распределительных устройств, электрических сетей (подстанций и линий электропередачи различных напряжений) и электроприемников, называется *электрической системой*.

Часть энергетической системы, кроме электроприемников, называется *системой электроснабжения*.

В качестве стандартных напряжений в общей системе электроснабжения принимают для: а) генераторов — 230, 400, 690, 6300, 10 500 и 21 000 В; б) электроприемников — 127, 220, 380, 660, 6000 и 10 000 В; в) распределения и передачи электроэнергии — все напряжения, перечисленные в предыдущем пункте, а также 20, 35, 110, 220, 330, 500, 750 и 1000 кВ.

Основными требованиями, которым должна удовлетворять всякая система электроснабжения, являются: надежность электроснабжения, хорошее качество электроэнергии, безопасность и экономичность всех элементов системы.

Надежность системы электроснабжения обеспечивается за счет рационального ее проектирования с учетом технических и экономических соображений, а также высоким уровнем эксплуатации. Хорошее качество электроэнергии определяется соблюдением допустимых изменений параметров напряжения и частоты, установленного ГОСТом. Диапазон допустимых изменений частоты обеспечивается энергосистемой, а диапазон допустимых изменений параметров напряжения на зажимах потребителей зависит от правильного проектирования и эксплуатации электроустановок.

От правильного выбора, монтажа и эксплуатации электроустановок и защитных средств зависит электробезопасность широкого круга лиц, соприкасающихся с электроустановками.

Рациональное сочетание капитальных затрат на сооружение систем электроснабжения и ежегодных эксплуатационных расходов является необходимым условием разумного и экономичного использования средств, выделяемых государством на электрификацию горной промышленности страны.

### 9.3. КАТЕГОРИИ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ

В отношении требуемой надежности электроснабжения ПУЭ разделяют электроприемники промышленных предприятий на следующие три категории [14].

*I категория* — электроприемники, нарушение электроснабжения которых может повлечь за собой опасность для жизни людей, значительный ущерб народному хозяйству, массовый брак продукции, расстройство сложного технологического процесса. В горной промышленности к этой категории относят: противопожарные насосные установки, водоотливные установки шахт и карьеров, вентиляторы главного проветривания опасных по газу рудников и угольных шахт, вспомогательные реверсивные вентиляторы (на шурфе) газовых шахт III категории и сверхкатегорных, калориферные установки для районов страны с тяжелыми климатическими условиями (города Воркута, Инта, Норильск, Караганда и др.), подъемные установки, обслуживающие спуск — подъем людей, центральные подземные подстанции, флотационные и агломерационные машины, пульпоподающие насосы и др.;

*II категория* — электроприемники, нарушение электроснабжения которых связано с массовым недоотпуском продукции, простоям рабочих, механизмов и промышленного транспорта. В горной промышленности к этой категории относят: скиповые подъемные установки, калориферные установки для районов страны

без тяжелых климатических условий, вентиляторы на рудниках и шахтах, не опасных по газу и пыли, измельчительные и классификационные механизмы и др.;

*III категория* — все остальные электроприемники, не подходящие под определение I и II категорий (электроприемники цехов несерийного производства, вспомогательных цехов, небольшие поселки и др.). В горной промышленности к этой категории относят: все виды транспорта породы, механические мастерские, склады, административный и бытовой комбинаты, внутреннее освещение зданий, наружное освещение промышленной площадки и др.

Из числа приемников I категории должна быть выделена *особая группа* электроприемников, требующая повышенной надежности питания. К особой группе относят приемники, обеспечивающие безаварийную остановку производства, перерыв в электроснабжении которого угрожает жизни и здоровью людей, взрывом, пожаром, порчей основного технологического оборудования.

В соответствии с требованиями ПУЭ допускаются перерывы в электроснабжении: а) электроприемников I категории — на время автоматического ввода резервного питания при условии обеспечения их электроэнергией от двух независимых источников питания; б) электроприемников II категории — на время, необходимое для включения резервного питания дежурным персоналом или выездной оперативной бригадой; в) электроприемников III категории — на время, необходимое для ремонта или замены поврежденного элемента системы электроснабжения, но не более одних суток.

Таким образом, отнесение потребителей к той или иной категории определяет степень резервирования, что, естественно, влияет на капитальные затраты. Поэтому в каждом конкретном случае необходимо при отнесении потребителей к той или иной категории и определении степени резервирования тщательно взвесить все возможные последствия нарушений электроснабжения.

Правила устройства электроустановок регламентируют только порядок продолжительности перерыва электроснабжения и не ограничивают число перерывов. Между тем надежность электроснабжения, безусловно, характеризуется двумя указанными факторами.

Повышения надежности электроснабжения можно добиться проведением следующих мероприятий: а) снижением удельной повреждаемости, т. е. повышением надежности отдельных элементов системы электроснабжения, в том числе путем применения электрооборудования, соответствующего условиям работы данной электроустановки, систематического проведения планово-предупредительных и профилактических испытаний, ремонтом

электроустановок и их электрооборудования, а также систематического обучения обслуживающего персонала; б) сокращением числа элементов в схемах электроснабжения путем упрощения схем; в) сокращением длительности аварийного перерыва в электроснабжении при каждом повреждении путем повышения качества обслуживания, резервирования и внедрения средств защиты и автоматики

#### **9.4. СХЕМЫ ПИТАНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЕЙ**

В соответствии с указаниями ПУЭ схемы электроснабжения предприятий должны выполняться, исходя из следующих принципов:

а) максимального приближения высшего напряжения к электроустановкам потребителей путем устройства глубоких вводов напряжением 35, 110 и 220 кВ с наименьшим числом ступеней промежуточной трансформации и аппаратов; сооружения подстанций вблизи центров нагрузки, цеховых подстанций и др.;

б) широкого применения наиболее простых и дешевых аппаратов (предохранителей, разъединителей, отделителей, выключателей нагрузки) там, где они соответствуют параметрам сети, обеспечивают селективность и надежную чувствительность действия;

в) широкого применения автоматического повторного включения и автоматического включения резерва.

Для приема электроэнергии от районной энергосистемы (РЭС) на территории предприятия сооружают один или несколько приемных пунктов (ПП).

Один ПП сооружают при компактном расположении нагрузок на предприятии и отсутствии специальных требований к надежности питания. Два и более ПП сооружают при наличии на предприятии двух и более обособленных относительно мощных групп потребителей, наличии специальных требований к надежности электроснабжения, целесообразности сооружения второго приемного пункта для нагрузок второй очереди при поэтапном развитии предприятия, а также во всех тех случаях, когда будет обоснована экономическая целесообразность сооружения нескольких приемных пунктов.

На больших предприятиях, к которым электроэнергия от районной энергосистемы подается при напряжении 35 кВ и более, в качестве ПП сооружают узловые распределительные подстанции (УРП), от которых электроэнергия распределяется при том же напряжении между подстанциями глубоких вводов (ПГВ), или главные понизительные подстанции (ГПП), на которых напряжение понижается до напряжения распределительной сети предприятия.

На больших и средних предприятиях, к которым электроэнергия подводится при напряжении, совпадающем с напряже-

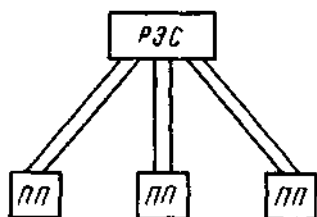


Рис 9.1. Схема питания приемных пунктов по двум радиальным линиям

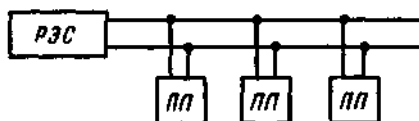


Рис 9.2. Схема питания приемных пунктов от двойной магистральной линии

нием распределительной сети, в качестве приемных пунктов сооружают центральные распределительные пункты (ЦРП) или распределительные пункты (РП).

На малых предприятиях в качестве ПП сооружают трансформаторные подстанции (ТП), совмещенные с РП.

Поскольку на горных предприятиях имеются электроприемники I категории, а также II категории, бесперебойная работа которых необходима для бесперебойного функционирования основных производственных процессов предприятия, подача электроэнергии от РЭС к ПП должна производиться не менее чем по двум радиальным линиям (рис. 9.1) или по ответвлениям от двойной магистральной линии энергосистемы (рис. 9.2).

ПП, к которым присоединены потребители I категории, должны получать питание от двух независимых источников. Независимыми источниками являются: а) две электростанции; б) две подстанции энергосистемы; в) две секции сборных шин электростанции или подстанции энергосистемы при условии, что каждая из секций имеет питание от независимого источника и секции не связаны между собой или имеют связь, автоматически отключаемую при нарушении нормальной работы одной секции.

Для питания электроприемников особой группы кроме двух основных источников питания электроприемников I категории должен предусматриваться третий независимый источник, достаточный для безаварийной остановки производства. В качестве таких источников могут быть использованы дизельные электростанции, аккумуляторные батареи и др., включаемые автоматически при исчезновении напряжения на обоих основных источниках питания. При выходе из работы одного из двух источников питания независимый источник питания переводится в режим горячего резерва. Мощность третьего независимого источника должна быть минимальной, обеспечивающей питание только электроприемников особой группы, необходимых для безаварийной остановки производства.

## 9.5. СХЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПРЕДПРИЯТИИ

Как правило, на современных предприятиях применяют ступенчатый принцип построения внутренней схемы электроснабжения с одно-, двух-, трех- и более кратной трансформацией напряжения [10].

В дальнейшем электроустановку, через которую электроэнергия поступает в звено схемы с данным рабочим напряжением, будем называть источником питания (ИП), а электроустановку, которая получает электроэнергию от этого звена, — приемником (П). Источниками питания для первого звена схемы являются приемные пункты, на которые электроэнергия поступает от энергосистемы, а приемниками — потребители электроэнергии (понижительные подстанции, двигатели, работающие на напряжении, которое подводится от энергосистемы). Для второго звена источниками питания являются понижительные подстанции, через которые электроэнергия поступает из первого во второе звено, а приемниками — понижительные подстанции, на которых производится дальнейшее понижение напряжения для подачи электроэнергии в третье звено, и двигатели, работающие при напряжении второго звена.

Схемы в отдельных звеньях системы внутреннего электроснабжения могут быть радиальными, магистральными (с односторонним и двухсторонним питанием и кольцевыми) и смешанными.

Радиальными называют схемы, в которых отсутствуют ответвления по длине питающей линии (рис. 9.3). Магистральными называют схемы, в которых от одной линии питается несколько потребителей, расположенных вдоль ее протяжения (рис. 9.4). Выбор той или иной схемы определяется территориальным размещением нагрузок, их значениями, требуемой степенью надежности питания и другими характерными особенностями предприятия [3].

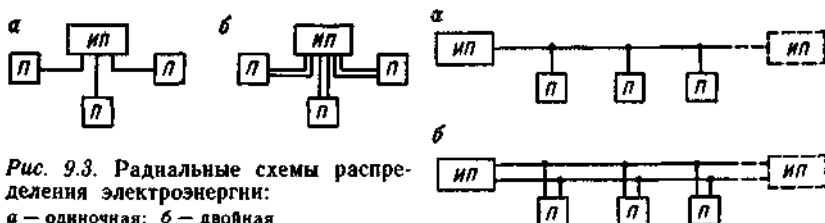


Рис. 9.4. Магистральные схемы распределения электроэнергии с глухими ответвлениями:

а — одиночная; б — двойная



Рис. 9.5. Цепочные магистральные схемы распределения электроэнергии:

а — одиночная; б — двойная

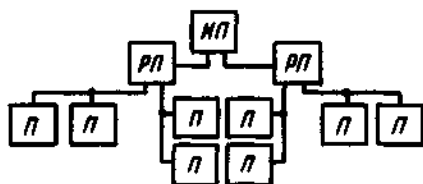


Рис. 9.6. Радиальная двухступенчатая схема

В зависимости от степени надежности электроснабжения потребителей схемы выполняют одиночными или двойными. Одиночные схемы применяют для питания потребителей III категории, а также потребителей II категории, если прекращение работы последних не связано с нарушением нормального функционирования производства и не влечет за собой значительного экономического ущерба. Для питания потребителей I категории, а также потребителей II категории, прекращение работы которых связано с нарушением нормального функционирования производства или влечет за собой значительный экономический ущерб, применяют двойные схемы.

Радиальные схемы используют для подачи электроэнергии к обособленным потребителям или группе потребителей, размещенных в стороне от других потребителей.

Магистральные схемы с односторонним питанием широко применяют при расположении потребителей вдоль одного направления, для группы технологически связанных потребителей, а также во всех случаях, когда они имеют технико-экономические преимущества по сравнению с другими схемами. При воздушных линиях применяют в основном магистральные схемы с глухими отпайками. При кабельных линиях используют в основном цепочные схемы с заводом магистральной линии на распределительный пункт или к потребителю (рис. 9.5).

Радиальные и магистральные схемы с односторонним питанием выполняют одноступенчатыми и двухступенчатыми (рис. 9.6). В последнем случае на первой ступени электроэнергия подводится от источника питания к распределительным пунктам, а на второй ступени — от распределительных пунктов непосредственно к потребителям. При этом в ряде случаев может оказаться целесообразным сочетание радиальной схемы на первой ступени с магистральной на второй (рис. 9.7) или магистральной схемы на первой ступени с радиальной на второй (рис. 9.8). На любой ступени возможно также питание од-



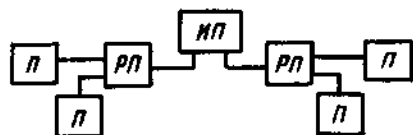


Рис. 9.7. Сочетание радиальной схемы на первой ступени с магистральной на второй

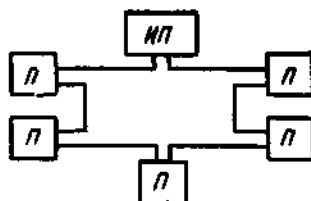


Рис. 9.8. Сочетание магистральной схемы на первой ступени с радиальной на второй

ной части потребителей по радиальной схеме, а другой — по магистральной.

Одноступенчатые схемы применяют на малых предприятиях, а также для питания больших сосредоточенных нагрузок на средних и больших предприятиях. Двухступенчатые схемы применяют для питания через РП удаленных обособленных групп потребителей. Схемы с числом ступеней более двух допускаются при развитии предприятия в случае их технико-экономической целесообразности.

Одиночные и двойные магистрали с двухсторонним питанием применяют при необходимости питания от двух независимых источников по условиям надежности электроснабжения, а также в случаях, когда расположение группы потребителей между двумя источниками питания создает экономические преимущества независимо от требуемой надежности питания. На рис. 9.4 и 9.5 второй источник питания показан пунктиром.

Кольцевые магистрали, являющиеся частным случаем одиночной магистрали с двухсторонним питанием, применяют при таком расположении потребителей, которое делает целесообразным охват их одной кольцевой линией (рис. 9.9).

Ввиду сложности выполнения защиты магистральных линий с двухсторонним питанием и кольцевых линий напряжением до 10 кВ эти линии в нормальном режиме работают разомкнутыми, т. е. как магистральные линии с односторонним питанием. Возможность двухстороннего отсоединения любого участка линии при его повреждении и подачи электроэнергии ко всем потребителям, присоединенным к неповрежденным участкам, обеспечивает повышенную надежность электроснабжения. В режиме двухстороннего питания магистральные линии работают только при напряжении от 20 кВ и выше.

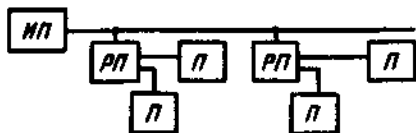


Рис. 9.9. Магистральная кольцевая схема

Обычно распределение электроэнергии на промышленном предприятии осуществляется по смешанной схеме, составленной из отдельных основных схем.

### **Контрольные вопросы**

1. Изложите основные элементы типичной схемы электроснабжения горнопромышленного района.
2. Перечислите категории электроприемников горных предприятий.
3. Сформулируйте отличительные особенности схем электроснабжения горных предприятий.

## **Глава 10**

# **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

### **10.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ**

При проектировании систем электроснабжения выполняется ряд расчетов, по результатам которых выбирается оборудование подстанций, сечение и материал проводников, наиболее экономичные способы передачи электрической энергии, конфигурация сети, расположение трансформаторных подстанций. Расчетные электрические нагрузки и учет изменения их во времени в этом случае являются исходными данными для всего последующего проектирования.

При проектировании электроснабжения горных предприятий расчетные нагрузки определяют для групп различных электроприемников, получающих питание от подстанций. Поэтому исходными данными для определения электрических нагрузок отдельных элементов и всей системы электроснабжения являются сведения о количестве потребителей, их расположении и номинальных мощностях.

Нагрузка электрических приемников независимо от характера их работы изменяется во времени случайно и формируется в результате совместного действия случайных факторов, как то: суммарная длительность цикла, длительность его рабочей части, длительность паузы, мощность, потребляемая в рабочей части цикла и при холостом ходе, и т. п. В зависимости от видов расчета и оборудования вводят различные коэффициенты, которые учитывают частоту появления расчетного максимума нагрузки и форму суточного графика.

### **10.2. ГРАФИКИ НАГРУЗКИ**

Нагрузки, потребляемые из сети отдельными электроприемниками или их группами, могут выражаться в единицах мощности или тока. Нагрузки подавляющего большинства электроприем-

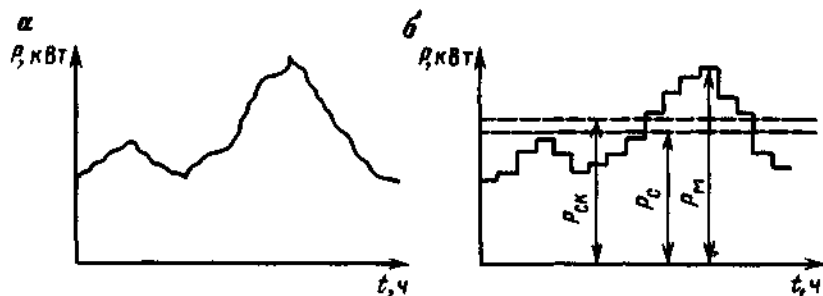


Рис. 10.1. Графики нагрузки:  
 а — записанный самописцем; б — построенный по показаниям счетчика

ников не остаются постоянными, они изменяются с течением времени. Ввиду очень большого разнообразия электроприемников и бесконечного множества их комбинаций в группе эти изменения нельзя выразить аналитически, поэтому их обычно представляют в прямоугольной системе координат кривыми или ломаными линиями и называют графиками нагрузки (рис. 10.1). Из сказанного очевидно, что графики могут выражать изменение во времени активной, реактивной, полной мощности или тока. В зависимости от поставленной цели они могут быть сняты или построены для любого промежутка времени — часа, смены, суток, года.

Общим математическим выражением любого графика нагрузки, например графика активной мощности, является зависимость  $P=f(t)$ , где  $t$  — время, отложенное по оси абсцисс. Площадь, ограниченная графиком нагрузки по продолжительности, дает в определенном масштабе расход активной или реактивной энергии за время работы  $T$ .

Следует различать индивидуальные и групповые графики нагрузки соответственно для отдельных электроприемников и присоединений, питающих группы электроприемников. Все величины и показатели, относящиеся к групповым графикам, обозначают прописными буквами латинского алфавита ( $P, Q, I$ ), а относящиеся к индивидуальным — строчными ( $p, q, i$ ). Кроме того, показатели графиков нагрузки и электроприемников приведены в основном по активной мощности. С достаточной точностью аналогичные выражения можно привести по реактивной мощности и току.

График может быть записан в виде непрерывной кривой обычными самопишущими или специальными регистрирующими приборами. Широко применяют графики в виде ступенчатой кривой, которая строится по показаниям счетчиков активной и реактивной электроэнергии, записываемым через равные промежутки времени.

В качестве примера приведены графики нагрузок, записанные самопишущими приборами (рис. 10.1, а) и построенные по показаниям счетчиков через равные промежутки времени (рис. 10.1, б). Как следует из рис. 10.1, нагрузки не являются стабильными, а претерпевают постоянные изменения. Эти изменения объясняются изменениями технологического процесса, внедрением новых прогрессивных методов работы, изменениями удельного потребления электроэнергии, повышением использования оборудования в результате интенсификации и автоматизации производственных процессов, повышением норм освещенности, уплотнением рабочего времени и другими факторами. При проектировании систем электроснабжения используют групповые графики нагрузок (от графиков нагрузки нескольких электроприемников до графиков нагрузки предприятия в целом). Индивидуальные графики необходимы лишь для определения нагрузки мощных электроприемников.

Так как производственные операции на предприятиях горной промышленности постоянно повторяются, то и графики нагрузок (индивидуальные и групповые) обладают цикличностью и периодичностью. Любой график нагрузки изучают за время, равное длительности законченного технологического цикла данной группы электроприемников. В большинстве случаев это время считается равным длительности одной смены. При этом принимают, что приемники работают с наибольшими нагрузками и производят длительностями.

На практике для расчетов электроснабжения широко используют не графики нагрузок, а ряд безразмерных коэффициентов, являющихся показателями графиков и характеризующих режим работы потребителей. Для расчета этих коэффициентов на многих предприятиях систематически определяют нагрузки и режимы работы отдельных электроприемников и их групп. Усредненные значения коэффициентов для характерных групп электроприемников отдельных участков, цехов или предприятий и являются исходными данными для расчета нагрузок (приводятся в справочной литературе).

В теории электрических нагрузок и ее практических приложениях удобно пользоваться некоторыми безразмерными показателями (коэффициентами), характеризующими режим работы отдельных электроприемников и их групп. Для обозначения коэффициентов графиков нагрузок принята следующая система: а) все коэффициенты индивидуальных графиков обозначают  $k$ , а групповых —  $K$ ; б) вид коэффициента обозначают русской начальной буквой его названия и ставят ее в индекс.

1. Коэффициентом использования активной мощности приемника  $k_a$  или группы приемников  $K_a$  называется отношение средней активной мощности отдельного приемника  $P_c$  или группы их  $P_c$  к ее номинальному значению, т. е.

$$k_{\text{и}} = p_{\text{с}}/p_{\text{ном}}; \quad K_{\text{и}} = P_{\text{с}}/P_{\text{ном}} = \sum_1^n k_{\text{и}} p_{\text{ном}} / \sum_1^n p_{\text{ном}}. \quad (10.1)$$

Коэффициент использования, как и средняя нагрузка, относится к смене с наибольшей нагрузкой приемников и является основным показателем графика нагрузки. Аналогично определяют коэффициенты использования по реактивной мощности и по току.

2. *Коэффициент максимума*  $K_{\text{мах}}$  группового графика представляет собой отношение расчетного (получасового) максимума нагрузки к ее среднему значению, т. е.

$$K_{\text{мах}} = P_{\text{мах}}/P_{\text{с}}. \quad (10.2)$$

Коэффициент максимума — это важная характеристика, которая связывает две величины: расчетную и среднюю нагрузки. Его величину можно определить из таблиц справочников по эффективному числу токоприемников и коэффициенту использования.

3. *Коэффициент спроса*, как и коэффициент максимума, является показателем групповых графиков. Коэффициентом спроса по активной мощности  $K_{\text{с}}$  называют отношение расчетной активной мощности (получасового максимума  $P_{\text{мах}}$ ) к номинальной (установленной) мощности группы (без мощности резервных приемников):

$$K_{\text{с}} = P_{\text{мах}}/P_{\text{ном}}. \quad (10.3)$$

В горной промышленности расчеты нагрузок основываются большей частью на коэффициенте спроса, который является также важнейшим расчетным показателем.

Разделив числитель и знаменатель формулы (10.3) на среднюю нагрузку  $P_{\text{с}}$  и используя формулы (10.1) и (10.2), запишем:

$$K_{\text{с}} = P_{\text{мах}}/P_{\text{с}} : P_{\text{ном}}/P_{\text{с}} = K_{\text{мах}} : 1/K_{\text{и}} = K_{\text{и}} K_{\text{мах}}. \quad (10.4)$$

При расчете нагрузок можно использовать любую из двух формул:

$$P_{\text{мах}} = K_{\text{с}} P_{\text{ном}} \quad \text{и} \quad P_{\text{мах}} = K_{\text{мах}} P_{\text{с}}. \quad (10.5)$$

Следует обратить внимание на взаимосвязанность основных коэффициентов, характеризующих графики нагрузки:

$$K_{\text{с}} = K_{\text{и}} K_{\text{мах}}. \quad (10.6)$$

По существу все методы расчета нагрузок, имеющие практическое применение, сводятся к методам определения приведенных выше коэффициентов. Вместе с тем иногда необходимо знать и другие коэффициенты, например коэффициент формы. *Коэффициентом формы* графика нагрузки  $K_{\text{ф}}$  называют отно-

шение эффективной (среднеквадратичной) мощности  $P_g$  группы электроприемников за определенный промежуток времени к среднему значению за то же время:

$$K_{\Phi} = P_g / P_c. \quad (10.7)$$

При расчетах нагрузок используют и другие показатели, например коэффициенты включения и загрузки приемников, коэффициент заполнения группового графика.

### 10.3. ОСНОВНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ

*Номинальная мощность* является исходной для определения величины нагрузки от групп электроприемников. Номинальная мощность электроприемника дается в паспорте электроприемника. Номинальная мощность электродвигателя, выраженная в киловаттах, — это мощность  $P_{ном}$ , которую развивает двигатель на валу при номинальном напряжении, а номинальная мощность трансформатора  $S_{ном}$ , выраженная в киловольт-амперах, или источника света  $P_{ном}$ , выраженная в киловаттах, — это мощность, потребляемая из сети.

Под номинальной активной мощностью приемника  $q_{ном}$  понимают реактивную мощность, потребляемую из сети (знак «+») или отдаваемую в сеть (знак «—») при номинальной активной мощности и номинальном напряжении (а для синхронных электродвигателей и при номинальном токе возбуждения или номинальном коэффициенте мощности).

Между номинальными мощностями данного электроприемника при продолжительном  $P_{ном}$  и повторно-кратковременном  $P_{пв}$  режимах существует соотношение

$$P_{ном} = P_{пв} \sqrt{ПВ},$$

(ПВ — продолжительность включения в долях единицы, из которого следует, что при  $ПВ < 1$   $P_{пв} > P_{ном}$ . Последнее очевидно, поскольку процесс нагрева при повторно-кратковременном режиме по сравнению с длительным режимом замедляется. Это позволяет использовать электроприемники с повышенной нагрузкой во время включения (вследствие охлаждения во время паузы). Номинальную реактивную мощность электроприемника рассчитывают по аналогичной формуле.

Групповая номинальная активная (реактивная) мощность — это алгебраическая сумма номинальных активных (реактивных) мощностей группы электроприемников, приведенных к  $ПВ = 1$  (кроме резервных):

$$P_{ном} = \sum_1^n P_{ном}; \quad Q_{ном} = \sum_1^n q_{ном}.$$

*Средняя нагрузка*  $P_c$  за интервал заданной длительности  $T$  выражается формулой (применительно к групповому графику активной мощности)

$$P_c = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt, \quad (10.8)$$

где  $P(t)$  — текущее значение ординат группового графика. Аналогичными формулами могут быть представлены средние полная и реактивная мощности, а также ток. Средняя нагрузка всего графика за время  $T$  (см. рис. 10.1) является величиной, зависящей лишь от конфигурации самого графика и продолжительности цикла или периода наблюдения. Применительно к графикам активной и реактивной мощностей, площади которых определяют расход активной  $W_a$  и реактивной  $W_p$  энергии, можно записать, что

$$P_c = W_a/T; \quad Q_c = W_p/T.$$

Средние нагрузки за другие характерные интервалы времени обозначают дополнительным индексом, например:  $P_{c \max}$  ( $Q_{c \max}$ ) — средняя нагрузка по активной (реактивной) мощности за максимально загруженную смену;  $P_{cr}$  ( $Q_{cr}$ ) — среднегодовая нагрузка по активной (реактивной) мощности.

*Средняя активная мощность*  $P_{c \max}$  (*реактивная*  $Q_{c \max}$ ) *за наиболее загруженную смену* — основная величина при расчете нагрузок групп электроприемников. Наиболее загруженной считается смена с наибольшим потреблением электроэнергии данной группой приемников, цехом или предприятием в целом для характерных суток. Характерными считаются те сутки, в течение которых потребление электроэнергии равно величине средневзвешенного потребления электроэнергии за каждый рабочий день в рассматриваемом периоде времени (неделя, месяц, год).

Так как потери мощности в проводнике пропорциональны квадрату нагрузки, то имеют значение квадратичные графики, в первую очередь групповые, которые характеризуются *средней квадратичной*, или *эффективной*, *нагрузкой*  $P_{ck}$  за интервал времени  $T$ :

$$P_{ck} = \left( \frac{1}{T} \int_0^T P^2(t) dt \right)^{1/2}. \quad (10.9)$$

Аналогичные формулы можно вывести для реактивной или полной мощности и тока. При неравномерном графике средняя квадратичная нагрузка  $P_{ck}$  всегда выше средней  $P_c$  (см. рис. 10.1).

*Максимальная нагрузка.* Максимальные значения активной, реактивной и полной мощности или тока представляют собой

наибольшие из соответствующих средних величин за некоторый промежуток времени (см. рис. 10.1).

Максимальная длительная нагрузка ( $P_{\max}$ ,  $Q_{\max}$ ,  $I_{\max}$ ) различной продолжительности (10, 30, 60 мин и т. д.) является основной величиной при расчете сетей по нагреву и выборе мощности трансформаторов и преобразователей, а также для определения максимальных потерь мощности в сетях, выборе проводов, шин, кабелей и др. Обычно в качестве расчетной принимают максимальную из средних нагрузок длительностью 30 мин. Такой получасовой максимум применяют в качестве расчетного потому, что он близок к трем постоянным времени нагрева часто применяемых проводников малых и средних значений. Для единообразия расчетной методики получасовой максимум рассматривается как расчетная нагрузка для выбора по нагреву всех элементов электроснабжения.

Величину расчетного максимума тока  $I_{\max}$  группы электроприемников определяют из соотношения

$$I_{\max} = S_{\max} / \sqrt{3} U_{\text{ном}} = P_{\max} / \sqrt{3} U_{\text{ном}} \cos \varphi_{\max}, \quad (10.10)$$

где  $\cos \varphi_{\max}$  — значение коэффициента мощности группы за период расчетного максимума активной мощности;  $U_{\text{ном}}$  — номинальное напряжение;  $S_{\max}$  — полная расчетная максимальная мощность.

**Пиковая нагрузка.** Для расчета сетей, выбора трансформаторов и другого оборудования кроме величины расчетной нагрузки  $P_{\max}$  необходимо знать максимальные нагрузки, пиковые, создаваемые отдельными мощными электроприемниками.

Пиковой нагрузкой одного или группы электроприемников называется кратковременная нагрузка (длительностью 1—2 с), обусловленная пуском электродвигателей, эксплуатационными короткими замыканиями дуговых электропечей, электрической сваркой и т. д. Пиковая нагрузка характеризуется частотой ее появления, крутизной нарастания и абсолютной величиной превышения над средней величиной нагрузки.

Эта нагрузка принимается за основу в расчетах колебаний напряжения, при выборе устройств и уставок защиты и при проверке электрических сетей по условиям самозапуска электродвигателей после значительного снижения напряжения при коротких замыканиях.

Пиковый ток  $I_{\text{п}}$  группы электроприемников напряжением до 1000 В с достаточной для практики степенью точности можно определить по формуле

$$I_{\text{п}} = i_{\text{п max}} + (I_{\max} - i_{\text{ном max}}), \quad (10.11)$$

где  $i_{\text{п max}}$  — пусковой ток электродвигателя максимальной мощности в группе;  $I_{\max}$  — ток максимальной нагрузки всех элект-



роприемников;  $i_{ном\ max}$  — номинальный (приведенный к ПВ-1) ток электродвигателя с максимальным пусковым током.

Пиковые токи группы электродвигателей выше 1000 В при их самозапуске и для электроприемников с ударными нагрузками определяют с помощью расчета.

#### 10.4. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Все методы определения электрических нагрузок условно делят на две группы.

Первая группа включает методы расчета, не использующие теорию вероятностей (интерполяционные и эмпирические методы расчета). Наиболее важными из них являются: 1) способ определения расчетной нагрузки при заданном графике; 2) расчет нагрузок по технологическим данным; 3) расчет нагрузок по числу часов использования максимума и расходу электроэнергии; 4) расчет нагрузок по методу коэффициента спроса и др.

Все эти методы либо не очень точны, либо имеют ограниченную область применения.

Ко второй группе относятся методы, использующие теорию вероятностей. Они более отвечают физической сущности электрических нагрузок. Известны три основных метода определения нагрузок: 1) метод коэффициентов использования и максимума; 2) статистический метод; 3) метод вероятностного моделирования графиков нагрузок.

Два последних метода в проектных расчетах в настоящее время еще не используют.

Практически на горных предприятиях электрические нагрузки преимущественно рассчитывают по методу коэффициента спроса. Хотя этот метод и является ориентировочным, однако он отличается простотой и при большом числе электроприемников в группе (около 100 и более) дает приемлемые результаты.

Ранее приведенная формула (10.5) связывает расчетную нагрузку (максимум заданной продолжительности)  $P_{расч}$  с номинальной мощностью групп приемников

$$P_{расч} = P_{max} = K_c P_{ном}.$$

Здесь  $K_c$  — коэффициент спроса по активной мощности, относимый к тому же интервалу (30 мин) усреднения, что и рассчитываемая нагрузка.

В рассматриваемом методе коэффициент спроса принимают по справочным данным в виде какой-то постоянной величины, зависящей от рода потребителей и их технологического режима, но не зависящей от числа приемников, входящих

в группу. Однако такое предложение противоречит физическому смыслу и основным представлениям о законах формирования электрических нагрузок и теоретически приемлемо лишь при бесконечно большом числе приемников в группе. В последнем случае  $K=1$ , тогда согласно формуле (10.4)  $K_c=K_n$ .

Если в группе есть несколько подгрупп приемников с различным режимом работы и возможно несовпадение их максимальных нагрузок во времени, то допускается введение понижающего коэффициента совмещения максимумов  $K_{с\max}$ , т. е.  $P_{с\max}=K_{с\max}P_{\max}$ .

### Контрольные вопросы

1. Охарактеризуйте способы построения графиков нагрузки горных предприятий.
2. Дайте определение коэффициентов, характеризующих режим работы отдельных электроприемников и их групп.
3. Перечислите основные величины, характеризующие электрические нагрузки и способы их определения.

## Глава 11

# ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ ПРИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИИ ГОРНЫХ МАШИН

### 11.1. ДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА

Широкое применение электрической энергии в промышленности сопровождается потенциальной опасностью поражения электрическим током внутренних (поражение органов дыхания, нарушение работы сердца) или внешних (ожоги) органов обслуживающего персонала. Положение усугубляется еще тем, что отсутствуют какие-либо внешние признаки, предостерегающие человека об угрожающей ему опасности.

Последствия действия электрического тока на организм человека зависят в основном от величины тока, проходящего через тело человека, и длительности его действия [16]. В зависимости от этого различают: ощутимый ток — наименьшее значение тока, воздействие которого ощущает человек. Средние значения ощутимого переменного тока частотой 50 Гц составляют 0,8—1,8 мА (по данным МГИ, средние значения ощутимого постоянного тока в 3—4 раза больше); отпускающий ток — наибольшее значение тока, при котором человек сохраняет способность самостоятельно освободиться от контакта с частями, находящимися под напряжением (средние значения оцениваются диапазоном 4—8 мА для переменного тока,

а для постоянного в 3—4 раза больше); неотпускающий ток — наименьшее значение тока, при котором человек теряет способность управлять мышцами, не может освободиться самостоятельно от контакта и, следовательно, подвергается смертельной опасности (средние значения неотпускающего переменного тока частотой 50 Гц составляют  $8 \div 16$  мА, по данным МГИ).

Для определения значения кратковременного безопасного тока  $I_{к.б.}$  мА, пользуются формулой Дальзиеля

$$I_{к.б.} = 116/\sqrt{t}, \quad (11.1)$$

где  $t$  — длительность воздействия тока на человека, с.

Реакция организма при поражениях электрическим током и возможные последствия зависят от многих факторов: параметров электрической цепи (напряжения, сопротивления), окружающих условий (температуры, влажности, давления), пути прохождения тока через тело человека, психологического состояния человека и пр.

Наиболее опасен ток, проходящий через сердце, органы дыхания и мозг. Постоянный ток менее опасен по сравнению с переменным. Электрический ток промышленной частоты (50—60) Гц и токи частотой 200 Гц (данные МГИ) являются наиболее опасными для человека. Ток частотой 2000—2500 Гц является еще опасным. Однако дальнейшее увеличение частоты тока до 15000 Гц заметно уменьшает степень опасности электрического тока, что используется в медицине. Тяжесть поражения организма зависит от химического состава крови, психологического состояния человека и пр. В состоянии опьянения человека или при неожиданном его поражении действие тока становится более опасным.

Основными факторами, определяющими величину тока, проходящего через тело человека, являются сопротивление тела человека и величина приложенного к телу напряжения (напряжения прикосновения).

Сопротивление тела человека зависит от размеров площади соприкосновения с током и его характера (плотный хват или случайное касание), состояния кожи (толщина рогового слоя, ее влажность, загрязненность), значений приложенного напряжения и проходящего тока. Для условий горных предприятий, по данным МГИ, следует принимать значение сопротивления тела человека при напряжении: до 1000 В — 0,8 кОм; выше 1000 В — 0,5 кОм.

В соответствии с ГОСТ 12.1.038—82 напряжение прикосновения и ток через тело человека не должны превышать значений: для переменного тока частотой 50 Гц  $U=2$  В и  $I=0,3$  мА; для постоянного тока  $U=8$  В и  $I=1$  мА.

Таблица 11.1

Вид тока	Нормируемая величина, В	Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения не более, при продолжительности воздействия тока $t$ , с											
		0,01— —0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	Свыше 1,0
Переменный частотой 50 Гц	$U$	650	500	250	165	125	100	85	70	65	55	50	36
Выпрямленный однополупериодный	$U_{амп}$	650	500	400	300	250	200	190	180	170	160	150	6*
Выпрямленный двухполупериодный	$U_{амп}$	650	500	400	300	270	230	220	210	200	190	180	—
Постоянный	$U$	650	500	400	350	300	250	240	230	220	210	200	40 15*

\* Значение предельно допустимого уровня тока, мА

Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов при аварийном режиме электроустановок напряжением до 1000 В с любым режимом нейтрали и выше 1000 В с изолированной нейтралью не должны превышать значений, указанных в табл. 11.1.

Зная величину длительно безопасного тока ( $I_{д.б}$ ) и минимальное сопротивление тела человека  $R_{ч}$ , можно определить допустимую безопасную величину напряжения прикосновения:

$$U_{пр. доп} = I_{д.б} R_{ч}. \quad (11.2)$$

Наконец, при оценке условий электробезопасности следует учитывать специфические условия горного производства, связанные с постоянным перемещением горных машин и механизмов, высокой влажностью, запыленностью и загазованностью рудничной атмосферы.

## 11.2. РЕЖИМЫ НЕЙТРАЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Надежность работы электроустановок и систем электроснабжения во многом зависит от режима нейтрали источников и приемников трехфазного тока, обмотки которых соединены в «звезду» или «треугольник». В соответствии с ПУЭ по режиму работы нейт-

рали все электроустановки делятся на две группы: с глухозаземленной и изолированной нейтралью. Электрические сети напряжением до 1000 В работают как с изолированной, так и с заземленной нейтралью. При выборе режима работы нейтрали учитывают требования экономики, надежности и электробезопасности [2].

В отношении электробезопасности наиболее опасным является случай одновременного прикосновения человека к открытым токоведущим частям двух фаз.

Величина тока, проходящего через тело человека,  $I_q$  в этом случае определяется напряжением сети и сопротивлением тела человека и не зависит от режима работы нейтрали сети:

$$I_q = U_n / R_q = \sqrt{3} U_\phi / R_q, \quad (11.3)$$

где  $U_n$ ,  $U_\phi$  — линейное и фазное напряжение сети.

Однако случай одновременного прикосновения к двум фазам сети редкий. Наиболее распространен случай прикосновения к одной фазе сети либо к получившему электрическое соединение с фазой корпусу электрооборудования. Величина тока, который проходит через тело человека, прикоснувшегося к одной фазе, а следовательно, и опасность поражения током будут зависеть при прочих равных условиях от того, заземлена или изолирована нейтраль электрической сети.

Сетью с глухозаземленной нейтралью называется сеть, в которой нейтрали (нулевые точки генераторов и трансформаторов) присоединены к заземляющему устройству непосредственно или через малое сопротивление. Сетью с изолированной нейтралью называется сеть, в которой нейтрали генераторов и трансформаторов изолированы от земли или соединены с ней через большое сопротивление.

В сети с заземленной нейтралью при нормальном сопротивлении изоляции напряжение каждой фазы относительно земли практически равно фазному напряжению. Прикоснувшийся к любой фазе человек оказывается под фазным напряжением. Величина тока, проходящего через тело человека в этом случае, если пренебречь малыми величинами сопротивления почвы  $r_n$  и рабочего заземления  $r_s$ , по сравнению с сопротивлением человека  $R_q$ , будет:

$$I_q = U_\phi / R_q + r_n + r_s \approx U_\phi / R_q. \quad (11.4)$$

Как видим из уравнения (11.4), ток  $I_q$  определяется напряжением сети и сопротивлением тела человека. Этот ток опасен уже при напряжении сети 127 В.

Основным преимуществом сети с глухозаземленной нейтралью является простота выполнения релейной защиты, так как любое замыкание фазы на землю является однофазным коротким замыканием, которое немедленно и селективно

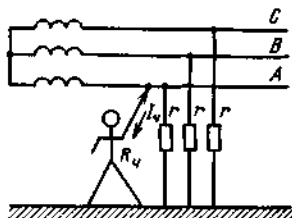


Рис. 11.1. Схема однофазного прикосновения в сети с изолированной нейтралью и малой емкостью

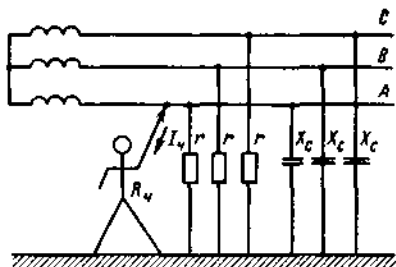


Рис. 11.2. Схема однофазного прикосновения в сети с изолированной нейтралью и большой емкостью

отключается максимальной защитой. Опасность поражения электрическим током в случае прикосновения к токоведущим частям в системе с изолированной нейтралью в значительной мере зависит от величины емкости сети относительно земли. В соответствии с этим электрические сети можно разделить на две основные группы: с малой емкостью относительно земли и с большой емкостью.

