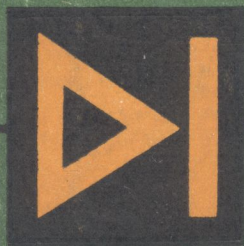


62-55
E-81

В. П. Есаков



**ЭЛЕКТРО -
ОБОРУДОВАНИЕ
И ЭЛЕКТРОПРИВОД
ПРОМЫШЛЕННЫХ
УСТАНОВОК**

62-83

Е 81

В. П. Есаков

ЭЛЕКТРО - ОБОРУДОВАНИЕ И ЭЛЕКТРОПРИВОД ПРОМЫШЛЕННЫХ УСТАНОВОК

270048

*Допущено Министерством
высшего и среднего специаль-
ного образования СССР
в качестве учебного пособия
для студентов заочной формы
обучения энергетических
специальностей вузов*

**НТБ ВПИ
г. Винница**

ABONEMENT-4

Киев
Головное издательство
издательского объединения
«Вища школа»
1981

83

83

94

ББК 31.26
6П2.1.081
Е81

УДК 62-5+621.3.07+621.313(07)

Электрооборудование и электропривод промышленных установок.
В. П. Е с а к о в.— Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1981.—
248 с.

В пособии рассмотрены электрооборудование и электропривод кранов, лифтов, экскаваторов, автономных механизмов, механизмов непрерывного транспорта, компрессоров, насосов, вентиляторов, металлорежущих станков, кузнечно-прессовых машин и прокатных станов. Описаны некоторые наиболее типичные современные схемы управления этими механизмами, методы расчета и выбора электродвигателей и других силовых элементов схем. Для ряда механизмов приведены числовые примеры расчета.

Нормативные материалы указаны по состоянию на 1 января 1981 г.

Для студентов заочной формы обучения по специальностям «Электроснабжение промышленных предприятий, городов и сельского хозяйства», «Подъемно-транспортные машины и оборудование». Может быть использовано студентами, специализирующимися по электроприводу, и инженерно-техническим персоналом, занятым проектированием, наладкой и эксплуатацией указанного электрооборудования.

Табл. 16 Ил. 47 Библиогр.: 32 назв.

Рецензенты: доценты В. М. Терехов и В. А. Елисеев (Московский энергетический ин-т); доц. А. И. Бычков (Ленинградский электротехнический ин-т)

Редакция литературы по кибернетике, электронике и энергетике
Зав. редакцией М. С. Хойнацкий

Е 30307—258 165—81. 2302030000
М211(04)—81

© Издательское объединение
«Вища школа», 1981

В последнее время отечественная литература обогатилась рядом новых работ в области теории и управления электроприводами, однако по-прежнему ощущается острый недостаток в систематизированных учебных пособиях по изучению прикладных многоплановых курсов. Эти курсы включают в себя изучение теоретических и прикладных вопросов электроприводов механизмов, которые наиболее часто встречаются в различных отраслях народного хозяйства. К таким механизмам относятся: краны, лифты, экскаваторы, автономные механизмы, механизмы непрерывного транспорта, компрессоры, насосы, вентиляторы и др.

Указанные механизмы обеспечивают выполнение разнообразных технологических процессов или сами являются составными элементами технологических линий, поэтому их роль в решении задач хозяйственного строительства огромная.

В решениях XXV съезда КПСС отмечалось, что нужно последовательно осуществлять переход от создания и внедрения отдельных машин и технологических процессов к разработке, производству и массовому применению высокоэффективных систем машин, оборудования, приборов и технологических процессов, обеспечивающих механизацию и автоматизацию всех процессов производства, и особенно вспомогательных, транспортных и складских операций [1].

Благодаря фундаментальным работам советских ученых, научным и конструкторским разработкам специализированных научных и конструкторских организаций и учебных заведений созданы и промышленностью выпускаются разнообразные электрифицированные механизмы и машины, необходимые для решения поставленных задач. На основе этих работ в данном учебном

пособии в сжатой форме излагаются основные вопросы, касающиеся электрооборудования кранов, лифтов, экскаваторов, автономных механизмов, механизмов непрерывного транспорта, компрессоров, насосов, вентиляторов и металлообрабатывающих механизмов в пределах программ курса «Электрооборудование и электропривод промышленных установок» и в части прикладных вопросов курса «Электрооборудование подъемно-транспортных машин». Оно предназначено в основном для студентов старших курсов заочной формы обучения, а также может быть полезно студентам стационара, специализирующимся в области электропривода, и инженерно-техническому персоналу, занятому проектированием и эксплуатацией указанного электрооборудования.