Рассмотрим электрическую сеть с изолированной нейтралью с малой (близкой к нулю) емкостью сети относительно земли (рис. 11.1) при равенстве сопротивления изоляции фаз относительно земли  $r_A = r_B = r_C$ . При прикосновении человека к фазе А сопротивление изоляции этой фазы уменьшится и симметрия системы нарушится.

Напряжение смещения нейтрали (напряжение нулевой последовательности) определяется по формуле

$$U = U_A r / (3R_{\text{ч}} + r). \quad (11.5)$$

Уравнение для определения тока, проходящего через тело человека, имеет вид

$$I_{\text{ч}} = 3U_{\phi} / (3R_{\text{ч}} + r). \quad (11.6)$$

Анализ уравнения (11.6) показывает, что безопасность в сетях с изолированной нейтралью и малой емкостью во многом зависит от сопротивления изоляции сети. Высокое сопротивление изоляции сети обеспечивает безопасное значение тока, проходящего через тело человека в случае прикосновения его к одной из фаз. Приняв  $I_{\text{ч}} = I_{\text{д.б.}}$ , из уравнения (11.6) можно определить минимальное безопасное значение сопротивления изоляции сети:

$$r = (3U_{\phi} / I_{\text{д.б.}}) - 3R_{\text{ч}}. \quad (11.7)$$

Наиболее опасным бывает прикосновение человека к одной из фаз, когда какая-либо из других фаз замкнута на землю (например,  $r_B=0$ ). В этом случае ток, проходящий через тело человека, определяется величиной линейного напряжения:

$$I_q = U_{\Delta}/R_q = \sqrt{3} U_{\Phi}/R_q. \quad (11.8)$$

Таким образом, прикосновение к одной из фаз в сети с изолированной нейтралью оказывается опасным лишь в случае, когда сопротивление изоляции другой фазы равно нулю или же когда сопротивление изоляции сети недостаточно велико. Если учесть емкость сети относительно земли, то емкостные сопротивления  $x_c$  окажутся присоединенными параллельно активному сопротивлению изоляции сети (рис. 11.2), а ток, проходящий через тело человека, будет

$$I_q = 3U_{\Phi} \gamma \frac{\gamma_q}{3\gamma + \gamma_q}, \quad (11.9)$$

где  $\gamma = 1/r + j\omega C$  — проводимость изоляции фазы сети на землю;  $\gamma_q = 1/R_q$  — проводимость тела человека;  $C$  — емкость фазы сети относительно земли;  $\omega$  — угловая частота в сети. В сетях высокого напряжения  $I_q$  определяется также по уравнению (11.9). Однако учитывая, что в таких сетях величина  $x_c$  может оказаться во много раз меньше  $r$ , токами утечки через активное сопротивление изоляции можно пренебречь. Тогда, полагая, что  $C_A = C_B = C_C = C$ ,

$$I_q = \frac{3U_{\Phi}\omega C}{\sqrt{9R_q^2\omega^2 C^2 + 1}}. \quad (11.10)$$

При глухом замыкании фазы на землю ток, проходящий через место замыкания,  $I_3$  определяют из уравнения

$$I_3 = 3U_{\Phi}\omega C. \quad (11.11)$$

Приближенно емкостные токи замыкания на землю определяются исходя из средних значений емкости:

для воздушных линий

$$I'_3 = U_{\Delta} L_B / 350 = \sqrt{3} U_{\Phi} L_B / 350; \quad (11.12)$$

для кабельных линий 6—10 кВ

$$I'_3 = U_{\Delta} L_K / 10 = \sqrt{3} U_{\Phi} L_K / 10; \quad (11.13)$$

для смешанных воздушных и кабельных линий

$$I_3 = I'_3 + I''_3 = \sqrt{3} U_{\Phi} (L_B + 35L_K) / 350, \quad (11.14)$$

где  $L_B$  и  $L_K$  — длина соответственно воздушных и кабельных линий, электрически связанных между собой, км.

Для обеспечения безопасности эксплуатации сети с изолированной нейтралью большое значение имеют высокое сопротивление изоляции и минимальная емкость сети. Значение сопротивления изоляции определяется свойствами изоляционных материалов и условиями ее эксплуатации. Например, сопротивление изоляционных материалов снижается при их увлажнении. Для поддержания высокого сопротивления изоляции используют качественные изоляционные материалы, проводят их подсушку, а также по возможности создают микроклимат.

В отличие от методов повышения сопротивления изоляции, которые в основном зависят от принятых конструктивных и эксплуатационных мер, снижения емкости сети таким образом практически нельзя достичь, если не учитывать возможность разветвления сети.

Уменьшить влияние емкости сети на безопасность эксплуатации можно компенсацией емкостной составляющей тока утечки, для чего между нейтралью сети и землей необходимо включить индуктивное сопротивление. В этом случае через место повреждения протекает ток, который кроме активной и емкостной составляющих имеет еще индуктивную, отличную по фазе от емкостной на  $180^\circ$ . Поэтому суммарный ток в месте повреждения уменьшается.

Отметим, что с помощью приведенных методов можно лишь снизить величину электрического тока, проходящего через тело человека, и тем самым уменьшить, но не предупредить полностью опасность поражения им. Кроме общих мер предупреждения и защиты от поражения электрическим током, в горной промышленности широко применяют также специальные меры, предназначенные для защиты от поражения током при прикосновении человека: 1) к корпусам, оказавшимся под напряжением вследствие повреждения изоляции; 2) к открытым токоведущим частям электроустановок, находящихся под напряжением.

Электрические сети напряжением 6, 10 и 35 кВ выполняются с изолированной нейтралью или с нейтралью, заземленной через аппараты, компенсирующие емкостной ток (дугогасящие аппараты). Изолированная нейтраль дает возможность применять релейную защиту в двухфазном исполнении. Компенсация емкостного тока, величина которого пропорциональна напряжению и длине электрически связанных линий, применяется в соответствии с ПУЭ при значениях тока замыкания на землю соответственно 30, 20 и 10 А.

Сети напряжением 110 кВ и выше выполняют с глухозаземленной нейтралью. В связи с этим защиту (реле и трансформаторы тока) устанавливают в трех фазах, что приводит к некоторому удорожанию. Дорого обходятся и заземляющие устройства. Однако учитывая, что таких установок значительно



меньше, чем установок на напряжение 6—25 кВ, и, следовательно, стоимость их изоляции меньше, а надежность работы (релейная защита) увеличивается, применение глухозаземленной нейтрали в таких сетях экономически полностью оправдано.

### 11.3. НАЗНАЧЕНИЕ, УСТРОЙСТВО И РАСЧЕТ ЗАЩИТНОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ

В сетях с изолированной нейтралью при повреждении изоляции токоведущих частей электрооборудования металлический корпус оказывается под напряжением относительно земли. Если к такому корпусу прикоснется человек, то через его тело пройдет электрический ток, вызванный разностью потенциалов на корпусе электрооборудования и поверхности земли (в месте касания ног человека с землей).

Если корпус электрооборудования с поврежденной изоляцией изолирован от земли (рис. 11.3), то значение тока, который проходит через тело человека при замыкании на корпус, определяют по уравнениям для случая однофазного прикосновения в трехфазной сети с изолированной нейтралью.

Если корпус электрооборудования с поврежденной изоляцией соединен с землей через сопротивление, то  $I_{\text{ч}}$  составляет часть полного тока утечки, который проходит по двум путям: через тело человека  $R_{\text{ч}}$  и переходное сопротивление корпуса относительно земли  $R_3$ .

В этом случае

$$I_{\text{ч}} = I (R_{\text{ч}} / R_{\text{ч}} + R_3), \quad (11.15)$$

где  $I$  — полный ток утечки в сети.

Из уравнения (11.15) следует, что чем меньше сопротивление заземления, тем меньше ток, проходящий через тело человека.

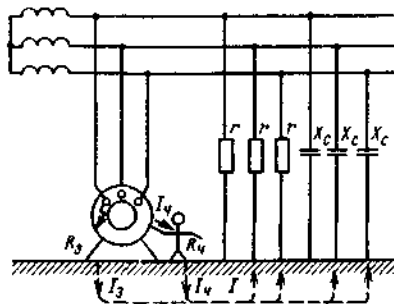


Рис. 11.3 Схема прикосновения к заземленному электрооборудованию в сети с изолированной нейтралью

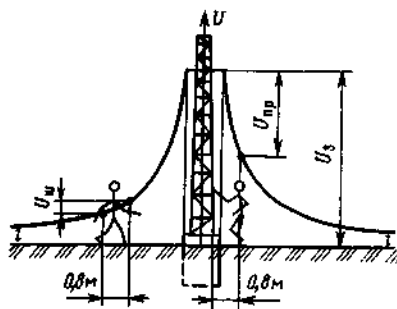


Рис. 11.4 Кривые потенциала почвы в окрестностях заземлителя при замыкании на землю

Заземление является наиболее распространенной защитой обслуживающего персонала от поражения электрическим током. Согласно действующим Правилам безопасности в угольных и сланцевых шахтах (сокращенно Правила безопасности), заземлению подлежат все металлические части, не находящиеся под напряжением, но которые в случае повреждения изоляции могут оказаться под напряжением относительно земли.

Заземляющие устройства представляют собой совокупность проводников, которые соединяют заземляющие части электроустановки с заземлителями. Заземлители могут быть естественные и искусственные. Естественными заземлителями могут быть металлические конструкции и сооружения, имеющие хороший электрический контакт с землей (трубопроводы, кроме трубопроводов горючих жидкостей и газов, арматура железобетонных конструкций, свинцовые оболочки кабелей и пр.). В качестве искусственных заземлителей применяют вертикально заложённые стальные трубы, угловую сталь, круглую сталь, горизонтально проложенные стальные полосы и пр.

Шахтная заземляющая система состоит из центрального заземлителя и местных, а также заземляющих проводников. Центральный заземлитель устанавливают в зумпфе в виде стальной пластины площадью не менее  $0,75 \text{ м}^2$ , толщиной не менее 5 мм и длиной не менее 2,5 м. Для подземных выработок шахт рекомендуется иметь  $R_a \leq 2 \text{ Ом}$  и устанавливать не менее двух главных заземлителей (в зумпфе и водосборнике) на случай выхода одного из строя (например, при чистке зумпфа или водосборника).

Кроме того, возле электроустановок в выработках делают местные заземлители. В сточные канавки укладывают стальные листы площадью  $\geq 0,6 \text{ м}^2$ , длиной  $\geq 2,5 \text{ м}$  и толщиной  $\geq 3 \text{ мм}$ . Листы укладывают на подушку из песка толщиной  $\geq 50 \text{ мм}$  и засыпают сверху слоем земли толщиной  $\geq 150 \text{ мм}$ . В сухих выработках бурят шпуров глубиной  $\geq 1,5 \text{ м}$ , в которые вставляют трубы диаметром  $\geq 30 \text{ мм}$ .

Для подключения электроприемников к заземлителям в карьерах служат магистральные заземляющие провода (тросы), которые прокладывают по опорам воздушных линий, питающих данную установку, а далее к приемнику с помощью заземляющей жилы гибкого кабеля. В шахтах подключение к заземлителям проводят с помощью заземляющих жил кабелей.

При замыкании на корпус фазы электрооборудования, соединенного с одиночным заземлителем, ток с заземлителя растекается по значительному объему. Растекающийся по окрестности в земле ток создает в ней электрическое поле, напряженность которого по мере удаления от заземлителя уменьшается. Зависимость напряжения на поверхности земли от

точки замыкания приведена на рис. 11.4. В радиусе 1 м от точки замыкания самая опасная зона (сосредоточено 60—70 % полного напряжения). В радиусе 20 м от заземлителя потенциал практически равен нулю.

Как следует из рис. 11.4, между любыми двумя точками земли, находящимися в зоне растекания тока замыкания, существует разность потенциалов. Поэтому человек, который находится в пределах этой зоны, сделав шаг, подвергается воздействию так называемого шагового напряжения  $U_{\text{ш}}$ . Величину шагового напряжения в различных пунктах растекания тока можно получить, определив разность между потенциалами точек земли, которые находятся одна от другой на расстоянии 0,8 м. Из кривой распределения потенциалов видно, что шаговое напряжение уменьшается при удалении человека от заземлителя. Величина его не должна превышать 40 В, в противном случае следует выравнивать потенциалы. Выравнивание потенциалов заключается в укладке дополнительных стальных полос вокруг заземлителя, благодаря чему спад кривой потенциала делается более пологим.

Величина сопротивления заземляющего устройства  $R_{з.у}$  в сетях с изолированной нейтралью должна удовлетворять условию

$$R_{з.у} \leq U_3 / I_3', \quad (11.16)$$

где  $U_3$  — принимается равным 250 В, если заземляющее устройство используется только для установок напряжением более 1000 В и 125 В, если заземляющее устройство одновременно используется и для установок напряжением до 1000 В;  $I_3'$  определяют по уравнениям (11.13) и (11.14).

Для расчета принимается меньшее из двух значений сопротивления заземляющего устройства (расчетного и нормируемого Правилами безопасности).

По Правилам безопасности сопротивление заземляющего устройства на карьерах и на поверхности шахт для электроустановок напряжением до 1000 В не должно превышать 4 Ом. Сопротивление заземляющего устройства  $R_{з.у}$  складывается из сопротивления заземлителей  $R_з$  и сопротивления соединительных проводников  $R_{\text{пр}}$ :

$$R_{з.у} = R_з + R_{\text{пр}},$$

где  $R_{\text{пр}}$  — сопротивление соединительных проводников до наиболее удаленного электроприемника, подлежащего заземлению.

$$R_{\text{пр}} = \rho l / q,$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление проводника, Ом · м;  $l$  — длина соединительного проводника, м;  $q$  — поперечное сечение, м<sup>2</sup>.

Сопротивление заземлителей  $R_3 = R_{3,д} - R_{пр}$ .

Сопротивление одиночного заземлителя, например стального уголка  $50 \times 50 \times 5$  мм, длиной 2,5 м, будет  $r_{0,з} = r_{0,у} = 0,00318\rho_2$ , а стального уголка  $60 \times 60 \times 5$  мм, длиной 2,5 м —  $0,00298\rho_2$ , где  $\rho_2$  — удельное сопротивление грунта, Ом · см (находят по справочникам).

Количество электродов (одиночных заземлителей) заземления определяют по формуле

$$n = r_0 \cdot k_r / R_3 \eta, \quad (11.17)$$

где  $\eta$  — коэффициент использования электродов заземления;  $k_r$  — отношение максимального коэффициента сезонности в году (коэффициента, учитывающего увеличение сопротивления одиночного заземлителя в зависимости от времени года) к коэффициенту сезонности в момент сооружения заземляющего устройства, т. е.  $k_r = k_{с\max} / k_c$ . При проектировании заземления принимают  $k_c = 1$ . Вследствие наложения электрических полей соседних электродов сопротивление растеканию каждого отдельного электрода как бы возрастает. Это учитывается коэффициентом  $\eta$ , значение которого зависит от количества электродов и отношения расстояния между электродами к их длине. Первоначально его значение принимается ориентировочно, затем при получении ориентировочного количества электродов значение  $\eta$  определяется по справочникам, и расчет количества электродов уточняется.

При сдаче заземляющего устройства в эксплуатацию измеряют его сопротивление. Кроме того, раз в два года измеряют сопротивление одного электрода, отключив его от заземляющей сети. В процессе эксплуатации измерения проводят ежегодно два раза (летом и зимой) в периоды наименьшей проводимости почвы.

Не реже одного раза в месяц проводят осмотр всей заземляющей сети и измерение общего сопротивления заземляющей системы подвижных и стационарных установок. Результаты заносят в таблицу (книгу).

#### 11.4. КОНТРОЛЬ ИЗОЛЯЦИИ И ЗАЩИТНОЕ ОТКЛЮЧЕНИЕ

В случае прикосновения человека к нормально находящимся под напряжением частям электрооборудования безопасность может быть обеспечена при условии непрерывного контроля изоляции сети относительно земли. Задачей контроля изоляции является подача сигнала или отключение электроустановки при появлении однофазной утечки. В настоящее время на горных предприятиях параметры изоляции низковольтных электрических сетей контролируют с помощью аппарата защиты от

утечек (реле утечки), который при снижении сопротивления изоляции сети ниже допустимого значения автоматически отключает напряжение [5]. Реле утечки автоматически срабатывает также в случае прикосновения человека к токоведущим частям сети и при появлении тока утечки, который может вызвать открытое искрение в условиях взрывчатой среды.

Защита от утечек на землю в сетях напряжением до 1000 В должна отвечать следующим основным требованиям: 1) осуществлять непрерывный контроль значений токов утечки через изоляцию; 2) реагировать только на снижение активной составляющей изоляции сети; 3) реагировать как на симметричное, так и на несимметричное снижение изоляции сети; 4) обладать достаточной чувствительностью и необходимой надежностью; 5) не реагировать на переходные процессы в сети, вызванные включением или отключением силовых потребителей; 6) время срабатывания реле утечки и коммутационного отключающего аппарата не должно превышать 0,2 с; 7) по возможности осуществлять самоконтроль исправности аппарата.

Устройства защиты от утечек, применяемые в низковольтных сетях, являются неселективными. Селективность действия защиты в таком случае не нужна, так как работа электродвигателей на участке, как правило, связана технологическим процессом. Например, отключение электродвигателя конвейера делает невозможной работу комбайна и т. п.

В сетях с изолированной нейтралью используют два метода определения величины тока утечки: по величине напряжения или тока нулевой последовательности, возникающего в защищаемой сети при появлении утечек; по измерению сопротивления защищаемой сети относительно земли, которое определяется с помощью приложенного между сетью и землей оперативного напряжения, накладываемого на рабочую сеть. Возможно применение комбинированных схем, построенных на одновременном использовании обоих методов.

На рис. 11.5 приведена принципиальная схема аппарата защиты от утечек типа УАКИ. Трехфазный выпрямитель питается от делителя  $R1-R2$  и состоит из трех диодов  $V1$ ,  $V2$  и  $V3$ . Между общей точкой выпрямителей  $O_1$  и нулевой точкой звезды делителя напряжения  $O_2$  существует выпрямленное напряжение, являющееся оперативным напряжением цепи защиты. При большом сопротивлении изоляции ( $r \rightarrow \infty$ ) и отсутствии утечек ( $r_{yt} \rightarrow \infty$ ) под действием этого напряжения вспомогательный ток  $I_0$  протекает по I и II обмоткам реле  $P$ . Числа витков и сопротивления обмоток I и II выбираются так, чтобы при  $r \rightarrow \infty$  и  $r_{yt} \rightarrow \infty$  создаваемые этими обмотками магнитные потоки были равны. Учитывая, что обмотки включены встречно,

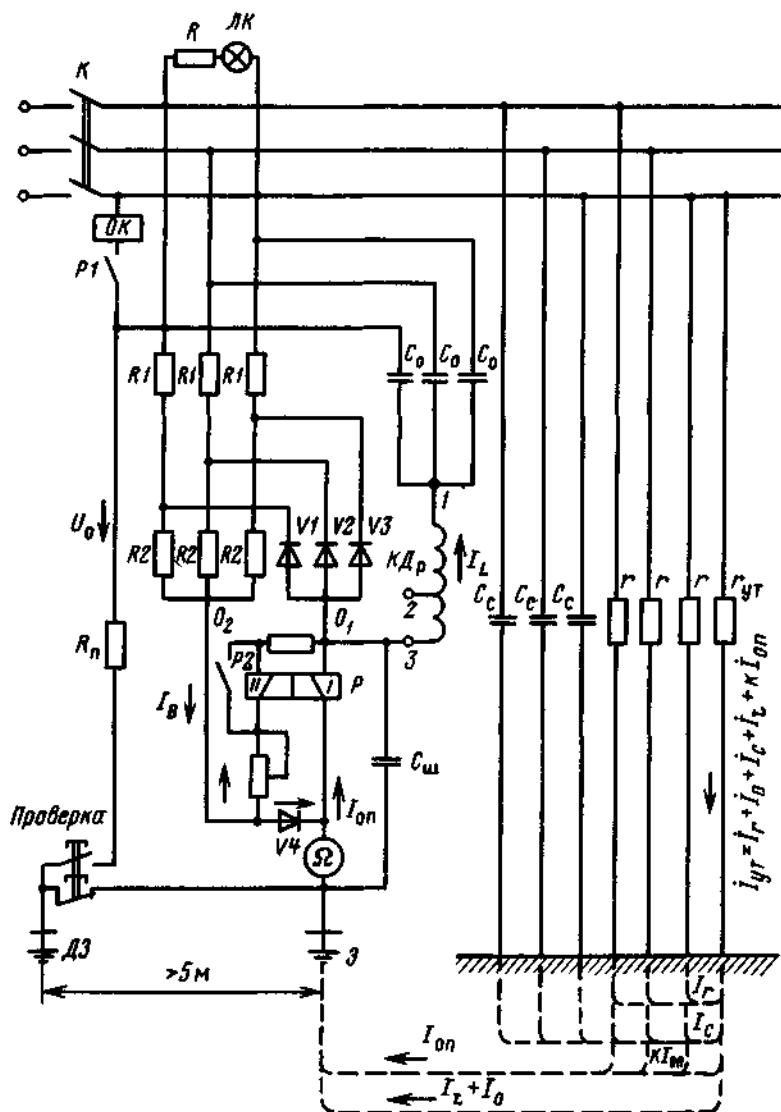


Рис. 115. Принципиальная электрическая схема аппарата защиты от утечек УАКИ

результатирующее их воздействие на реле равно нулю и реле находится в нейтральном состоянии.

После того как снизится сопротивление  $r$  или  $r_{ут}$ , появится проходящий через обмотку  $I$  оперативный ток  $I_{оп}$ , значение которого зависит от сопротивления изоляции сети. При дальней-

шем уменьшении сопротивления изоляции оперативный ток увеличивается. При величине, равной току срабатывания реле  $P$ , последнее срабатывает, замыкает свой контакт  $P1$ , который включает отключающую катушку  $OK$ , расположенную в автоматическом выключателе АФВ, в результате чего происходит отключение сети.

В аппаратах УАКИ применяется компенсатор емкости в виде дросселя КД<sub>р</sub>, который присоединяется к нулевой точке звезды, образованной конденсаторами  $C_0$ . Дроссель имеет обмотку с двумя отпайками, которыми можно регулировать величину индуктивности в зависимости от суммарной емкости сети.

С учетом технологических включений и отключений пускателей, в результате которых емкость сети непрерывно изменяется, эффективность компенсации можно повысить применением устройств автоматической настройки индуктивности. В таких устройствах вместо компенсирующего дросселя (с  $L = \text{const}$ ) применяется дроссель с подмагничиванием, переменная величина индуктивности которого зависит от величины подмагничивающего постоянного тока, протекающего по обмотке управления такого дросселя. Промышленность выпускает аппарат защиты и автоматической компенсации (АЗАК), в корпус которого встроены реле утечки типа УАКИ и устройство автоматической компенсации емкостной составляющей тока утечки.

Основными недостатками защиты от утечек типа УАКИ являются: неселективность действия, вследствие чего затрачивается много времени на отыскание поврежденного участка сети; отсутствие самоконтроля исправности действия аппарата защиты; малое собственное внутреннее сопротивление, что повышает опасность прикосновения.

В сетях напряжением 1140 В для защиты от утечек применяют аппарат блока защитного отключения БЗО-1140, основным назначением которого является защита от поражения электрическим током при эксплуатации электромеханического оборудования. В шахтах, которые перешли на более высокую ступень напряжения, аппарат БЗО-1140 осуществляет резервное отключение высоковольтной ячейки в случаях отказа автоматического выключателя со стороны 1140 В или повреждения основных элементов схемы аппарата. Особенностью аппарата БЗО-1140 является также необходимость применения устройств автоматической компенсации емкостных токов утечки для ограничения кратковременных токов, проходящих через тело человека. Схема аппарата БЗО-1140 обеспечивает самоконтроль исправности работы основных элементов.

Непрерывный контроль работоспособности (самоконтроль) является одним из перспективных направлений повышения

надежности защиты от утечек в сетях 380, 660 В. Самоконтроль аппаратуры защиты значительно снижает вероятность нарушения условий безопасности при потере работоспособности аппаратуры.

#### **11.5. ИЗОЛИРУЮЩИЕ ПОЛЫ И ПЛОЩАДКИ, СРЕДСТВА ЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ**

При невозможности выполнения заземления или защитного отключения (если это представляет значительные трудности по техническим причинам) допускается создание изолирующих площадок, которые должны быть устроены так, чтобы прикосновение к представляющим опасность незаземленным предметам было возможно только с изолирующей площадки и возможность одновременного прикосновения к незаземленным частям электрооборудования и частям оборудования или здания, имеющим соединения с землей, была исключена.

Наличие сухих плохо проводящих полов (деревянных, асфальтовых и т. п.) в сухих производственных, жилых и общественных отапливаемых помещениях позволяет отказаться от устройства в них заземлений при напряжениях не выше 380 В. Это указание не относится к производственным помещениям, в которых возможно одновременное прикосновение к частям электрооборудования и заземленным предметам, например кабелям и проводам в металлических оболочках или трубах.

Не следует заземлять устройства, расположенные на недоступной высоте, обслуживаемые с деревянных лестниц и не имеющие соединения с землей. В последнем случае при устройстве заземлений имела бы опасность одновременного прикосновения к токоведущим частям и заземленному корпусу электрооборудования.

Средствами личной защиты называют приборы, аппараты, переносные и перевозимые приспособления и устройства, а также отдельные части устройств, приспособлений и аппаратов, служащие для защиты персонала, работающего на электроустановках, от поражения электрическим током, воздействия электрической дуги и продуктов ее горения и т. п.

Защитные средства делятся на: а) основные, изоляция которых надежно выдерживает рабочее напряжение электроустановок и при помощи которых допускается касание токоведущих частей, находящихся под напряжением; б) дополнительные, которые сами по себе не могут при данном напряжении обеспечить безопасность от поражения током.

Дополнительные средства защиты служат дополнением к основным средствам, а также служат для защиты от напряжения прикосновения и шагового напряжения [17].



### **Контрольные вопросы**

1. От каких основных факторов зависит поражающее действие электрического тока на организм человека?
2. Сравните режимы лейтэрали электрических сетей в отношении безопасности.
3. Изложите устройство и основные положения расчета защитного заземления.
4. Расскажите принцип действия и назначение устройств контроля изоляции и защитного отключения.

## **Глава 12**

# **УСТРОЙСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ И ПОДСТАНЦИЙ**

### **12.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ**

В соответствии с ГОСТ 19431—84 электрическая сеть — это совокупность воздушных и кабельных линий электропередачи и подстанций, работающих на определенной территории.

Отсюда следует, что в состав сетей входят не только линии электропередачи различных конструкций и напряжений, но и все электрическое оборудование подстанции: силовые трансформаторы, коммутационная и защитная аппаратура. В свою очередь, линия электропередачи представляет собой электроустановку, предназначенную для передачи электрической энергии. Следовательно, электрические сети служат для передачи и распределения электрической энергии. Электрические сети служат также для создания энергетических систем.

Электрические сети классифицируют по следующим признакам.

1. По напряжению. Каждая сеть характеризуется номинальным напряжением, определяющим класс изоляции оборудования и его свойства. Номинальные напряжения сетей стандартизированы в соответствии с ГОСТом. Иногда шкала номинальных напряжений условно разделяется на зоны низких, средних, высоких и сверхвысоких напряжений. Кроме того, в некоторых случаях сети по напряжению делят на сети до 1000 В и сети свыше 1000 В.

2. По роду тока сети делят на сети постоянного и переменного тока. Сети переменного тока выполняются как трехфазные (трех- или четырехпроводные), так и однофазные (двухпроводные).

3. По назначению различают сети районные (питающие) и распределительные. Районные (питающие) сети связывают между собой отдельные электростанции и районные подстанции. Напряжение таких сетей обычно превышает 35 кВ. Распределительные сети предназначены для питания электропри-

емников. Обычно это сети с номинальным напряжением до 35 кВ включительно. К распределительным сетям иногда применяют термин «местные сети».

4. По конструктивному исполнению линии сети делят на воздушные, кабельные и внутренней проводки.

## 12.2. РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Существенными факторами, определяющими расположение и число подстанций и распределительных пунктов, являются расположение и мощности приемников. Факторами, определяющими схему электрических подстанций, являются число и мощности трансформаторов, величины рабочих напряжений, а также число и рабочее напряжение вводов. Схема электрических соединений распределительных пунктов определяется в основном числом и напряжением вводов.

По способу начертания различают однолинейные и многолинейные схемы электрических соединений.

В однолинейной схеме изображают только соединения одной фазы электрической системы. Допустимость этого начертания обуславливается однотипностью электрооборудования и соединений всех трех фаз. При наличии нулевого провода последний показывают отдельно пунктиром и обозначают цифрой 0. Если однолинейные схемы вычерчивают для всей электроустановки в целом и показывают только главные элементы первичных цепей (генераторы, силовые и измерительные трансформаторы, коммутационные аппараты, реакторы, разрядники), то такие схемы называют принципиальными. Если в схеме показывают также элементы вторичных цепей (измерительные приборы, устройства релейной защиты и автоматики, приборы и аппараты управления и сигнализации), то их называют полными однолинейными схемами (рис. 12.1). При этом контакты аппаратов и реле показывают в положении, отвечающем отсутствию тока во всех цепях схемы.

В соответствии с требованиями Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей у графических изображений на схеме указывают напряжения сборных шин и типы по каталогу всех главных элементов первичных цепей. У графических изображений элементов вторичных цепей типы по каталогу не указываются.

При наличии в схеме аналогичных линий типы основных аппаратов указывают только на одной линии, а на остальных повторяются изображения основных аппаратов без указания их типов. Аналогичными называют линии, у которых аппараты главной цепи, устройства защиты, автоматики, регулирования и телемеханики, а также приборы измерения и учета подобны.

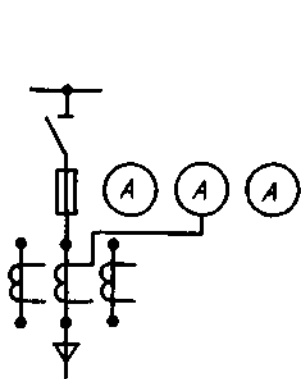


Рис 121 Полная однолинейная схема

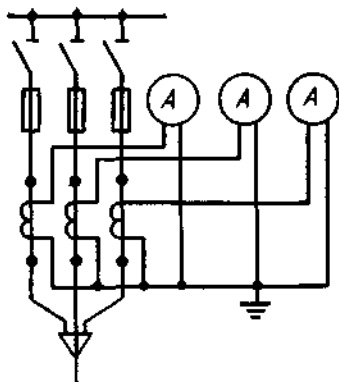


Рис 122 Трехлинейная схема

На трехлинейных схемах показывают соединения трех фаз электроустановки с указанием всех включенных аппаратов и приборов. При этом в схеме приводят не только первичные цепи, но и соединения аппаратов и приборов вторичных цепей (рис. 12.2). Трехлинейные схемы, показывающие соединение составных частей установки проводами, жгутами, кабелями, на которых все аппараты, приборы и проводка расположены в соответствии с их действительным положением на щите или панели, называют монтажными.

Проектирование всякой электроустановки начинают с составления принципиальных однолинейных схем, которые служат основой для разработки монтажных схем и конструкций электрических станций, подстанций и распределительных устройств. Однолинейные схемы широко применяются при эксплуатации электроустановок, так как в них отсутствуют излишние, затрудняющие ориентирование в схеме подробности.

Распределительные устройства и подстанции разделяются на закрытые (с расположением оборудования внутри здания) и открытые (с расположением оборудования на открытом воздухе).

На практике применяют также комбинированные подстанции с наружной установкой аппаратов высшего напряжения и трансформаторов и с установкой в здании аппаратов низшего напряжения.

Каждый из типов распределительных устройств и подстанций может состоять из электрооборудования обычного типа, монтируемого непосредственно на месте установки, или же из комплектных полностью или частично закрытых шкафов с встроенными в них аппаратами, устройствами защиты и ав-

томатики, измерительными приборами и вспомогательными устройствами, поставляемых в собранном или полностью подготовленном для сборки виде.

Комплектное оборудование в настоящее время по существу вытеснило отдельные виды электрооборудования, монтируемые на месте их установки, поскольку его применение ускоряет монтаж и существенно повышает безопасность эксплуатации.

### 12.3. СИСТЕМА СБОРНЫХ ШИН

Необходимость соединения между собой подводящих и отводящих электроэнергию линий обуславливает применение на станциях, подстанциях и распределительных пунктах сборных шин. К сборным шинам присоединяют все генераторы или трансформаторы, вводы и отходящие линии. Электрическая энергия поступает на сборные шины и по ним распределяется к отдельным отходящим линиям. Таким образом, сборные шины являются узловым пунктом схемы соединения, через который протекает вся мощность станции, подстанции или распределительного пункта. Повреждение или разрушение сборных шин означает прекращение подачи электроэнергии потребителям. Поэтому сборным шинам уделяют серьезное внимание при проектировании, монтаже и эксплуатации электроустановок.

Простейшей системой является так называемая одиночная система шин (рис. 12.3), применяемая в электроустановках малой мощности с одним источником питания. На станциях и подстанциях, имеющих два и более трансформатора или генератора, в целях повышения надежности снабжения потребителей электроэнергией шины секционируют, т. е. делят на две, а иногда и большее число частей. К каждой секции должно быть присоединено по возможности равное число генераторов или трансформаторов и отходящих линий (рис. 12.4). Секционирование шин сообщает схеме большую эксплуатационную гибкость (при выходе из работы одной секции шин отключается только часть вводов и отходящих линий).

Отдельные секции шин могут быть соединены между собой разъединителями или выключателями. При секционировании шин разъединителем последний большей частью разомкнут. При этом обе секции работают раздельно, и при повреждении одной из секций питания лишается только часть потребителей.

Кроме того, при раздельной работе трансформаторов снижаются токи короткого замыкания на стороне вторичного напряжения. В случае повреждения трансформатора его отключают и обе секции соединяют между собой разъедини-

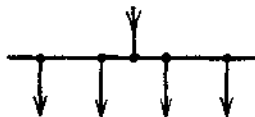


Рис. 12.3. Одиночная система шин

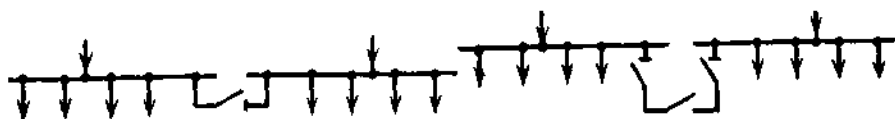


Рис 12.4. Одиночная секционированная система шин с межсекционным разъединителем

Рис 12.5 Одиночная секционированная система шин с межсекционным выключателем

нителем, отключив предварительно для предотвращения перегрузки неответственные потребители.

Допустима также работа с включенным разъединителем для обеспечения равномерного распределения нагрузки между питающими линиями. В этом случае при аварии на одной из секций прекращается питание электроэнергией всех потребителей на время, необходимое для разделения секций. В случае же автоматического отключения одного из источников питания второй источник будет перегружен в течение времени, необходимого для отключения неответственных потребителей.

При наличии межсекционного выключателя (рис. 12.5) последний может быть также при работе замкнутым или разомкнутым. При работе с замкнутым выключателем его снабжают максимальной токовой защитой, которая автоматически отключает поврежденную секцию. Однако такое решение не рекомендуется, поскольку оно не дает существенных преимуществ по сравнению со схемами с межсекционными разъединителями. Применение межсекционного выключателя рекомендуется только в тех случаях, когда он используется для автоматического включения резервного питания от другого рабочего источника и при нормальной работе электроустановки находится в разомкнутом состоянии.

При наличии на подстанции одиночной секционированной системы шин резервирующие друг друга отходящие линии следует присоединять к различным секциям шин. Для большей надежности питания и большего удобства эксплуатационных переключений на крупных станциях и подстанциях применяют двойную систему шин (рис. 12.6), которая допускается только при наличии соответствующего обоснования в каждом отдельном случае. При нормальной работе электроустановки одна система шин является рабочей, а другая — резервной. Обе системы шин могут быть соединены между собой шинносоединительным выключателем, который

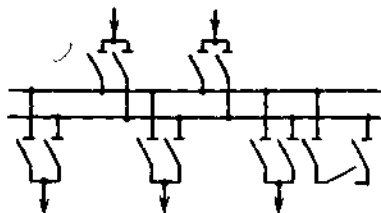


Рис. 12.6 Двойная система шин

позволяет осуществить переход с одной системы шин на другую без перерыва в подаче энергии, а также может быть использован в качестве замены любого из выключателей электроустановки. В последнем случае линию, с которой выключатель снят для ремонта, присоединяют к резервной системе шин и соединяют рабочую и резервную системы шин шиносоединительным выключателем.

#### 12.4. СХЕМЫ И КОНСТРУКЦИИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НАПЯЖЕНИЕМ ДО 1000 В

На рис. 12.7 показаны варианты схем соединения электрооборудования линий при напряжении до 1000 В.

На отходящих линиях, отключение которых производится редко, например на осветительных линиях, может применяться предохранитель-выключатель (рис. 12.7, а), объединяющий функции неавтоматического выключателя и плавкого предохранителя. Ремонт блока предохранителя-выключателя возможен только после снятия напряжения со стороны шин, т. е. связан с отключением всей установки.

Самое широкое применение как в осветительных, так и в силовых сетях находит вариант с раздельным применением неавтоматического ручного выключателя и плавкого предохранителя (рис. 12.7, б). Выключатель устанавливают до предохранителя, что дает возможность менять и ремонтировать предохранитель при отсутствии напряжения.

При установке для защиты линий автоматических выключателей (рис. 12.7, в) иногда перед последним также устанавливают рубильник для возможности ремонта и регулирования автоматического выключателя при отсутствии напряжения.

При необходимости осуществления дистанционного управления включением и отключением линий применяют схемы с контактором и плавким предохранителем (рис. 12.7, г). Ана-

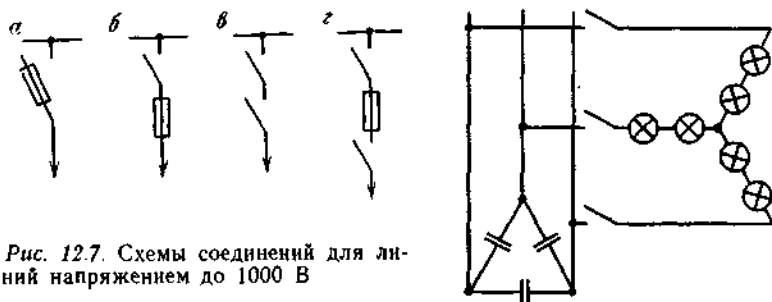


Рис. 12.7. Схемы соединений для линий напряжением до 1000 В

Рис. 12.8. Схема присоединения разрядного сопротивления к конденсаторной батарее при напряжении до 1000 В

логичные схемы соединения электрооборудования применяют также для вводов напряжением до 1000 В.

Для разряда конденсаторных батарей непосредственно к их зажимам присоединяют лампы накаливания, включенные для снижения потребляемой мощности и увеличения срока службы по две последовательно с соединением трех групп ламп «звездой» (рис. 12.8).

Распределительное устройство напряжением до 1000 В выполняют обычно в виде щитов из комплектных панелей и шкафов, допускающих одностороннее или двустороннее обслуживание. Панели отличаются от шкафов тем, что они открыты сверху и с задней стороны и поэтому могут применяться только в специальных электротехнических помещениях. Свободно стоящие щиты двустороннего обслуживания (рис. 12.9, а) удобнее в эксплуатации, но требуют большей площади, чем щиты одностороннего обслуживания (рис. 12.9, б).

Распределительные щиты устанавливаются обычно в зданиях, причем расстояния от стен здания, оборудования и соседних электроконструкций определяются требованиями ПУЭ. При установке комплектных шкафов на открытом воздухе для обеспечения их нормальной работы должен быть предусмотрен местный обогрев аппаратов, реле и измерительных приборов.

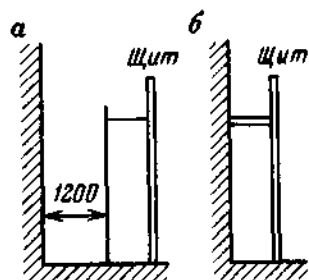


Рис. 12.9. Типы распределительных щитов

## 12.5. СХЕМЫ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ И ПОДСТАНЦИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ ВЫШЕ 1000 В

Варианты схем соединения электрооборудования при напряжении выше 1000 В даны на рис. 12.10.

Варианты схем с установкой плавких предохранителей и разъединителей (рис. 12.10, а) или плавких предохранителей и выключателей нагрузки (рис. 12.10, б) должны применяться в тех случаях, когда требуется только защита от коротких замыканий, имеется возможность подобрать соответствующий параметрам сети плавкий предохранитель и не требуется предусматривать автоматическое включение линии или телеуправление. При этом вариант с применением разъединителя (см. рис. 12.10, а) возможен только для присоединения измерительных трансформаторов напряжения, а также коротких воздушных и кабельных линий и силовых трансформаторов, ток холостого хода которых соответствует отключающей способно-

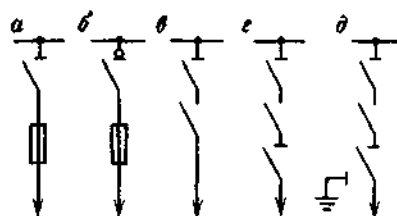


Рис. 12.10. Схемы соединений для линий напряжением выше 1000 В

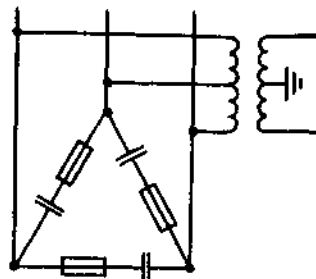


Рис. 12.11. Схема присоединения разрядного сопротивления к конденсаторной батарее при напряжении выше 1000 В

сти разъединителя. Включение и отключение разъединителя должно производиться только после отключения нагрузки на конце воздушных и кабельных линий или на стороне низшего напряжения силового трансформатора. Во всех остальных случаях, включая и небольшие конденсаторные установки (до 400 квар), плавкий предохранитель должен применяться только в сочетании с выключателем нагрузки. В случаях, когда применение плавких предохранителей невозможно или нецелесообразно для линий, питающих электродвигатели, батареи статических конденсаторов, а также одиночные силовые трансформаторы и одиночные тупиковые линии, применяют сочетание выключателей с разъединителем (рис. 12.10, в). Разъединитель предназначен для снятия напряжения с выключателя при его осмотрах и ремонтах и поэтому устанавливается до выключателя.

При возможности подачи напряжения со стороны линии устанавливают дополнительно разъединитель (рис. 12.10, г). При присоединении длинных воздушных и кабельных линий применяют линейный разъединитель с заземляющими ножами (рис. 12.10, д), назначением которых является разряд кабеля после его отключения, а также заземление воздушных и кабельных линий при производстве на них ремонтных работ.

Аналогичные схемы соединения электрооборудования применяют также для вводов напряжением до 35 кВ.

Для разряда конденсаторной батареи непосредственно к ее зажимам присоединяют измерительный трансформатор напряжения, во вторичную цепь которого для контроля целости цепи разряда включают неоновые лампы (рис. 12.11).

Для понижающих подстанций с вводом напряжением 35 кВ и выше с целью снижения капитальных и эксплуатационных затрат рекомендуется применять схемы без силовых выключателей на вводе. Рассмотрим три такие схемы. При питании каждого трансформатора подстанций отдельной радиальной



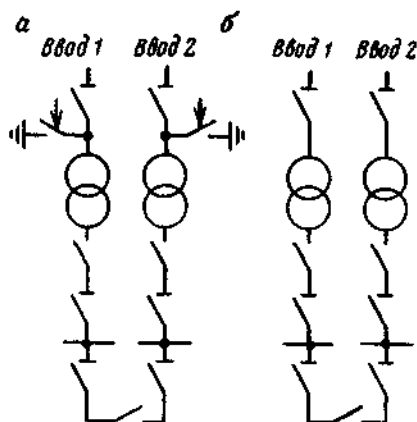


Рис. 12.12. Схема подстанции без силовых выключателей на вводе, питаемой по двойной радиальной линии:

а — с короткозамыкателями; б — с передачей отключающего импульса на подстанцию энергосистемы

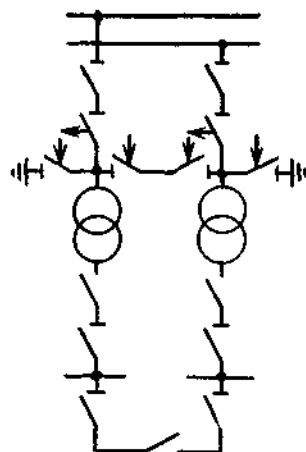


Рис. 12.13. Схема подстанции без силовых выключателей на вводе, присоединенной к двойной магистральной линии

воздушной или кабельной линией по схеме блока питающая линия — трансформатор воздействие на выключатель, установленный на питающей подстанции, осуществляется по одному из следующих способов:

а) на подстанции предприятия устанавливаются короткозамыкатели (рис. 12.12, а), осуществляющие под воздействием релейной защиты от внутренних повреждений в трансформаторе (газовой, дифференциальной) искусственное замыкание на землю одной из фаз в сетях с большим током замыкания на землю или двух-трех фаз между собой в сетях с малым током замыкания на землю. Таким образом, выключатель, установленный на питающей подстанции, осуществляет защиту не только линий, но и трансформаторов, установленных на подстанции предприятия;

б) отключающий импульс от защиты трансформатора предприятия передается на выключатель питающей подстанции по проводам воздушной линии электропередачи с помощью высокочастотной аппаратуры, по специальным воздушным линиям, ультракоротковолновому радиоканалу или по кабелям связи (рис. 12.12, б). Отказ от короткозамыкателей и переход на схему с применением передачи отключающего импульса на выключатель питающей подстанции должен быть обоснован в каждом отдельном случае.

При питании подстанций по магистральной схеме от двойной линии (рис. 12.13) оборудование подстанций потребителей не только короткозамыкателями, но и автоматическими отделителями является обязательным. При срабатывании защиты одного из трансформаторов замыкается соответствующий короткозамыкатель, в результате чего отключается выключателем питающей подстанции одна из линий. В бестоковую паузу автоматический отделитель отключает поврежденный трансформатор, а устройство автоматического повторного включения восстанавливает питание неповрежденных трансформаторов других подстанций, присоединенных к той же линии. Наличие перемычки между питающими линиями позволяет осуществлять питание любого трансформатора или обоих трансформаторов по любой из линий. Перемычки допускается применять при значительном числе подстанций, присоединенных к одной линии.

### **Контрольные вопросы**

1. Как классифицируются электрические сети и какие требования предъявляются к ним?
2. Одноточные и двойные системы сборных шин, область их применения.
3. Схемы и конструкции распределительных устройств и подстанций до и выше 1000 В.

## **Глава 13**

# **ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА ЗАЩИТЫ И УПРАВЛЕНИЯ**

### **13.1. НАЗНАЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ**

Электрическая аппаратура — составная часть электропривода, обеспечивающая не только управление им, но и его защиту при отклонении параметров от установленных норм эксплуатации.

По назначению аппаратура подразделяется на две основные группы: 1) аппаратуру управления, которая обеспечивает включение и отключение электрических цепей, пуск, остановку, реверсирование, торможение и регулирование частоты вращения электродвигателей (к ней относятся рубильники, реостаты, пускатели, выключатели); 2) аппаратуру защиты, которая предотвращает выход из строя электрических установок и защиту персонала от поражения электрическим током в случае нарушения нормального режима работы, связанного с коротким замыканием, пробоем изоляции, колебанием напряжения и др.; сюда входят плавкие предохранители и различного типа реле (максимальное, нулевые и др.).

В зависимости от величины применяемого напряжения электрическая аппаратура привода делится на две группы: напряжением до 1000 В и выше 1000 В. По способу управления различают аппаратуру: ручного управления — рубильники, выключатели, контроллеры, реостаты; полуавтоматического управления — автоматические воздушные и автоматические фидерные выключатели; автоматического управления — контакторы, магнитные пускатели, магнитные станции.

По виду исполнения и способу защиты от окружающей среды аппаратура делится на: открытую, защищенную, закрытую, герметичную, взрывобезопасную.

По принципу действия аппаратура подразделяется на электромагнитную, индукционную, ионно-электронную и др.

По способу коммутации аппараты управления делятся на контактные и бесконтактные. Контактные аппараты имеют систему, осуществляющую видимый разрыв электрической цепи. Бесконтактные аппараты выполнены на базе статических полупроводниковых элементов, переключающих электрические цепи без видимого разрыва и возникновения электрической дуги.

Аппаратура защиты и управления изготавливается с учетом определенных номинальных технических параметров: напряжения, тока, термической устойчивости, механической износостойчивости и др. Основные требования, предъявляемые к аппаратуре: надежность и безопасность в работе, механическая прочность, электрическая и термическая устойчивость, компактность и невысокая стоимость, простота монтажа и эксплуатации.

### 13.2. АППАРАТУРА ЗАЩИТЫ

Аппаратами защиты называются устройства, предназначенные для автоматического отключения электрических цепей или машин при нарушении режима работы. Наиболее распространенными видами защиты являются: максимальная, минимальная, нулевая, тепловая и защита от утечек.

Максимальная защита предназначена для отключения цепи при коротком замыкании и значительных перегрузках. Простейшие аппараты максимальной защиты — плавкие предохранители. В сетях при напряжении до 1000 В они бывают двух видов: пробочные и трубчатые. Пробочные предохранители применяются для защиты осветительных установок и двигателей небольшой мощности (на ток до 60 А), а трубчатые — для защиты силовых сетей и мощных потребителей электроэнергии (на ток до 1000 А). Трубчатые предохранители по конструкции бывают без заполнителя типа ПР и с кварцевым заполнителем — типа ПК. Последние имеют большую разрывную способность и считаются более надежными.

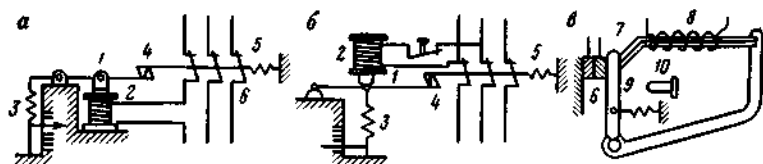


Рис 13.1 Реле защиты максимальное (а), минимальное (б), тепловое (в): 1 — якорь, 2 — катушка, 3 — пружина, 4 — защелка, 5 — расцепляющая пружина, 6 — контакты; 7 — биметаллическая пластина, 8 — нагревательный элемент, 9 — рычаг 10 — кнопка

Предохранитель состоит из фибрового патрона, внутрь которого вставляется металлическая плавкая вставка (цинковая пластинка), закрепляемая в концевых латунных обоймах. Предохранитель устанавливается в зажимах. Вставка в сечении имеет несколько сужений, на месте которых при перегорании возникает дуга. Давление газов, возникающее при разложении фибры, способствует интенсивному гашению дуги. Предохранители характеризуются номинальными токами патрона и плавкой вставки. Преимущества плавких предохранителей — их простота, надежность защиты от коротких замыканий, а недостатки — отсутствие реакции на небольшие перегрузки, возможность сгорания плавкой вставки в одной фазе, вызывающего недопустимый ток перегрузки в двух других фазах двигателя.

По правилам безопасности плавкая вставка должна быть рассчитана на ток, в 2—3 раза больший номинального тока короткозамкнутого двигателя и соответственно в 2,5—1,6 раза меньший пускового тока. При этом в момент запуска короткозамкнутого двигателя, когда пусковой ток превышает в 5—7 раз номинальный, вставка не успевает перегореть. Для трехфазного двигателя с фазным ротором и нагрузки плавкие вставки выбирают по номинальному значению тока. При шунтировании предохранителя на время пуска можно выбирать вставку по номинальному току и для короткозамкнутых двигателей.

Максимальное токовое реле (рис. 13.1, а) — более совершенный аппарат защиты электроустановок от перегрузки и токов короткого замыкания. Оно состоит из магнитопровода с катушкой, якоря и контактов. В цепях с напряжением менее 1000 В реле включается обычно в разрыв фазы, а в цепях с напряжением выше 1000 В через трансформатор тока.

При нормальном рабочем токе якорь не притягивается катушкой. Только при увеличении тока силы притяжения катушки преодолевают сопротивление пружины, защелка освобождается и под действием расцепляющей пружины размыка-

ются контакты рабочих фаз, т. е. срабатывает выключатель. Реле такого типа применяют в автоматических выключателях и магнитных пускателях.

Электромагнитное реле настраивается на номинальный ток регулировочной пружиной, связанной с якорем. Во избежание срабатывания реле при пуске короткозамкнутого двигателя оно обычно применяется с выдержкой по времени или на этот момент отключается. В качестве механизмов выдержки времени применяют масляный или воздушный демпфер, часовой механизм или тепловое реле.

Для устранения возможности принудительного удержания рукоятки автоматического выключателя во включенном положении при его срабатывании в конструкциях привода обычно предусматривается механизм свободного расцепления. Максимальные реле устанавливают на двух рабочих фазах.

Максимальные реле обеспечивают: мгновенное отключение при коротком замыкании; одновременность выключения тока в трех фазах; минимальное время на включение после срабатывания; легкость регулирования. В то же время эта аппаратура сложнее предохранителей, несколько дороже и, так же как плавкие вставки, не защищает двигатель от перегрева при небольших превышениях тока.

Минимальная и нулевая защита предназначена для контроля величины напряжения в сети, и при падении последнего (или  $U=0$ ) машины отключаются. Необходимость отключения электрических цепей или машин при падении напряжения в сети ниже 70 % номинального объясняется тем, что в этом случае двигатель потребляет ток значительно больший, чем нормальный, что приводит к перегреву оборудования. При  $U=0$  (нулевая защита) установка должна отключаться во избежание несчастных случаев при самопроизвольном включении ее после подачи энергии. Поэтому эту защиту встраивают в пусковую аппаратуру, например воздушные выключатели.

Минимальные и нулевые реле электромагнитного типа, катушки которых включают между двумя фазами (рис. 13.1, б), имеют минимальную и нулевую защиту. Принцип действия реле заключается в том, что при нормальном напряжении ток, протекающий по катушке, удерживает якорь в притянутом состоянии. При снижении напряжения уменьшаются ток и сила притяжения катушки. Вследствие этого якорь под действием пружины отпадает и с помощью расцепляющей пружины освобождаются защелки. Самопроизвольное включение двигателя после появления напряжения в сети исключается.

В магнитных пускателях роль нулевой и минимальной защиты выполняет электромагнит контактора, который после подачи электроэнергии не может быть включен вследствие применения нормально открытого блок-контакта, шунтирующего

кнопку «пуск», или резистора нулевой защиты, встроенного в кнопочный пост.

Тепловая защита предназначена для предохранения двигателей от небольших по значению, но длительных по времени перегрузок. Осуществляется она посредством применения тепловых реле.

Тепловое реле типа РТ (рис. 13.1, в). Основная часть его — биметаллическая пластина, которая составлена из двух пластинок, имеющих разный коэффициент линейного расширения. При прохождении тока повышенного значения через нагревательный элемент последняя нагревается и, изгибаясь вверх, освобождает рычаг, который под действием пружины перемещается вправо, размыкая контакты. Для возвращения рычага в исходное положение необходимо нажать кнопку. Сменные нагревательные элементы цепи выбирают в соответствии с номинальным током. Тепловое реле устанавливают обычно в магнитных пускателях на двух фазах сети.

Нагревательный элемент реле выбирают по наибольшему рабочему току нагрузки двигателя. Тепловое реле рационально применять, когда двигатель работает в длительном режиме и нет несоответствия между температурой срабатывания реле и допустимой температурой нагрева двигателя. В случае же резко переменной нагрузки в кратковременном режиме такое несоответствие существует. Поэтому в подобных условиях следует использовать не тепловые, а температурные реле.

Малогабаритные температурные реле типа ТМ-4 или ТДР-1 приклеивают к обмотке двигателя по одному на каждую фазу. Между собой реле соединяют последовательно, а их выводы включают в цепь промежуточного реле пускателя. При перегреве контакты реле размыкаются, отключая электродвигатель.

Тепловое и температурное реле не защищают от коротких замыканий, так как, прежде чем нагреются отключающие пластинки, сгорит их нагреватель. Поэтому в силовых цепях в комплексе с тепловыми реле необходимо ставить плавкие предохранители или максимальные реле.

### 13.3. АППАРАТУРА РУЧНОГО УПРАВЛЕНИЯ

К аппаратам ручного управления относятся: рубильники, переключатели, пакетные выключатели, пускатели с ручным приводом, реостаты, контроллеры.

Рубильники и переключатели — простейшие аппараты ручного управления. Рубильник состоит из неподвижных и подвижных медных контактов в виде ножей, смонтированных на изоляционной плите. При включении ножи входят между пружинящими элементами неподвижных контактов и замыкают

цепь. Применяются они при редких замыканиях и размыканиях цепей и бывают одно-, двух- и трехполюсными с центральной или боковой рукояткой. Переключатели отличаются от рубильников наличием двух комплектов неподвижных контактов и поэтому применяются для управления реверсивными двигателями.

Рубильники и переключатели предназначены для вертикальной установки на панелях различных распределительных устройств при напряжении до 500 В. Установка этих аппаратов не допускается в местах, не защищенных от атмосферных осадков, во взрывоопасной и пожароопасной средах. Электрическая износоустойчивость рубильников и переключателей — 2500 включений и отключений тока.

Пакетные выключатели и переключатели используют для коммутации в сетях с напряжением до 380 В. Выключатель собирают в виде отдельных секций, число которых зависит от числа размыкаемых проводов. Неподвижные контакты крепятся на изоляционных кольцах, подвижные контакты — на валике, который поворачивается с помощью рукоятки. Вместе с контактами поворачиваются фибровые шайбы, которые под действием высокой температуры дуги выделяют инертные газы, способствующие ее гашению при разрыве контактов. Под крышкой смонтирован пружинный механизм, ускоряющий поворот валика. При повороте рукоятки сначала натягивается пружина, а затем под ее действием быстро происходит переключение.

Шахтные пускатели ручного управления применяются для включения и отключения электрических цепей под нагрузкой. Известны пускатели двух модификаций: пускатели барабанного типа ПРШ-1 (ручной со штепсельным вводом) и контакторного типа ПРВ-1031А (ручной взрывобезопасный). Первый из них имеет контактную систему в виде барабана с подвижными пластинами, соприкасающимися с неподвижными контактами. ПРШ-1 рассчитан на напряжение 380—660 В и выдерживает до 100 тыс. переключений.

Пускатель ПРВ-1031А снабжен перекачивающимися при работе контактами и рассчитан на ток до 60 А (напряжение 380 В). Контактная система пускателя заключена во взрывонепроницаемую оболочку. Оболочка состоит из цилиндрического корпуса и сферической крышки, сблокированной с ручкой. К оболочке крепится камера, разделенная на моторную и сетевую для подсоединения соответствующих кабелей. Корпус пускателя снабжен салазками. Максимальная защита обеспечивается предохранителями ПР-2 с вставкой на 100 А. Пускатель ПРВ-1031А выдерживает до миллиона включений.

#### 13.4. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ

Автоматические выключатели предназначены для защиты магистральных кабельных линий (фидеров) от перегрузок и коротких замыканий, а также для нечастых (30 раз в сутки) включений и отключений электрических цепей (кроме пуска и защиты электродвигателей). Некоторые типы выключателей допускают пуск, защиту и отключение электродвигателей.

Автоматический выключатель — это аппарат преимущественно с ручным приводом, снабженный механизмом свободного расцепления (МСР), который позволяет автоматически при отклонении каких-либо параметров (тока, напряжения и др.) от нормы отключать автоматический выключатель даже в том случае, если рукоятка его удерживается во включенном положении. Максимальное и нулевое реле защиты не имеют контактного узла и отключают автоматические выключатели, воздействуя своим якорем на МСР. Поэтому они получили название максимального и нулевого расцепителей. Для воздействия на МСР применяют также независимый расцепитель, который включается с помощью других аппаратов.

Автоматические выключатели классифицируют по току главной цепи (постоянный и переменный); по числу полюсов главной цепи (одно-, двух- и трехполюсные); по видам расцепителей (с максимальным или независимым расцепителем тока, минимальным или нулевым расцепителем напряжения).

В электроустановках на поверхности шахт применяют автоматические выключатели серий АЗ700, АВМ, АЕ-2000, АП-50 и др.

Автоматические выключатели АЗ700 выпускают на напряжение переменного тока 660 В и ток 630 А. В обозначении типоразмеров выключателей этой серии, например АЗ621Б, третья цифра означает номинальный ток выключателя (цифра 1 — 160; 2 — 250; 3 — 400; 4 или 9 — 630 А), а четвертая цифра и буква — исполнение выключателя по числу полюсов и токовой защите. Механическая и коммутационная износостойкость выключателей АЗ700 составляет соответственно 16 000 и 10 000 циклов включений—отключений (ВО).

Выключатели серии АВМ изготавливаются на напряжение 500 В и ток 2000 А. Номинальный ток отражен в обозначении типоразмера (например, АВМ-4 — 400 А; АВМ-10 — 1000 А).

Автоматические выключатели АЕ-2000 изготавливаются на напряжение 660 В и ток 100 А.

Подробные данные по указанным выше автоматическим выключателям общего назначения приводятся в справочниках [4].

Рудничные взрывобезопасные автоматические выключатели имеют взрывонепроницаемую оболочку, в которую встроены



Таблица 13.1.

Выключатель	Номинальный ток, А	Пределы уставок срабатывания аксиимального расцепителя, А	Коммутационная способность на отключение (кА) при напряжении, В		Уставка блока контроля изоляции, кОм		Масса, кг
			660	380	предупредительная	аварийная	
АФВ-1А	200	300—450—600	10	19	—	—	200
АФВ-2А	350	600—900—1200	10	19	—	—	205
АФВ-3	500	1000—1500—2000	10	19	—	—	220
АФВ-2БК	350	600—900—1200	10	19	—	—	215
АВ-200ДО	200	400—1200 (через 100 А)	15	17	200	30	340
АВ-320ДО	320	800—2400 (через 200 А)	17	20	200	30	340
АВ-315Р	315	800—2400 (через 200 А)	20	23	—	—	290
АВ-400ДО	400	800—2400 (через 200 А)	20	23	100	30	340

автоматический выключатель и аппараты защиты. Длястройки применяются модификации серий АЗ700 и АВМ. В обозначение их добавляется буква У (например, АЗ792У или АВМ-4У).

В настоящее время изготавливаются рудничные взрывобезопасные автоматические выключатели на напряжение 380 и 660 В серии АФВ и новой серии АВ.

Серия АФВ представлена выключателями с ручным управлением АФВ-1А, АФВ-2А и АФВ-3. В эксплуатации находится также изготавливаемый ранее выключатель АФВД-2БК с ручным управлением и дистанционным отключением. В выключателях серии АФВ встроены автоматические выключатели АВМ-У. Механическая износостойкость их составляет 4000 отключений вручную и по 3000 отключений максимальным и минимальным расцепителями. Взрывонепроницаемая оболочка выключателей АФВ представляет собой сварную конструкцию. На корпусе оболочки установлено вводное устройство, коробка которого имеет две камеры — сетевую и моторную. Камеры разделяются съемной перегородкой и закрываются общей крышкой. Внутри камеры расположены проходные зажимы. В гнездах арматуры выводов имеются резиновые кольца для уплотнения кабеля, на муфтах — скобы, предохраняющие кабель от выдергивания. Технические данные выключателей приведены в табл. 13.1.

Электрическая схема автоматических выключателей серии АФВ с ручным управлением показана на рис. 13.2. Максимальная защита осуществляется расцепителями *КА1* и *КА2*, включенными в две фазы главной цепи. Катушки *КП1* и *КП2* проверки исправности механизма свободного расцепления и максимальных расцепителей включены на линейное напряжение через кнопки *SB1* и *SB2*, управление которыми вынесено на корпус выключателя. Независимый расцепитель *КВ1* включен через реле утечки и замыкающий вспомогательный контакт выключателя.

Выключатель АФВ-2БК дополнительно снабжен понижающим и стабилизированным трансформаторами и дистанционно управляемым промежуточным реле с искробезопасной цепью управления. Размыкающий контакт реле введен в цепь катушки независимого расцепления.

В выключателях серии АВ применены автоматические выключатели АЗ700У, выдерживающие 16 000 циклов ВО, из которых 10 000 циклов — при номинальной нагрузке. Выпускаются выключатели АВ-315Р с ручным управлением и АВ-400ДО с ручным управлением и дистанционным отключением. Широко применяются также изготавливаемые ранее выключатели АВ-200ДО и АВ-320ДО.

В выключателе АВ-315Р максимальная защита осуществляется унифицированным блоком А1 типа ПМЗ (рис. 13.2, б), включенным через трансформаторы тока *ТА1-ТА3*. При срабатывании максимальной защиты подается команда на включение независимого расцепителя *КВ1*, который через механизм свободного расцепления отключает автоматический выключатель. Независимый расцепитель питается от трансформатора *TV*.

Автоматический выключатель АВ-400ДО имеет уровень взрывозащиты РВ (взрывобезопасный) и вид взрывозащиты ЗВИа (взрывонепроницаемая оболочка и искробезопасная цепь дистанционного отключения). В АВ-400ДО используют автоматический выключатель АЗ792У. Выключатель АВ-400ДО в отличие от рассмотренных выше снабжен блокировочным разъединителем, который устанавливается в специальном взрывонепроницаемом отделении оболочки. При отключении разъединителя снимается напряжение со всех токоведущих частей аппаратов, расположенных в обслуживаемом отделении выключателя, в результате чего в нем можно проводить работы, не отсоединяя автоматический выключатель от сети.

Электрическая часть автоматического выключателя АВ-400ДО (рис. 13.2, в) содержит следующие унифицированные блоки: максимальной токовой защиты А1 типа ПМЗ (для отключения выключателя вместе с трансформаторами тока *ТА1-ТА3* при возникновении к. з. в ответвлении участка сети);

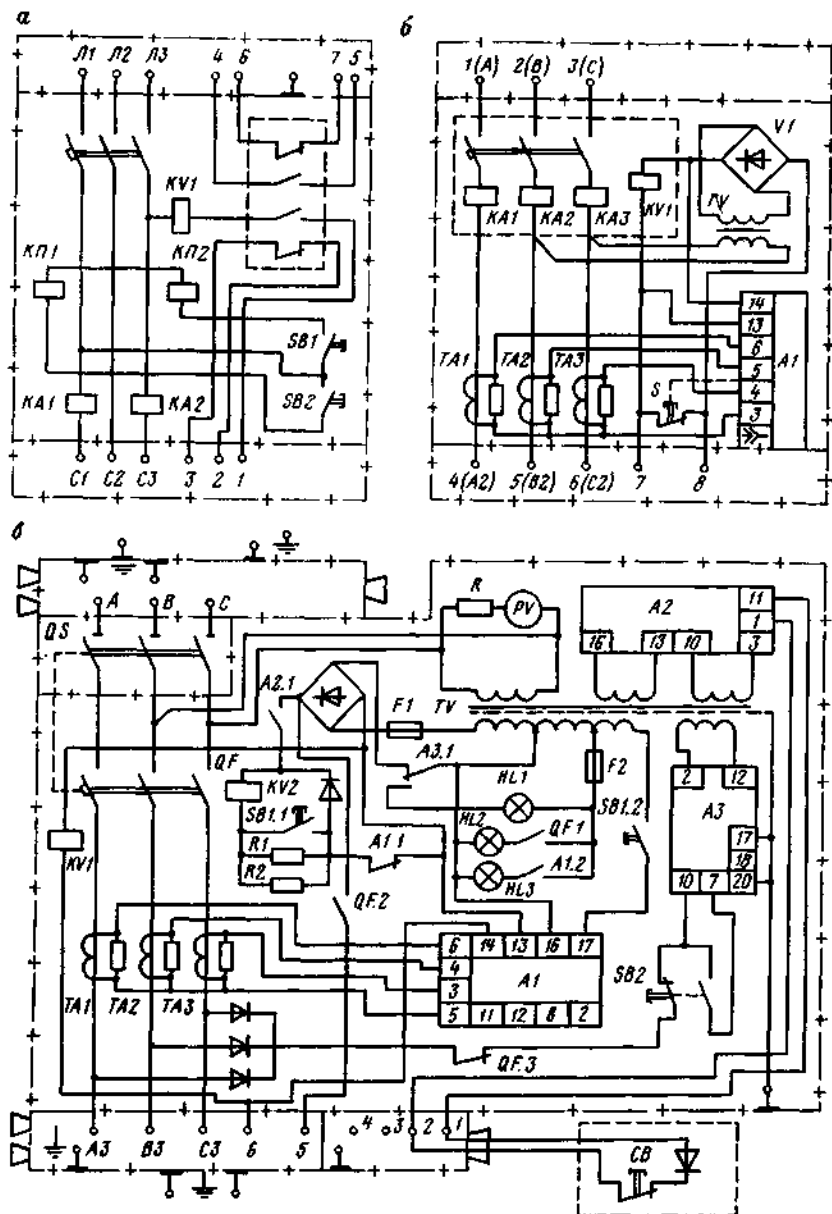


Рис. 13.2. Принципиальные электрические схемы автоматических выключателей::

а — АФВ-1А; б — АВ-315Р; в — АВ-400ДО

дистанционного отключения *A2* типа ДО (для дистанционного отключения выключателя вынесенной кнопкой «Стоп»); контроля изоляции *A3* типа БКИ (для предварительного контроля сопротивления изоляции относительно земли защищаемого выключателем участка сети и блокирования от его включения, если указанное сопротивление окажется меньше допустимого).

Автоматический выключатель обеспечивает защиту от токов к. з. отходящих силовых цепей, при обрыве цепи дистанционного отключения, от потери управляемости при замыкании проводов цепи дистанционного отключения между собой, нулевую, проверку действия максимальной токовой защиты (ПМЗ) и блока контроля изоляции; световую сигнализацию о включении выключателя, срабатывании максимальной токовой защиты и срабатывании блока контроля изоляции.

Работа автоматического выключателя происходит следующим образом. При включении разъединителя *QS* подается питание на понижающий трансформатор *TV* и вольтметр *PV*. Если кнопка «Стоп» вынесенного кнопочного поста не зафиксирована в разомкнутом положении, а провода цепи дистанционного отключения не оборваны и не замкнуты между собой, то срабатывает реле блока дистанционного отключения *A2*, которое своим контактом *A2.1* замыкает цепь питания нулевого расцепителя *KV2*. Перед включением выключателя необходимо нажать кнопку *SV1* (для этого ручку привода кнопки повернуть в положение «Взвод защиты»). Контакт *SB1.1* кнопки замыкается и шунтирует резисторы *R1* и *R2*. При включении выключателя *QF* его вспомогательный контакт *QF.1* замыкает цепь питания сигнальной лампы *HL2*.

Выключатель отключается вручную (местное отключение) с помощью рукоятки на корпусе выключателя, а дистанционно — кнопкой «Стоп» вынесенного поста управления. Возможно автоматическое отключение выключателя контактами аппаратуры защитного отключения электроэнергии (реле утечки, анализатора метана, аппаратуры контроля воздуха, температуры и др.). При нажатии кнопки *SB* реле блока *A2* отключается, его замыкающий контакт *A2.1* размыкается и отключает цепь питания нулевого расцепителя *KV2*, который, отключаясь, воздействует на механизм свободного расцепления, в результате чего выключатель *QF* отключается.

При срабатывании максимальной токовой защиты ПМЗ подается сигнал на срабатывание независимого расцепителя *KV1*, который через механизм свободного расцепления отключает выключатель. Контакт *A1.1* блока ПМЗ размыкает цепь питания нулевого расцепителя *KV2* и не дает таким образом повторно включить выключатель. Замыкающий контакт *A1.2* включает сигнальную лампу с красным светофильтром *HL3*, указывающую на срабатывание защиты ПМЗ. Для возврата

блока *A1* (ПМЗ) в исходное состояние необходимо нажать кнопку *SB1*. Тогда ее контакт *SB1.2* отключит реле в блоке *A1*.

Если при отключенном положении выключателя *QF* сопротивление изоляции отходящего от выключателя участка электрической сети по отношению к земле будет меньше сопротивления уставки (30 или 100 кОм), то срабатывает реле блока *A3* (БКИ). Размыкающий контакт *A3.1* выходного реле блока *A3* разомкнет цепь питания нулевого расцепителя *KV2*, не допуская включения выключателя. Замыкающий контакт *A3.1* включит сигнальную лампу *HL1* с желтым светофильтром, которая сигнализирует о низком сопротивлении изоляции. Проверка блока *A2* производится при отключенном выключателе нажатием кнопки *SB2*. Если блок исправен, загорится сигнальная лампа *HL1*.

### 13.5. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПУСКАТЕЛИ

Электромагнитный пускатель — это коммутационный электрический аппарат для пуска, остановки, реверсирования и защиты электродвигателей. Он состоит из контактора, аппаратов защиты, блокировки и управления, помещенных в общий корпус. Во взрывобезопасных пускателях оболочка взрывонепроницаемая. Различают неререверсивные и реверсивные пускатели. В реверсивных пускателях имеются два контактора, один из которых включает электродвигатель в условном направлении «Вперед», а другой — «Назад».

В настоящее время выпускаются неререверсивные пускатели с искробезопасными цепями управления серии ПМВИ-03А и ПВИ (последние более совершенные). Обозначение пускателей расшифровывается следующим образом: П — пускатель; М — магнитный; В — взрывобезопасный; И — с искробезопасными цепями управления.

Типоразмеры пускателей обеих серий и их основные технические данные приведены в табл. 13.2. На шахтах широко применяются также выпускавшиеся до начала 80-х годов неререверсивные пускатели ПМВИ-13М, ПМВИ-23М и ПМВИ-61.

Пускатели серии ПВИ отличаются от пускателей ПМВИ в основном тем, что разъединитель помещен в специальное взрывонепроницаемое отделение, а контакторное отделение имеет быстрооткрываемую крышку. Почти во всех пускателях (кроме ПМВИ-61 и ПВИ-32) применяют унифицированные узлы: устройство максимальной токовой защиты типа УМЗ и блок управления, содержащий блокировочное реле утечки с уставками срабатывания при напряжении 380 В — 18 кОм и при 660 В — 30 кОм.

Пускатели ПВИ-25Б, ПВИ-63Б и ПВИ-125Б имеют сварной корпус, состоящий из четырех отделений, разделенных взрыво-

Таблица 13.2.

Пускатель	Номинальный ток, А	Наибольшая мощность подключаемого двигателя с к. з. ротором (кВт) при напряжении, В		Минимальный и максимальный токи уставок реле, А	Коммутационная способность, А			Масса, кг
		380	660		на отключение (эффективный ток)	на включение (амплитудный ток)	коммутационная выносливость, млн. циклов ВО	
ПМВИ-13М	63	32	55	125—275	1400	2400	0,6	145
ПМВИ-23М	120	55	100	250—750	2400	3380	0,6	150
ПМВИ-61	240	105	140	500—1500	2100	—	—	229
ПМВИ-13А	63	32	55	125—375	1500	2700	1	150
ПМВИ-23А	125	55	100	250—750	2500	4600	1	155
ПВИ-25Б	25	13	22	63—187	1500	2700	1	200
ПВИ-63Б	63	32	50	125—375	1500	2700	1	200
ПВИ-125Б	125	55	100	250—750	2500	4600	1	200
ПВИ-32	32	16	28	384	1100	1900	1	130
ПВИ-250Б	250	125	200	500—1500	4000	7000	1	350
ПВИ-320А	320	160	280	800—2400	4800	8800	1	415
ПВИР-250	250	125	200	500—1500	4000	7000	1	415

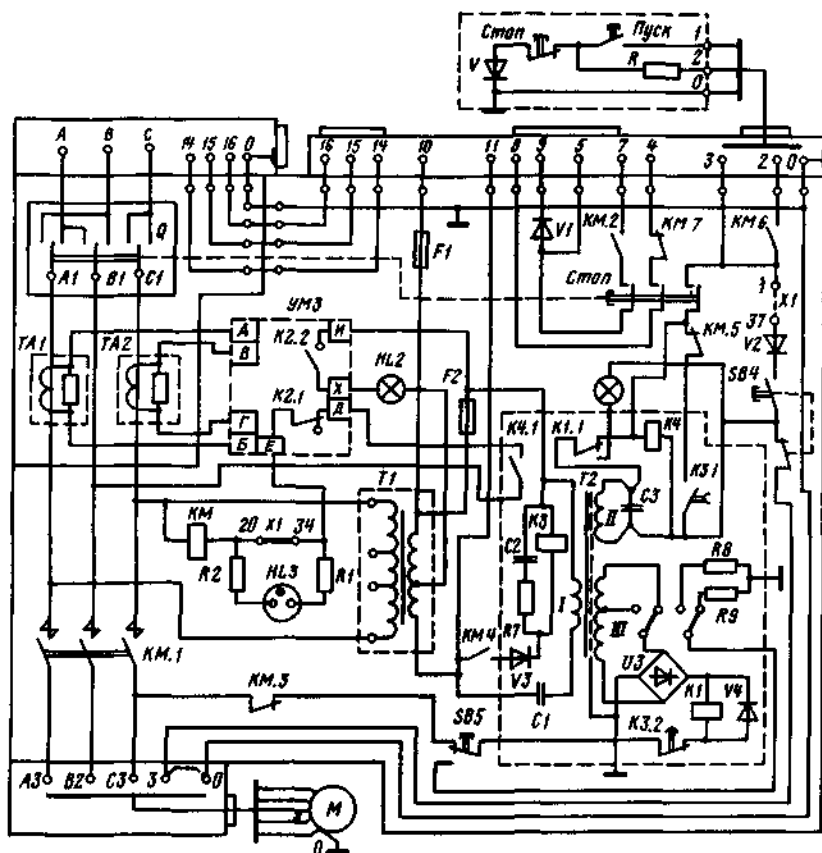


Рис. 13.3 Принципиальная электрическая схема пускателей ПВИ-25Б, ПВИ-63Б, ПВИ-125Б

непропускаемыми перегородками. Сетевое отделение предназначено для ввода и подсоединения питающего и транзитного кабелей. Отделение выводов предназначено для ввода кабеля электроприемника и кабелей контрольных цепей. В отделении разъединителя размещены блокировочный реверсирующий разъединитель и трансформатор тока максимальной токовой защиты УМЗ. В контакторном отделении расположен контакторный блок с аппаратурой управления, защиты и сигнализации.

Пускатели ПВИ-25Б, ПВИ-63Б и ПВИ-125Б обеспечивают следующие виды управления (рис. 13.3): дистанционное с помощью вынесенных кнопок (установленных отдельно или на

рабочей машине); дистанционное автоматическое от замыкающего контакта другого пускателя или какого-либо датчика; местное отключение кнопкой «Стоп» на пускателе.

Установленная в пускателях аппаратура обеспечивает также защиту: от токов к. з. в отходящих от пускателя силовых цепях и сигнализацию о срабатывании защиты, от потери управляемости при обрыве или замыкании проводов дистанционного управления между собой и с заземляющей жилой, от обрыва или увеличения сопротивления цепи заземления свыше 100 Ом на отключение, нулевую и проверку исправности цепи катушки контактора.

Включающая катушка контактора получает питание через контакт промежуточного реле, присоединенного непосредственно к зажимам искробезопасной вторичной обмотки понижающего трансформатора. В схеме это реле *K4* (см. рис. 13.3) присоединено к обмотке II трансформатора *T2*. По катушке реле проходит переменный ток, но сопротивление ее настолько велико, что этот ток недостаточен для включения реле. Чтобы реле можно было включить, параллельно катушке реле и, следовательно, вторичной обмотке трансформатора присоединяют через контакт аппарата управления (например, кнопки) полупроводниковый диод. В течение одного полупериода тока обмотки II, когда направление тока совпадает с проводящим направлением диода, обмотка II трансформатора замкнута практически накоротко (сопротивление диода в проводящем направлении незначительно) и ток по катушке реле не проходит. В течение следующего полупериода ток обмотки II пойдет только по катушке реле, так как через встречно включенный диод он идти не может. В результате катушка реле будет обтекаться однополупериодным выпрямленным током, и реле сработает.

При дистанционном управлении с кнопочного поста на рабочей машине между проходными зажимами 0 и 3 устанавливают переемычку (показана штриховой линией). Нажатием на кнопку «Пуск» вынесенного поста образуется цепь, замыкающая обмотку II трансформатора *T2* через диод *V* в кнопочном посту: верхний зажим обмотки II, размыкающий контакт *K1.1*, кнопка *SB3* («Стоп»), проходной зажим 1 в отделении контрольных выводов, жила управления 1 силового кабеля, кнопки «Пуск» и «Стоп», диод *V*, заземляющая жила 0 силового кабеля, проходной зажим 0, переемычка 0—3 на проходных зажимах, размыкающий контакт кнопки *SB4* («Проверка схемы»), нижний зажим обмотки II. В результате катушка реле будет обтекаться выпрямленным током, реле *K4* сработает и контактом *K4.1* замкнет цепь катушки контактора *KM*, который главными контактами *KM.1* подаст питание на электродвигатель и переключит вспомогательные контакты в цепях управления.



Так, контакт *КМ.6* через резистор *R* зашунтирует кнопку «Пуск», поэтому при ее отпускании цепь управления останется замкнутой.

При дистанционном управлении с отдельного кнопочного поста переключку *0—3* с пускателя снимают и устанавливают в электродвигателе *М*. В результате описанная выше цепь будет содержать дополнительно жилы *0* и *3* силового кабеля к электродвигателю. Таким образом цепь управления контролирует целостность заземляющей жилы.

При срабатывании максимальной защиты (устройство УМЗ) контакт *К2.1* отключает контактор, а контакт *К2.2* включает сигнальную лампу *НЛ2*.

Исправность цепи катушки контактора (без его включения и подачи напряжения на электродвигатель) проверяют следующим образом. Переключку *X1* с зажимов *20* и *34* в цепи катушки контактора снимают и устанавливают на зажимы *1* и *37*, после чего нажимают кнопку *SB4* («Проверка схемы»). В результате обмотка II трансформатора *T2* и катушка реле *K4* оказываются зашунтированными диодом *V2* в течение одного полупериода по цепи: верхний зажим обмотки II, размыкающий контакт *K1.1*, кнопка *SB3*, переключку *X1* (*1—37*), диод *V2*, кнопка *SB4*, нижний зажим обмотки II. Реле *K4* срабатывает и замыкает контакт *K4.1* в цепи катушки контактора *КМ*. При снятой с зажимов *20* и *34* переключке последовательно с катушкой контактора оказываются включенными резисторы *R1*, *R2* и неоновая сигнальная лампа *НЛ3*. При исправной цепи ток в катушке контактора будет недостаточен для его срабатывания, а загорание лампы *НЛ3* покажет, что цепь исправна.

Блокировочное реле утечки (БРУ) смонтировано в блоке управления (БУ). Для контроля работы БРУ нажимают кнопку *SB5* («Проверка БРУ»), вводя в цепь реле *K1* вместо сопротивления изоляции проверочный резистор *R8* (при 380 В) или *R9* (при 660 В), равные соответственно 18 и 30 кОм.

В процессе эксплуатации при повторном включении электродвигателя, еще не успевшего остановиться, под действием его э. д. с. могут происходить ложные срабатывания защиты от утечек (БРУ). Во избежание этого в пускателе установлено реле времени, состоящее из электромагнитного реле *K3*, электролитического конденсатора *C2*, резистора *R7* и диода *V3*. Когда контактор *КМ* включается, его вспомогательный контакт *КМ.4* замыкает цепь питания реле *K3* и оно срабатывает без выдержки времени, замыкая контакт *K3.1* в цепи шунтировки реле *K4* и размыкая контакт *K3.2* в цепи реле *K1* (БРУ). При отключении контактора его контакт *КМ.4* в цепи реле времени размыкается, по катушке реле *K3* будет проходить ток разрядки конденсатора *C2*, поэтому возврат реле *K3* в исходное состояние произойдет через  $2\div 3$  с (время разрядки

конденсатора). В течение этого времени контактор не может быть включен, так как катушка промежуточного реле *K4* зашунтирована контактами *KМ.5* и *K3.1*. По истечении указанного времени контакт *K3.1* размыкается, а *K3.2* в цепи контроля сопротивления изоляции замыкается.

Электрическая схема остальных пускателей серии ПВИ, а также ПМВИ-13А и ПМВИ-23А аналогична.

В настоящее время выпускаются взрывобезопасные реверсивные пускатели ПМВИР-41 и ПВИР-250. Основные технические данные их приведены в табл. 13.2.

В пускателе ПМВИР-41 максимальная токовая защита осуществляется плавкими предохранителями. При перегорании плавкой вставки в одном из них работающий электродвигатель будет продолжать вращаться, но ток в его обмотках превысит номинальный. Во избежание выхода его из строя параллельно предохранителям включают двухобмоточное реле. При исправных предохранителях разность потенциалов на их зажимах близка к нулю и реле отключено. Если плавкая вставка в одном из предохранителей сгорит, то на зажимах этого предохранителя образуется напряжение и реле включается, размыкая свой контакт в цепи управления пускателем.