При написании пособия предполагалось, что студентами изучены курсы «Материаловедение и обработка конструкционных материалов», «Теоретические основы электротехники», «Промышленная электроника», «Электрические машины», «Электрические аппараты и средства автоматизации», «Теория электрического привода». Поэтому в пособии наибольшее внимание обращается на приложение теоретических вопросов к решению практических задач и, без повторения других курсов, рассмотрены наиболее типичные схемы управления названными выше механизмами.

Автор признателен рецензентам — доцентам кафедры автоматизированного электропривода Московского энергетического института В. М. Терехову и В. А. Елисееву, а также доценту кафедры электрификации и автоматизации Ленинградского электротехнического института А. И. Бычкову за ряд полезных замечаний и рекомендаций, способствовавших улучшению пособия.

Отзывы о книге просим направлять по адресу: 252054, Киев-54, ул. Гоголевская, 7, Головное издательство издательского объединения «Вища школа».

ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И ЭЛЕКТРОПРИВОД КРАНОВЫХ МЕХАНИЗМОВ

1.1. КРАТКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРАНОВ, ИХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ

Грузоподъемные машины характеризуются рядом параметров, в том числе такими, которые обуславливают мощности приводных электродвигателей, т. е. грузоподъемностью, массой крана или тележки, скоростями движения их отдельных механизмов и режимом работы. Эти параметры для типовых кранов унифицированы и, например, грузоподъемность установлена ГОСТ 1575—75 (от 0,2 до 1000 т), основные данные и технические характеристики мостовых кранов общего назначения — ГОСТ 6711—70 (нормированные номинальные грузоподъемности крюковых подвесок не включают массу крюков, а грейферов, кубелей, бадьей, грузовых магнитов — и массу специальных грузозахватных приспособлений, подвешиваемых на крюк [16]), хотя характеристики специальных машин могут и отличаться от унифицированных.

Краны являются одними из механизмов большой группы грузоподъемных машин, включающей также электрические тали, шпили, погрузчики, штабелеры, подъемники и пр. Режимы работы электрооборудования кранов типичные и наиболее общие для этой группы, поэтому они подробно и рассматриваются в данной главе.

Наиболее распространенные краны условно разделяются на мостовые, кабель-краны, стреловые, консольные, краны-штабелеры, электрические тележки и передвижные тали. В зависимости от использования в технологическом процессе они могут иметь различные захватные приспособления: крюки, грейферы, магниты и т. д.

Мостовые краны подразделяются на цеховые и козловые, а также на мостовые перегружатели. Первые используются для выполнения различных технологических

и монтажных операций; вторые — для выполнения складских и монтажных операций; третьи применяются на рудных дворах и угольных складах. *Кабель-краны* обычно используются на строительных площадках, где приходится транспортировать грузы через какие-то преграды: реки, рвы и т. д. *Краны-штабелеры* с вилочным захватом грузоподъемностью 0,125...12,5 т бывают опорные и подвесные, имеющие механизмы подъема, передвижения моста и тележки, а также вращение колонны, и стеллажные, включающие механизмы подъема, передвижения и выдвижения телескопического захвата. Они предназначены для выполнения погрузочно-разгрузочных и транспортных работ на складах штучных и тарных грузов.

К *стреловым кранам* относятся порталные, башенные и самоходные (автомобильные, железнодорожные, гусеничные и плавучие) краны. Эти краны применяются в портах, на судостроительных заводах, при строительстве зданий и там, где не требуется систематическая работа крана, причем есть краны, у которых кабина может двигаться вверх и вниз по корпусу башни, а плавучий кран «Витязь» может поднять с 50-метровой глубины затонувшее судно массой до 1600 т.