Пускатель ПВИР-250 обеспечивает те же виды управления, защиты, блокирования, сигнализации и проверок, что и рассмотренные выше неревверсивные пускатели. В нем дополнительно предусмотрено электрическое блокирование, препятствующее одновременному включению обоих контакторов пускателя.

На рис. 13.4 приведена силовая цепь пускателя ПВИР-250, содержащая разъединитель *Q*, трансформаторы тока *TA1* и *TA2*, главные контакты *K1.2* и *K2.2* контакторов. В пускателе ПВИР-250 установлены контакторы КТУ-4. Включающие катушки контакторов питаются от выпрямителя *V1*, который присоединен к зажимам (36 В) вторичной обмотки трансформатора *TV1*. При включенном разъединителе *Q* на диоды *V1* подается напряжение по цепи: плюс выпрямителя *V1*, вспомогательные контакты *K1.7*, *K2.7* контакторов, резистор *R5*, катушка реле форсировки включения *K3.1*, контакт кнопки *S1*, минус *V1* проходит ток. Реле *K3.1* срабатывает и своим замыкающим контактом шунтирует резисторы *R3* и *R4* в цепи включающих катушек контакторов.

Для пуска электродвигателя в каком-либо направлении, например «Вперед», необходимо нажать соответствующую кнопку поста управления. При этом в пускателе включится промежуточное реле *K5.1* и замкнет контакт *K5.2* в цепи катушки контактора *K1.1*. Контактор включится и вспомогательным контактом *K1.1* разомкнет цепь катушки *K3.1* форсировочного реле, контакт *K3.2* которого, размыкаясь, введет в цепь

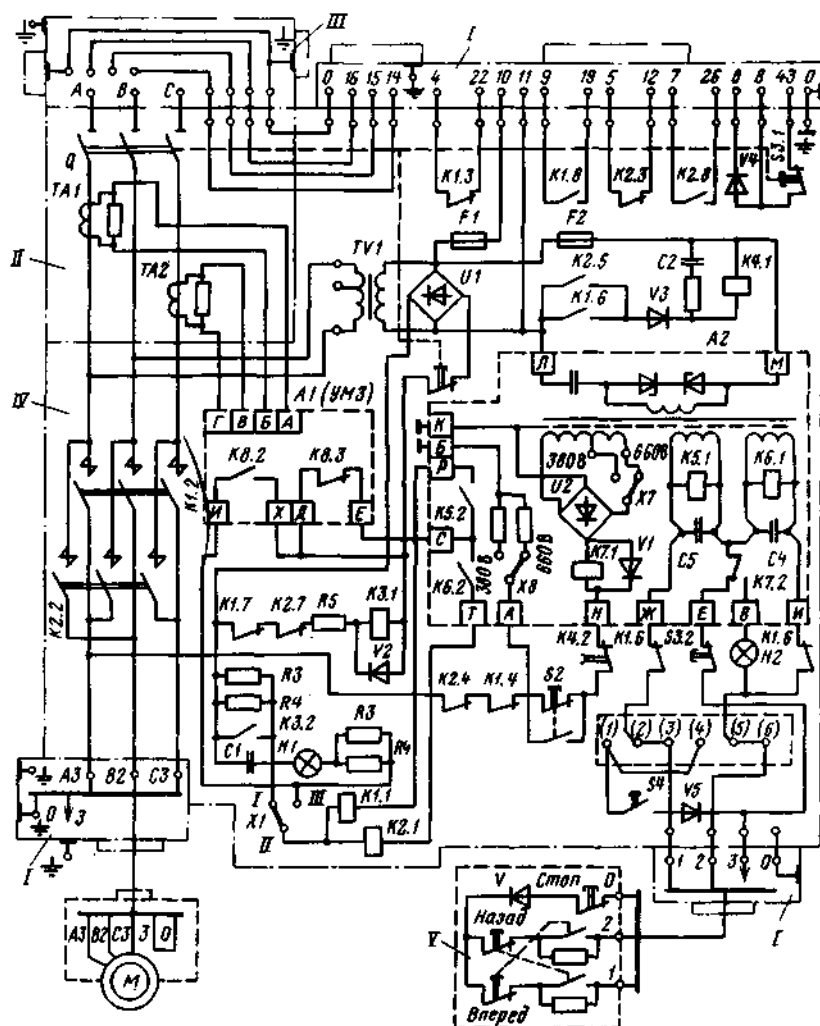


Рис. 134. Принципиальная электрическая схема пускателя ПВИР-250, включающая отделения:

I — выводов; II — разъединителя; III — сетевое; IV — контакторное; V — дистанционного управления

включающей катушки контактора резисторы  $R3$  и  $R4$ . В результате ток в катушке контактора снизится до значения, достаточного для удержания контактов во включенном состоянии.

## Контрольные вопросы

1. По каким признакам классифицируется электрическая аппаратура защиты и управления?
2. Устройство, принцип действия и назначение аппаратов защиты.
3. Изложите особенности рудничной аппаратуры ручного управления.
4. Особенности устройства и схем автоматических выключателей
5. Изложите требования и способы, обеспечивающие надежность, безопасность и удобство эксплуатации магнитных пускателей.

## Глава 14

# ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ РАБОТ

### 14.1. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К СХЕМАМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ РАБОТ

Выбор схемы электроснабжения в подземных выработках угольных и рудных шахт определяется многими факторами, основными из которых являются: а) глубина шахты, размеры шахтного поля, система разработки пластов, удаленность рабочих участков от околоствольного двора; б) способ вскрытия месторождения и количество разрабатываемых горизонтов; в) мощность электроприводов основных шахтных силовых установок и их расположение; г) вид подземного транспорта.

В зависимости от глубины залегания полезного ископаемого различают два основных способа питания электроэнергией добычных и подготовительных участков от ГПП: при глубоком залегании пластов (более  $300 \div 350$  м) — кабелями, проложенными по стволу, и при неглубоком залегании — кабелями, проложенными в скважинах, специально пробуренных для этой цели, или в шурфах. Однако при любом способе питания неизбежна прокладка кабелей через ствол для питания водоотлива и электроприемников околоствольного двора [14].

Выбор значения напряжения в шахте зависит от количества, мощности и назначения электроприемников.

В настоящее время для распределения электроэнергии по шахте и участкам применяют напряжение 6000, 1140, 660 и 380 В. Для питания ручного инструмента и освещения подземных выработок шахт предусматривается напряжение 127 и 220 В.

Современная система электроснабжения подземных горных работ должна удовлетворять следующим основным требованиям: 1) надежности, т. е. обеспечить бесперебойное питание электроэнергией основных потребителей; 2) безопасности в отношении пожаров, взрывов рудничной среды и поражения людей электрическим током; 3) экономичности как по капитальным затратам, так и по эксплуатационным расходам; 4) обла-

дать гибкостью, т. е. должна учитывать непрерывное развитие подземных электрических сетей.

Виды электроприемников в подземных выработках шахт, их количество и мощность, а также режим электропотребления зависят от вида энергии, используемой для механизации горных работ, мощности шахты, водообильности и других факторов.

#### **14.2. ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТОК ЧЕРЕЗ СТОЛ**

Электроснабжение подземных выработок шахт от главной понижительной подстанции (ГПП) до центральной подземной подстанции (ЦПП) при помощи кабелей, прокладываемых по столу, до настоящего времени является наиболее распространенным способом канализации электроэнергии. При этом каждый кабель рассчитывают на нагрузку, которая позволяет при выходе из строя одного из кабелей обеспечить электроэнергией все потребители I категории и ряд потребителей II категории.

Часть электроэнергии, поступающей в ЦПП, распределяется на том же напряжении между подземными распределительными пунктами высокого напряжения, участковыми подстанциями, для питания добычных и подготовительных работ, а также транспортных установок. Другая часть электроэнергии, тоже обычно на напряжении 6 кВ, используется для питания электродвигателей насосов главного водоотлива, трансформаторных преобразовательных подстанций, питающих электровозную откатку, а также трансформаторов, обеспечивающих работу электроустановок напряжением до 1000 В, расположенных в околостольных выработках.

Для питания ЦПП от ГПП по столу предусматривается прокладка не менее двух кабелей. Если для передачи необходимой мощности двух кабелей недостаточно, то прокладывают большее число кабелей, но, как правило, четное. Для повышения надежности электроснабжения в ЦПП применяют секционированную систему шин. Число секций равно числу ствольных кабелей.

Распределение электроэнергии по подземным выработкам шахты осуществляется при помощи ряда распределительных пунктов высокого напряжения (РП-6) и подземных участков стационарных и передвижных пониженных трансформаторных подстанций. Сооружение стационарных подстанций, размещаемых в камерах с несгораемой крепью, предусматривают только при невозможности или нецелесообразности применения передвижных подстанций.

Принципиальная схема подземного электроснабжения шахты приведена на рис. 14.1.

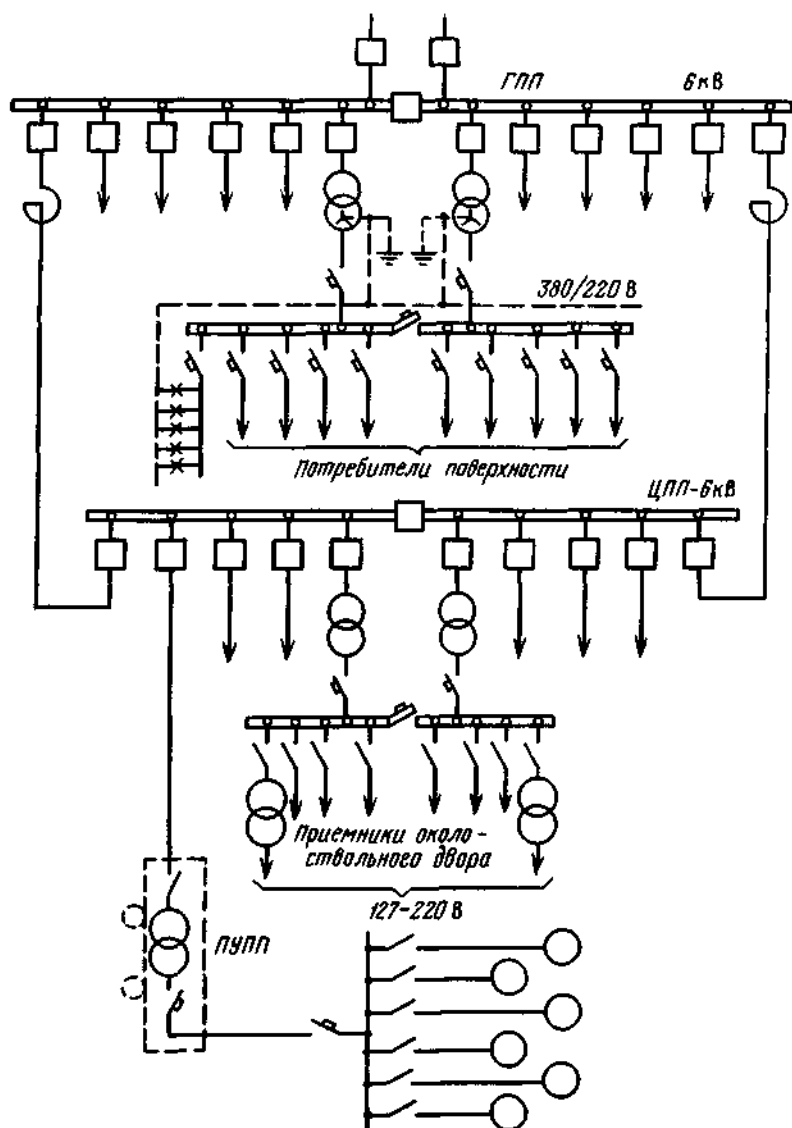


Рис 141 Принципиальная схема подземного электроснабжения шахты

Независимо от схемы питания ЦПП, ее местоположения и назначения каждая ЦПП состоит из одного или двух распределительных устройств на 6 кВ, двух трансформаторов напря-

жением 6/0,69 (0,4) кВ для питания электроприемников, устанавливаемых в околоствольном дворе, и распределительного устройства низкого напряжения.

Для обеспечения надежности электроснабжения и большей эксплуатационной оперативности в ЦПП следует предусматривать раздельную работу вводов, секционирование системы шин РУ 6 кВ и раздельную работу трансформаторов. Установки, состоящие из нескольких рабочих или резервных агрегатов (насосы главного водоотлива, трансформаторы, установленные в ЦПП и др.), должны присоединяться к разным секциям шин. При такой схеме питания выход из строя одной из секций шин 6 кВ не повлечет за собой простоя шахты.

Существующие и проектируемые схемы питания ЦПП разделяют на две группы: питание непосредственно от общих шин 6 кВ ГПП, к которым присоединены также и потребители поверхности шахты, и обособленное, находящееся в подземных выработках шахты.

Схемы питания ЦПП от общих шин 6 кВ рекомендуются в основном для питания шахт, не опасных по газу, которые разрабатывают один или два горизонта. Под обособленным питанием понимают такую схему электроснабжения ЦПП, когда питание подстанции осуществляется от отдельных источников питания, установленных на поверхности шахты и электрически не связанных с остальной сетью шахты (поверхность, жилые поселки и пр.). В качестве источников питания при таких схемах электроснабжения могут использоваться отдельные вторичные обмотки основных понижительных трансформаторов (трансформаторы с расщепленной обмоткой) или специальные раздельные трансформаторы (6/6 кВ), дополнительно установленные на ГПП.

Основными преимуществами системы питания подземных потребителей электроэнергии через ствол являются: 1) возможность использования для прокладки питающих кабелей готовой выработки (ствола); 2) стационарность питающих линий, рассчитанная на весь срок службы шахты, и доступность для надзора за стволовыми кабелями; 3) удобство централизованного контроля и обслуживания высоковольтной шахтной кабельной сети из ЦПП; 4) удобство эксплуатации, обслуживания и контроля участков трансформаторных понижительных подстанций.

Недостатками способа электроснабжения через ствол следует считать: применение в подземных выработках в больших масштабах высокого напряжения, что значительно повышает опасность поражения электрическим током, возникновения пожаров и пр.; большие капитальные затраты на сооружение протяженной кабельной сети 6 кВ; значительная емкость шахтной кабельной сети, определяющая величину емкостных токов;

необходимость применения маслонаполненных аппаратов и дорогостоящего высоковольтного электрооборудования во взрывобезопасном исполнении.

#### **14.3. ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТОК ЧЕРЕЗ ШУРФЫ И СКВАЖИНЫ**

При неглубоком залегании пластов в ряде случаев питание подземных участков шахт целесообразно и экономически выгодно производить с поверхности через энергетические скважины (или шурфы). Электроснабжение в этих случаях осуществляют от ГПП шахты по воздушной линии электропередачи 6 кВ до устья скважины (шурфа), и далее питание электроэнергией участков шахты производится напряжением 6 кВ и низшим напряжением (до 1000 В).

Электроснабжение участков через скважины.

снижает стоимость сетей напряжением 6 кВ за счет ликвидации дорогостоящих подземных кабельных сетей большой протяженности, количество и стоимость взрывобезопасного электрооборудования напряжением 6 кВ; сокращает сооружение камер и ниш для силовых трансформаторов и распределительных пунктов при кабельных скважинах низкого напряжения; повышает безопасность эксплуатации систем электроснабжения за счет ликвидации протяженных сетей напряжением 6 кВ; снижает величину емкостных токов в распределительных сетях напряжением 6 кВ.

При питании низким напряжением на поверхности у скважины, располагаемой над участком шахты, устанавливается стационарный или передвижной трансформаторный киоск либо передвижная комплектная трансформаторная подстанция, электроэнергия к которым подводится от ГПП по одноцепной воздушной линии 6 кВ из сталеалюминиевых проводов на простых деревянных опорах.

Принципиальная схема электроснабжения участка через скважины напряжением до 1000 В приведена на рис. 14.2. Защита трансформаторного киоска от перенапряжений и грозовых разрядов осуществляется разрядниками. От одной воздушной линии электропередачи 6 кВ может питаться несколько скважин. Кабели от трансформаторного киоска к распределительным пунктам участков прокладываются по скважинам, закрепленным обсадной трубой с внутренним диаметром 125÷150 мм. Каждый кабель крепится к стальному тросу диаметром 6÷9 мм с помощью бандажей, накладываемых через 1,5÷2 м.

Способ питания участков через скважины низким напряжением широко применяют при неглубоком залегании пластов (около 200 м) и небольшой мощности потребителей на участ-



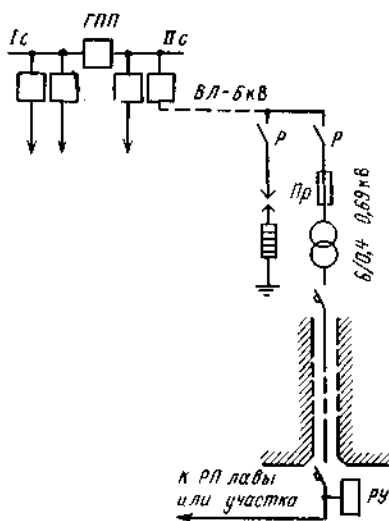


Рис 14.2 Принципиальная схема электроснабжения участка через шурфы и скважины напряжением до 1000 В

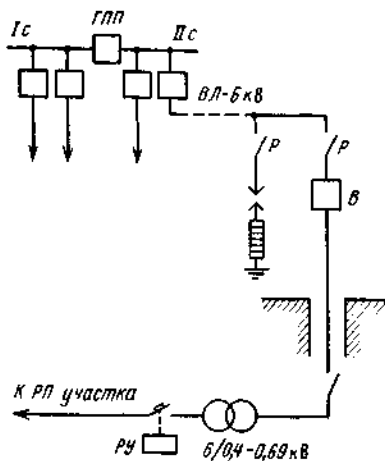


Рис 14.3 Принципиальная схема электроснабжения участка через шурфы и скважины напряжением 6 кВ

ках. С внедрением мощных угледобывающих и проходческих комплексов, а также увеличением длины лав и обрабатываемых столбов обеспечение нормальных уровней напряжения на зажимах приемников вследствие значительной потери напряжения в низковольтной сети усложняется. В ряде случаев применяют не одну, а две-три энергоскважины с частым их перемещением, что очень ограничивает этот способ электроснабжения участков.

Поэтому в настоящее время в основном применяют энергоскважины при передаче по ним высокого напряжения (6 кВ) с последующей его трансформацией на участках.

Принципиальная схема электроснабжения участка через скважины напряжением 6 кВ приведена на рис. 14.3. Кабели 6 кВ присоединяются на поверхности к одноцепной (или двухцепной) воздушной линии электропередачи через разъединители или масляные выключатели.

Основными недостатками системы электроснабжения участков шахт через скважины и шурфы являются: частые перемещения скважин и трансформаторных киосков, необходимые по условиям потери напряжения (при низком напряжении) и погашения выработок (при высоком напряжении); повышенные затраты на многократное бурение скважин и их закрепление обсадными трубами которые обычно не извлекают и повторно

не используют; необходимость использования малонадежных по сравнению с кабельными воздушных линий электропередачи; затруднения, связанные с обслуживанием и надзором за трансформаторными киосками на поверхности у скважин, особенно в зимнее время и в распутицу; трудность монтажа кабеля в скважинах.

Следует сказать, что специфической особенностью системы подземного электроснабжения горных предприятий является непрерывное перемещение фронта горных работ и связанное с этим перемещение отдельных элементов подземной электрической сети. Кроме того, разнообразие условий и применяемых систем разработок определяет существенное разнообразие способов электроснабжения очистных и подготовительных работ.

Выбор системы питания электроэнергией подземных участков следует производить на основании технико-экономических расчетов.

#### **14.4. ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ОЧИСТНЫХ И ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ УЧАСТКОВ**

Основные принципы электроснабжения шахт, несмотря на большое разнообразие горно-геологических и других условий, являются одинаковыми и заключаются в следующем. От ЦПП при глубоком залегании пластов или от энергоскважины при мелком залегании электроэнергия напряжением 6 кВ по кабелям подается либо непосредственно к передвижным понижающим подстанциям на участках, либо к распределительным устройствам 6 кВ, от которых энергия распределяется по отдельным подстанциям. От участковых подстанций, подвигающихся вслед за продвижением лав, электроэнергия при напряжении 380 и 660 В подается к распределительному пункту лавы (РПЛ) или к магнитной станции (станции управления), от которой электроэнергия гибкими кабелями распределяется по электроприемникам.

В настоящее время в связи со значительным увеличением длин лав и мощности забойных машин каждая лава и подготовительный штрек, как правило, питаются электроэнергией от собственной участковой понижающей подстанции. Более того, в связи с ростом мощности горных машин в ряде случаев на участках применяют по две и более подстанции. Иногда нагрузка участка распределяется между двумя понижающими подстанциями, одна из которых установлена на конвейерном, а другая — на вентиляционном штреке.

В соответствии с уровнем механизации, количеством и мощностью электроприемников на участке, наличием или отсутствием подготовительных работ электроэнергия от участковых подстанций подводится к отдельным потребителям через один

или два распределительных пункта лавы.

Питание участковых подстанций (трансформаторов) осуществляют высоковольтным кабелем от ЦПП или воздушной линией от ГПП. Питание нескольких участковых подстанций от одной ячейки ГПП или ЦПП запрещено, поскольку при этом невозможно обеспечить селективность действия защиты от токов к.з.

Однако при наличии на участке двух трансформаторных подстанций, обслуживающих общий производственный процесс (например, питание приемников в лаве и конвейерных установок на штреке), допускается их питание от общей дистанционно управляемой ячейки [15].

На рис. 14.4 приведена принципиальная схема электроснабжения панели при передвижных участковых понизительных подстанциях. Количество их в этом случае соответствует количеству лав и нарезных штреков. РП-6, от которого питаются все передвижные подстанции, располагается в камере на сопряжении центрального бремсберга (уклона) и главного откаточного штрека. В специальной камере, где расположен РП-6, часто устанавливают сухой трансформатор или передвижную подстанцию для питания конвейеров бремсберга (уклона), а в некоторых случаях, если позволяют мощность и расстояние, — части штрековых конвейеров. Вообще питание ленточных штрековых и бремсберговых конвейеров, как правило, осуществляют от отдельных ближайших понизительных подстанций, которые являются стационарными на период отработки столба (яруса).

На рис. 14.5 в качестве примера приведены план расстановки оборудования и схема электроснабжения участка при пологом и наклонном залегании пластов. Участок питается от двух подстанций, при этом от одной передвижной подстанции питаются электроприемники штрека, от другой — электроприемники лавы.

При эксплуатации и расчете кабельной сети участка большое значение имеет шаг передвижки участковой подстанции, т. е. предельно допустимое расстояние от подстанции до распределительного пункта лавы. Это расстояние определяется как требованиями обеспечения допустимых колебаний и откло-

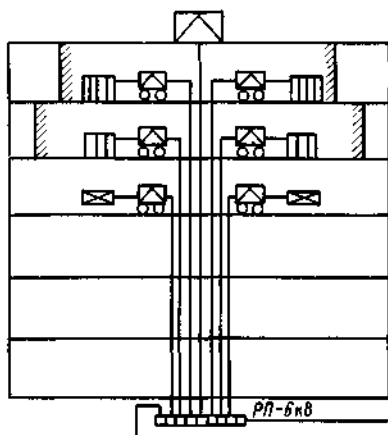
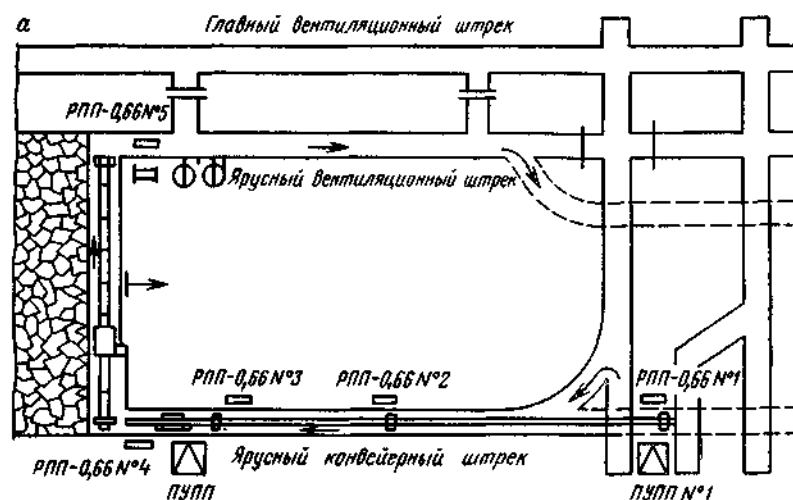


Рис. 14.4. Принципиальная схема электроснабжения панели при передвижных участковых подстанциях



б

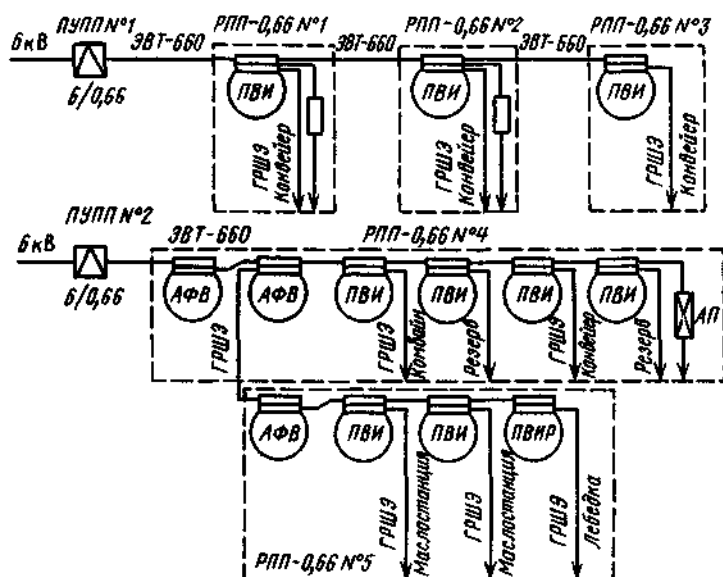


Рис 145 План размещения оборудования (а) и схема электроснабжения участка шахты (б)

нений уровней напряжения на шинах распределительного пункта (и соответственно на зажимах электродвигателей), так и требованиями минимальных затрат при повторных перемещениях подстанций и скважин (при питании участков с поверхности). Эти же соображения должны быть положены в основу определения шага передвижки распределительного пункта.

При эксплуатации этот вопрос решается по-разному в зависимости от многочисленных факторов, определяемых местными условиями (длина разрабатываемого столба, яруса или этажа, величина применяемого напряжения на участке, наличие рельсовых путей и разминок, ширина конвейерного штрека, сечение фидерного кабеля и пр.).

В связи с широким внедрением мощных механизированных комплексов и быстрым их подвиганием резко увеличивается длина отработываемых столбов и этажей, ограничивающих возможности стационарного использования участков трансформаторных подстанций по условиям потери напряжения в сети. Кроме того, использование стационарных участков подстанций требует резкого увеличения количества и сечения магистральных кабелей большой протяженности (от участковой подстанции до распределительного пункта лавы), что связано также со значительными потерями электроэнергии. С другой стороны, для снижения потерь напряжения и электроэнергии в сети участковую подстанцию желательно возможно чаще передвигать, уменьшая шаг ее передвижения, что, однако, связано со значительным увеличением эксплуатационных затрат, особенно при необходимости сооружения специальных ниш для размещения подстанции.

Определение оптимального шага передвижки является технико-экономической задачей. Тем не менее на практике стремятся свести к минимуму количество передвижек подстанции, требующих значительных затрат времени. При этом необходимо учитывать, что ущерб от простоя добычи в ряде случаев может во много раз перекрывать достигаемую экономию в стоимости кабелей и электроэнергии. В принципе следует стремиться к непрерывному передвижению участковой трансформаторной подстанции, как и распределительного пункта лавы, вслед за подвиганием забоя. В некоторых угольных бассейнах уже накоплен интересный опыт непрерывного автоматического передвижения распределительного устройства вслед за подвиганием лавы. Это осуществляется просто с помощью жесткой связи между конвейерным приводом и электрооборудованием распределительного пункта лавы.

В большинстве случаев в выработках, имеющих рельсовые пути, передвижные подстанции располагают на старых, неиспользуемых разминках или в специальных уширениях (нишах). В этом случае шаг передвижки подстанции определяется

конкретными условиями в шахте при учете обеспечения минимально возможной потери напряжения в сети.

При отсутствии рельсовых путей на промежуточном и вентиляционном штреках, при ограниченной длине разрабатываемого столба и широко применяемом напряжении 660 В, когда может быть обеспечен требуемый уровень напряжения на зажимах электроприемников, в ряде случаев передвижная участковая подстанция фактически используется как стационарная. При этом затраты на повторное передвижение ее в пределах разрабатываемого столба отпадают. Остаются лишь затраты, связанные с монтажом и демонтажом отдельных участков кабеля соответственно удлинению или укорочению кабеля 6 кВ, подводимого к подстанции.

Обеспечение надежной работы подземных электроустановок, от которых зависят безопасность и бесперебойность работы шахты, должно быть положено в основу любой системы электроснабжения. Вопросы резервирования решаются в каждом отдельном случае в зависимости от конкретных условий в результате технико-экономического сравнения. Резервирование должно предусматриваться в первую очередь для тех элементов сети, выход из строя которых существенно снижает производительность шахты. Отсюда следует, что в первую очередь необходимо резервировать те магистральные кабели 6 кВ, которые обеспечивают электроснабжение группы участков, дающих большую часть добычи шахты.

При использовании электрооборудования на пологих и наклонных пластах угольных шахт, опасных по внезапным выбросам угля и газа, нужно применять приборы контроля содержания метана, соблюдать дополнительные требования, повышающие безопасность эксплуатации. К основным из этих требований относится обязательное применение: а) только безмасляного электрооборудования; б) автоматической защиты от утечек в сетях 6 кВ, действующей при снижении сопротивления изоляции сети до предельно допустимой величины 120 кОм при однофазной утечке и 360 кОм на фазу при трехфазной утечке; в) БРУ с короткозамыкателями в ячейках 6 кВ, в автоматических фидерных выключателях и в магнитных пускателях; г) экранированных негорючих кабелей повышенной прочности и гибкости.

Применение электрооборудования в вентиляционных выработках с исходящей струей воздуха на пластах, опасных по выбросам угля и газа, допускается только при наличии обособленного питания электроэнергией. Иногда целесообразно ограничиться обособленным питанием одних лишь участков, на которых опасность взрыва от искрения особенно велика; при этом питание осуществляют от подземных разделительных трансформаторов, устанавливаемых в ЦПП.

Условия эксплуатации электрооборудования на крутонаклонных пластах значительно опаснее, чем на пологих и наклонных. Это объясняется повышенной вероятностью повреждения гибких кабелей, находящихся в подвешенном состоянии, необходимостью размещения электрооборудования на вентиляционных штреках с исходящей струей воздуха и значительной подверженностью крутонаклонных пластов внезапным выбросам угля и газа. Согласно Правилам безопасности на крутонаклонных пластах шахт, не опасных по внезапным выбросам, применение электрической энергии на очистных и подготовительных участках допускается лишь при условии выполнения всех требований, предъявляемых к электроснабжению участков на пологих и наклонных пластах, опасных по внезапным выбросам.

По Правилам безопасности запрещается применение электрической энергии в очистных, подготовительных и вентиляционных выработках с исходящей струей воздуха на крутонаклонных пластах, опасных по внезапным выбросам. Применение электрооборудования в таких случаях разрешается лишь при расположении его на расстоянии не менее 150 м от забоев и на свежей струе воздуха.

Электроснабжение подготовительных работ по сравнению с добычными участками имеет в зависимости от крепости пород следующие особенности: а) небольшую потребляемую мощность при проходке крепких пород буровзрывным способом; б) высокое электропотребление при наличии мощных проходческих комбайнов и комплексов.

В первом случае основными потребителями электрической энергии на подготовительном участке являются: буровой станок в сочетании с колонковыми или ручными электросверлами, погрузочная машина, маневровая лебедка, насос орошения, вентилятор местного проветривания и сухой осветительный трансформатор. Питание таких потребителей осуществляют, как правило, от участковых передвижных подстанций мощностью до 180 кВт·А.

#### **14.5. УЧАСТКОВЫЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ ПУНКТЫ И ТРАНСФОРМАТОРНЫЕ ПОДСТАНЦИИ**

Сооружаемые и применяемые в подземных выработках шахт трансформаторные подстанции делятся на две основные группы: стационарные и передвижные. К стационарным трансформаторным подстанциям относятся:

1) центральные подземные подстанции, сооружаемые в околоствольном дворе для распределения высокого напряжения на пласты и участки, а также для питания потребителей электроэнергии в околоствольном дворе; 2) участковые понизительные

(трансформаторные) подстанции, располагаемые в специальных камерах, предназначенные для питания электроэнергией потребителей на очистных и подготовительных участках, 3) бремсберговые трансформаторные подстанции, сооружаемые для питания потребителей бремсбергов (уклонов), например конвейерных установок, лебедок и др. Часто эти подстанции совмещаются в одной камере с распределительным пунктом 6 кВ (РП-6), откаточной лебедкой и др.

В отличие от стационарных передвижные подстанции являются комплектными, т. е. включают в себя все необходимое высоковольтное и низковольтное электрооборудование. Основными элементами подземных подстанций являются силовые трансформаторы, аппаратура высокого и низкого напряжения (высоковольтные и низковольтные распределительные пункты).

Высоковольтные распределительные пункты РП-6 рекомендуются для электроснабжения нескольких участков очистных и подготовительных работ в пределах одной панели или этажа. РП-6 представляет собой распределительное устройство напряжением 6 кВ, скомплектованное из комплектных распределительных устройств в рудничном исполнении и предназначенное для распределения электроэнергии на напряжение 6 кВ в основном между группой участков подстанций по радиальной схеме. РП-6 располагается по возможности в центре нагрузок, на капитальной выработке, в специальной огнестойкой камере.

При присоединении к РП-6 пяти-шести трансформаторных подстанций питание его предусматривается по одному кабелю. Если от РП-6 намечается питание ответственных потребителей (участковые водоотливные установки, перекачные насосные установки на промежуточном горизонте) или же перебои питания РП-6 значительно снижают производительность шахты, то для питания РП-6 следует предусматривать прокладку двух кабелей. При этом кабели, питающие РП-6, присоединяют к разным секциям шин 6 кВ на ЦПП. Шины РП-6 разделяют на две рабочие секции с установкой между ними высоковольтной ячейки (рис. 14.6). Сечение каждой питающей кабельной линии должно быть рассчитано на обеспечение всей нагрузки РП-6. В нормальном режиме предусматривается раздельная работа секций шин 6 кВ распределительного пункта. При проектировании РП-6 следует предусматривать установку на каждой секции шин одной резервной высоковольтной ячейки, а также резервное место для установки еще одной ячейки. Тяжелые условия эксплуатации трансформаторов в подземных выработках предъявляют к ним требования большой механической прочности, безопасности в отношении взрыва и пожара, небольших размеров и удобства транспортирования.

В соответствии с этими требованиями применяемые в шахтах трансформаторы имеют значительные конструктивные от-



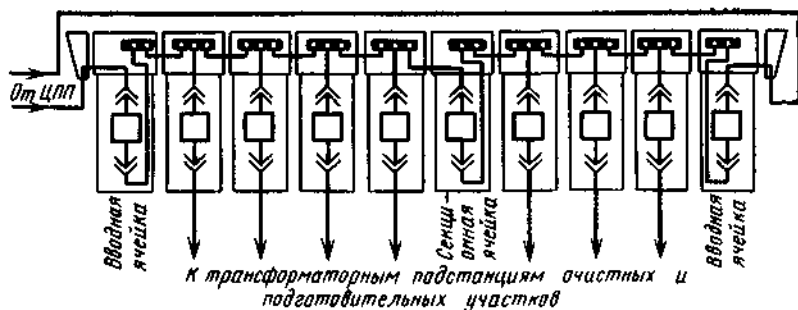


Рис 146 Принципиальная схема высоковольтного распределительного пункта РП-6

личия от трансформаторов в общепромышленном нормальном исполнении. В шахтах применяют шахтные трансформаторы с масляным заполнением и сухие трансформаторы. Сухие трансформаторы предназначены для комплектных передвижных подстанций и могут быть использованы также для стационарных подстанций.

Сооружение на участках шахт стационарных трансформаторных подстанций в специальных камерах имеет следующие недостатки: а) высокую стоимость сооружения огнестойких трансформаторных камер; б) применение маслонаполненного оборудования (трансформаторы и масляные выключатели); в) значительные потери напряжения в низковольтной сети в связи с большими расстояниями от камер участковых подстанций до распределительных пунктов лав; г) значительные простои при переноске оборудования подстанций в другую камеру. Все эти недостатки устраняются при применении передвижных подземных трансформаторных подстанций. Основной особенностью этих подстанций являются отсутствие маслонаполненных аппаратов и легкая передвижка их по шахтным рельсовым путям вслед за продвижением горных работ.

Шахтная передвижная трансформаторная подстанция представляет собой передвижной агрегат, состоящий из силового трансформатора, отсека с высоковольтным разъединителем и отсека низкого напряжения с фидерным автоматическим выключателем, реле утечки и комплектом измерительных приборов.

В настоящее время широко распространены передвижные трансформаторные подстанции типа ТСШВП и ТКШВП. Подстанции состоят из трехфазного заполненного кварцем (или сухого) трансформатора мощностью  $100 \div 630$  кВ·А и распределительного устройства высокого (РУВН) и низкого (РУНН) напряжения.

Трехфазный сухой заполненный кварцем (ТКШВП) или с изоляцией из стеклоткани (ТСШВП) трансформатор для изменения коэффициента трансформации в пределах  $\pm 5\%$  имеет отпайки обмотки высшего напряжения, выведенные в специальные фарфоровые изоляторы, находящиеся на стенке кожуха трансформатора. Снятие крышки и переключение отводов можно производить только после отключения трансформатора от сети. Вторичные обмотки трансформаторов допускают соединение на 380 и 660 В.

В нашей стране в связи с производством сухих взрывобезопасных передвижных трансформаторных подстанций область применения стационарных участковых подстанций значительно уменьшилась. Тем не менее при отсутствии необходимости в регулярных передвижках трансформаторной подстанции или же когда по условиям допускаемой потери напряжения подстанция в течение длительного срока является стационарной технико-экономические расчеты могут оказаться в пользу стационарных подстанций, т. е. сухих взрывобезопасных трансформаторов, располагаемых в специальных камерах.

#### 14.6. ШАХТНЫЕ КАБЕЛИ

В подземных выработках шахт электрическая энергия передается только по кабельным линиям. Применяемые кабели согласно ПБ должны быть предназначены для работы в шахтных условиях и иметь оболочки или защитные покровы, не распространяющие горение.

Правила безопасности запрещают применять в подземных выработках и стволах шахт кабели с алюминиевыми жилами или с алюминиевой оболочкой [14].

В шахтах применяют бронированные, гибкие и особо гибкие кабели. По назначению различают кабели: силовые, управления, предназначенные для цепей дистанционного управления, релейной защиты и автоматики; контрольные для цепей контроля и измерения различных параметров.

Бронированные кабели применяют для питания потребителей стационарных, а также перемещаемых периодически [15]. Для стационарной прокладки в горизонтальных выработках используют кабели СБн, СБГ. Буква Б в маркировке кабеля означает броню в виде двух стальных лент; н — негорючий наружный покров. Эти кабели можно применять также и в наклонных выработках, но при небольшой разности уровней концов кабеля. Такое ограничение связано с тем, что маслосанифольный компаунд, которым пропитана бумажная изоляция жил, под действием собственной массы стекает к нижнему концу кабеля и образовавшееся там давление компаунда может вывести кабель из строя.

В крутонаклонных выработках с углом наклона до  $45^\circ$  могут прокладываться те же кабели, но с обедненно-пропитанной изоляцией. В обозначение этих кабелей добавляется буква В, например СБн-В.

В стволах, а также наклонных выработках при большой разности уровней концов кабелей следует применять кабели с броней, выполненной плоскими (буква П в обозначении) стальными оцинкованными проволоками. При глубине прокладки в стволах 200 м можно применять кабели с обедненно-пропитанной изоляцией, например СПли-В; при большей глубине — кабели ЦСПл и ЦСКл, пропитанные нестекающим составом на основе церезина.

К бронированным также относится кабель повышенной гибкости и прочности ЭВТ, который в соответствии с требованием ПБ применяется для подачи энергии передвижным участковым подстанциям и распределительным пунктам НН, перемещающимся вслед за подвиганием забоя. Выпускают четырех- и восьмижильные кабели ЭВТ на 6 кВ с сечением основных жил 16, 25 и 35 мм<sup>2</sup>, заземляющей жилы 10 мм<sup>2</sup> и вспомогательных жил (у восьмижильных кабелей) — 4 мм<sup>2</sup>. Для питания распределительных пунктов низкого напряжения выпускают четырех- и восьмижильные кабели на 660 В с сечением основных жил 16—95 мм<sup>2</sup> и восьмижильные кабели на 1140 В с сечением основных жил 35—120 мм<sup>2</sup>.

Восьмижильный кабель ЭВТ (рис. 14.7, а) имеет три основные жилы 10, покрытые изоляцией 2 из поливинилхлоридного пластиката и заключенные в индивидуальные экраны 4 из медной фольги, и четыре вспомогательные жилы 1, скрученные между собой и помещенные в общий экран. Все указанные жилы располагают вокруг заземляющей жилы 6 и поверх них накладывают оболочку 3 из поливинилхлоридного пластиката, поясную изоляцию 5, общий экран 7 из медной фольги шланговую оболочку 9 с вделанной в нее броней 8 из стальных канатиков.

Гибкие кабели применяют в качестве силовых для питания шахтных передвижных машин и механизмов и управления. Силовые кабели ГРШ (гибкие с резиновой изоляцией, шахтные, экранированные) на напряжение 660 В используют на шахтах особенно широко. Промышленность выпускает кабели: семижильные (рис. 14.7, б) с тремя основными жилами сечением 4—95 мм<sup>2</sup>, тремя вспомогательными и одной жилой заземления; четырехжильные (рис. 14.7, в) без вспомогательных жил. Основные 1 и вспомогательные 5 жилы имеют резиновую изоляцию 2. Поверх изоляции основных жил наложен экран 3 из электропроводящей резины. Жилы кабеля скручиваются; вспомогательные — между собой и вместе с основными — вокруг заземляющей жилы 4. В четырехжильных кабелях основные

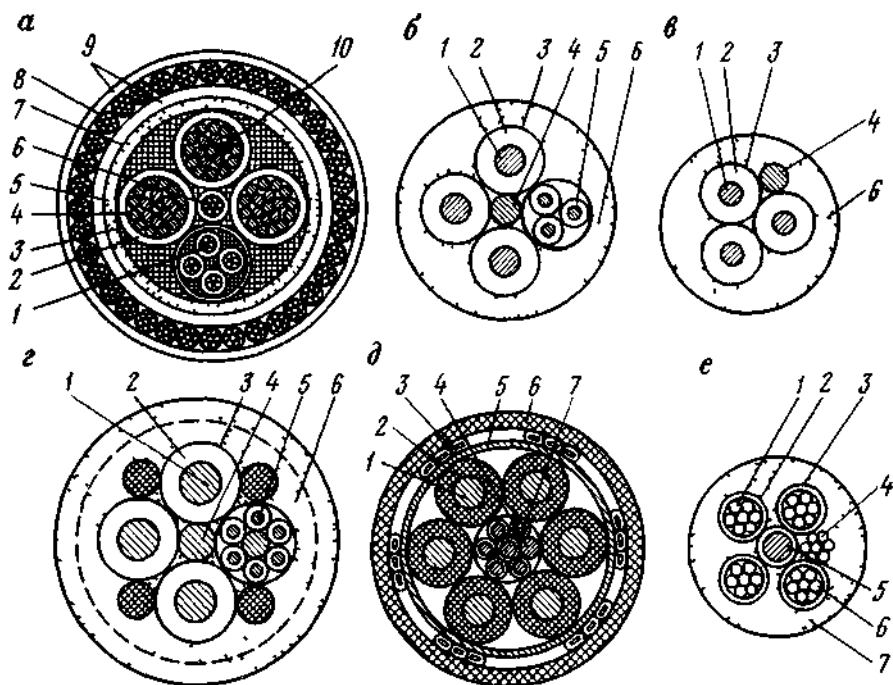


Рис 147 Конструкции шахтных кабелей

а — ЭВТ (восьмижильный) б — соответственно семи и четырехжильный кабель ГРШЭ г — ГРШЭП д — ГВШОП е — КОГЭШ и КОГВЭШ

и заземляющие жилы скручены между собой. Поверх скрученных жил наложена резиновая оболочка 6.

В связи с использованием напряжения 1140 В для питания потребителей добычных участков выпускают семижильные кабели ГРШЭ—1140 с тем же сечением основных жил. Они отличаются от кабелей ГРШЭ на 660 В повышенным сопротивлением изоляции.

Кабели ГРШЭП имеют повышенную гибкость и прочность по сравнению с ГРШЭ. Они разработаны для питания очистных комбайнов с кабелеукладчиками или кабелеподборщиками. Номинальное напряжение основных жил 660 В. Кабели ГРШЭП изготавливают девятижильными (рис 147, г) с сечением основных жил 10—70 мм<sup>2</sup>. По конструкции они близки к кабелям ГРШЭ. Эти кабели имеют пять вспомогательных жил 5, свитые между собой и с основными жилами 1, которые покрыты изоляцией 2 и заключены в экран 3, вокруг заземляющей жилы 4. Поверх скрученных жил наложена двухслойная резиновая оболочка 6, упрочненная между слоями нитями из волокнистых материалов.

Кабели ГВШОП предназначены для питания электродвигателей передвижных машин и механизмов при напряжении 660 В для основных и 380 В для вспомогательных жил в системах электроснабжения с опережающим отключением. Пять вспомогательных жил 7 (рис 147, д) кабеля, изолированных поливинилхлоридным (ПВХ) пластиком, и не изолированная заземляющая жила 4 скручены вокруг сердечника из лавсановых нитей. Шесть основных жил 1 сечением  $6 \div 50 \text{ мм}^2$ , покрытых изоляцией 2 из ПВХ пластика и графитополимерным экраном, скручены вокруг вспомогательных жил и обмотаны лентой 5 из синтетического материала. Поверх ленты наложены 18 упрочняющих жгутов 3 из металлокорда или стального каната. Наружная оболочка 6 выполнена из ПВХ пластика.

Кабели КРПСН выпускаются четырехжильные (три основные жилы сечением  $2,5-120 \text{ мм}^2$  и одна заземляющая), пятижильные (три основные жилы сечением  $2,5 \div 6 \text{ мм}^2$ , одна заземляющая и одна вспомогательная) и шестижильные (три основные жилы сечением  $4 \div 50 \text{ мм}^2$ , одна заземляющая и две вспомогательные). Эти кабели имеют резиновую маслостойкую оболочку, не распространяющую горение. Они применяются в шахтах, когда не требуются экранированные кабели.

Контрольные кабели КГШ применяют в цепях управления, защиты, сигнализации и блокировки. Их выпускают с числом жил 6—36, сечением каждой жилы  $1,5 \text{ мм}^2$ .

Особо гибкие кабели используют для присоединения шахтного бурильного электроинструмента к сети напряжением до 220 В для кабелей с резиновой изоляцией и до 660 В для кабелей с ПВХ изоляцией. Выпускаются кабели КОГЭШ (особо гибкий с резиновой изоляцией, экранированный, шахтный) и КОГВЭШ, отличающийся видом изоляции (используют ПВХ вместо резины). Эти кабели имеют пять жил (три основные жилы сечением  $1,5-6 \text{ мм}^2$ , одна заземляющая и одна вспомогательная). Основные жилы 1 (рис 147, е) и вспомогательная 6 покрыты изоляцией 2, на которую наложен экран 3 из электропроводящей резины (для кабеля КОГЭШ) или графитополимерный (для КОГВЭШ). Жила заземления 4 не имеет изоляции. Все жилы скручены вокруг сердечника 5 и покрыты синтетической пленкой и резиновой оболочкой 7.

#### Контрольные вопросы

1. Какие существуют требования к электроснабжению подземных горных работ?
2. Основные достоинства и недостатки схем электроснабжения через ствол, шурфы и скважины.
3. Схемы электроснабжения очистных и подготовительных выработок.
4. Как устраиваются участковые распределительные пункты и трансформаторные подстанции?
5. Конструктивные особенности и марки шахтных кабелей.

## Глава 15

### РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ РАБОТ

#### 15.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Подземное электрооборудование горных машин и установок проектируют на заранее оговоренный период развития горного предприятия. Планом развития горных работ на конец этого периода должны быть обоснованы наибольшие расстояния до потребителей электроэнергии, ожидаемые (или фактические) мощности потребителей и планограммы (или графики) их работ. Последние необходимы для определения коэффициентов одновременности и загрузки машин и установок. Следует учитывать перспективу появления новых более мощных машин по сравнению с изготавливаемыми на момент проектирования, а также перспективу более прогрессивной организации работ, потребляющей более мощных горных машин. Поэтому для проектирования системы подземного электрооборудования и электроснабжения необходимы следующие исходные данные: 1) план горных работ с указанием длины горных выработок; 2) типы, количество и номинальные мощности горных машин и установок на всех участках производственного процесса предприятия; 3) мощности пластов, крепость угля или сопротивляемость его резанию, угол наклона пласта, длина и количество лав на участке, планограммы или графики работы машин и установок и пр.); 4) категория шахты по газу, опасность по пыли; 5) способ прохождения прилегающих к очистному забою горизонтальных выработок, величина опережения штреков; 6) график одновременности работы очистных забоев (по пласту, крылу шахте); 7) основные параметры питающей энергосистемы: расстояние до питающей районной подстанции, сечение проводов питающих сетей, мощности питающих трансформаторов, токи или мощности к. з. на шинах районной или шахтной поверхностной подстанции и пр.

Величина питающего напряжения определяется главным образом мощностью и видом потребителя.

В соответствии с требованиями Правил безопасности ручные инструменты (в том числе и ручные электросверла) а также сетевые светильники должны питаться напряжением не более 127 В.

Серийно изготавливается для шахт силовое низковольтное электрооборудование на напряжение 660 В, и уже начал выпуск участковых электроустройств на напряжение 1140 В. Цельсообразность того или иного рабочего напряжения определяется мощностью электродвигателей. При мощности уста-

новки  $160 \div 200$  кВт целесообразно применять рабочее напряжение 660 В, при более мощных электродвигателях — 1140 В.

В высоковольтных распределительных системах шахт в настоящее время общепринятым является напряжение 6 кВ. Однако при большой мощности горного предприятия целесообразным может оказаться напряжение 10 кВ и более. Требуемая величина напряжения определяется в этом случае на основании технико-экономического сравнения вариантов.

Во всех схемах электроснабжения подземных горных работ в качестве источников питания приняты ПУПП. Применение этих подстанций во многих случаях приближает источник питания непосредственно к центру нагрузок забоя, что способствует более качественному электроснабжению, сокращает расход кабелей, повышает оперативность в управлении электроснабжением очистных забоев.

Наиболее полно и эффективно используются трансформаторные подстанции в схемах, где от одной трансформаторной подстанции питается все оборудование забоя. Подобная схема электроснабжения удобна также для шахт сверхкатегорных и опасных по внезапным выбросам газа и пыли. Поэтому преимущественно в схемах электроснабжения предусмотрено питание забойного оборудования от отдельной подстанции. Максимальное удаление передвижных подстанций от забоев, как показывает практика, при напряжении 660 В равно  $500 \div 600$  м.

В зависимости от расстановки забойного оборудования в схемах электроснабжения забоев, работающих на пологих и наклонных пластах, предусматривают один или два распределительных пункта низкого напряжения. В схемах электроснабжения подготовительных забоев и забоев, работающих на крутонаклонных пластах, по необходимости предусматривается и большее количество распределительных пунктов. В схемах электроснабжения забоев, оборудованных комбайновыми комплексами, предусматриваются магнитные станции, в остальных случаях — питание отдельных токоприемников забоя от магнитных пускателей.

## **15.2. ВЫБОР МОЩНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРА УЧАСТКОВОЙ ПОДСТАНЦИИ**

Потребители электроэнергии добычного участка работают обычно одновременно, с различными коэффициентами загрузки по току. Отдаваемая трансформатором мощность изменяется в больших пределах в течение суток и даже отдельной смены. Поэтому точно определить требуемую мощность участкового трансформатора трудно. В данном случае наиболее широко применяется метод коэффициента спроса.

Расчетную мощность трансформатора  $S_p$  (кВ·А) определяют по формуле

$$S_p = K_c P_{\Sigma} / \cos \varphi_{cp}, \quad (15.1)$$

где  $K_c$  — коэффициент спроса, учитывающий к. п. д. сети, одновременность работы электродвигателей, степень их загрузки;  $P_{\Sigma}$  — суммарная установленная мощность электроприемников участка, кВт;  $\cos \varphi_{cp}$  — средневзвешенный коэффициент мощности электроприемников при фактической их нагрузке.

Средневзвешенный коэффициент мощности можно определить аналитически через коэффициенты мощности отдельных потребителей при фактической их нагрузке с учетом их КПД при этой нагрузке. Но это затруднительно, поскольку неизвестны как зависимости  $\cos \varphi$  и КПД от мощности, так и сами фактические нагрузки. Поэтому значение средневзвешенного коэффициента мощности принимают для подготовительных и очистных участков шахт с пологими пластами равным 0,6, а для очистных участков шахт с крутыми пластами — 0,7.

При расчете нагрузок на отдельных участках шахт коэффициенты спроса  $K_c$  определяют по эмпирическим формулам, предложенным Центрогипрошахтом.

Для очистных участков, где применяются комбайны с индивидуальной крепью, и подготовительных участков, когда отсутствует блокировка очередности пуска электродвигателей,

$$K_c = 0,29 + 0,71 P_{\text{ном max}} / R_{\Sigma}, \quad (15.2)$$

где  $P_{\text{ном max}}$  — номинальная мощность наибольшего электродвигателя, питающегося от подстанции

При использовании механизированных очистных комплексов с автоматической блокировкой пуска электродвигателей, для которых коэффициент одновременности близок к единице,

$$K_c = 0,4 + 0,6 P_{\text{ном max}} / P_{\Sigma}. \quad (15.3)$$

Опыт эксплуатации показал, что трансформаторные подстанции, мощность которых определена по данным формулам, недогружены, т. е. мощность их завышена. Для коррекции расчета в работе [15] рекомендуется разделить расчетную мощность  $S_p$ , полученную по формуле (15.1) на коэффициент возможного использования шахтных участков подстанций  $k = 1,25$  и по уточненной таким образом расчетной мощности  $S_p'$  выбрать трансформатор

$$S_{\text{ном}} \geq S_p' = S_p / 1,25. \quad (15.4)$$

Если на участке шахты применяется напряжение 1140 В, то исключается необходимость определения мощности трансформаторной подстанции, так как в настоящее время выпускается только один типоразмер ПУПП на это напряжение —  $S_{\text{ном}} =$



$= 630 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ . Однако рассмотренная методика расчета мощности трансформатора используется и в этом случае, но для решения обратной задачи — определения максимальной установленной мощности электроприемников, которые могут быть подключены к ПУПП.

### 15.3. РАСЧЕТ КАБЕЛЬНОЙ СЕТИ УЧАСТКА

*Основные положения.* Кабельная сеть участка шахты (рис. 15.1) в общем случае состоит из низковольтных (до 1140 В) кабелей, питающих отдельные электроприемники; магистрального низковольтного кабеля между ПУПП и распределительным устройством РПП-НН; высоковольтного (6 кВ) магистрального кабеля между РПП-6 и ПУПП.

Шахтные кабельные линии напряжением до 1140 В рассчитывают: по допустимой продолжительной токовой нагрузке в нормальном и аварийном режимах; по потере напряжений, чтобы обеспечить определенное напряжение на электроприемниках в различных режимах работы. По результатам расчетов принимают наибольшее из полученных значений сечения кабеля. Ответвления к отдельным приемникам по экономической плотности тока не проверяют.

Кабели напряжением 6 кВ рассчитывают по: нагреву рабочим током (по длительно допустимой плотности тока); нагреву током короткого замыкания; допустимой потере напряжения; экономической плотности тока.

Параметры кабельной сети участка выбраны правильно, если выполняются следующие условия:

ток, проходящий по кабелю,

$$I_{\text{каб}} \leq I_{\text{каб. доп}}; \quad (15.5)$$

напряжение на электродвигателях в рабочем режиме

$$U \geq 0,95 U_{\text{ном}}; \quad (15.6)$$

напряжение на зажимах электродвигателей (кроме комбайнового) при пуске

$$U_{\text{пуск}} \geq 1,1 U_{\text{ном}} \sqrt{k M_{\text{ном}} / M_{\text{пуск}}}, \quad (15.7)$$

где  $M_{\text{ном}}$ ,  $M_{\text{пуск}}$  — соответственно номинальный и пусковой моменты электродвигателя;  $k = M_{\text{пуск min}} / M_{\text{ном}}$  — минимальная кратность пускового момента;  $M_{\text{пуск min}}$  — минимальный пусковой момент электродвигателя, обеспечивающий его разгон.

Значения  $k$  составляют для: скребковых конвейеров —  $1,2 \div 1,5$ ; ленточных конвейеров —  $1,2 \div 1,4$ ; вентиляторов и насосов —  $0,5 \div 0,6$ . Отношение  $M_{\text{пуск}} / M_{\text{ном}} = a$  указывается в технических данных двигателей, например в работах [4, 18].

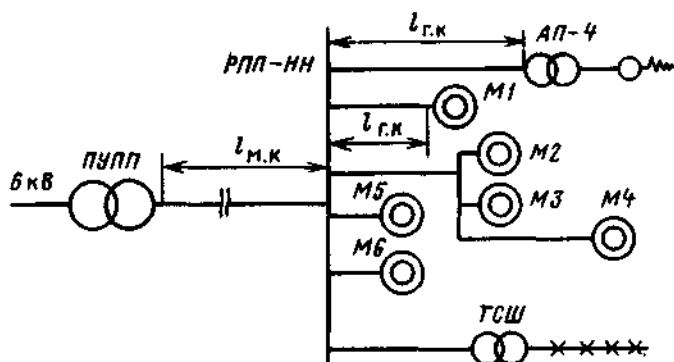


Рис. 15.1. Расчетная схема кабельной сети участка

Напряжение на комбайновом электродвигателе при пуске

$$U_{\text{пуск}} \geq 0,8 U_{\text{ном}}. \quad (15.8)$$

Комбайновые электродвигатели значительно мощней остальных, поэтому, если соблюдено условие (15.8), то для других электродвигателей условие (15.7) почти всегда выполняется и проверку по нему обычно не проводят.

**Расчет сети НН.** При расчете кабельной сети, чтобы упростить определение общего тока нескольких двигателей, токи их складывают арифметически. Возникающая при этом погрешность незначительна: векторная и арифметическая суммы одинаковых по модулю токов двух двигателей при  $\cos \varphi = 0,6$  и  $\cos \varphi = 0,8$  отличаются всего на 1 %. На основании этого допущения фактический результирующий ток электроприемников участка, проходящий по магистральному низковольтному кабелю,

$$I_{\text{ф.р}} = K_c P_{\text{ном}} / \sqrt{3} U_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{ср}}, \quad (15.9)$$

где  $U_{\text{ном}}$  — номинальное напряжение электроприемников.

Значения  $P_{\text{ном}}$ ,  $K_c$  и  $\cos \varphi_{\text{ср}}$  такие же, как при определении  $S_p$  по формуле (15.1).

Здесь и ниже все формулы приведены с учетом параметров, выраженных в основных единицах СИ. В результате формулы получаются более простыми. Числовой коэффициент 100, имеющийся в некоторых формулах, появляется при переводе долевых единиц в проценты и обратном переводе.

Затем выбирают сечение жил кабеля по нагреву. Допустимые токовые нагрузки на гибкие кабели приведены в каталогах. Проверку по допустимой потере напряжения проводят исходя из условий (15.6)—(15.8) и из того, что напряжение на вторичной обмотке трансформатора в режиме холостого хода —

$U_{20}$  составляет  $1,05 U_{\text{ном}}$  (400 В при  $U_{\text{ном}}=380$  В; 690 В при  $U_{\text{ном}}=660$  В; 1190 В при  $U_{\text{ном}}=1140$ ), т. е. превышает номинальное напряжение электроприемников на 5 %.

Таким образом, общая допустимая потеря напряжения в трансформаторе, магистральном и гибком кабелях к приемнику составляет с учетом условий (15.6) и (15.8) 10 %  $U_{\text{ном}}$  при рабочем режиме, 25 %  $U_{\text{ном}}$  при пуске комбайнового двигателя.

Для нормальной работы электродвигателей необходимо, чтобы

$$\Delta u_{\text{тр}} + \Delta u_{\text{м.к}} + \Delta u_{\text{г.к}} \leq \Delta u_{\text{доп.з}} \quad (15.10)$$

или, переходя к абсолютным единицам,

$$\Delta U_{\text{тр}} + \Delta U_{\text{м.к}} + \Delta U_{\text{г.к}} \leq \Delta U_{\text{доп.з}}. \quad (15.11)$$

Потерю напряжения в трансформаторе (%) в общем случае, т. е. для любого режима работы, определяют по формуле

$$\Delta u_{\text{тр}} = \beta (u_{\text{к.а}} \cos \varphi_2 + u_{\text{к.р}} \sin \varphi_2), \quad (15.12)$$

где  $\beta = I_2 / I_{\Sigma \text{ном}}$  — коэффициент загрузки трансформатора;  $u_{\text{к.а}}$  и  $u_{\text{к.р}}$  — соответственно активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания  $u_{\text{к.}}$ , %;  $\varphi_2$  — фазовый сдвиг между векторами тока и напряжения вторичной обмотки при различных режимах работы (в расчетах принимают  $\varphi_2 = \varphi_{\text{ср}}$ ).

Активная и индуктивная составляющие напряжения к. з. (%)

$$u_{\text{к.а}} = 100 P_{\text{к}} / S_{\text{ном}}, \quad (15.13)$$

где  $P_{\text{к}}$  — потери короткого замыкания трансформатора;

$$u_{\text{к.р}} = \sqrt{u_{\text{к.}}^2 - u_{\text{к.а.}}^2}. \quad (15.14)$$

По найденному значению  $\Delta u_{\text{тр}}$  (%) находят потерю напряжения в абсолютных единицах, В

$$\Delta U_{\text{тр}} = U_{20} \Delta u_{\text{тр}} / 100. \quad (15.15)$$

Непосредственно потерю напряжения  $\Delta U_{\text{тр}}$  можно определить через ток  $I_2$  и приведенные к обмотке НН активное и индуктивное сопротивления трансформатора —  $R_{\text{тр}}$  и  $X_{\text{тр}}$ .

Потеря напряжения в гибком кабеле

$$\Delta U_{\text{г.к}} = \sqrt{3} I_{\text{г.к}} (R_{\text{г.к}} \cos \varphi_{\text{г.к}} + X_{\text{г.к}} \sin \varphi_{\text{г.к}}). \quad (15.16)$$

Допустимая потеря напряжения в магистральном кабеле на основании формулы (15.10)

$$\Delta U_{\text{м.к. доп}} = \Delta U_{\text{доп.з}} - (\Delta U_{\text{тр}} + \Delta U_{\text{г.к}}). \quad (15.17)$$

При проверке по потере напряжения в рабочем режиме в формулу (15.16) подставляют  $I_{\text{г.к}} = I_{\text{дв. ном}}$ ;  $\cos \varphi_{\text{г.к}} = \cos \varphi_{\text{дв. ном}}$ , где  $I_{\text{дв. ном}}$  — номинальный ток двигателя.

Затем проверяют выполнение условия (15.7). Напряжение определяют по формуле

$$U_{\text{пуск}} = \frac{U_{20} - \Delta U_{\text{н.р.}}}{1 + \sqrt{3} \frac{I_{\text{п.н.}}}{U_{\text{ном}}} (R \cos \varphi_{\text{пуск}} + X \sin \varphi_{\text{пуск}})}, \quad (15.18)$$

где  $\Delta U_{\text{н.р.}}$  — потеря напряжения от прочих работающих двигателей при  $U_{\text{ном}}$  в тех участках сети, через которые подключен запускаемый двигатель;  $I_{\text{пуск ном}}$  — пусковой ток двигателя при  $U_{\text{ном}}$ ;  $R$ ,  $X$  — соответственно активное и индуктивное сопротивление трансформатора и кабеля до запуска двигателя;  $\cos \varphi_{\text{пуск}}$  — коэффициент мощности двигателя при пуске.

Разность  $U_{20} - \Delta U_{\text{н.р.}}$  представляет собой напряжение на РПП—НН до включения двигателя комбайна при работающих остальных двигателях. В число этих двигателей входит также один двигатель комбайна, если последний оснащен двумя раздельно запускаемыми двигателями.

Формула (15.18) получена исходя из того, что напряжение на зажимах запускаемого двигателя равно разности между напряжением в этой точке сети до пуска и дополнительной потерей напряжения от пускового тока в соответствующих элементах сети.

Потерю напряжения  $\Delta U_{\text{н.р.}}$  рассчитывают по формуле

$$\Delta U_{\text{н.р.}} = \sqrt{3} I'_{\text{м.к.}} (R' \cos \varphi'_{\text{ср}} + X' \sin \varphi'_{\text{ср}}), \quad (15.19)$$

где  $I'_{\text{м.к.}}$  — ток в магистральном кабеле от всех двигателей, кроме запускаемого;  $R'$ ,  $X'$  — суммарное соответственно активное и индуктивное сопротивление магистрального кабеля и трансформатора ПУПП;  $\cos \varphi'_{\text{ср}}$  — средневзвешенный коэффициент мощности электродвигателей, кроме запускаемого.

#### 15.4. РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В НИЗКОВОЛЬТНОЙ СЕТИ УЧАСТКА

В низковольтной сети участка шахты рассчитывают токи трех- и двухфазного короткого замыкания (к. з.). Токи трехфазного к. з. имеют большее значение. Их определяют для случая замыкания в начальной точке ответвления, когда они максимальны. По этим токам проверяют коммутационные аппараты на отключающую способность. Токи двухфазного к. з. меньше токов трехфазного к. з. Их рассчитывают (в отличие от токов трехфазных к. з.) для коротких замыканий в наиболее удаленной точке защищаемого ответвления, определяя минимальное значение тока к. з., необходимое для выбора уставки тока срабатывания максимальной защиты.

Порядок расчета токов к. з. в низковольтной сети участка такой же, как при расчете токов к. з. в сетях электроснабжения шахты. Рассчитывают сопротивление цепи  $Z$  до точки, где произошло к. з., и по нему и номинальному напряжению трансформатора определяют токи к. з.:

$$I_K^{(3)} = U_{20} / \sqrt{3} Z; \quad (15.20)$$

двухфазного

$$I_K^{(2)} = U_{20} / 2Z. \quad (15.21)$$

Из формул (15.20) и (15.21) следует, что между токами трех- и двухфазного к. з. имеется соотношение

$$I_K^{(2)} = (\sqrt{3}/2) I_K^{(3)}. \quad (15.22)$$

При расчете  $Z$  учитывают активные и индуктивные сопротивления трансформаторов ( $R_{тр}$  и  $X_{тр}$ ) и кабелей ( $R_{каб}$  и  $X_{каб}$ ) до точки к. з., т. е.

$$Z = \sqrt{(R_{тр} + R_{каб})^2 + (X_{тр} + X_{каб})^2}. \quad (15.23)$$

Активное сопротивление трансформатора, приведенное к обмотке НН,

$$R_{тр} = P_K / 3 I_{2 ном}^2, \quad (15.24)$$

где  $P_K$  — потери к. з. трансформатора;  $I_{2 ном}$  — номинальный ток обмотки НН.

Полное сопротивление трансформатора, приведенное к обмотке НН,

$$Z_{тр} = u_K U_{2 ном} / 100 \sqrt{3} I_{2 ном}, \quad (15.25)$$

где  $u_K$  — напряжение к. з. трансформатора, %.

Индуктивное сопротивление трансформатора

$$X_{тр} = \sqrt{Z_{тр}^2 - R_{тр}^2}. \quad (15.26)$$

Активное сопротивление кабеля принимают по данным справочников или определяют по длине  $L$ , сечению  $S$  и удельному сопротивлению  $\rho$  материала токопроводящей жилы

$$R_{каб} = \rho L / S.$$

Индуктивное сопротивление кабеля принимают  $x_0 = 0,07$  Ом/км.

### 15.5. ВЫБОР ЗАЩИТНОЙ АППАРАТУРЫ И РАСЧЕТ УСТАВОК ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ В НИЗКОВОЛЬТНОЙ СЕТИ УЧАСТКА

В качестве защитной аппаратуры применяются коммутационные аппараты (автоматические выключатели, электромагнитные пускатели) со встроенными в них элементами защиты. Эти аппараты выбирают по номинальному току нагрузки  $I_{\text{ном}}$  и напряжению сети  $U_{\text{ном}}$ . Затем их проверяют по отключающей способности при трехфазном к. з. Необходимо, чтобы при этом

$$I_{\text{откл}} \geq 1,2 I_{\text{к}}^{(3)}. \quad (15.27)$$

К элементам токовой защиты относятся плавкие предохранители, максимальные реле и расцепители. Номинальные токи плавких вставок и уставки тока срабатывания максимальных реле выбирают исходя из следующих соображений. Во-первых, необходимо избежать ложных срабатываний защиты при пуске асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Во-вторых, чтобы защитить элементы сети от токов к. з., защита должна срабатывать при минимально возможном токе к. з., т. е. при токе двухфазного короткого замыкания в наиболее удаленной точке защищаемого ответвления.

Для получения некоторого запаса надежности при действии защиты в расчетные формулы вводят соответствующие коэффициенты. Эти формулы и значения коэффициентов приведены в Инструкции по выбору и проверке уставок реле максимального тока и плавких вставок предохранителей в шахтных сетях, приведенных в ПБ.

Уставка тока срабатывания реле  $I_{\text{уст}}$  автоматических выключателей или пускателей:

для защиты магистрали

$$I_{\text{уст}} \geq I_{\text{пуск. ном}} + \sum I_{\text{ном. ост}}, \quad (15.28)$$

где  $I_{\text{пуск. ном}}$  — пусковой ток (при номинальном напряжении) наиболее мощного двигателя;  $\sum I_{\text{ном. ост}}$  — сумма номинальных токов остальных двигателей;

для защиты ответвлений, питающих группу одновременно включаемых асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором,

$$I_{\text{уст}} = \sum I_{\text{пуск. ном}}. \quad (15.29)$$

После этого принимают ближайшую большую уставку аппарата защиты, например блока УМЗ.

Выбранная уставка тока срабатывания проверяется по расчетному минимальному току двухфазного к. з.  $I_{\text{к min}}^{(2)}$

$$I_{\text{к min}}^{(2)} / I_{\text{уст}} \geq k_{\text{ч}}, \quad (15.30)$$

где  $k_{\text{ч}}$  — коэффициент чувствительности защиты ( $k_{\text{ч}} = 1,5$ ).

#### 15.6. ПОРЯДОК РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И ВЫБОРА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ УЧАСТКА ШАХТЫ

Расчет электроснабжения и выбор электрооборудования участка шахты проводят в следующей последовательности:

1) уточняют горнотехнические данные и, если оборудование участка (комбайн, крепь, конвейер и др.) не задано, выбирают его; 2) прочерчивают расстановку машин и механизмов по выемке и доставке угля на плане горных работ; 3) выбирают место установки ПУПП и РПП-НН, способы и шаг их передвижки; 4) составляют таблицу электроприемников, в которой указывают наименование машины, тип, число и номинальные данные электродвигателей, а также мощность осветительной нагрузки; 5) определяют мощность трансформаторной подстанции; 6) выбирают тип кабелей и способы их прокладки; 7) рассчитывают все токи в рабочем режиме и выбирают сечения жил кабелей по допустимому нагреву; 8) рассчитывают или проверяют выбранные сечения жил кабелей по допустимой потере напряжения в рабочем режиме и при пуске наиболее мощного и удаленного от ПУПП электродвигателя (предварительно составляют расчетную схему кабельной сети участка); 9) рассчитывают токи к. з.; 10) выбирают аппаратуру управления и защиты и определяют уставки максимальной защиты; 11) составляют схему электроснабжения участка шахты в соответствии с требованиями Правил технической эксплуатации (ПТЭ) угольных и сланцевых шахт.

При проверке кабельной сети по условиям пуска электродвигателя ток  $I'_{\text{м.к}}$  в магистральном кабеле рассчитывают по формуле, аналогичной (15.9),

$$I'_{\text{м.к}} = K_{\Sigma} P_{\text{ном } \Sigma} / \sqrt{3} U_{\text{ном}} \cos \varphi_{\Sigma}, \quad (15.31)$$

где  $P_{\text{ном } \Sigma}$  — суммарная установленная мощность электроприемников участка без запускаемого двигателя (или двух одновременно включаемых двигателей комбайна или струга).

Сопротивления  $R'$  и  $X'$  определяют по формулам

$$R' = R_{\text{м.к}} + R_{\text{тр}}; \quad X' = X_{\text{м.к}} + X_{\text{тр}}. \quad (15.32)$$

Приведенные к обмотке НН сопротивления трансформатора рассчитывают по формулам (15.24) — (15.26). Значение  $\cos \varphi_{\Sigma}$

принимают такое же, как при расчете мощности ПУПП. Пусковой ток комбайновых двигателей приводится в каталогах.

Если условия (15.6) и (15.8) не выполняются, то необходимо увеличить сечение гибкого или магистрального кабеля, проложить параллельный магистральный кабель или приблизить ПУПП к электроприемникам.

### **Контрольные вопросы**

1. Как определяются расчетные нагрузки и мощность участковой трансформаторной подстанции?
2. Как определяются потери напряжения в участковой сети?
3. Каков порядок расчета тока короткого замыкания в участковой сети?
4. Как производится выбор и проверка уставок реле и плавких вставок предохранителей?

## **Глава 16**

### **ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УГОЛЬНЫХ ШАХТ**

#### **16.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ**

К основным технико-экономическим показателям, характеризующим степень электрификации шахт и эффективность использования электроэнергии, относятся:

электровооруженность труда, определяемая как отношение потребляемой предприятием за год электроэнергии к среднесписочной численности промышленно-производственного персонала за тот же период; расход электроэнергии на единицу продукции (на 1 т добытого угля); себестоимость 1 т угля по затратам на электроэнергию; реактивная мощность на входе ГПП и ее соответствие заданному энергоснабжающей организацией значению.

Значение этих показателей зависит от горнотехнических, горно-геологических, гидрогеологических и других факторов: глубины залегания пласта, числа разрабатываемых пластов, их мощности и угла наклона, способа вскрытия шахтного поля, системы разработки, протяженности выработок; их сечения и способа крепления, крепости угля, метанообильности, притока воды в шахтные выработки, принятой технологии добычи угля и его транспортировки, тарифа на электроэнергию в данном регионе и пр. Поскольку не существует шахт, в которых все эти факторы совпадают, указанные выше показатели планируются для каждой шахты. Электромеханическая и другие службы шахт должны постоянно разрабатывать и внедрять мероприятия по улучшению этих показателей.



## 16.2. РАСХОД ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

В число важнейших народнохозяйственных задач входит экономия топливно-энергетических ресурсов, в первую очередь в энергоемких отраслях, к которым относится угольная промышленность. Наиболее эффективно эта задача решается нормированием расхода электроэнергии, т. е. установлением плановой меры ее потребления. Оно обеспечивает применение технико-экономически обоснованных прогрессивных норм расхода электроэнергии для ее экономии, рационального распределения и наиболее эффективного использования. На угольных шахтах электроэнергия нормируется в соответствии с Инструкцией по расчету норм расхода электроэнергии в угольной промышленности, введенной в действие с 1 января 1982 г. Эти нормы устанавливаются на 1 т добываемого угля. Единица их измерения — кВт·ч/т.

Общешахтная норма расхода электроэнергии учитывает расход на основные и вспомогательные производственно-эксплуатационные нужды (отопление, освещение, водоснабжение, механические мастерские, электроцех и др.). В нормах расхода электроэнергии учтены конкретные условия добычи и переработки угля, производство других работ, а также достижения научно-технического прогресса. Они систематически пересматриваются с учетом развития техники и изменения горно-геологических условий, технологии добычи угля и других факторов, влияющих на потребление электрической энергии. Эти нормы должны способствовать выполнению плановых заданий и использованию внутренних резервов экономии электрической энергии. Нормы расхода электроэнергии делятся на:

годовые и квартальные — по времени действия; технологические и общепроизводственные — по составу.

Технологическая норма по шахте представляет собой отнесенное к 1 т добычи угля (сланца) потребление электроэнергии на основные и вспомогательные процессы, непосредственно связанные с добычей полезного ископаемого.

В состав общешахтной технологической нормы расхода электроэнергии входят следующие: добычные участки (выемка угля и управление кровлей); подготовительные участки (проведение подготовительных выработок); подземный транспорт (доставка и транспортирование угля и материалов вдоль забоя и по выработкам конвейерами, электровозами, канатной откаткой по наклонным выработкам и др.); водоотливные установки (главный и участковый водоотлив); шахтный подъем (скиповые и клетевые подъемные установки, вспомогательные электроприемники подъема); вентиляция (проветривание горных выработок и дегазация); производство сжатого воздуха (только при пневмодобыче); технологический комплекс на поверхности.

Для внутреннего хозрасчета и контроля, более рационального использования электроэнергии общешахтная технологическая норма разделяется на участковые технологические нормы, учитывающие расход электроэнергии на завершение технологического процесса данного участка. Участковые нормы представляют собой отношение электроэнергии (кВт·ч), израсходованной потребителями этого участка за определенный период (обычно за 1 год), к единице продукции этого участка за тот же период: для добычного участка, подъема и технологического комплекса на поверхности — к 1 т добытого угля (сланца); для подготовительных участков — к 1 м<sup>3</sup> пройденных выработок; для подземного транспорта — к 1 т·км перевезенного груза (угля, породы, материалов); для водоотлива — к 1 м<sup>3</sup> откачанной воды; для вентиляции и компрессорных установок — к 10<sup>3</sup> м<sup>3</sup> подаваемого в шахту воздуха.

Общепроизводственная норма по шахте учитывает всю израсходованную электрическую энергию на: основные и вспомогательные технологические процессы (вошедшие в расчет технологической нормы по шахте) и, кроме того, на вспомогательные нужды производства (водоснабжение, сжатый воздух, нужды ремонтных цехов, освещение территории шахты и пр.); капитальное строительство, выполняемое хозяйственным способом; неизбежные потери в элементах системы электропитания (трансформаторах, линиях электропередач, реакторах, компенсирующих устройствах). Эта норма определяется как отношение израсходованной на указанные нужды электроэнергии за 1 год к годовой добыче угля.

Расход электроэнергии различными производственными участками шахты может определяться расчетно-аналитическим, опытным и расчетно-статистическим методами.

Расчетно-аналитический метод используют как основной. Он предусматривает определение норм расхода электроэнергии расчетным путем по статьям расхода на основании прогрессивных технологических процессов на шахтах для получения продукции с минимальными затратами электроэнергии.

Опытный метод разработки норм состоит в определении удельных норм расхода электроэнергии на основании опытных данных. При этом необходимо, чтобы оборудование находилось в технически исправном состоянии, режимы работы соответствовали предусмотренным и технологическое оборудование было загружено по мощности и производительности на планируемом уровне.

Расчетно-статистический метод применяется в виде исключения, когда не представляется возможным использовать указанные выше методы. При этом методе нормы расхода электроэнергии определяются на основании данных о фактических удельных расходах электроэнергии и факторах, влияющих на

их изменение, за ряд предшествующих лет. Расчет участков технологических норм позволяет выявить наиболее энергоемкие производственные участки. Проведение на этих участках мероприятий по экономии электроэнергии позволит получить наибольший эффект. На большинстве шахт к таким участкам относятся подъем и вентиляция, на шахтах с большим притоком воды — также и водоотлив.

### 16.3. ЭКОНОМИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Мероприятия по экономии электроэнергии на угольных шахтах можно разделить на три основные группы.

В первую группу входят повышение загрузки и к. п. д. горношахтного оборудования. Сюда относятся мероприятия по замене незагруженного технологического оборудования. Так, на очистных и подготовительных участках должны использоваться машины, технические характеристики которых соответствуют фактическим условиям работы (крепости угля или породы, скорости подачи комбайнов, углу наклона и производительности забойных конвейеров и пр.). На участках вентиляции и водоотлива следует заменять устаревшие вентиляторы и насосы более совершенными осевыми вентиляторами ВОД, центробежными вентиляторами ВЦ и ВЦД и насосами ЦНС. Во вспомогательных цехах, например механических мастерских, целесообразней не устанавливать мощные металлорежущие станки, которые загружены на полную мощность в редких случаях, а крупные запасные части изготавливать и восстанавливать в ЦЭММ или на РРЗ.

Мероприятия этой группы обычно связаны с ликвидацией разбросанных горных выработок в результате отказа от одновременной разработки нескольких пластов, применения групповых горных выработок при разработке сближенных пластов (вместо самостоятельных выработок для каждого пласта), отказа от длинных многоступенчатых уклонов путем углубки ствола и др.

Ко второй группе относятся полная или частичная ликвидация энергоемких операций, технологических процессов, снижение их энергоемкости и уменьшение потерь электроэнергии. Мероприятия этой группы дают наибольший эффект экономии электроэнергии. К ним относятся:

замена пневматической энергии электрической в связи с чрезвычайно низким ( $0,2 \div 0,3$ ) общим к. п. д. компрессорной установки (включая пневмодвигатели). При необходимости применения пневматической энергии следует проводить мероприятия по уменьшению утечек сжатого воздуха, соблюдению нормального режима охлаждения, рациональному устройству воздухопроводной сети, снижению производительности компрес-

сорной установки в периоды спада нагрузок и др.; создание и применение очистных машин с минимальным удельным расходом на разрушение угля.

При работе некоторых очистных комбайнов часть отбитого угля переизмельчается, на что расходуется много энергии. Ликвидация этого недостатка позволяет получить значительную экономию электроэнергии и улучшение сортности угля; применение более экономичных подъемных машин со статическим уравниванием системы подъема; систематический перевод вентиляторов главного проветривания при изменении параметров вентиляционной сети шахты в наиболее экономичный режим поворотом лопаток осевых вентиляторов, регулированием частоты вращения вентилятора и пр.; сокращение объема получаемой породы и выдачи ее на поверхность; применение экономичной схемы водоотлива (например, не сбрасывать воду на нижележащий горизонт) и поддержание элементов водоотливной установки в надлежащем техническом состоянии своевременной очисткой отложений со стенок трубопроводов, ликвидацией неисправности насосов из-за коррозии и износа деталей, регулярной чисткой водосборников.

В третью группу входят рационализация электропривода и электрических сетей, внедрение нового прогрессивного электрооборудования, применение его в сетях высокого напряжения. К этой группе относятся такие общие мероприятия, как замена незагруженных электродвигателей и трансформаторов, увеличение сечения проводов, максимальное приближение трансформаторных подстанций к электроприемникам, применение напряжения 1140 В в участковых сетях, переход с 6 на 10 кВ в высоковольтной сети подземных выработок, увеличение коэффициента мощности шахтной электрической сети. Из мероприятий, относящихся к определенным участкам технологического процесса, можно выделить: применение систем асинхронно-вентильный каскад и тиристорный преобразователь — двигатель в приводе подъемных установок; использование регулируемого электропривода подачи очистных комбайнов, позволяющего получить оптимальный (в отношении удельного электропотребления) режим их работы.

#### **16.4. КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ. КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ**

Активная мощность однофазного переменного тока или одной фазы трехфазного тока определяется выражением

$$P = UI \cos \varphi, \quad (16.1)$$

где  $\varphi$  — угол сдвига между напряжением и током, зависящий от

характера нагрузки. Отношение активной мощности к полной называется коэффициентом мощности:

$$P/S = \cos \varphi. \quad (16.2)$$

Коэффициент мощности имеет важное технико-экономическое значение. Из выражения (16.1) имеем

$$I = P/(U \cos \varphi), \quad (16.3)$$

т. е. ток обратно пропорционален коэффициенту мощности. Так, например, при одинаковой активной мощности ток в случае  $\cos \varphi = 0,5$  будет в два раза больше, чем при  $\cos \varphi = 1$ . Следовательно, в первом случае потери энергии в питающем кабеле того же сечения будут в четыре раза большими. В два раза возрастет падение напряжения в кабелях. Возрадут также потери и во всех других элементах электрической сети по всему тракту передачи электроэнергии. Кроме того, возникнет необходимость в установке дополнительных трансформаторов, поскольку их нагрузочная способность определяется током, т. е. полной мощностью  $S = UI$ , а не активной мощностью подключенных к ним приемников. Бóльший ток вызывает также необходимость в коммутационных аппаратах бóльших габаритов.