Кроме того, используются *специальные краны*, к которым относятся: металлургические (литейные) краны, которые используются при выполнении операций по разливке и заливке жидкого металла в литейных цехах и имеют, как правило, главный и вспомогательный подъемы, расположенные на отдельных тележках; колодезные краны, предназначенные для работы в отделениях нагревательных колодцев прокатных цехов; мульдозавалочные краны, которые применяются для погрузки шихты в мартеновские и электроплавильные печи, и др. Краткие характеристики некоторых кранов приведены в табл. 1.

Электрические тележки выпускаются грузоподъемностью от 3 до 10 т при скоростях подъема 16 и 8 м/мин и передвижения 75 и 30 м/мин; *передвижные тали* — грузоподъемностью от 1,5 до 10 т при скоростях подъема 8 м/мин и передвижения 20 м/мин; *однотарабанные лебедки* — тяговым усилием 1 и 5 т при скоростях каната 0,13 и 17 м/с, а также грузоподъемностью от 30 до 75 т при скоростях подъема соответственно 1,85

Таблица 1

Характеристики кранов		Мостовые краны		Поворотные краны (стреловые)	Краны-штабелеры
		цеховые	козловые и перегружатели		
Грузоподъемность, т		5...630	1...500	3...2500	0,125...12,5
Скорость механизмов	подъема, м/мин	30...40	90...120	До 40...80	3...40
	перемещения тележки, м/мин	60...80	240...360	—	12...60
	перемещения моста м/мин (или поворота), об/мин	120...140	—	(До 0,5...3)	(0,3...125)
	выдвижения захвата, м/мин	—	—	—	8

и 1,47 м/мин [20]. Тали и лебедки обычно используются в тех случаях, когда установка подъемного устройства необходима в период монтажных и ремонтных работ.

Крановые механизмы работают в очень разнообразных условиях: от легких — в механических цехах, до весьма тяжелых — в литейных и металлургических цехах. Для механизмов типовых кранов характерны следующие режимы работ: I — легкий (Л) с ПВ = 15...25% (до 60 вкл/ч), II — средний (С) с ПВ = 25% (до 120 вкл/ч), III — тяжелый (Т) с ПВ = 40% (до 240 вкл/ч) и IV — весьма тяжелый (ВТ) с ПВ = 60% (до 600 вкл/ч) [3, 29]. Эти режимы зависят от класса использования (А1, А2, А3 и А4) и класса условной относительной нагрузки (В1, В2, В3 и В4) кранового механизма. Кроме того, при более сложных режимах, чем ВТ, когда относительная продолжительность включения механизма может достигать 100%, режим работы становится особо тяжелым (ОТ).

Время работы крановых механизмов колеблется в широких пределах: для класса А1 — до 1 ч в сутки и до 200 ч в течение года; для А2 — они, соответственно, более 1...3 и 200...800 ч; для А3 — более 3...7 и 800...2500 ч, а для А4 — более 7 и 2500 ч. Классы условной относительной нагрузки ориентировочно характеризуются коэффициентом, который приближенно можно рассчитать по формуле

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^m P_i}{mP_{\text{ном}}}, \quad (1.1)$$

где $\sum_{i=1}^m P_i$ — сумма нагрузок, действующих на механизм при установившемся движении за определенный промежуток времени (час, сутки); $P_{\text{ном}}$ — нагрузка, действующая на механизм при установившемся движении с номинальным грузом; m — число движений за этот же промежуток времени.

На основании формулы (1.1) рассчитаны и в табл. 2 приведены значения коэффициента γ в зависимости от класса условной относительной нагрузки кранового механизма. Соответствующие сочетания класса использо-

Таблица 2

Класс условной относительной нагрузки	Коэффициент γ	Качественная оценка класса условной относительной нагрузки
В1 В2	До 0,3 Более 0,3...0,5	Работа с нагрузками, значительно меньшими, чем максимальные, и, в порядке исключения, с максимальными нагрузками
В3	Более 0,5...0,7	Регулярная работа с малыми, средними и максимальными нагрузками
В4	Более 0,7...1,0	Работа с нагрузкой, приближающейся к максимальной

Таблица 3

Класс использования	Класс условной относительной нагрузки			
	B1	B2	B3	B4
A1	I	I	I	II
A2	I	I	II	III
A3	II	II	III	IV
A4	II	III	IV	IV

вания и класса условной относительной нагрузки определяют режимы работы механизма, которые даны в табл. 3. Применительно к этим режимам проектируются все электроприводы крановых механизмов. Режим работы крана в целом устанавливается по механизму главного подъема.