Таким образом, низкий коэффициент мощности приводит к увеличению потерь электроэнергии и капитальных затрат. Поэтому его повышение — важная народнохозяйственная задача.

При расчетах, связанных с определением коэффициента мощности и проведением мероприятий по его повышению, более удобно пользоваться не самим  $\cos \varphi$ , а реактивной мощностью  $Q$  и ее отношением к активной мощности  $P$ , т. е. тангенсом угла  $\varphi$  ( $\operatorname{tg} \varphi = Q/P$ ).

Номинальный коэффициент мощности  $\cos \varphi_{\text{ном}}$  современных асинхронных двигателей составляет  $0,75 \div 0,9$ . Однако при эксплуатации он оказывается значительно более низким. Причины этого следующие:

недогрузка электродвигателя (при этом активная мощность электродвигателя снижается, а реактивная мощность  $Q$ , которая зависит от намагничивающего действия тока, при постоянном напряжении сети не меняется, коэффициент мощности уменьшается);

увеличение напряжения сети (значение магнитной индукции в магнитопроводе соответствует зоне насыщения, в результате чего резко увеличиваются намагничивающий ток и реактивная мощность);

некачественный ремонт электродвигателя (снижение коэффициента мощности электродвигателя после ремонта может

быть вызвано изменением обмоточных данных, в результате чего магнитная индукция может перейти в зону насыщения, и проточкой ротора, т. е. увеличением воздушного зазора и, следовательно, возрастанием намагничивающего тока).

Для повышения коэффициента мощности в распределительных сетях применяют три способа.

1. Установка электродвигателей меньшей мощности. Если на каком-либо объекте двигатель постоянно недогружен, его следует заменить двигателем меньшей мощности, реактивная мощность которого ниже. Так, на скребковых и ленточных конвейерах мощность установленных двигателей определена исходя из максимальной длины конвейера. Поэтому на конвейерах меньшей длины двигатели будут недогружены. Аналогичная ситуация может возникнуть и на других горных машинах и механизмах.

2. Снижение времени работы машин и механизмов вхолостую и с малыми нагрузками. Это мероприятие должно проводиться путем упорядочения технологического процесса и лучшей организации работ.

3. Компенсация реактивной мощности. Этот способ повышения коэффициента мощности осуществляется с помощью компенсирующих устройств: конденсаторов, синхронных электродвигателей и компенсаторов, работающих с опережающим током. Синхронный компенсатор — это синхронная машина облегченной конструкции, вращающаяся вхолостую и специально предназначенная для компенсации реактивной мощности.

При компенсации реактивной мощности следует иметь в виду, что коэффициент мощности повышается только в тех элементах, которые расположены до точки подключения компенсирующих устройств (считая от источника питания). Так, при подключении конденсаторов к шинам 6 кВ ГПП потери уменьшаются только в трансформаторах, понижающих напряжение до 6 кВ, и в ЛЭП, питающей шахту. Поэтому желательно устанавливать компенсирующие устройства ближе к электроприемникам. Например, при установке конденсаторов непосредственно на комбайне коэффициент мощности увеличился бы во всех элементах шахтной сети, включая и гибкий кабель к комбайну. Но это невозможно по конструктивным причинам: конденсаторы во взрывонепроницаемой оболочке негде разместить в забое и тем более перемещать вместе с комбайном. Кроме того, при низком напряжении для получения необходимой реактивной мощности необходима большая емкость, чем при высоком. Поэтому более экономично устанавливать конденсаторы на высокой стороне 6—10 кВ.

В настоящее время для компенсации реактивной мощности выпускают специальные косинусные конденсаторы серий КМ (с пропиткой минеральным маслом) на напряжение 0,38; 0,66;

6,3 и 10,5 кВ мощностью от 4,3 до 26 квар и КС (с пропиткой синтетическими жидкостями) на напряжение 0,38 и 0,66 кВ мощностью от 14 до 40 квар.

Для компенсации реактивной мощности в шахтных электрических сетях выпускаются на базе конденсаторов КС2 конденсаторные установки серии УК в виде отдельных ячеек (вводной и конденсаторной).

Реактивная мощность электроустановок угольных шахт в течение суток изменяется вследствие включения и отключения отдельных электроприемников, но результирующая (в результате компенсации) реактивная мощность должна оставаться постоянной. Это необходимо для нормальной работы энергосистемы и электроприемников в самой шахте, напряжение на которых при результирующей реактивной мощности  $Q_{рез} = \text{const}$  изменяется незначительно. Чтобы обеспечить режим  $Q_{рез} = \text{const}$ , необходимо соответственно регулировать реактивную мощность компенсирующих устройств. Конденсаторные батареи позволяют осуществить это только ступенчато, путем отключения и включения отдельных ее сетей. В синхронных электродвигателях и компенсаторах реактивная мощность может изменяться плавно. Поэтому при наличии их на шахте постоянную часть суточного графика реактивной мощности электроустановок компенсируют конденсаторами, а переменную часть — синхронными двигателями и компенсаторами.

## 16.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛАТЫ ЗА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ

В соответствии с действующим Прейскурантом № 09-01 Минэнерго СССР предприятия с присоединенной мощностью 750 кВ·А и выше, к которым относятся практически все предприятия угольной промышленности, рассчитываются за пользование электроэнергией по двухставочному тарифу. Он состоит из годовой платы за 1 кВт заявленной (абонированной) потребителем максимальной мощности, участвующей в максимуме нагрузки энергосистемы, и платы за 1 кВт·ч отпущенной потребителю активной электрической энергии [16].

Заявленной мощностью называется абонированная потребителем наибольшая получасовая мощность (период максимальной нагрузки энергосистемы, который устанавливается энергоснабжающей организацией по кварталам и фиксируется в договоре на пользование электроэнергией). Заявленная мощность  $P_{\max}$  также фиксируется в договоре поквартально и периодически контролируется энергоснабжающей организацией по фактическому получасовому максимуму активной нагрузки  $P_{\phi}$ , определяемому по показаниям специальных приборов учета. Если в часы максимума нагрузки  $P_{\phi} > P_{\max}$ , то в конце квартала суммы платы перерассчитывают в соответствии со значе-

нием  $P_{\phi}$ . В случае  $P_{\phi} < P_{\max}$  оплата производится по нагрузке  $P_{\max}$ , обусловленной договором, но по желанию потребителя оплачиваемая мощность может быть снижена в установленном порядке.

Плата за 1 кВт·ч израсходованной электроэнергии установлена, если она производится по показаниям счетчика на стороне первичного напряжения головного абонентского трансформатора. При установке счетчика на стороне вторичного напряжения плата за 1 кВт·ч умножается на коэффициент 1,025.

Прейскурантом № 09-01 для предприятий, рассчитывающихся по двухставочному тарифу, установлена система скидок и надбавок к тарифу на электроэнергию за компенсацию реактивной мощности. При определении скидок и надбавок за основу принимаются наибольшая реактивная мощность (измеренная на стороне первичного напряжения головного абонентского трансформатора) в течение получаса в период максимума активной нагрузки энергосистемы  $Q_{\phi 1}$  и средняя реактивная мощность  $Q_{\phi 2}$  (измеренная там же) за период наименьшей нагрузки энергосистемы, определяемые за расчетный период (квартал) по показаниям приборов учета. Период наименьших активных нагрузок энергосистемы устанавливается энергоснабжающей организацией. Суммарная скидка или надбавка к тарифу на электроэнергию содержит две составляющие:

1) надбавку к тарифу за повышенную реактивную мощность  $Q_{\phi 1}$  по сравнению с заданным энергоснабжающей организацией значением  $Q_{\phi 1}$  в период максимума нагрузки энергосистемы. Эта надбавка  $H_1$  (%) определяется по формуле

$$H_1 = (Q_{\phi 1} - Q_{\phi 1}) / P_{\phi}. \quad (16.4)$$

При  $Q_{\phi 1} < Q_{\phi 1}$  значение  $H_1$  принимается равным нулю;

2) скидку или надбавку к тарифу за отклонение режима работы компенсирующих устройств от заданного, оцениваемое абсолютным значением разности между фактической реактивной мощностью  $Q_{\phi 2}$  и заданной (энергоснабжающей организацией) оптимальной реактивной мощностью  $Q_{\phi 2}$  в часы минимума активной нагрузки энергосистемы. Эта скидка или надбавка  $H_2$  (%) определяется по формуле

$$H_2 = 20 [(Q_{\phi 2} - Q_{\phi 2}) / P_{\phi}] - 2. \quad (16.5)$$

Положительное значение  $H_2$  означает надбавку, а отрицательное — скидку с тарифа. Как видно из формулы (16.5), максимальная скидка составляет 2 % при  $Q_{\phi 1} = Q_{\phi 2}$ . Скидка или надбавка исчисляется с суммарной платы по обоим видам двухставочного тарифа. Значения  $P_{\phi}$ ,  $Q_{\phi 1}$  и  $Q_{\phi 2}$  определяются в соответствии с методикой, изложенной в Указаниях по регулиро-



ванию режимов потребления на предприятиях угольной промышленности, утвержденных Минуглепромом СССР [8].

Существующий двухставочный тариф стимулирует промышленные предприятия снижать активную и реактивную мощности в периоды максимума нагрузки энергосистемы. Выравнивание суточного графика нагрузки, а также сезонной неравномерности является важной народнохозяйственной задачей, поскольку при равномерном потреблении электроэнергии стоимость ее получается более низкой. Технические мероприятия в рамках энергоснабжающей организации связаны со значительными капитальными затратами, поэтому большой вклад в решение этой задачи должны внести промышленные предприятия — потребители электроэнергии.

### 16.6. ЭЛЕКТРОВООРУЖЕННОСТЬ ТРУДА

Электровооруженность труда — это показатель, характеризующий уровень механизации и автоматизации производства. Он определяется по формуле и выражается в кВт·ч/чел.

$$\mathcal{E} = W/N_{\text{ср. сч}},$$

где  $W$  — годовой расход электроэнергии, кВт·ч/год;  $N_{\text{ср. сч}}$  — среднесписочное число промышленно-производственного персонала.

Электровооруженность с ростом механизации и автоматизации непрерывно растет. В настоящее время темпы роста ее несколько снизились, но тенденция к увеличению остается.

Чтобы рост электровооруженности труда не происходил за счет нерационального расхода электроэнергии, ее необходимо рассматривать в неразрывной связи с удельными нормами потребления и производительности труда. В настоящее время рост электропотребления опережает рост производительности шахты, поэтому электровооруженность растет быстрее, чем производительность труда.

#### Контрольные вопросы

1. Какие существуют методы определения норм расхода электроэнергии на участках шахт?
2. Назовите основные три группы мероприятий по экономии электроэнергии на шахте.
3. Как определяется коэффициент мощности и каковы способы его улучшения?
4. Как определяется стоимость электроэнергии по двухставочному тарифу?

**17.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ**

Современный карьер является полностью электрифицированным предприятием. Вопросы электроснабжения открытых горных разработок имеют решающее значение, так как применение ненадежных и негибких схем электроснабжения сводит к минимуму все преимущества даже самой передовой технологии ведения горных работ.

К электроснабжению карьеров предъявляются следующие основные требования: обеспечение высокого качества электроэнергии у потребителей (стабильность напряжения и частоты); надежность электроснабжения; экономичность и безопасность всех элементов системы электроснабжения; возможность развития карьера в перспективе не менее чем на 10 лет.

Перечисленные факторы существенно влияют на схемы внешнего электроснабжения. Число линий, питающих карьер, их пропускную способность, а также число и мощность трансформаторов на подстанциях выбирают с учетом изложенных требований и с таким расчетом, чтобы обеспечить длительное питание всех потребителей первой и основных потребителей второй категории при выходе из строя одной из питающих линий или одного из трансформаторов.

Построение схем внутреннего электроснабжения открытых горных работ зависит от формы, площади и глубины карьеров, устойчивости бортов, способа разработки, мощности приводов основных горных машин и т. д.

Внешнее электроснабжение открытых горных работ осуществляют по схеме «глубокий ввод», т. е. применяются системы электроснабжения с приближением высокого напряжения (35—110 кВ) к потребителям для уменьшения ступеней трансформации электроэнергии. Выбор напряжения питающих линий проводят на основании технико-экономических сравнений вариантов с разными напряжениями по приведенным затратам, расходу цветных металлов и пр.

В ряде случаев напряжение питающих линий предопределяется напряжением источника питания. Часто карьер входит в состав горнообогатительного комбината, питаемого от энергосистемы напряжением 110—220 кВ, при этом к карьере подводят линии среднего напряжения 35 или 6 кВ. В отдельных случаях к мощным карьерам, находящимся на значительном расстоянии от крупных подстанций, подводят напряжение 110 кВ и выше отпайками от транзитных магистральных линий энергосистем.

Для питания карьерных электроприемников переменного тока широко применяют напряжение 6000 и 380 В. К наиболее мощному горнотранспортному оборудованию подводят напряжение 10 или 35 кВ. Осветительные установки питаются напряжением 220, 127, 36 и 12 В.

Для повышения безопасности эксплуатации распределительные сети карьеров напряжением до и выше 1000 В выполняют с изолированной нейтралью. В сетях напряжением до 10 кВ предусматривают защитное отключение без выдержки времени при однофазном замыкании на землю. Предусматривается также защита от перехода напряжения с обмотки высшего напряжения трансформатора на обмотку низшего напряжения. Карьерные электроустановки различного назначения и напряжения имеют общее заземляющее устройство.

Основными элементами системы электроснабжения карьера являются одна или несколько главных понизительных (станционных) подстанций (ГПП, ГСП), один или несколько центральных распределительных пунктов (ЦРП), карьерные линии электропередачи (ЛЭП), передвижные комплектные трансформаторные подстанции (ПКТП), передвижные карьерные распределительные пункты, приключательные пункты и др.

Местоположение ГПП или ЦРП выбирают на поверхности, у границы карьерного поля, как можно ближе к центру электрических нагрузок, но в зоне, безопасной при ведении взрывных работ на карьере. Если подстанцию или распределительный пункт используют для питания группы карьеров, то учитывают также удобство трассировки воздушных и кабельных линий.

## **17.2. СХЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ**

Питание электроэнергией открытых горных разработок осуществляется от районных подстанций энергосистем или от ведомственных электростанций, питающих кроме карьеров и другие промышленные и коммунальные предприятия района.

Схемы распределительных сетей карьера подразделяются на радиальные (с питающими линиями), магистральные (с распределительными линиями) и получившие наибольшее распространение смешанные [16].

Радиальные схемы выполняют одноступенчатыми — при непосредственном питании электроприемников от ГПП или ЦРП (рис. 17.1, а) или двухступенчатыми — с применением промежуточных РП (рис. 17.1, б и в) и ТП (рис. 17.1, в).

Магистральные схемы выполняют одиночными магистралями, имеющими одностороннее (рис. 17.1, д) и двухстороннее питание (рис. 17.1, е), или кольцевыми магистралями, также имеющими одностороннее (рис. 17.1, ж) или двухстороннее питание (рис. 17.1, з).

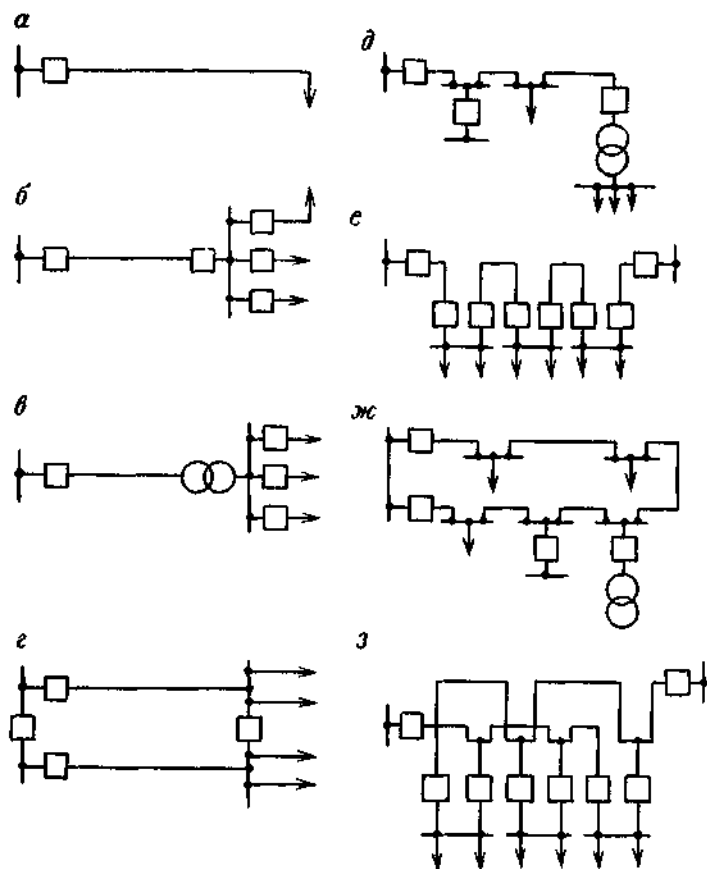


Рис. 171. Схемы распределительных сетей карьеров

В зависимости от расположения линий электропередачи относительно фронта горных работ применяемые в настоящее время схемы распределения можно классифицировать следующим образом.

1. *Продольно-фронтальная схема* (рис. 17.2). Питание нескольких потребителей или распределительных пунктов осуществляется по одной линии и характеризуется направлением питающих линий вдоль фронта работ. Воздушные ЛЭП могут быть стационарными при малой ширине карьера и переносными при большой ширине.

Питание экскаваторов осуществляют от воздушных ЛЭП гибкими кабелями через стационарные или передвижные приключательные пункты, которые располагают вдоль линии через

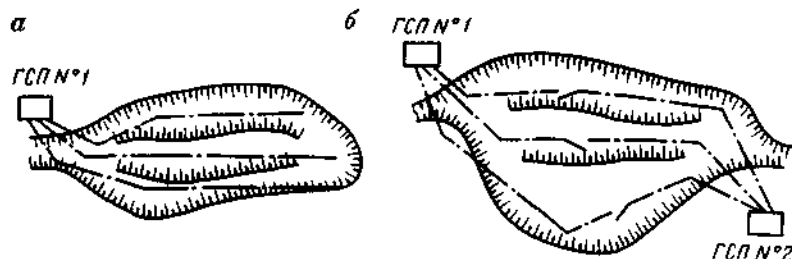


Рис 17.2 Продольно-фронтальная схема распределения электроэнергии  
 а — с односторонним питанием; б — с двусторонним питанием

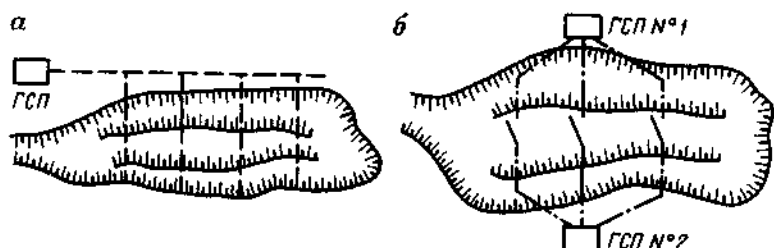


Рис 17.3 Поперечно-фронтальная схема распределения электроэнергии  
 а — с односторонним питанием; б — с двусторонним питанием

200÷300 м. По мере удаления от приключательных пунктов на расстояние, определяемое длиной гибкого кабеля, передвижные электроприемники присоединяют к следующему ближайшему приключательному пункту. Длина гибкого кабеля, питающего одноковшовые экскаваторы, составляет 100÷250 м, что удобно при их подтягивании и переноске. Напряжение 380 В для силовых приемников подается от передвижных трансформаторных подстанций, а для освещения — через общий или местные осветительные трансформаторы. Продольное расположение воздушных линий не создает помех при перемещении экскаваторов вдоль уступа и при работе; упрощается подключение других электроприемников на рабочих площадках. Недостатком описанных схем электроснабжения является необходимость частой передвижки и высокая повреждаемость при взрывных работах. Продольно-фронтальные схемы широко применяют особенно в период строительства карьеров при проведении траншей.

2. *Поперечно-фронтальная схема* (рис. 17.3). При такой системе питание экскаваторов и трансформаторных пунктов карьера осуществляется через приключательные пункты от поперечных распределительных линий, которые получают питание от

стационарных магистральных ЛЭП, проложенных вдоль бортов карьера вне границы поля разрабатываемого месторождения. Количество линий, пересекающих уступ, и число приключательных пунктов зависят от длины уступа, длины разрабатываемых блоков, количества рабочих машин.

Чтобы исключить при работе касание стрелой экскаватора поперечной воздушной линии, питание осуществляют попеременно от двух ближайших приключательных пунктов, расположенных на границах блока. Преимуществом поперечно-фронтальной схемы электроснабжения открытых горных работ является отсутствие передвижных линий электропередачи.

Применение такой схемы электроснабжения по сравнению с продольно-фронтальной обычно приводит к увеличению капитальных затрат за счет большей суммарной протяженности линий. Однако в процессе эксплуатации укорачивание или наращивание поперечных линий производят сравнительно быстро и просто, поэтому снижаются эксплуатационные расходы и уменьшаются простои оборудования. Поперечно-фронтальная схема может быть с односторонним и двусторонним питанием.

3. *Комбинированная схема* распределения электроэнергии представляет открытую бортокольцевую систему с воздушными и кабельными ЛЭП, проложенными в продольном и поперечном направлениях по отношению к фронту работ. Такая схема может иметь одностороннее или двустороннее питание с включением ЛЭП на параллельную работу.

При комбинированной системе электроснабжения отсутствует необходимость в периодическом перемещении основной карьерной сети. Эта система электроснабжения является наиболее устойчивой к повреждаемости воздушной сети при взрывных работах на карьере. Комбинированные схемы электроснабжения открытых горных работ являются наиболее надежными и находят применение на карьерах с большим числом крупных экскаваторов и других потребителей электроэнергии.

Одной из разновидностей бортокольцевой схемы является схема, в которой в промежутках между подстанциями сооружаются высоковольтные карьерные распределительные пункты (КРП), от которых по отдельным ЛЭП осуществляется питание крупных экскаваторов, добычных участков и т. д. (рис. 17.4).

Выбор рациональной системы распределения электроэнергии на эксплуатационный период зависит прежде всего от параметров горной технологии (скорость продвижения экскаваторного забоя; ширина и суммарное количество экскаваторных заходов, необходимое для полной отработки участка горных работ; скорость продвижения фронта работ основного и смежного уступов и т. д.) и максимальных границ открытой разработки месторождения.

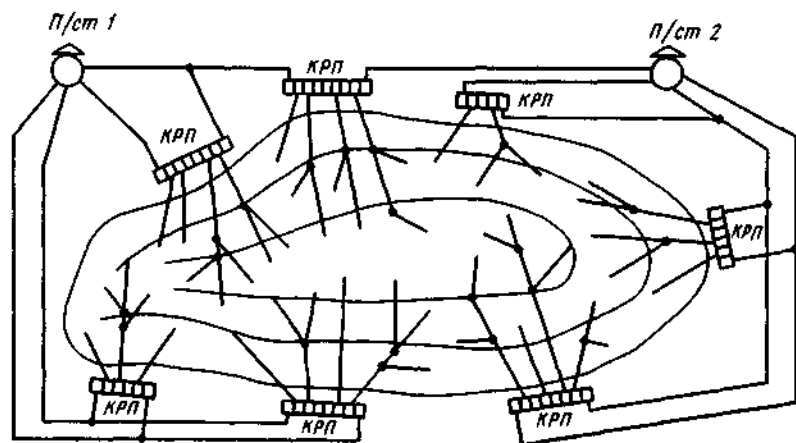


Рис. 17.4. Комбинированная схема распределения электроэнергии

Приведенные факторы дают возможность определить тип (стационарные, передвижные) и местоположение карьерных распределительных сетей (борт карьера, рабочие горизонты). Местоположение и тип воздушных линий в пределах границ разработки месторождения открытым способом обуславливают систему карьерного энергораспределения. Стремятся к наименьшему числу промежуточных звеньев и ступеней системы электроснабжения и к минимальной протяженности линий электропередачи. Сравнение намеченных вариантов проводят по технико-экономическим показателям, учитывающим не только факторы, относящиеся к системе электроснабжения, но и простой оборудования при переключениях и пр.

Выбранная система электроснабжения должна иметь наименьшие первоначальные затраты и годовые эксплуатационные расходы. Для расширяющихся карьеров должна быть предусмотрена возможность дальнейшего развития карьерной сети без существенных переустройств смонтированной части.

### 17.3. ОСОБЕННОСТИ КАРЬЕРНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Карьерные распределительные сети состоят из воздушных и кабельных линий электропередачи и понизительных или распределительных подстанций и подразделяются на постоянные (стационарные) и временные (передвижные).

К *постоянным* воздушным линиям электропередачи относятся стационарные линии всех напряжений, которые

сооружают как на поверхности карьера, так и непосредственно в карьере и на отвалах. В карьере и на отвалах стационарные воздушные ЛЭП сооружают по трассам, расположенным на нерабочих уступах или на уступах с длительным (более года) сроком отработки.

К *временным* воздушным линиям электропередачи относятся передвижные и переносные линии, которые сооружают непосредственно на рабочих уступах в карьере и на отвалах. Временные воздушные ЛЭП систематически перемещают по мере продвижения горных работ. Преимущественное распространение на карьерах получили воздушные линии, отличающиеся простотой устройства и эксплуатации, а также экономичностью по сравнению с кабельными линиями. Конструктивные особенности воздушных и кабельных линий зависят от величины линейного напряжения. Для карьерных стационарных воздушных линий электропередачи применяют голые многопроволочные алюминиевые и сталеалюминиевые провода марок А, АС, АСУ. Сталеалюминиевые провода применяют обычно на высоковольтных линиях напряжением 35 кВ и на линиях напряжением 6 кВ — в случае пролета большой длины. Для передвижных линий напряжением 6 кВ внутри карьера используют алюминиевые провода марки А сечением не более 120 мм<sup>2</sup>.

Опоры карьерных стационарных и передвижных воздушных линий электропередачи различаются между собой. Для стационарных воздушных линий различных напряжений опоры в зависимости от наличия материала изготавливают из дерева, стали и железобетона. Широкое распространение получили комбинированные опоры, состоящие из деревянных конструкций, установленных на железобетонных пасынках. Деревянные опоры характеризуются простотой изготовления и небольшой стоимостью. Кроме того, они создают дополнительную изоляцию относительно земли. К недостаткам деревянных опор следует отнести небольшой срок их службы и пожароопасность.

Для передвижных (временных) воздушных линий напряжением 3—10 кВ в карьерах и на отвалах применяют деревянные и комбинированные опоры различных конструкций. Различают переносные опоры, основания которых закрепляются в специально пробуренной скважине, и передвижные опоры, основанием которых может служить железобетонная или чугунная плита, а также деревянная конструкция. Наиболее распространены в карьерах опоры с деревянными основаниями, требующие, однако, значительного расхода леса и больших трудозатрат на ремонт. На передвижную опору с металлическим основанием расходуется до 0,5 т металла. Наиболее экономичными являются передвижные опоры с железобетонным основанием. Сооружение новых и перемещение на новые трассы действующих временных воздушных линий осуществля-



ется механизированным способом. Опоры переносных линий электропередачи переставляют буростолбоставом, а передвижные — трактором-бульдозером.

Для секционирования стационарных и передвижных линий, а также для разделения разветвленных линий на карьерах применяют разделительные пункты, которые оборудуются соответственно на стационарных или передвижных опорах.

Разделительные пункты для воздушных линий напряжением 6 кВ представляют собой стационарную или передвижную (переносную) опору, на которой кроме линейных изоляторов для крепления проводов установлен трехполюсный разъединитель, соединенный с помощью траверсы с ручным приводом. Привод закреплен на этой же опоре на доступной для обслуживающего персонала высоте.

Для экономии материалов и сокращения затрат труда на сооружение и перемещение воздушных линий в карьерах и на отвалах применяют опоры специальной конструкции для совместной подвески проводов линии электропередачи напряжением 6 кВ, проводов осветительной или силовой линии напряжением до 1000 В. По этим же опорам прокладывают и провода заземляющей сети. Совместная подвеска проводов линий различного назначения осуществляется на всех типах переносных и передвижных опор: промежуточных, анкерных, угловых и концевых.

Длина пролетов линий электропередачи напряжением до 1000 В принимается в среднем  $40 \div 50$  м, для линий напряжением  $3 \div 10$  кВ — в пределах  $50 \div 100$  м. Расстояние между проводами для линий напряжением до 1000 В принимают в среднем  $400 \div 500$  мм, для линий напряжением  $3 \div 10$  кВ — в пределах  $800 \div 1500$  мм. Кабельные линии на открытых горных разработках также подразделяются на стационарные и передвижные. Токопроводящие жилы силовых кабелей изготовляют из алюминия или электролитической меди.

Стационарные кабельные линии выполняют бронированными кабелями. Преимущественное применение получили кабели с алюминиевыми жилами в алюминиевой оболочке, бронированные стальными лентами (ААБ). Их прокладывают по площадке в кабельных траншеях. Спуски на рабочие горизонты выполняют открыто — в желобах, по металлическим решеткам и т. д. Такой способ прокладки кабелей лучше предохраняет их от механических повреждений из-за обвалов, оползней и т. п. Кабельные спуски часто устраивают в неподвижной части карьера при веерном продвигании фронта горных работ. Прокладка кабеля под железнодорожными путями и автодорогами карьера должна проводиться в трубах, коробах или желобах.

Кабельные линии из гибких кабелей являются передвижными. Из-за высокой стоимости кабелей применение их ограничено (используют главным образом для обеспечения манев-

ренности подвижных электроприемников). Для предохранения кабеля от завала породой, наездов машин и т. п. его по возможности укладывают на деревянных или металлических стойках (козлах, салазках). Это требование не распространяется на случаи, когда конструкцией передвижных электрифицированных механизмов предусматривается запас гибкого кабеля под напряжением на специальном кабельном барабане.

Кабельные сети в подземных выработках дренажных шахт карьеров должны выполняться в соответствии с Едиными правилами безопасности при разработке рудных, нерудных и россыпных месторождений подземным способом.

Кабели передвижных и стационарных карьерных линий электропередачи не должны находиться в воде или на сильно увлажненном грунте, так как поглощение влаги ухудшает их изоляцию. Электрическая прочность изоляционной резины, например, находящейся в течение месяца в воде, снижается на 40—60 %. Кроме того, влага, проникающая внутрь кабеля, при низкой температуре превращается в лед и создает внутренние напряжения, которые уменьшают электрическую стойкость резины

#### **17.4. СХЕМЫ И УСТРОЙСТВО КАРЬЕРНЫХ ПЕРЕДВИЖНЫХ ПОДСТАНЦИЙ И ПРИКЛЮЧАТЕЛЬНЫХ ПУНКТОВ**

При распределении электрической энергии внутри карьера широкое распространение получили передвижные трансформаторные подстанции, передвижные карьерные распределительные и приключательные пункты.

Для электроснабжения низковольтных потребителей на карьере (буровых станков, передвижных компрессорных установок, небольших конвейеров и землесосов, осветительных установок и т. п.) обычно применяют передвижные комплекты трансформаторные подстанции (ПКТП) на 6/0,4 кВ.

Передвижные подстанции изготавливают закрытыми с воздушными и кабельными вводами (иногда открытыми). Для облегчения перемещения передвижные подстанции монтируют на салазках (саях) или шасси. В типовом проекте передвижных комплектов трансформаторных подстанций (ПКТП) на 6—10/0,4 кВ для открытых горных работ, разработанном институтом Гипроруда, предусмотрены масляные трансформаторы в нормальном исполнении типа ГМ мощностью 25, 40, 63, 100, 160, 250, 400 и 630 кВ·А. Общая компоновка, форма и размеры ПКТП определяются: назначением и условиями применения, размерами и количеством электрооборудования с учетом удобств и безопасности обслуживания при эксплуатации, соблюдением электрических расстояний между частями, находящимися под напряжением, и от них до заземленных частей, соз-

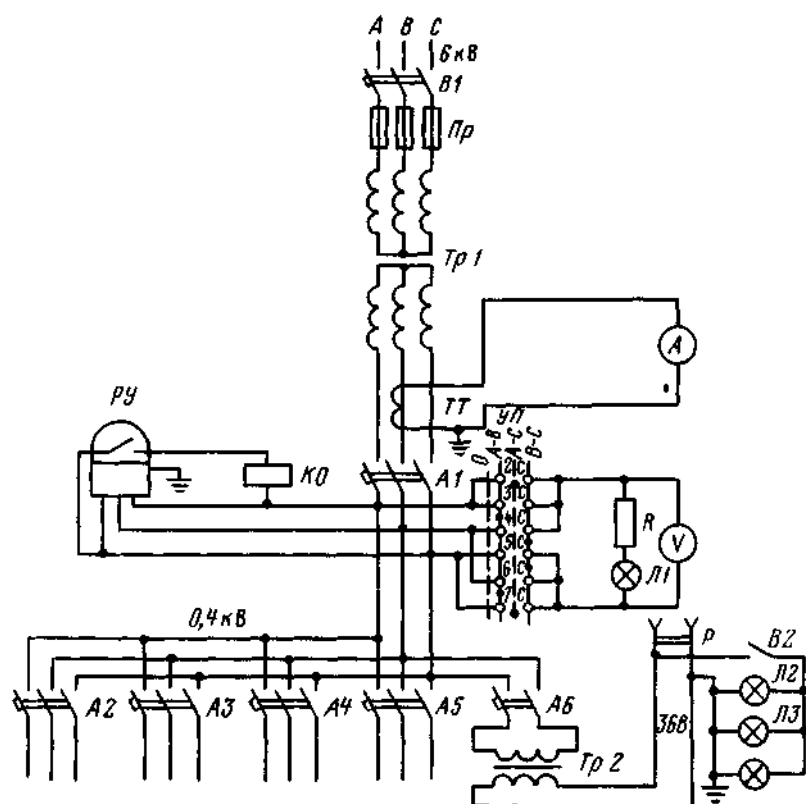


Рис 175 Электрическая схема передвижной карьерной подстанции

даннем надлежащих тепловых и атмосферных условий работы электрооборудования и т. д.

Криворожский электрозавод в настоящее время выпускает ПКТП-400 на 6/0,4 кВ мощностью 400 кВ·А. Подстанция предназначена для приема, преобразования и распределения электрической энергии переменного тока в условиях ведения открытых разработок, а также для промышленных предприятий. Трансформаторная подстанция состоит из корпуса, салазок и опоры ограждения со штыревыми изоляторами. Электрическая схема передвижной карьерной подстанции приведена на рис. 17.5.

Все оборудование подстанции размещено в прочном металлическом корпусе, установленном на металлических салазках.

Разъемы и двери имеют защиту от проникновения внутрь корпуса пыли, дождя и снега. Корпус разделен на три отсека (высокого напряжения, силового трансформатора и щита низкого напряжения). В подстанции установлены силовой транс-

форматор ТМ-400-6/0,4—0,23 и камера РУ-6 кВ, которая оборудована выключателем нагрузки ВНП-16 с предохранителями ПК-6. На шите низкого напряжения установлены автоматические выключатели А-3100, на вводе — автомат АВМ-10 и реле утечки. Для питания цепей освещения предусмотрен осветительный трансформатор *Tr2* типа ОСВ-0,5 напряжением 380/36 В. Для повышения безопасности обслуживания установки привод ПР-17 расположен в ячейке, отделенной от РУ-6 кВ сетчатой дверью, имеющей механическую блокировку для исключения ошибочных операций. Подстанция имеет воздушный ввод на стороне ошибочных операций. Подстанция имеет воздушный ввод на стороне 6 кВ и сальники для кабельного выхода на стороне 0,4 кВ, рассчитанные на присоединение гибкого кабеля сечением до 120 мм<sup>2</sup>.

Для подключения передвижных потребителей карьеров и отвалов к воздушным или кабельным линиям применяют приключательные пункты, которые могут быть с разъединителями, выключателями нагрузки и масляными выключателями. В настоящее время на карьерах находят применение серийно изготавливаемые комплектные распределительные устройства РВНО-6, ПКРН-6В, ЯКНО-6ЭП, ОПП.

Распределительное устройство типа РВНО-6, оборудованное масляным выключателем ВМБ-10, применяют редко из-за следующих недостатков: небольшая мощность отключения; возможен только кабельный ввод от воздушной линии электропередачи; отсутствие защиты от перенапряжений; непригодность для комплектования группового распределительного устройства; отсутствие трансформатора напряжения.

Распределительное устройство типа ПКРН-6В можно использовать в виде одиночного приключательного пункта для подключения электроприемника к переносной ЛЭП и для передвижных групповых распределительных устройств (рис. 17.6).

Шкаф устройства ПКРН-6В представляет собой металлическую камеру прочной конструкции пылезащищенного исполнения. Внутри камеры размещены коммутационные аппараты (выключатель типа ВМК-10К, разъединители), трансформаторы тока и напряжения. Управление выключателем может осуществляться с помощью привода ПРБА-100 либо электромагнитным приводом ПЭ-11 с дистанционным управлением. Привод ПРБА можно применять только в том случае, если ток к. з. в месте установки ячейки не превышает 5 кА. Коммутационные аппараты и двери шкафа снабжены блокирующими устройствами, не допускающими выполнения неправильных операций. Ячейка оборудована токовой защитой, предусмотрена также защита от однофазных замыканий на землю. Приключательный пункт одиночного исполнения может иметь воздушный или кабельный ввод и вывод.

Рис 176 Схема при-  
ключательного пункта  
в одноконтурном исполнении  
а — схема ячейки для уста-  
новки в КРП б — схема  
одиночной ячейки

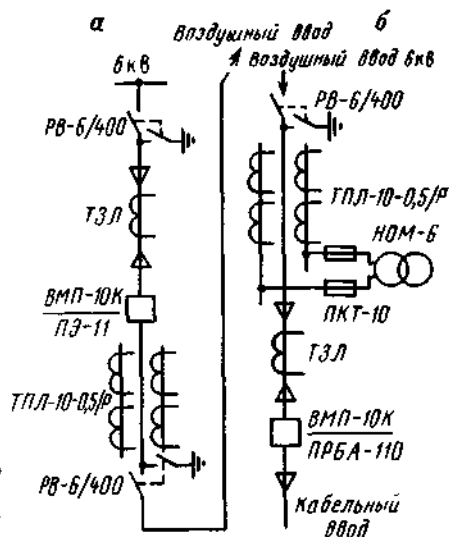
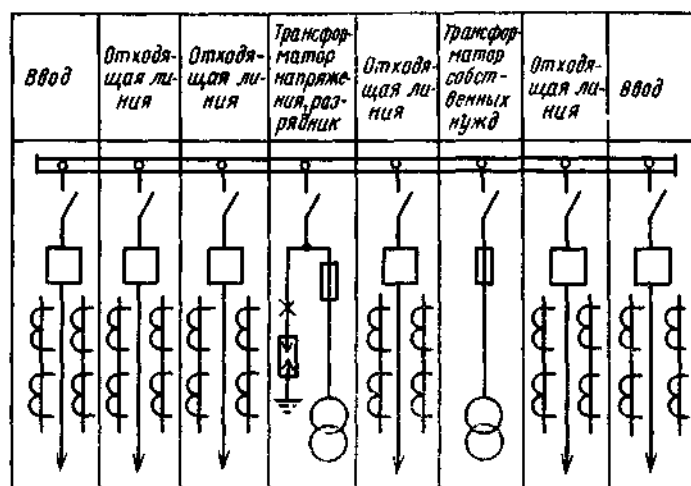


Рис 177 Схема пере-  
движного карьерного  
распределительного пун-  
кта напряжением 6—  
10 кВ



Разработана модернизированная конструкция одноконтурного передвижного приключательного пункта с масляным выключателем, управляемым дистанционно с экскаватора (ПКРН-6ВМ). Этот приключательный пункт оснащен следующими средствами защиты и автоматики: избирательной защитой от однофазных замыканий на землю; однократным автоматическим повторным включением в случае ложного действия защиты от замыканий на землю; блокировкой, запрещающей включение выключателя

при наличии замыкания на землю на защищаемом участке; максимальной токовой защитой и от минимального напряжения; контролем целостности заземляющей жилы кабеля, соединяющего ячейку устройства ПКРН-6ВМ с экскаватором; дистанционным управлением приводом выключателя с площадки экскаватора.

Передвижные карьерные распределительные пункты (КРП) на 6—10 кВ предназначены для питания потребителей в карьерах и отвалах. Передвижные КРП комплектуются из ячеек наружной установки типа ПКРН или ЯКНО, а также из комплектных распределительных устройств наружной установки КРН-10.

Применение передвижных и полустационарных КРП позволяет значительно сократить объем работ, а также срок их сооружения и повысить надежность электроснабжения. Передвижные распределительные устройства, так же как и приключательные пункты, монтируют на салазках и оборудуют воздушными вводами, что дает возможность быстро перемещать их по мере развития горных работ.

КРП собирают из комплектных распределительных устройств, состоящих из: шкафов ввода, трансформатора собственных нужд, трансформатора напряжений и разрядников, отходящих линий (рис. 17.7). Количество шкафов для отходящих линий определяется схемой электроснабжения. При питании крупных участков горных работ, а также карьеров с потребителями первой категории применяют КРП с двумя и более вводами и секционирование шин.

#### **17.5. ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КОМПЛЕКСОВ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ И ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

Комплексы машин непрерывного действия питают трехфазным переменным током напряжением преимущественно 6 или 10 кВ. Наиболее мощные роторные экскаваторы и транспортно-отвальные мосты питаются напряжением 35 кВ. К отдельным машинам небольшой производительности подводят напряжение 380 В. Для путепередвижателей непрерывного действия и небольших цепных многоковшовых экскаваторов на железнодорожном ходу может подводиться питание постоянным током от тяговой сети электровозной откатки.

Для питания транспортно-отвальных комплексов обычно применяют радиальную одно-или двухступенчатую схему с продольными питающими линиями. Распределительные сети в карьерах, разрабатываемых комплексами непрерывного действия, выполняют на уступах гибкими кабелями и воздушными линиями на дневной поверхности. Количество подстанций и питающих линий зависит от мощности электроустановок и длины

фронта горных работ. Машины, перемещение которых происходит редко (конвейеры, межуступные перегружатели и др.), подключают к распределительной сети короткими (до 250 м) гибкими кабелями. Металлоконструкции этого оборудования обычно используют для прокладки кабелей распределительной сети.

Для питания машин, перемещающихся в процессе работы периодически или непрерывно (экскаваторы, отвалообразователи, отвальные мосты и др.), широко применяют кабельные барабаны, на которые наматывают гибкий питающий кабель экскаватора длиной до 2000 м. Кабель подключают к приключательному пункту, расположенному в торце карьера или на участке фронта работ. В зависимости от направления движения машины с кабельным барабаном (к приключательному пункту или от него) осуществляется автоматическая намотка или размотка кабеля. При недостаточной вместимости кабельного барабана увеличивают количество приключательных пунктов. Место установки кабельного барабана выбирают так, чтобы размотанный кабель был расположен в условиях наименьшей вероятности повреждения. Питание крупных машин осуществляется по нескольким параллельным кабелям, наматываемым на индивидуальные кабельные барабаны. В этом случае при повреждении одного из кабелей нагрузку потребителей не ограничивают. Преимуществом такого способа питания являются высокая надежность, безопасность и почти полное отсутствие трудоемких вспомогательных работ по передвижке линий электропередачи. К недостаткам относятся большие капитальные затраты и уменьшение допустимой токовой нагрузки. Даже при однослойной навивке кабеля на барабан с промежутками между витками допустимая нагрузка снижается на  $20 \div 25\%$ , при двухслойной — на  $40 \div 45\%$ , а при трехслойной — на  $50 \div 55\%$ . На практике принимают не более двух, трех слоев навивки, поэтому размеры барабанов могут быть большими: диаметр — 6,5 м, длина — 8 м. Для повышения допустимой нагрузки на кабель, намотанный на барабан, устанавливают небольшие вентиляторы для искусственного охлаждения кабеля, а от нагрева солнечными лучами кабельный барабан предохраняют навесом. Конец намотанного на барабан кабеля пропускают сквозь пустотелый вал и присоединяют к контактным кольцам токосъемного устройства. К щеткам этого устройства подключают кабель, прокладываемый к потребителю.

Кабельный барабан может быть встроен в машину (экскаваторы небольшой и средней производительности), установлен на прицепной железнодорожной тележке (отвальные мосты и цепные многоковшовые экскаваторы на железнодорожном ходу) или выполнен в виде самоходной установки на гусеничном ходу (мощные роторные экскаваторы и др.).

В отдельных случаях для питания отвальных мостов с экскаваторами применяется передвижная трехфазная контактная сеть. Проводником служит круглый провод сечением 100 мм<sup>2</sup> и более. На промежуточных опорах провод не крепится, а укладывается на седла, закрепленные на траверсе опорными изоляторами. Анкерные опоры устанавливают только в торцах карьера и оборудуют барабанами для регулировки натяжения проводов и размещения запаса, необходимого при изменении длины фронта работ. Токосъемники выполняют роликовыми или ползунковыми. Для улучшения контакта предусматривают не менее двух токосъемников на каждой фазе. К контактной сети моста могут подключать и другие электроприемники. Для этого приключательный пункт соединяют с седлами двух смежных опор, чем достигается непрерывность питания в случае, если роликовые токосъемники моста приподнимут над седлами одной опоры. Преимуществами контактного способа питания являются простота конструкции, дешевизна и возможность устройства ответвлений для подключения дополнительных электроприемников; недостатками — большая трудоемкость обслуживания и невысокая надежность.

Особенность электроснабжения гидромеханических установок заключается в том, что, имея значительные установленные мощности электродвигателей, они непрерывно перемещаются по мере разработки или вскрытия месторождения. Основными электроприемниками при гидромеханизации являются насосные станции для водоснабжения гидромониторов, землесосы для напорного транспортирования горных пород по трубам и плавучие земснаряды.

Насосную станцию при наиболее распространенной схеме водоснабжения располагают стационарно у водоприемного пруда за пределами карьера. Станция оснащается несколькими насосными агрегатами. Номинальная мощность одного электродвигателя достигает 2000 кВт. Для питания насосной станции электроэнергией от ГПП строят одну или две воздушные линии электропередачи напряжением 6 кВ и в помещении насосной устанавливают распределительный пункт. При значительном удалении мощных насосных станций используют глубокий ввод и строят подстанцию напряжением 35/6 кВ. Электроприемники напряжением до 1000 В (ремонтное оборудование, эжектор для создания вакуума в насосе и заливки его водой при пуске, освещение и др.) питают от понизительного трансформатора небольшой мощности (40—63 кВт·А), размещенного в одной из ячеек.

Землесосы на открытых горных работах монтируют в полустационарных установках, которые в течение сезона несколько раз передвигают тракторами. Мощность электродвигателя землесоса достигает 1100 кВт.



Номинальное напряжение питания при мощности до 320 кВт составляет преимущественно 380 В, при большей мощности — 6 кВ. Энергия подводится по воздушной линии — обычно отпайка от магистральной карьерной высоковольтной линии, выполненной на передвижных опорах и расположенной за пределами досягаемости струи гидромонитора. В отдельных случаях применяют перекачные землесосные станции, находящиеся за пределами горных выработок, питаемые их электроэнергией осуществляется одной-двумя постоянными высоковольтными линиями 6 кВ.

Плавучие землесосные снаряды также являются мощными электроприемниками. Установленная мощность их электродвигателей составляет более 5000 кВт. Для их питания от подстанции карьера строят радиальную воздушную линию 6 кВ. Гибкий кабель от приключательного пункта к земснаряду прокладывают вместе с напорным трубопроводом на понтонах, спущенных в водоем.

#### 17.6. ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ДРЕНАЖНЫХ ВЫРАБОТОК

Для осушения карьерного поля проходят стволы дренажных шахт, штреки и камеры подземных водоотливных установок, дренажные канавы на поверхности карьера, вертикальные скважины для глубинных насосов и др.

Основными электроприемниками дренажных шахт являются насосные установки главного водоотлива, перекачные насосы (для перекачки воды из пониженной части штреков к подземному водосборнику), подъемные и вентиляционные установки на поверхности, проходческие комбайны, электровозная откатка и пр. Расчетные нагрузки дренажных шахт составляют 300—600 кВт, и все электроприемники питаются напряжением до 1000 В, поэтому трансформаторные подстанции, как правило, сооружают на поверхности. Дренажную шахту относят к потребителям первой категории и обеспечивают резервным питанием от подстанции, расположенной вблизи ствола. Питание подземных электроустановок осуществляют двумя и более бронированными кабелями напряжением до 1000 В, проложенными в стволе шахты.

В дренажном штреке у скважины собирают распределительный пункт из аппаратуры рудничного нормального исполнения. От него к электроприемникам прокладывают преимущественно гибкие кабели из-за необходимости частой переноски.

Для откатки по дренажным штрекам применяют малогабаритные контактные электровозы (масса 2+3 т). Число электровозов в дренажных штреках карьера не превышает двух-трех. Постоянный ток напряжением 40—50 В поступает в тяговую сеть от переносных машинных или полупроводниковых преоб-

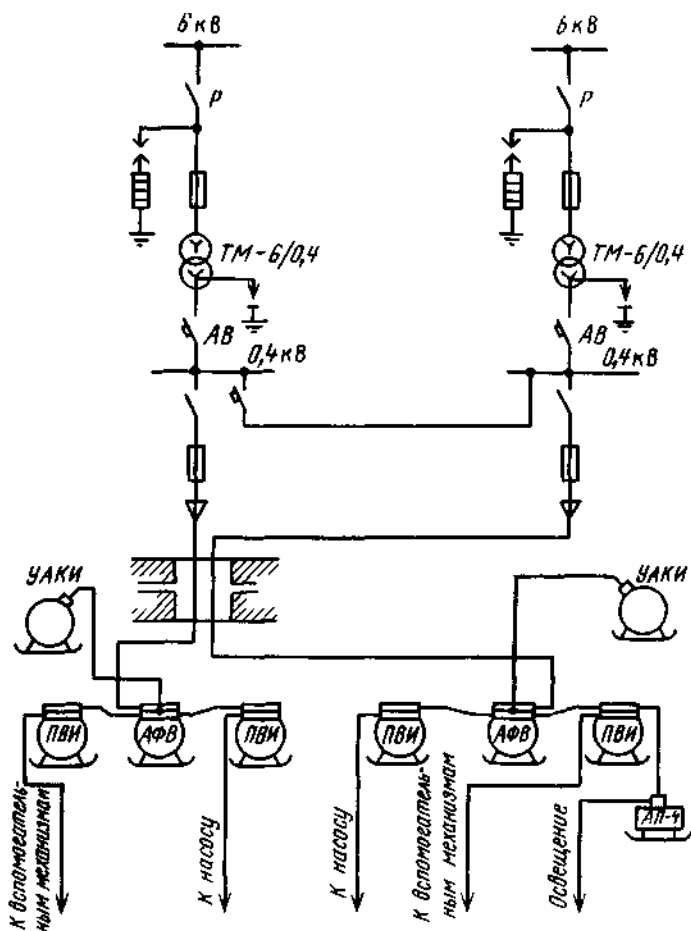


Рис 178 Схема электроснабжения подземной водоотливной установки

разователей мощностью  $3+5$  кВт. Использование контактных электровозов с большим напряжением в тяговой сети невозможно из-за недостаточной по условиям безопасности высоты дренажных штреков; применение аккумуляторных электровозов нецелесообразно по экономическим соображениям.

Электроснабжение главной подземной водоотливной установки осуществляют через скважину от двух трансформаторов. Трансформаторы обычно устанавливают на мачтовых подстанциях либо на передвижных установках — в подстанциях типа ПКТП. В камере водоотливной установки располагают два насосных агрегата. Мощность каждого трансформатора выбирают

из условия работ одного агрегата и всех вспомогательных механизмов (например, расположенных вблизи перекачных насосов), освещения и пр.

Схему питания водоотливной установки выполняют с таким расчетом, чтобы оперативные переключения для ввода в работу резервного трансформатора можно было выполнить на подземном участковом РП, не выходя на поверхность к трансформаторной подстанции (рис. 17.8).

Для питания групп глубинных или перекачных насосов в карьере и на поверхности обычно строят воздушную магистральную линию напряжением 6 кВ и устанавливают подстанцию: на поверхности чаще применяют мачтовую подстанцию на деревянных опорах, в карьере — передвижную типа КТП. Иногда можно обеспечить питание от действующих подстанций и линий электропередачи напряжением до 1000 В, расположенных вблизи насосных установок.

#### **17.7. ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА, ПОВЕРХНОСТИ И ВНЕШНИХ ОТВАЛОВ**

К объектам технологического комплекса и поверхности карьера относятся: сортировка, железнодорожные бункера, обогатительная фабрика, резервные склады полезного ископаемого, электромеханические мастерские, административно-бытовой комбинат и другие сооружения.

Основными потребителями электроэнергии среди объектов технологического комплекса и поверхности карьеров являются дробильные и измельчительные отделения обогатительных фабрик, которые потребляют около 60—70 % всей электроэнергии горно-обогатительных комбинатов. Потребителями электроэнергии при напряжении 6 кВ являются синхронные и асинхронные приводы мельниц, дробилок, крупных насосов и вентиляторов. Установки технологического комплекса, имеющие электродвигатели напряжением 6 кВ, а также 0,4 кВ значительной мощности, питаются от отдельных подстанций и распределительных устройств, которые монтируют отдельно в непосредственной близости от объекта или же в здании объекта. Подстанции и РУ-6 кВ технологического комплекса получают электроэнергию от ГПП по кабельным или воздушным линиям.

Среди потребителей технологического комплекса и поверхности имеется большое число потребителей электроэнергии первой и второй категорий, что должно учитываться при выборе схемы электроснабжения.

Внешние отвалы обычно располагают на значительном расстоянии (3÷5 км) от технических границ карьера. Схема электроснабжения внешних отвалов зависит от расстояния до отвала, мощности карьера, применяемого оборудования и т. д.

На отвалах небольших карьеров мощность потребителей электроэнергии невелика (компрессоры, освещение, электрифицированный инструмент и т. п.). При расстоянии 1 км от подстанции карьера до отвала сооружается воздушная ЛЭП напряжением 0,4—0,23 кВ, к которой через распределительный пункт подключаются токоприемники. При расстоянии более 1 км от подстанции карьера сооружается высоковольтная линия напряжением  $6 \div 10$  кВ, а на отвале устанавливается передвижная трансформаторная подстанция.

При наличии на отвалах мощных экскаваторов сооружают подстанции на 35/6 кВ или распределительные устройства РУ-6 кВ. Подвод электроэнергии от ГПП к подстанциям или РУ осуществляется по стационарным высоковольтным линиям. От подстанции или РУ до экскаваторов сооружают линии электропередачи, которые располагают вдоль отвальных уступов. Подвод электроэнергии к экскаваторам и другим токоприемникам проводят так же, как и на карьере. Экскаваторы с помощью гибких кабелей присоединяют к воздушным ЛЭП через приключательные пункты.

#### 17.8. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА КАРЬЕРНЫХ СЕТЕЙ

Сечение проводников воздушных и кабельных линий на карьерах выбирают в зависимости от технических и экономических факторов. К техническим факторам относят: нагрев проводников токами нагрузки и токами к.з.; потери напряжения в проводниках в нормальных и пусковых режимах; устойчивость проводников к механическим нагрузкам.

Экономические факторы, определяющие целесообразное сечение проводов, учитывают капитальные затраты на сооружение линий, расходы, связанные с эксплуатацией линий, и стоимость электроэнергии.

Внутрикарьерные линии рассчитывают по техническим показателям, так как являются временными сооружениями. Сечение проводников стационарных (питающих) линий, после того как оно выбрано по техническим условиям, сравнивается с сечением экономически целесообразным.

Необходимо отметить, что при расчете сечения проводников карьерных линий электропередачи по допустимой потере напряжения следует учитывать наличие пиковых нагрузок потребителей. Пиковая нагрузка создает максимальные потери напряжения в электрической сети. В этих условиях должны быть обеспечены достаточные пусковые моменты электроприводов. Наибольший пиковый ток одного приемника принимается равным пусковому току электродвигателей по паспортным данным. Пиковый ток группы электродвигателей, которые могут пускаться одновременно, принимается равным сумме пиковых токов

пускаемых электродвигателей. При одновременном пуске величина пикового тока определяется по уравнению

$$I_{\text{пик}} = I_{\text{п max}} + (I_p - k_n I_{\text{ном max}}), \quad (17.1)$$

где  $I_p$  — расчетный ток нагрузки группы электроприемников, определяемый методом коэффициента спроса;  $I_{\text{п max}}$  — пусковой ток наиболее мощного электродвигателя в группе;  $I_{\text{ном max}}$  — номинальный ток наиболее мощного электродвигателя;  $k_n$  — коэффициент использования, характерный для электродвигателя, имеющего наибольший пусковой ток.

При проектировании карьерных воздушных линий обычно используют типовые конструкции передвижных и стационарных опор, для которых рекомендованы определенные расстояния между опорами и сечения проводов и тросов, удовлетворяющие условиям механической прочности. Минимальные сечения проводов для воздушных высоковольтных линий карьера по условиям механической прочности должны быть не менее  $25 \text{ мм}^2$  — для сталеалюминиевых и  $35 \text{ мм}^2$  — для алюминиевых проводов. Для воздушных линий напряжением до 1000 В сечения проводов должны быть соответственно не менее 10 и 16  $\text{мм}^2$ .

Карьерные электрические сети чаще всего представлены магистральными линиями с распределенными электрическими нагрузками. Приемники электрической энергии на карьерах не имеют строго фиксированных точек присоединения к магистрали, так как их постоянно перемещают вдоль линии. Учитывая это, карьерные магистральные линии в отличие от стационарных промышленных сооружений с постоянным сечением.

Магистральные осветительные сети на карьерах выполняют четырехпроводными (на промплощадках), трехпроводными внутри карьеров), иногда двухпроводными. Карьерные осветительные сети, как правило, имеют равномерно распределенную нагрузку вдоль магистрали, и поэтому их сечение принимается постоянным по всей длине. Сечение проводов осветительных магистральных сетей определяется, исходя из допустимых потерь напряжения с последующей проверкой на нагрев по таблицам допустимых нагрузок.

Сечение провода магистральной линии трехфазного тока с равномерно распределенной нагрузкой определяется по формуле

$$q = \frac{\sqrt{3} I_p l \cos \varphi_p 10^9}{2 \Delta U_{\text{д}} \gamma}, \quad (17.2)$$

где  $l$  — длина линии, км;  $\cos \varphi_p$  — расчетное значение коэффициента мощности (для ламп накаливания  $\cos \varphi_p = 1$ );  $\Delta U_{\text{д}}$  — допустимая потеря напряжения в осветительных сетях, не должна превышать 2,5 % номинального напряжения ламп;  $\gamma$  — удельная проводимость материала проводов сети, См/м.

В сетях наружного освещения вследствие большой длины распределительных линий существенное значение приобретает равенство между потерями напряжения в фазах осветительной системы. Это равенство достигается равномерным распределением осветительных нагрузок между фазами по всей длине линии.

### 17.9. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СХЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КАРЬЕРОВ

При технико-экономическом сравнении вариантов схем электроснабжения карьера высокая точность не требуется. Стоимость элементов электроснабжения, включающая капитальные затраты на электрооборудование, линии электропередачи и строительство карьерных подстанций и т. д., определяется по укрупненным показателям стоимости:

$$K = \sum_{i=1}^n K_i, \quad (17.3)$$

где  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  — число элементов электроснабжения по капитальным затратам.

Годовые эксплуатационные расходы или ежегодные издержки производства определяют по формуле

$$C = C_n + C_a + C_{к.р} + C_m + C_z, \quad (17.4)$$

где  $C_n$  — стоимость потерь электроэнергии, которая устанавливается согласно указаниям по определению электрических нагрузок промышленных предприятий и тарифу на электроэнергию, действующему в питающей энергосистеме;  $C_a$  — амортизационные отчисления на реновацию, т. е. полное восстановление основных фондов при первоначальной стоимости объекта за естественный срок службы;  $C_{к.р}$  — амортизационные отчисления на капитальный ремонт, которые принимают в пределах 40—50 % от общей нормы амортизации;  $C_m$  — затраты на электроэнергию, приобретение материалов, топлива, сырья, необходимых для производственного процесса;  $C_z$  — расходы на эксплуатацию, включающие расходы на текущий ремонт, заработную плату, общепроизводственные расходы и т. д.

Затраты на текущий ремонт определяют по нормативным процентам этих расходов от суммы капитальных вложений.

Технико-экономические показатели схем электроснабжения карьеров ориентировочно определяют по следующим уравнениям.

Капитальные затраты на электроснабжение:

$$K = 43,8 + 5,1\P_{г.м}, \text{ тыс. руб.}, \quad (17.5)$$

где  $\Pi_{г.м}$  — годовая производительность карьера по горной массе, млн. т.

Годовая стоимость электроэнергии:

$$C_2 = 101,6 + 4,6 \text{ Пг. м, тыс. руб.} \quad (17.6)$$

Стоимость годовой эксплуатации:

$$C_3 = 9,42 + 1,01 \text{ Пг. м, тыс. руб.} \quad (17.7)$$

При сравнении двух схем электроснабжения карьера могут рассматриваться следующие два варианта: 1)  $K_1 > K_2$  и  $C_1 > C_2$ ; 2)  $K_1 > K_2$  и  $C_1 < C_2$ . Используют обычно вариант 2, как имеющий меньшие капитальные затраты и годовые эксплуатационные расходы. Решение принимают на основе определения срока окупаемости:

$$T_{\text{ок}} = (K_1 - K_2) / (C_2 - C_1) < T_n,$$

где  $T_n$  — нормативный срок окупаемости капиталовложений, принимают равным 6,7 лет.

При рассмотрении трех и более схем электроснабжения пользоваться последним уравнением затруднительно. В этих случаях при одновременных капитальных вложениях в электроснабжение и постоянных годовых издержках производства сравнение рекомендуется выполнять по годовым суммарным приведенным затратам с учетом годового ущерба, зависящего от перерывов электроснабжения.

#### Контрольные вопросы

1. Какие схемы электроснабжения применяют на открытых горных работах?
2. Охарактеризуйте особенности устройства воздушных и кабельных линий карьерных распределительных сетей.
3. Устройство карьерных передвижных подстанций и приключательных пунктов.
4. Особенности расчета карьерных электрических сетей.

## Глава 18

### ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

### ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

#### 18.1. СХЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Геологоразведочные работы различаются как по объему и методике их проведения, так и по природным условиям. Поэтому в каждом конкретном случае выбор энергетической базы геологоразведочной партии требует специальных технико-экономических обоснований по оптимальному варианту. При выборе рациональной схемы электроснабжения следует руководствоваться объемом бурения, наличием вблизи линии электропередач, перспективностью разведываемого месторождения.

Поскольку при поисковом бурении объем скважин невелик, а оборудование перемещается непрерывно, в данном случае наиболее эффективны буровые станки с приводом от двигателей внутреннего сгорания (ДВС). При этом в качестве источников электроэнергии, которая необходима для вспомогательных операций, могут быть использованы передвижные электростанции типа бензоэлектрических агрегатов.

При предварительной разведке месторождений существует уже определенная сетка скважин, которая в зависимости от масштаба месторождения может выполняться одним или несколькими буровыми станками. На мелкомасштабном месторождении, когда в работе находятся один-два станка, целесообразнее применять их с ДВС. Когда число буровых агрегатов, работающих одновременно, превышает два, рациональнее применять установки с электродвигателями, питающимися от общей передвижной электростанции. Площадь участка, обслуживаемого одной электростанцией при напряжении 0,4 кВ, не должна превышать 1 км<sup>2</sup>. В противном случае резко возрастают потери электроэнергии.

При детальной разведке, на долю которой приходится 90 % буровых работ, применяются полустационарные и стационарные электростанции. Преимуществами полустационарных электростанций (рис. 18.1) являются: их простота, отсутствие трансформаторов и высоковольтных линий.

К их недостаткам относятся: значительные потери энергии при удалении буровых установок, необходимость перемещения сложного оборудования в процессе работ, сооружение временных зданий и пр. Оптимальная длина линии  $L$ , идущей от полустационарных электростанций, определяется по минимальной сумме затрат на перемещение электростанции и ее эксплуатацию. По произведенным подсчетам максимальное удаление буровой установки от электростанции не должно превышать 0,5 км.

Более дешевая и лучшего качества электроэнергия может быть получена при оборудовании стационарных электростанций или использовании энергосистем. В этом случае электроснабжение осуществляется централизованным порядком. Вырабатываемая на стационарной электростанции энергия трансформируется повышающим трансформатором до напряжения 6—10 кВ и по высоковольтной линии через распределительные пункты подается к передвижным понижающим трансформаторным подстанциям, а далее рабочим напряжением — к потребителю.

В соответствии с расчетами, выполненными некоторыми авторами, при детальной разведке для питания электропривода в радиусе 10÷25 км в большинстве случаев целесообразно централизованное электроснабжение при напряжении 6÷10 кВ.



Рис 181 Схема разведки с применением полустационарной электростанции:

I, II, III — позиции станции, 1 — электростанция, 2 — буровые станки, 3 — профили бурения

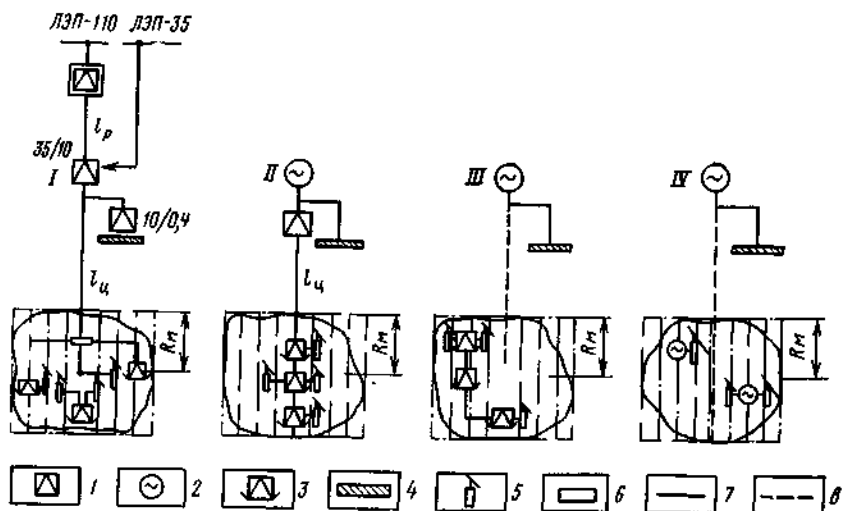
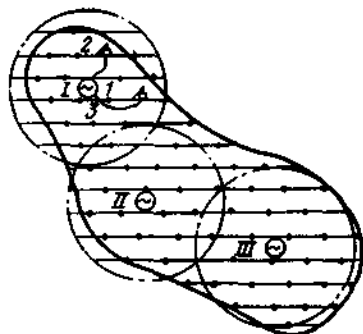


Рис 182 Схемы электроснабжения геологоразведочных работ:

1 — трансформаторная подстанция, 2 — электростанция; 3 — КТП; 4 — поселок, 5 — технологический потребитель, 6 — распределитель; 7 — ЛЭП, 8 — дорога

Установка центральной электростанции чаще всего имеет место близ рабочего поселка ГРП. При этом наряду с учетом расстояния до рабочих площадок принимаются во внимание возможность использования части энергии без повышения напряжения, подъездных путей и пр.

В качестве источников электроэнергии на центральных электростанциях обычно используют тихоходные дизель-генераторы (три-четыре машины).

При централизованном электроснабжении наиболее эффективным является получение электроэнергии от районных электростанций. Это позволяет уменьшить штат обслуживающего

персонала, повысить качество электроэнергии, снизить ее себестоимость. Применяемые на геологоразведочных работах (ГРР) системы электроснабжения могут быть подразделены по следующим классификационным признакам [7]: 1) по источнику поступления электроэнергии (системы, получающие энергию от собственных электростанций или от общей сети); 2) по характеру эксплуатации энергоисточников (электроснабжение от стационарных энергоисточников с трансформацией энергии или передвижных электростанций на месте работ без трансформации энергии); 3) по месторасположению энергоисточников (с рассредоточенным расположением энергоисточников или централизованным энергоисточником на месте работ, с единым централизованным энергоисточником на базе экспедиции); 4) по характеру присоединения потребителей к энергоисточнику на месте работ (с индивидуальным или групповым присоединением к электростанции или подстанции); 5) по способу распределения энергии (с радиальным, магистральным или кольцевым построением цепи электроснабжения).

Для специфических условий электроснабжения геологоразведочных объектов наиболее существенными классификационными признаками являются первые три. Положив их в основу, можно выделить четыре принципиально различных варианта электроснабжения, которые отличаются друг от друга не только по своему техническому исполнению, области возможного применения, но и по затратам, срокам ввода в эксплуатацию и себестоимости энергии. Поэтому при технико-экономическом обосновании электроснабжения геологоразведочных работ следует иметь в виду четыре основных базовых варианта, принципиальные схемы которых приведены на рис. 18.2: I — централизованная от государственной (районной) сети; II — централизованная от единой местной электростанции; III — централизованная от разных изолированных электростанций (с трансформацией энергии), размещаемых на отдельных участках работ; IV — локального электроснабжения на генераторном напряжении от передвижных электростанций.

На схемах показано электроснабжение технологических объектов (буровых станков), расположенных от базы (поселка) на расстоянии  $l_{\text{д}}$ , и потребителей самой базы, находящейся на расстоянии  $l_{\text{р}}$  от государственной энергосети ( $R_{\text{м}}$  — средний радиус месторождения).

Приведенные схемы наиболее часто встречаются, они являются базовыми, но в отдельных случаях может быть их сочетание. Например, база геологоразведочной партии получает энергию от государственной сети, а участок ведения работ — от центральной ДЭС на месте и пр. На основе приведенных принципиальных схем иногда выбор оптимального варианта не представляет какой-то сложности. Так, если вблизи месторож-

дения проходит районная сеть, то следует ориентироваться в основном на схему I. Если государственная сеть проходит далеко, база расположена от месторождения на значительном расстоянии, рассредоточенность потребителей велика, то наиболее обоснованным окажется вариант с применением передвижных электростанций (схема IV). Однако чаще к числу возможных можно отнести большинство из приведенных вариантов, и тогда выбор наиболее предпочтительного из них становится сложной задачей, решаемой с привлечением положений оптимизации при технико-экономических расчетах.

## 18.2. ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ НА ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТАХ

В настоящее время потребление электроэнергии в геологоразведочной отрасли достигает 2,5 млрд. кВт·ч, и почти половина этого количества вырабатывается местными электростанциями. По источнику преобразования первичной энергии в электрическую выделяют гидравлические, тепловые, атомные и ветровые электростанции. На геологоразведочных работах в качестве местных энергоисточников применяют тепловые электростанции, оснащенные дизельными и бензоагрегатами. Основное количество электроэнергии (до 95 %) поступает от дизельных электростанций, хотя общее число рабочих единиц бензоагрегатов и дизель-агрегатов примерно одинаково.

Характерные особенности электростанций — многообразие конструкций с различными основными параметрами, что вызвано стремлением к постоянному совершенствованию конструкций оборудования, улучшению его технических характеристик, повышению эксплуатационных качеств и степени автоматизации. Эксплуатируемые в настоящее время при разведке месторождений электростанции можно условно классифицировать по следующим признакам: назначению, способу эксплуатации, мощности, роду и частоте тока, степени автоматизации, типу первичного двигателя.

По назначению электростанции делятся на силовые, осветительные, зарядные и специальные. *Силовые* электростанции служат для электроснабжения силовых потребителей и состоят из одного или нескольких агрегатов, подключенных к общей системе шин распределительного устройства. *Осветительные* электростанции служат для освещения временных хозяйственных объектов. Они имеют в своем составе кроме обычного оборудования комплект светильников и кабельную сеть. *Зарядные* электростанции предназначены для заряда аккумуляторных батарей и оснащены агрегатами постоянного тока напряжением 28,5 или 115 В, а также специальным оборудованием. *Специальные* электростанции оборудуются в соответствии с их назна-

чением. Например, электростанции для геофизических работ комплектуются генераторами, дающими ток повышенной частоты.

По способу эксплуатации электростанции делятся на три группы: передвижные, полустационарные, стационарные. Передвижные электростанции, перемещаемые многократно в течение сезона, применяются при поисковых работах и предварительной разведке. Они состоят из одного бензоагрегата или дизель-агрегата, и их устанавливают на месте работ без фундамента. Такие электростанции могут монтироваться в помещении буровой вышки и перемещаться вместе с ней или на специальном прицепе. В отдельных случаях применяют навесные электростанции, представляющие собой генератор небольшой мощности с облегченным щитом управления, который устанавливается непосредственно на тракторе и приводится в действие от его двигателя посредством клиноременной передачи.

К недостаткам передвижных электростанций относятся: высокая стоимость энергии —  $0,15-0,4$  руб/(кВт·ч), низкие энергетические показатели ( $\cos \varphi = 0,3-0,4$ ); коэффициент использования  $k_{\text{и}} = 0,2 \div 0,25$ ; коэффициент спроса  $k_{\text{с}} = 0,35 \div 0,4$ ; большие простои. Преимущества их — автономность работы, небольшие размеры, легкая транспортабельность, отсутствие передающих сетей (следовательно, и потерь в них), быстрота ввода в действие.

*Полустационарные* электростанции перемещают не чаще одного-двух раз в год. Они состоят обычно из одного или нескольких дизель-агрегатов, которые устанавливают во временных зданиях. Эти электростанции имеют высокие показатели, обеспечивают лучшую устойчивость в работе и меньшие расходы на ремонт. К недостаткам полустационарных электростанций относится то, что электроустановки питаются от них с помощью линий генераторного напряжения, а это с увеличением расстояний дает значительные потери энергии.

*Стационарные* электростанции не перемещаются в течение всего срока разведки месторождений. Они состоят обычно из нескольких агрегатов, и электроэнергия передается от них потребителям по линиям электропередач напряжением 6—10 кВ. Стоимость вырабатываемой энергии такими электростанциями низкая —  $0,05 \div 0,10$  руб/(кВт·ч), а энергетические показатели высокие ( $\cos \varphi = 0,6 \div 0,8$ ,  $k_{\text{с}} = 0,6$ ). К недостаткам их относятся длительный срок ввода в действие и необходимость иметь высоковольтные линии.

По мощности электростанции можно классифицировать на: малой мощности — 50 кВт, средней мощности —  $50 \div 500$  кВт, большой мощности — 500 кВт и более. На геологоразведочных работах применяют преимущественно электростанции малой и средней мощности. Кроме того, электростанции можно подраз-

делить по: роду тока — переменный и постоянный; частоте переменного тока — 50, 200, 400 Гц; напряжению — низкое (115, 230, 400 В) и высокое (6300, 10 500 В); степени автоматизации — 1, 2, 3-й; типу первичного двигателя — с дизельным и карбюраторным двигателем.

Характер геологоразведочных работ обуславливает необходимость применения электростанций, которые могут быть легко перевезены с одного места на другое и быстро приведены в рабочее состояние. Это главное требование, которое предопределяет особенности передвижных электростанций.

Включение асинхронного двигателя большой мощности приводит к резкому увеличению тока нагрузки, что влечет за собой изменение основных выходных параметров электростанции, которые в процессе эксплуатации должны оставаться постоянными. Выходные параметры электростанции — мощность, напряжение, род тока и его частота. Различают номинальную, максимальную и эксплуатационную мощности каждой электростанции.

*Номинальная мощность* — мощность, при которой электростанция работает длительное время в условиях, соответствующих расчетным. *Эксплуатационная мощность* — мощность, которую электростанция развивает в любых условиях при соответствующем тепловом режиме. *Максимальная мощность* — наибольшая мощность, которую можно получить в течение времени, гарантируемого заводом.

Электростанции, применяемые на геологоразведочных работах, должны отвечать следующим требованиям.

1. Электроагрегаты должны длительно обеспечивать номинальную мощность и перегрузку до 10 % в течение 1 ч при температуре окружающего воздуха от  $-50$  до  $40^{\circ}\text{C}$ , влажности до 98 % и высоте до 1000 м над уровнем моря. Общее время работы с перегрузкой 10 % не должно превышать 10 % времени гарантийного срока службы.

2. Электроагрегаты и электростанции должны обеспечивать без специальных пусковых устройств пуск асинхронного двигателя мощностью, равной 50—70 % номинальной мощности агрегата при нагрузке двигателя не более 30 %.

3. Дизель-агрегаты должны обеспечивать следующие качественные показатели: нестабильность напряжения и частоты (при любой неизменной нагрузке в пределах 0—100 % номинальной мощности коэффициентом мощности 1—0,8) не должна превышать  $\pm 1$  %, номинального значения; максимальные отклонения напряжения и частоты (при резком снижении или увеличении нагрузки до 100 %) не должны превышать соответственно 20 и 7 %, номинальных значений; время переходных процессов при резком снижении или увеличении нагрузки до 100 % не должно превышать  $3 \div 5$  с.

4. Электроагрегаты и электростанции должны обеспечивать длительную устойчивую параллельную работу как с другими агрегатами, так и с местной электросетью. При этом неравномерность распределения нагрузки не должна превышать 10 % для любого из агрегатов.

5. Время непрерывной работы электроагрегатов с дозаправкой их топливом и маслом без остановки должно быть не менее 150 ч.

6. Электрические агрегаты должны быть рассчитаны на длительную работу, а при несимметричной нагрузке в пределах до 25 % от номинальной величины силы тока.

7. Электрическая прочность изоляции всех цепей должна быть достаточной для предотвращения пробоя. Электростанции должны иметь надежный контроль изоляции и средств защиты, обеспечивающий надежность их действия при коротких замыканиях и перегрузках.

8. Все электроагрегаты в целях быстрого запуска первичного двигателя должны иметь подогреватели, работающие на том же топливе, что и двигатель. Электроагрегаты, предназначенные для стационарной работы, должны иметь электрические подогреватели.

9. Электростанции должны иметь эффективные глушители шума и радиопомех, защитные устройства, предохраняющие персонал от травм, ожогов, а также противопожарные устройства.

Требования к электроагрегатам с карбюраторным двигателем по качеству электроэнергии несколько ниже, чем к дизельным электроагрегатам.

### **18.3. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ**

Используемые на геологоразведочных работах электрооборудование и электроустановки имеют либо общепромышленное, либо рудничное (нередко взрывобезопасное) исполнение. Первое по параметрам часто не соответствует сложным условиям, в которых ведется разведка месторождения, и быстро выходит из строя, а второе, предназначенное для тяжелых подземных условий, громоздкое и дорогое.

Главные особенности эксплуатации геологоразведочного оборудования — непрерывная его передислокация, влияние атмосферных воздействий, большие динамические нагрузки и вибрация, повышенная опасность поражения электрическим током и пожароопасность. Поэтому наряду с общими требованиями, предъявляемыми к любому электрооборудованию (безопасность, надежность, невысокая стоимость), к электрооборудованию для геологоразведочных партий должны быть предъявлены допол-

нительные требования: закрытое исполнение, легкость и компактность, транспортабельность, прочность оболочек, обеспеченность быстроразъемными соединениями, виброустойчивость.

По-видимому, этим требованиям в наибольшей степени могло бы соответствовать электрооборудование в нормальном рудничном исполнении. Однако большая часть этого оборудования (пускатели, автоматы, КРУ) выпускается только во взрывобезопасном исполнении, а следовательно, оно тяжелое и дорогостоящее. Предпочтительным является оборудование в защищенном или закрытом исполнении с изолированными и неизолированными токоведущими частями для умеренного и холодного климата.

Многотипность оборудования, используемого в технологии геологоразведочных работ, затрудняет совершенствование его конструкций, осложняет организацию снабжения, эксплуатацию и ремонт. Поэтому электрооборудование должно быть укомплектовано на основе сокращения типов оборудования, перечня аппаратуры и приборов для использования в отдельных агрегатах, применения унифицированных конструкций отдельных узлов и типовых электрических схем на базе унифицированных и нормализованных деталей и механизмов, использования блочных конструкций для различных исполнений.

С учетом унифицированных серий современного электрооборудования, наиболее подходящего к условиям геологоразведочных работ (по данным о надежности), были разработаны рекомендации, относящиеся к энергоисточнику, оборудованию трансформаторных подстанций, электродвигателю, аппаратуре управления.

Собственными электростанциями, укомплектованными дизель-агрегатами, мощность которых находится в пределах 15÷630 кВт, а число их типоразмеров превышает 40, по данным Министерства геологии СССР, вырабатывается около 50 % всей потребляемой электроэнергии. Наиболее распространены электростанции ПЭС-15, ДЭС-60р, ДЭСМ-30, ДЭА-100, ДГА-300, ДГ-66 (ДГ-72). Для унификации и сокращения многотипности электростанций в качестве базовой может быть рекомендована единая серия дизель-агрегатов АД. Целесообразно в пределах этой серии иметь пять типоразмеров: АД-30Т/400, АД-50Т/400М, АД-75Т/400, АД-100Т/400, АД-200Т/400. На базе этих дизель-агрегатов выпускают компактные и удобные в эксплуатации передвижные электростанции соответственно: ЭСД-30Т/400, ЭСД-50Т/400М, ЭСД-75Т/400М, ЭСД-100Т/400М, ЭСД-200Т/400.

Все перечисленные электростанции используют в качестве передвижных энергоисточников. Для стационарных электростанций следует применять хорошо зарекомендовавшие себя в работе агрегаты ДГА-300 и ДГ-72 соответственно на 300 и

800 кВт. Принятие единой серии дизель-агрегатов позволит вместо 40 различных марок по отрасли иметь шесть-семь их типоразмеров. Для поисковых работ с успехом могут быть использованы унифицированные бензоагрегаты типа АБ.

При распределении и преобразовании электроэнергии основным узловым звеном являются трансформаторные подстанции. Поскольку при ведении разведочных работ на твердые полезные ископаемые мощности, как правило, невелики, а подстанции требуют частых перемещений, целесообразно применять комплектные трансформаторные подстанции (КТП), трансформаторы которых должны обеспечивать регулирование напряжения под нагрузкой. Такие КТП должны иметь воздушный ввод с использованием телескопических опор и оборудованы счетчиками расхода энергии и фотореле. КТП целесообразно применять в стационарных (на базе поселка) или полустационарных условиях. В качестве основной серии для геологоразведочных работ могут быть приняты трансформаторы типа ТМН с РПН, а в условиях сурового климата и частых перемещений — типа ТСЗ.

Самое рациональное — использование передвижных трансформаторных подстанций (ПТП). Ввиду недостаточного числа ПТП заводского изготовления во многих экспедициях налажено производство самодельных передвижных трансформаторных подстанций, которые имеют существенные недостатки: громоздки вследствие применения АФВ с УАКИ (автоматического фидерного включателя с устройством автоматического контроля изоляции) и не имеют счетчиков расхода электроэнергии. Естественно, что ПТП заводского изготовления должны иметь со стороны низкого напряжения компактный аппарат защиты от утечек, например блок встройки реле УАКИ в сочетании с автоматическим воздушным выключателем, воздушный ввод со стороны высокого напряжения и кабельный — со стороны низкого напряжения. Для распространенных в настоящее время буровых агрегатов следует применять трансформаторы: ТМ 100/6—10 для ЗИФ-650М; ТМ 160/6—10 для ЗИФ-1200МР; ТМ 63/6—10 для СБА-500.

При необходимости комплектования трансформаторной подстанции на месте нужно использовать комплектные распределительные устройства КРУН-10, в которых в качестве коммутационных аппаратов используют выключатели нагрузки ВМП-17 и ВН-11 с токоограничивающими предохранителями типа ВН. По сравнению с масляными выключателями нагрузки имеют меньшую стоимость, а по надежности работы и удобству обслуживания не уступают им (в условиях холодного климата даже превосходят). Для комплектования трансформаторных подстанций напряжением 35 кВ необходимо применять КРУН, укомплектованные масляными выключателями С-35, МКП-35.



Большое значение в бесперебойной работе электропривода и осуществлении контроля за параметрами имеет правильно подобранная аппаратура защиты и управления. Компоновка магнитных станций большинства буровых агрегатов, как показали исследования надежности, не вполне отвечает современным требованиям. Существующие магнитные станции должны быть модернизированы в следующих направлениях: замена плавких предохранителей автоматическими выключателями; применение виброустойчивых счетчиков активной и реактивной энергии; оборудование клемм или розеток для подсоединения осветительной сети, измерительных и электронагревательных приборов; для удобства монтажных работ клеммную колонку следует расположить выше и переконструировать узел ввода кабеля с учетом того, что при проектировании буровых зданий принято решение прокладывать кабели в трубах, заложенных в полу.

Вместе со станцией управления буровыми станками следует поставлять комплект осветительных приборов. Для освещения бурового здания и мачты целесообразны светильники типа «плафон», металлические, с жестким креплением, с двумя сальниковыми вводами, что позволит монтировать их без разветвительных коробок.

Электрооборудование для горно-разведочных работ следует поставлять в рудничном исполнении, так как выпускаемое для угольной промышленности взрывобезопасное оборудование слишком тяжелое, громоздкое и дорогостоящее для условий постоянно перемещаемых геологоразведочных механизмов.

#### **18.4. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОТ ПЕРЕДВИЖНЫХ ЭНЕРГОИСТОЧНИКОВ**

Характер работы потребителей электроэнергии при разведке месторождений предопределяет необходимость использования передвижных энергоисточников на местах независимо от того, какая система электроснабжения принята на данном объекте. При централизованном электроснабжении от дизельной электростанции или государственной сети передвижными источниками энергии у потребителей будут комплекты трансформаторные подстанции (КТП), а при изолированной системе — передвижные электростанции (ЭСД). И хотя эти системы резко отличаются по условиям применения, параметрам и себестоимости электроэнергии, их схемы электроснабжения от передвижного энергоисточника до потребителя практически аналогичны.

В настоящее время от передвижных станций предусматривается обеспечение электроэнергией в основном отдельных технологических потребителей (бурового агрегата, потребителей горно-разведочной выработки). Обычно осуществляется ради-

альная схема электроснабжения при генераторном напряжении с использованием гибкого кабеля площадью сечения  $(3 \times 16) \div (3 \times 35)$  мм<sup>2</sup> и длиной от 60 до 100 м, подключенного к электростанции мощностью от 15 до 100 кВт. Преимущества таких схем — мобильность, быстрота ввода, отсутствие трансформации и протяженных линий электропередач, исключение взаимозависимости потребителей и зависимости их от базы. К числу общих их недостатков относятся низкие энергетические показатели, меньшая надежность, плохое качество энергии и более высокая ее стоимость по сравнению со схемами централизованного электроснабжения.

Присоединение нескольких технологических потребителей к передвижной электростанции при напряжении до 1000 В встречается практически редко, так как появляющиеся при этом их взаимозависимость и потери напряжения в линиях осложняют эксплуатацию. Групповое присоединение к электростанции при генераторном напряжении обычно используется в случае электроснабжения потребителей базы, партии, когда они находятся на небольшом расстоянии от стационарно установленной электростанции. Применение группового присоединения технологических потребителей позволяет увеличить мощность энергоисточника, повысить качество вырабатываемой энергии, снизить ее себестоимость. Однако использование этого подварианта для передвижных потребителей ограничено.

Если при централизованном электроснабжении на месте работ применяются передвижные подстанции, то схема снабжения от понижающей подстанции до потребителя остается такой же, как и при передвижной электростанции. В этом случае только чаще используются низковольтные воздушные линии, а не кабельные. Передвижные трансформаторные подстанции комплектуются в большинстве геологоразведочных партий и состоят из масляных трансформаторов, аппаратуры высокого напряжения, включающей высоковольтные плавкие предохранители и разъединители, низковольтной аппаратуры, представленной автоматическими фидерными выключателями с УАКИ. Все это оборудование монтируют обычно на саях, имеющих ограждение и мачту для воздушного ввода электроэнергии напряжением 6 или 10 кВ.

К недостаткам схем электроснабжения от передвижных энергоисточников относятся разнотипность и громоздкость электрооборудования, а также несоответствие в большинстве случаев его параметров условиям геологоразведочных работ.

Так как в настоящее время около 90 % объема геологоразведочных работ ведется способом бурения, типовые схемы электроснабжения от передвижных энергоисточников составляют применительно к буровым агрегатам. Наиболее распространены буровые агрегаты СБА-500, ЗИФ-650М, ЗИФ-1200МР, поэтому

на основе их установленных мощностей проведены расчеты, выбрано и скомпоновано соответствующее электрооборудование.

Типовые схемы разработаны с учетом присоединенной мощности, степени загрузки электропривода на буровых работах, среднего значения коэффициента мощности при бурении, допустимых расстояний передачи электроэнергии по линиям напряжением до 1000 В, перечня рационального оборудования. В соответствии с этим приняты следующие исходные положения для буровых установок, присоединяемых индивидуально к передвижным энергоисточникам.

Присоединенная мощность потребителей вычисляется по формуле  $P = P_y K_z / \eta$ ; коэффициенты загрузки двигателей агрегатов  $K_z$  и мощности  $\cos \phi$  при бурении приняты равными 0,5; нагрузка двигателя станка при спуско-подъемных операциях предусмотрена максимальной; мощность энергоисточника выбрана на основе присоединенной мощности с учетом  $P_a \geq 1,5 P_{\max}$ ;  $S_a \geq 3 P_{\max}$ , где  $P_a$  и  $S_a$  — соответственно активная и полная мощность применяемого энергоисточника;  $P_{\max}$  — мощность максимального короткозамкнутого двигателя; учтена возможность включения теплоэнергонагревателей мощностью до 20 кВт; комплектация схем электроснабжения оборудованием выполнена в соответствии с приведенными рекомендациями (табл. 18.1).

В табл. 18.1 приведено оборудование для электроснабжения буровых агрегатов при индивидуальном их присоединении к передвижной электростанции или трансформаторной подстанции. В качестве энергоисточников предусмотрено применение унифицированных передвижных трансформаторных подстанций типа

Таблица 18.1

Электрооборудование	Марка оборудования для установки		
	СБА-500	ЗИФ-650М	ЗИФ-1200МР
Провода воздушных линий	АС-16	АС-16	АС-16
Передвижные подстанции	ПТП 63/10	ПТП 110/10	ПТП 160/10
Передвижные электростанции	ЭСД-50Т/400М	ЭСД-50Т/400М	ЭСД-100Т/400М
Кабель	цКРПТ 3×16	КРПТ 3×25	КРПТ 3×70
Главный автомат	Серии АВМ с блоком встройки УАКИ		
Защита двигателей	Автоматические выключатели серий А-1100, АЕ-2000		
Пускатели	Серии ПА и ПМЕ		
Светильники	НПС 835×60/П55-02		
Установленная номинальная мощность, кВт	48	59,9	127

ПТП или передвижных электростанций серии ЭДС по первой степени автоматизации.

Преимущества рекомендуемых комплектаций заключаются в том, что предусматривается применение компактного надежного передвижного унифицированного оборудования, наиболее полно отвечающего условиям ведения геологоразведочных работ и обеспечивающего получение лучших энергетических параметров. Все включенное в схемы оборудование выпускается серийно и не требует особых усовершенствований и реконструкций.

Для колонкового разведочного бурения на твердые полезные ископаемые (УКБ) существующие буровые агрегаты заменяют новыми установками. Особенности этих буровых установок являются: комплектное изготовление в заводских условиях, что позволяет применить более совершенное электрооборудование и измерительные приборы; увеличенные частоты вращения бурового снаряда и большая мощность приводного двигателя; повышение уровня механизации и автоматизации отдельных операций и улучшение условий труда рабочих.

Групповое присоединение буровых установок к передвижным энергоисточникам на генераторном напряжении, как отмечалось выше, применяется ограниченно. Поскольку комплектация линии к каждому потребителю остается такой же, как и при индивидуальном электроснабжении от передвижного энергоисточника, задача разработки подварианта группового присоединения сводится к определению расчетной мощности энергоисточника и его выбору в соответствии с принятой номенклатурой оборудования. Такие схемы могут быть рассмотрены для двух, максимум трех буровых установок, питаемых одновременно от одного энергоисточника.

## **18.5. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ**

*Методы определения нагрузок и мощности трансформаторных подстанций.* Известно несколько методов расчета мощности трансформаторных подстанций по: графику суточной нагрузки, коэффициенту спроса, удельным расходам электроэнергии и пр. Наибольшее распространение на геологоразведочных работах получил метод расчета по установленной мощности и коэффициенту спроса (см. гл. 15 и 17).

*Порядок расчета электрических сетей и линий электропередач.* При расчете электрических сетей и линий электропередач составляют план и схему расположения электроустановок и определяют нагрузки на каждую линию. Задачей расчета является определение минимально допустимых сечений проводов и кабелей, которые выбирают по тепловому режиму (допустимым

нагрузкам). В соответствии с Правилами устройства электроустановок (ПУЭ) каждому стандартному сечению проводов соответствует определенная предельно допустимая токовая нагрузка. Выбранные по нагрузке сечения проводов должны быть проверены по допустимой потере напряжения. Проверку сечения по экономической плотности тока и на термическую устойчивость в условиях работы ГРП в соответствии с ПУЭ можно не проводить.

Расчет электрических сетей и линий электропередач геологоразведочных работ проводят в том же порядке, что и проектирование электрических сетей шахт и карьеров (см. гл. 15 и 17).

#### **Контрольные вопросы**

1. Варианты схем электроснабжения геологоразведочных работ.
2. Электростанции на геологоразведочных работах.
3. Особенности расчета электроснабжения геологоразведочных работ.

## **Глава 19 ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОХОЗЯЙСТВА ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

### **19.1. УПРАВЛЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ ЭЛЕКТРОХОЗЯЙСТВА**

Основная задача эксплуатации электрохозяйства заключается в организации такого обслуживания электрических сетей и электрооборудования, при котором отсутствовали бы производственные простои из-за неисправности электроустановок, обеспечивалось надлежащее качество электроэнергии и сохранность электрооборудования в течение длительного времени эксплуатации, при минимальном расходе электрической энергии и эксплуатационных материалов.

В зависимости от масштабов и характера производства практика отечественных горнодобывающих предприятий вырабатала две основные формы управления электрохозяйством.

1. В угольной промышленности на уровне производственного объединения (ПО) энергомеханическая служба является отдельным структурным подразделением аппарата управления объединения. Главный энергетик входит в состав руководства энергомеханической службы и административно подчиняется главному механику объединения. Главный энергетик ПО возглавляет эксплуатацию подземного электрохозяйства, поверхностных сетей и подстанций, организацию ремонтов и наладок электрооборудования, учета и нормирования энергопотребления. В ведении главного энергетика находится электроцех в составе центральных электромеханических мастерских или ремонтно-механического завода. Кроме того, главный энергетик

ПО осуществляет техническое руководство работой главных энергетиков шахт.

На уровне шахты энергомеханическая служба является отдельным структурным подразделением, возглавляемым главным механиком шахты. Руководство эксплуатацией электроэнергетических объектов возглавляется главным энергетиком шахты, осуществляющим также техническое руководство эксплуатацией электрохозяйства на участках. Механики участков, руководящие работой участкового электромеханического персонала, административно не подчинены главному энергетiku шахты.

2. В горнорудной промышленности система управления электрохозяйством является более централизованной, так как на горно-обогатительных комбинатах (ГОКах), в производственных объединениях и рудоуправлениях все действующие электроустановки эксплуатируются единой электротехнической службой, возглавляемой главным энергетиком соответственно ГОКа, объединения или рудоуправления. Электротехническая служба является самостоятельным структурным подразделением аппарата управления, и, следовательно, главный энергетик административно не подчинен главному механику. В ведении главного энергетика ГОКа, объединения или рудоуправления наряду с чисто электротехнической службой находятся также службы отопления, теплоснабжения, водоснабжения и канализации. Каждая из служб эксплуатации может возглавляться соответствующим заместителем главного энергетика.

На уровне рудника электротехническая служба также является отдельным структурным подразделением, возглавляемым главным энергетиком рудника. На крупных рудниках в составе электротехнической службы выделяется участок внешних ремонтов (служба эксплуатации сетей и подстанций), возглавляемый начальником участка. Руководители электромеханических служб на участках — механики участков подчинены главному энергетiku функционально.

Главный энергетик шахты или рудника обязан обеспечить:

- а) надежную, экономичную и безопасную работу электроустановок;
- б) разработку и внедрение мероприятий по экономии электроэнергии, удельных норм на единицу продукции, а также повышению коэффициента мощности;
- в) внедрение новой техники в электрохозяйство, способствующей более надежной, экономичной и безопасной работе электроустановок, а также повышению производительности труда;
- г) организацию и своевременное проведение планово-предупредительного ремонта и профилактических испытаний электрооборудования и сетей;
- д) организацию обучения, инструктирование и периодическую проверку знаний подчиненного персонала, обслуживающего электроустановки;
- е) систематическое наблюдение за графиком нагрузки предприятия и принятие мер по поддержанию режима,

установленного энергосистемой; ж) организацию учета электроэнергии, ведение установленной отчетности и своевременное ее представление вышестоящим организациям; з) наличие и своевременную проверку защитных средств и противопожарного инвентаря; и) выполнение предписаний Госэнергонадзора и Госгортехнадзора в установленные актами сроки; к) своевременную организацию расследования аварий в электроустановках, а также несчастных случаев по поражению электрическим током.

Как видно из вышензложенного, круг задач по управлению электрохозяйством шахты или рудника является широким. Так, только по линии обеспечения защиты от токов к. з. в электроустановках напряжением до 1000 В главный энергетик шахты или рудника следит за техническим осуществлением системы защиты от токов к. з. и непосредственно организует:

а) проверку, отработку и замену устройств максимальной токовой защиты на месте установки и обслуживания аппаратов, а также выдачу на поверхность и дальнейшую повторную градуировку снятых устройств либо на предприятии, либо в специализированных организациях;

б) составление схемы электроснабжения и плана кабельной сети шахты или рудника в целом с указанием на них величин токов к. з., уставок и плавких вставок защиты всех неискробезопасных электроустановок и сетей;

в) согласование правильности составления схем электроснабжения шахты (рудника) и утверждение их в объединении (комбинате, рудоуправлении) с целью укомплектования оперативной части плана ликвидации аварий и передачи его командиру части ВГСЧ, обслуживающей район расположения шахты (рудника);

г) ведение журнальной документации по проверке и настройке установок защиты;

д) оформление нарядов на производство работ в действующих подземных электроустановках по проверке устройств защиты электротехническим персоналом предприятия или наладочных организаций.

Участковый электромеханический персонал кроме обслуживания механической части машин и механизмов должен выполнять также следующий объем эксплуатационных и ремонтных работ в электроустановках: а) обеспечивать надежную непрерывную работу участкового электрооборудования; б) производить профилактический осмотр, проверку исправности и плановое устранение мелких неисправностей в электрооборудовании (аппаратах, контактной сети, электровозах, конвейерах и т. д.); в) ликвидировать неисправности в электрооборудовании, возникающие в процессе работы; производить монтаж и включение его в работу взамен вышедшего из строя.

## 19.2. ПЛАНОВО-ПРЕДУПРЕДИТЕЛЬНЫЙ РЕМОНТ

Планово-предупредительный ремонт (ППР) проводят по заранее намеченному плану, устанавливающему сроки, объемы и длительность этих ремонтов, и направлен на предупреждение неожиданного выхода электрооборудования из строя и резкого ухудшения его состояния.

Система ППР — это комплекс организационно-технических мероприятий по уходу, надзору и ремонту электрооборудования, направленных на обеспечение его безаварийной и экономичной работы. В этот комплекс входят: техническое обслуживание; текущие средние и капитальные ремонты, осуществляемые периодически через определенные сроки, устанавливаемые графиками ППР; профилактические испытания; модернизация.

Под техническим обслуживанием понимают комплекс работ (предпусковые, пусковые и периодические осмотры, проверки, ревизии, наладки и испытания), выполняемых в установленные сроки электротехническим персоналом шахт и рудников, специализированных монтажных и наладочных организаций, для поддержания исправности или только работоспособности электрооборудования при подготовке и использовании по назначению.

Осмотр — оценка по внешним признакам состояния, условий размещения и содержания электроустановок. Осмотр производится без вскрытия оболочек и разборки аппаратов.

Проверка — сравнение по характерным функциональным признакам фактического состояния и режимов работы электрооборудования и его узлов с параметрами, установленными техническим паспортом, правилами или нормами. Проверка проводится как без вскрытия оболочек, так и со вскрытием с помощью средств измерения и контроля.

Ревизия — предпусковой или межремонтный осмотр и поэлементная проверка электроустановки с разборкой, чисткой, регулировкой и заменой отдельных узлов и деталей, производимые в целях обеспечения ее нормальной работы, до следующей ревизии, а также выявления необходимости, срока и объема ремонта или замены.

Наладка — выявление и приведение фактических отклонений от режима работы, конструктивных и схемных решений, установленных для объекта наладки, в соответствие с техническими условиями, правилами и нормами. Наладка обеспечивает четкое взаимодействие и срабатывание механических узлов и деталей, устройств защиты и управления, надежность, безопасность и экономичность последующей эксплуатации.

Испытания — измерение по специальным программам и методикам физических величин; исследование нагрузочных характеристик; анализ диэлектрических свойств изоляции и других



параметров испытываемого электрооборудования в целях вскрытия ошибок монтажа и наладки, отклонений от установленных нормируемых показателей, пригодности его использования в заданных режимах и условиях.

Весь комплекс работ по техническому обслуживанию действующих подземных электроустановок организует и контролирует главный энергетик шахты или рудника в сроки, установленные требованиями отраслевых правил безопасности.

Текущий ремонт — вид ремонта, при котором проводятся чистка, замена или ремонт быстроизнашивающихся частей, регулировка узлов и механизмов, что позволяет обеспечить безотказную работу электрооборудования на протяжении всего межремонтного периода. Текущий ремонт проводится на месте установки электрооборудования с его остановкой и отключением силами сменного и ремонтного электротехнического и обслуживающего персонала.

Средний ремонт — более сложный вид ремонта по сравнению с текущим. При среднем ремонте производится полная или частичная разборка электрооборудования, ремонт или замена изношенных деталей и узлов, восстановление качества изоляции, регулировка, наладка и испытания. Средний ремонт, как правило, проводится в электроремонтных цехах, мастерских или на близко расположенных базах централизованного ремонта. Средний ремонт нетранспортабельного электрооборудования проводится на месте установки силами специализированных ремонтных бригад.

Капитальный ремонт — это наибольший по объему и сложности вид ремонта, целью которого является восстановление всех номинальных характеристик и параметров оборудования с обеспечением его работоспособности в течение гарантийного срока до очередного капитального ремонта. При капитальном ремонте проводятся полная разборка электрооборудования, восстановление или замена изношенных деталей и узлов, включая базовые, регулировка, наладка и испытание в полном объеме. Капитальный ремонт проводится либо в электроремонтных цехах объединений или комбинатов, либо в специализированных ремонтных организациях. Капитальный ремонт нетранспортабельного электрооборудования проводится на месте установки силами электроремонтного цеха или специализированной организации. Периодичность ремонтов электрооборудования приведена в табл. 19.1.

Ремонт взрывозащищенного электрооборудования могут проводить только предприятия, зарегистрированные в органах Госгортехнадзора, технически подготовленные и имеющие специальные разрешения вышестоящей организации.

Под модернизацией понимается внесение в конструкцию оборудования изменений и усовершенствований с целью улучшения

Таблица 19.1.

Электрооборудование	Текущий ремонт	Капитальный ремонт
Распределительные устройства напряжением более 1000 В: масляные выключатели и их приводы, выключатели нагрузки воздушные выключатели и их приводы разъединители, заземляющие ножи короткозамыкателей и делителей и их приводы	По мере необходимости То же »	Не реже 1 раза в 3 года Не реже 1 раза в 2—3 года Не реже 1 раза в 3 года
Трансформаторы: подстанций	Не реже 1 раза в год	Через 6 лет после включения в эксплуатацию, в дальнейшем — в зависимости от результатов измерения и состояния
установленные в местах усиленного загрязнения все остальные	По местным инструкциям Не реже 1 раза в 3 года	По результатам испытаний То же
Кабельные линии напряжением до и более 1000 В	По результатам осмотров и испытаний	По результатам осмотров и испытаний
Распределительные устройства напряжением до 1000 В Электродвигатели	Не реже 1 раза в год По местным инструкциям	Не реже 1 раза в 3 года Не реже 1 раза в 2 года
Конденсаторные установки	Не реже 1 раза в год	Исходя из местных условий

технико-экономических показателей его работы: производительности, мощности, надежности, экономичности, долговечности, ремонтпригодности и др. Работы по модернизации должны производиться во время капитального ремонта.

### 19.3. ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЭЛЕКТРОХОЗЯЙСТВА

Основные организационные и технические положения по эксплуатации электрохозяйства шахт и рудников изложены в ПУЭ, ПТЭ электроустановок потребителей, отраслевых ПБ, ПТЭ, инструкциях и руководствах.

Одним из условий правильной эксплуатации электрохозяйства является своевременное проведение ППР и периодических профилактических испытаний электрооборудования и сетей.

Надежность подземного электроснабжения в значительной степени определяется правильным планированием ремонтно-профилактического обслуживания. Основные вопросы, решаемые

мые при планировании, заключаются в определении объемов работ, периодичности и длительности обслуживания, численности обслуживающего персонала.

Совершенствование системы технического обслуживания и ремонта заключается в развитии комплекса мероприятий, обеспечивающих поддержание надежности электрооборудования на высоком уровне и его восстановление при минимальных затратах времени и средств. Для электрооборудования напряжением до 1000 В очистных и подготовительных участков рациональной является двухконтурная система обслуживания.

Сущность двухконтурной системы заключается в том, что обслуживание проводится непрерывно сменным персоналом, находящимся на участке, и выездными ремонтными бригадами (периодически). Сочетание местного и центрального обслужи-

Таблица 19.2.

Мероприятия	Сроки проведения (кто проводит)	
	Шахты	Рудники
Осмотр всех электрических машин, аппаратов, трансформаторов, их взрывобезопасных оболочек, кабелей, заземлений	1 раз в смену (лица, работающие на машинах и механизмах, и дежурные электрослесари участка);  1 раз в неделю (механик участка или лицо, его заменяющее); не реже 1 раза в 3 мес (главный энергетик или назначенное им лицо)	1 раз в смену (лица, работающие на машинах и механизмах, и дежурные электрослесари);  1 раз в сутки (механик участка);
Проверка максимальной токовой защиты подземных электроаппаратов	Перед спуском в шахту; перед включением в сеть; в период эксплуатации не реже 1 раза в 6 мес при напряжении до 1000 В и не реже 1 раза в год при напряжении выше 1000 В	Перед спуском в рудник; не реже 1 раза в год
Измерение сопротивления изоляции электрооборудования и кабелей	После монтажа и переноски; после аварийного отключения защиты; после длительного пребывания в бездействии; для стационарного электрооборудования периодически, но не реже 1 раза в год	После монтажа и переноски; после аварийного отключения защиты; после длительного бездействия, но не реже 1 раза в 3 мес
Проверка реле утечки на срабатывание Проверка общего времени отключения сети под действием реле утечки	Перед началом каждой смены Не реже 1 раза в 6 мес	Перед началом каждой смены Не реже 1 раза в 6 мес

вания позволяет не допускать длительных простоев участков из-за отказов электрооборудования, выполнять более качественно его ремонт и эффективнее использовать имеющийся резерв обменных блоков и запасных частей.

В состав сменного технического обслуживания входят предусмотренные отраслевыми ПБ и ПТЭ внешние осмотры электрооборудования, кабелей и заземлений. Практика показывает, что для технического обслуживания и восстановления участковой сети достаточно иметь одного электрослесаря в смену на каждом добычном участке.

Централизованное обслуживание предусматривает проведение периодических плановых ревизий и наладок, а также плановых замен блоков с их последующим ремонтом в стационарных условиях. Отраслевые ПБ и Единые правила безопасности (ЕПБ) регламентируют периодичность проведения осмотров и ревизий подземного электрооборудования (табл. 19.2).

В состав ремонтных бригад должны включаться наиболее опытные работники, так как с увеличением стажа работы электрослесарей по специальности сокращаются затраты времени на организацию ремонта.

Основными вопросами планирования технического обслуживания являются определение периода, когда процесс накопления неисправностей не достиг критического предела, и установление его длительности, обеспечивающей максимальную эффективность дальнейшего функционирования электрооборудования. Исходными данными при этом являются количественные значения наработки на отказ элементов и блоков, характер возникающих отказов и закономерность их распределения, требуемый объем работ.

#### **19.4. ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК НА ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТАХ**

Стационарные установки принимаются в эксплуатацию специальной комиссией, а передвижные — главным энергетиком партии. Приемной комиссией должна быть представлена документация, включающая в себя технический проект, исполнительные чертежи и электрические схемы, протоколы испытания электрооборудования и т. д. Ответственным за эксплуатацию и безопасность обслуживания всех электроустановок геологоразведочного предприятия является главный энергетик экспедиции (партии). Он должен обеспечить: экономичную и безопасную работу электроустановок, разработку мероприятий по экономии электроэнергии и повышению коэффициента мощности, внедрение новой техники, организацию своевременного ремонта, обучения обслуживающего персонала, борьбы с авариями, учета электроэнергии.

Эксплуатация электрохозяйства геологоразведочной партии должна вестись в строгом соответствии с Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей, Правилами устройства электроустановок (ПУЭ), Правилами безопасности при геологоразведочных работах.

В каждой геологоразведочной партии должна быть принципиальная схема электрической сети, на которой отмечаются все подстанции, распределительные и приключательные пункты, а также потребители электрической энергии. На схеме указываются напряжение, марки проводов и кабелей, мощность установок, расположение аппаратуры.

Все изменения в электроснабжении должны отмечаться на схеме. На каждую электрическую установку составляется инструкция по эксплуатации, в которой регламентируются сроки ее осмотров и ревизий.

В подстанциях и приключательных пунктах должны вывешиваться их электрические схемы, схемы питающих и отходящих линий, инструкции для обслуживающего персонала. Подстанции должны быть оборудованы телефонной или радиосвязью, а также защитными средствами.

Эксплуатация воздушной линии предусматривает периодический контроль за состоянием трассы, нагрузкой и изоляцией линии, а также за состоянием соединительных контактов, древесины опор, заземления и грозозащитной аппаратуры. Периодические осмотры воздушных линий напряжением до 10 кВ проводят монтеры один раз в месяц. Верховые осмотры проводов, траверс и изоляторов на отключенной линии должны выполняться не реже одного раза в два года.

Проверку деревянных опор на загнивание проводят специальным щупом два раза в год, а траверсы — один раз в год, начиная с третьего года после сооружения. Проверку габаритных размеров линии теодолитом делают один раз в три года, при этом отклонения от нормы не должны превышать 5 %. В сетях низкого напряжения проверяют неравномерность загрузки фаз и уровней напряжения (у подстанций и в конце линии) не реже двух раз в год. Все замеченные во время обходов и проверок дефекты должны быть записаны в журнал и своевременно устранены. Ремонтно-профилактические работы на воздушных линиях, связанные с подъемом, ведутся при снятом напряжении звеном, состоящим не менее чем из двух человек. К работам звено приступает после того, как проверит отсутствие напряжения, установит защитное заземление и предупредяющий плакат у места включения. С приближением грозы работы на линии прекращаются.

Эксплуатация кабельных линий начинается с испытания их повышенным напряжением, при этом ток утечки не должен превышать 500 мкА. В процессе эксплуатации кабельных ли-

ний необходимо систематически проверять подвеску кабелей, соединительные муфты, заземление, состояние кабельных каналов. Кабельные трассы должны отмечаться пикетными столбиками и осматриваться не реже одного раза в месяц. Открыто проложенные кабели осматривают не реже двух раз в году. Во время таяния снега, паводков и после ливней необходимо проводить внеочередные осмотры трасс. Самый тщательный контроль должен осуществляться за тем, чтобы на трассе не производились работы, не согласованные с организацией, эксплуатирующей кабели.

Гибкие кабели, находящиеся под напряжением, не должны находиться в бухтах. Целостность резиновой изоляции и исправность присоединения заземляющей жилы к контуру заземления и корпусу машины необходимо проверять каждую смену. Замер сопротивления изоляции резинового кабеля делают не реже одного раза в месяц. Ремонтно-профилактические работы на кабельных линиях проводят при снятом напряжении, заземлении концов и выставлении плакатов «Не включать — работы на линии».

Ремонт электросетей и электроустановок делают в плановом порядке. Правилами технической эксплуатации предусматриваются плановые текущие и капитальные ремонты. При текущем ремонте производят осмотр и исправление небольших дефектов. Капитальный ремонт предусматривает отправку оборудования в электроцех, замену части опор, смену до 10 % изоляторов, траверс и пр. Ремонт линий электропередач проводят, как правило, в летний период, когда более дешевые земляные работы и лучшие климатические условия.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

---

1. *Взрывобезопасное электрооборудование на 1140 В для угольных шахт*/Под ред. Е. С. Траубе. — М.: Недра, 1982.
2. *Взрывобезопасность рудничного электрооборудования*/Под ред А. А. Каймакова. — Кемерово: ВостНИИ, 1978.
3. *Дзюбан В. С., Римап Я. С., Маслий А. К. Справочник энергетика угольной шахты.* — М.: Недра, 1983.
4. *Ключев В. И. Теория электропривода.* — М.: Энергоатомиздат, 1985.
5. *Колосюк В. П. Защитное отключение рудничных электроустановок.* — М.: Недра, 1980.
6. *Костюк В. С., Волкова Л. П., Травкин Е. К. Синтез системы управления электроприводом струга.* — Свердловск: Изв. вузов. Горный журнал, 1981, № 11, с. 117—120.
7. *Лимитовский А. М. Электрооборудование и электроснабжение геологоразведочных работ.* — М.: Недра, 1986.
8. *Нормирование топливно-энергетических ресурсов и регулирование режимов электропотребления*/Под. общ ред. В. В. Дегтярева. — М.: Недра, 1983.
9. *Основы взрывозащищенности электрооборудования*/Н. Ф. Шевченко, М. В. Харунжий, Н. А. Бойков и др. — М.: Энергоиздат 1982.
10. *Правила устройства электроустановок.* — М.: Энергоатомиздат, 1985.
11. *Стариков Б. Я., Азарх В. Л., Рабинович З. М. Асинхронный электропривод очистных комбайнов.* — М.: Недра, 1981.
12. *Цапенко Е. Ф., Мирский М. И., Сухарев О. В. Горная электротехника.* — М.: Недра, 1986.
13. *Чиликин М. Г., Сандлер А. С. Общий курс электропривода.* — М.: Энергоиздат, 1981.
14. *Шуцкий В. И., Волощенко Н. И., Плащанский Л. А. Электрификация подземных горных работ.* — М.: Недра, 1986.
15. *Электрооборудование и электроснабжение участка шахты*/Р. Г. Беккер, В. В. Дегтярев, Л. В. Седаков и др. — М.: Недра, 1983.
16. *Электропривод и электрификация открытых горных работ*/Б. П. Бельх, В. И. Шуцкий, Б. И. Заславец и др. — М.: Недра, 1982.
17. *Электротехнический справочник.* Изд. 2-е. — М.: Госэнергоиздат, 1982, т. III.
18. *Энергетика СССР в 1981—1985 годах.* — М.: Энергоиздат, 1981.

## АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

---

- Автоматический выключатель 192, 196  
Агрегат пусковой 200  
Аппаратура защиты 186, 192, 273  
— защитного отключения 172  
Асинхронный двигатель 40, 41, 53  
Асинхронно-вентильный каскад 115, 116
- Блокировочное реле утечки 201  
Бронированный кабель 218
- Взрывонепроницаемость 193, 197  
Внешнее электроснабжение 149  
Внутреннее электроснабжение 204
- Генератор—двигатель система 111, 130  
Глубокий ввод 149
- Диапазон регулирования угловой скорости 95  
Дистанционное управление 199, 201  
Дроссель 175
- Емкость сети 167
- Жесткость механической характеристики 24
- Заземление защитное 171, 172  
Защита максимальная токовая 187, 201  
— минимальная 188  
— нулевая 189  
— от утечки 173  
— тепловая 190
- Инвертор 118, 119, 139
- Кабели бронированные 218, 220  
— гибкие 219  
— особо гибкие 221  
Кабелеукладчик 255  
Кварцевое заполнение оболочки 218  
Контактор 200, 202  
Концевая опора 249  
Коррекция параллельная 129  
— последовательная 129  
Коэффициент загрузки 158, 227, 275  
— мощности 236, 275  
— спроса 161, 224  
Краткость максимального момента 225
- Линия магистральная 151, 243  
— радиальная 151, 242  
— электропередач 244
- Максимальный ток 188  
Метод средних потерь 76  
— эквивалентного тока 77  
— эквивалентной мощности 78  
— эквивалентного момента 78  
Механизм свободного расцепления 192  
Момент вращающий 11  
— активный 17  
— динамический 11  
— инерции 10  
— критический 42  
— максимальный 41  
— пусковой 42  
— реактивный 17  
— сопротивления 11, 17
- Нагрузочная диаграмма 74  
Напряжение прикосновения 163  
— фазное 167  
Нейтраль заземленная 165  
— изолированная 166  
Номинальная мощность 224, 269
- Оболочка взрывонепроницаемая 192  
Опасность электрического тока 162  
Отключение защитное 172, 174  
Относительные единицы 24
- Переходный процесс 56  
— механический 58  
— электромагнитный 64  
— тепловой 68  
Плавкая вставка 188  
Постоянная времени нагрева 70  
— электромагнитная 65  
— электрохимическая 58  
Потеря напряжения 227  
Преобразователь частоты 118  
— двигатель система 118, 119  
Продолжительность включения 82  
Пуск 91, 97, 98, 103, 105  
Пускатель нереверсивный 197  
— реверсивный 197, 202
- Расцепитель максимальный 194  
— независимый 194  
Регулирование скорости 95  
Регулятор пропорциональный 134



— пропорционально - интегральный 134

Режим работы электропривода 25

— двигательный 25

— динамического торможения 26, 32, 38, 49

— кратковременный 73

— повторно-кратковременный 73

— продолжительный 73

— противовключения 26, 32, 39, 52

— рекуперативный 26, 31, 48

— установившийся 23

Реле максимального тока 188

— утечки 173

Синхронный двигатель 54

Скольжение 40

— критическое 41

Сопротивление растеканию тока 172

Тариф на электроэнергию 239, 262

Температура окружающей среды 69

— перегрева 69

Ток утечки емкостный 167

— отпускающий 162

— неотпускающий 163

— осязательный 162

Торможение 90

Угловая опора 248

Угловая скорость 11

— синхронная 40

Управление 86

— ручное 86

— полуавтоматическое 86

— автоматическое 87

— программное 87, 88

Управляемый выпрямитель 112

— двигатель система 112, 113

Уравнение движения электропривода 9, 10, 11, 12

Уставка защиты 230

Устойчивость электропривода статическая 26

Фибрилляция 163

Форсирование переходного процесса 66, 67

Характеристика электропривода 23

— естественная 23

— искусственная 23

— механическая 23

— электрохимическая 23

— экскаваторная 130, 131

Центральная подземная подстанция 215

Центральный распределительный пункт 243

Эквивалентный ток 77

— момент 78

— Экономичность регулирования 96

Электробезопасность 162

Электровооруженность труда 241

Электропривод 5

— взаимосвязанный 6

— групповой 5

— индивидуальный 6

— многодвигательный 6

Электроснабжение очистных работ 210

— подготовительных работ 210

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение . . . . .	3
<b>Часть первая. ЭЛЕКТРОПРИВОД ГОРНЫХ МАШИН . . . . .</b>	<b>5</b>
<b>Глава 1. Общие сведения . . . . .</b>	<b>5</b>
1.1. Определение понятия «электропривод» . . . . .	5
1.2. Особенности электропривода горных машин . . . . .	7
<b>Глава 2. Основы механики электропривода . . . . .</b>	<b>9</b>
2.1. Уравнения движения электропривода . . . . .	9
2.2. Виды моментов сопротивления . . . . .	17
2.3. Приведение моментов и сил сопротивления, инерционных масс, моментов инерции . . . . .	19
2.4. Время пуска и торможения электропривода . . . . .	22
<b>Глава 3. Электромеханические свойства электроприводов в установившихся режимах . . . . .</b>	<b>23</b>
3.1. Основные определения . . . . .	23
3.2. Статическая устойчивость электроприводов . . . . .	26
3.3. Электромеханические свойства электроприводов с двигателями постоянного тока независимого возбуждения . . . . .	27
3.4. Электромеханические свойства электроприводов с двигателями постоянного тока последовательного возбуждения . . . . .	35
3.5. Электромеханические свойства электроприводов с асинхронными двигателями . . . . .	40
3.6. Электромеханические свойства электроприводов с синхронными двигателями . . . . .	54
<b>Глава 4. Переходные процессы в электроприводах . . . . .</b>	<b>56</b>
4.1. Общие сведения о переходных процессах в электроприводах . . . . .	56
4.2. Механические переходные процессы . . . . .	58
4.3. Электромагнитные переходные процессы . . . . .	64
4.4. Тепловые переходные процессы . . . . .	68
<b>Глава 5. Выбор по мощности электродвигателей . . . . .</b>	<b>72</b>
5.1. Общие сведения . . . . .	72
5.2. Выбор по мощности электродвигателей при продолжительном режиме работы ( $S_1$ ) . . . . .	75
5.3. Выбор по мощности электродвигателей при кратковременном ( $S_2$ ) и повторно-кратковременном ( $S_3$ ) режимах работы . . . . .	79
<b>Глава 6. Общие вопросы управления электроприводами . . . . .</b>	<b>86</b>
6.1. Функции систем управления электроприводами, их классификация и предъявляемые к ним требования . . . . .	86
6.2. Условные обозначения в электроприводе и принципы начертания схем . . . . .	88
6.3. Общие вопросы пуска, торможения и регулирования угловой скорости электроприводов . . . . .	90
<b>Глава 7. Разомкнутые системы управления электроприводами . . . . .</b>	<b>97</b>
7.1. Пуск и торможение электроприводов . . . . .	97
7.2. Регулирование угловой скорости электроприводов постоянного тока . . . . .	108

7.3. Регулирование угловой скорости электроприводов переменного тока	114
7.4. Типовые схемы управления асинхронными короткозамкнутыми двигателями	121
<b>Глава 8. Замкнутые системы управления электроприводами</b>	<b>126</b>
8.1. Общие сведения	126
8.2. Системы автоматического управления электроприводами с двигателями постоянного тока	128
8.3. Автоматическое управление электроприводами с асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором	138
8.4. Основные направления в области дальнейшего развития электропривода горных машин	141
<b>Часть вторая. ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ГОРНЫХ МАШИН</b>	<b>145</b>
<b>Глава 9. Системы электроснабжения горных предприятий</b>	<b>145</b>
9.1. Общие сведения	145
9.2. Энергетическая система и ее составные части	146
9.3. Категории электроприемников	147
9.4. Схемы питания предприятий электроэнергией	149
9.5. Схемы распределения электроэнергии на предприятии	151
<b>Глава 10. Электрические нагрузки горных предприятий</b>	<b>154</b>
10.1. Общие сведения	154
10.2. Графики нагрузки	154
10.3. Основные величины, характеризующие электрические нагрузки	158
10.4. Методы определения электрических нагрузок	161
<b>Глава 11. Электробезопасность при электроснабжении горных машин</b>	<b>162</b>
11.1. Действие электрического тока на организм человека	162
11.2. Режимы нейтрали электрических сетей	164
11.3. Назначение, устройство и расчет защитного заземления	169
11.4. Контроль изоляции и защитное отключение	172
11.5. Изолирующие полы и площадки, средства личной защиты	176
<b>Глава 12. Устройство электрических сетей и подстанций</b>	<b>177</b>
12.1. Классификация электрических сетей	177
12.2. Распределительные устройства	178
12.3. Система сборных шин	180
12.4. Схемы и конструкции распределительных устройств напряжением до 1000 В	182
12.5. Схемы распределительных устройств и подстанций напряжением выше 1000 В	183
<b>Глава 13. Электрическая аппаратура защиты и управления</b>	<b>186</b>
13.1. Назначение и классификация электрической аппаратуры	186
13.2. Аппаратура защиты	187
13.3. Аппаратура ручного управления	190
13.4. Автоматические выключатели	192
13.5. Электромагнитные пускатели	197
<b>Глава 14. Электроснабжение подземных горных работ</b>	<b>204</b>
14.1. Требования, предъявляемые к схемам электроснабжения подземных горных работ	204
14.2. Электроснабжение подземных выработок через ствол	205
14.3. Электроснабжение подземных выработок через шурфы и скважины	208
14.4. Электроснабжение очистных и подготовительных участков	210

14.5. Участковые распределительные пункты и трансформаторные подстанции . . . . .	215
14.6. Шахтные кабели . . . . .	218
<b>Глава 15. Расчет электроснабжения подземных горных работ . . . . .</b>	<b>222</b>
15.1. Общие сведения . . . . .	222
15.2. Выбор мощности трансформатора участковой подстанции . . . . .	223
15.3. Расчет кабельной сети участка . . . . .	225
15.4. Расчет токов короткого замыкания в низковольтной сети участка . . . . .	228
15.5. Выбор защитной аппаратуры и расчет уставок токовой защиты в низковольтной сети участка . . . . .	230
15.6. Порядок расчета электроснабжения и выбора электрооборудования для участка шахты . . . . .	231
<b>Глава 16. Техничко-экономические показатели электроснабжения угольных шахт . . . . .</b>	<b>232</b>
16.1. Общие сведения . . . . .	232
16.2. Расход электроэнергии . . . . .	233
16.3. Экономия электроэнергии . . . . .	235
16.4. Коэффициент мощности. Компенсация реактивной мощности . . . . .	236
16.5. Определение платы за электроэнергию . . . . .	239
16.6. Электровооруженность труда . . . . .	241
<b>Глава 17. Электроснабжение открытых горных работ . . . . .</b>	<b>242</b>
17.1. Общие сведения . . . . .	242
17.2. Схемы электроснабжения открытых горных работ . . . . .	243
17.3. Особенности карьерных распределительных сетей . . . . .	247
17.4. Схемы и устройство карьерных передвижных подстанций и приключательных пунктов . . . . .	250
17.5. Особенности электроснабжения комплексов непрерывного действия и гидромеханических установок . . . . .	254
17.6. Электроснабжение дренажных выработок . . . . .	257
17.7. Электроснабжение технологического комплекса, поверхности и внешних отвалов . . . . .	259
17.8. Особенности расчета карьерных сетей . . . . .	260
17.9. Техничко-экономический анализ схем электроснабжения карьеров . . . . .	262
<b>Глава 18. Электроснабжение геологоразведочных работ . . . . .</b>	<b>263</b>
18.1. Схемы электроснабжения . . . . .	263
18.2. Электростанции на геологоразведочных работах . . . . .	267
18.3. Электрооборудование геологоразведочных работ . . . . .	270
18.4. Электрооборудование системы электроснабжения от передвижных энергоисточников . . . . .	273
18.5. Расчет электроснабжения геологоразведочных работ . . . . .	276
<b>Глава 19. Организация эксплуатации электрохозяйства горных предприятий . . . . .</b>	<b>277</b>
19.1. Управление эксплуатацией электрохозяйства . . . . .	277
19.2. Планово-предупредительный ремонт . . . . .	280
19.3. Техническая эксплуатация электрохозяйства . . . . .	282
19.4. Эксплуатация электроустановок на геологоразведочных работах . . . . .	284
Список литературы . . . . .	287
Алфавитный указатель . . . . .	288