Основными механизмами большинства кранов являются механизмы подъема, перемещения крана и тележки или поворота либо изменения (для штабелеров — выдвигания) вылета. По графику нагрузки (циклу работы) механизмы кранов можно разделить в основном на две группы: 1) механизмы подъема, у которых график нагрузки состоит из четырех участков — подъем и опускание груза, подъем и опускание негруженого захватного приспособления; 2) механизмы перемещения, поворота, изменения вылета и выдвигания, у которых график нагрузки имеет два участка — работа с грузом и без него. В то же время встречаются краны, графики нагрузки которых могут отличаться от указанных.

Электроприводы крановых механизмов выполняются как на переменном, так и на постоянном токе: первые — на базе двигателей с фазным или с короткозамкнутым ротором, а вторые — на базе двигателей параллельного, смешанного или последовательного возбуждений. Напряжение питания двигателей переменного тока не более 660 В, а постоянного тока — 600 В [29].

Механизмы кранов работают в повторно-кратковременном режиме с большим числом включений в час и в тяжелых атмосферных условиях; поэтому для них выпускаются специальные крановые и металлургические электродвигатели с повышенными перегрузочной

способностью, механической прочностью и с уменьшенной динамической постоянной $t_{\text{дин}}$, равной

$$t_{\text{дин}} = \frac{GD^2 n_{\text{ном}}}{38,3M_{\text{ном}}} = \frac{4J n_{\text{ном}}}{38,3M_{\text{ном}}}, \quad (1.2)$$

где $M_{\text{ном}}$ и $n_{\text{ном}}$ — номинальные момент (Н · м) и частота вращения (мин^{-1}) электродвигателя; GD^2 и J — маховой момент и момент инерции ротора или якоря двигателя ($\text{кг} \cdot \text{м}^2$).

В приводах крановых механизмов раньше широко применялись двигатели постоянного тока серии ДП и переменного тока серий МТ и МТК. В настоящее время эти двигатели заменены крановыми и металлургическими двигателями постоянного тока серии Д (с последовательным, смешанным или с параллельным возбуждением), переменного тока с фазным ротором серий МТФ и МТН и с короткозамкнутым ротором серий МТКФ и МТКН, причем в количественном отношении двигатели переменного тока используются намного чаще (почти в 90% крановых электроприводов). У двигателей серий Д, МТН и МТКН изоляция класса Н, а серий МТФ и МТКФ — класса F. По конструкции они выполняются закрытыми, продуваемыми и с внешним обдувом [3].

Двигатели постоянного тока серии Д изготавливаются на напряжения 220 и 440 В мощностью 2,4...106 кВт при ПВ = 40% и частоте вращения 1550...460 мин^{-1} (157...55 с^{-1}) с вероятностью безотказной работы 0,98 (доверительной вероятностью 0,8) при трех годах эксплуатации и 0,92 при пятнадцати годах эксплуатации. Крановые двигатели серий МТФ и МТКФ изготавливаются на напряжения 220/380 и 500 В переменного тока частотой 50 Гц с синхронными частотами вращения 1000, 750 и 600 мин^{-1} , мощностью 1,4...30 кВт (МТФ) и 1,4...26 кВт (МТКФ) при ПВ = 40%; металлургические двигатели серий МТН и МТКН — на напряжения 220/380, 240/415, 400 и 500 В того же тока и с теми же частотами вращения, мощностью 3...160 кВт (МТН) и 3...37 кВт (МТКН) при ПВ = 40%; средний коэффициент мощности двигателей с фазным ротором составляет 0,72 и короткозамкнутых — 0,76.

Этих же серий выпускаются двух- и трехскоростные двигатели, построенные по принципу регулирования

при постоянном моменте с числом полюсов 4/12, 4/24, 4/8/24 (МТКФ) и 6/12, 6/16, 6/20 (МТКН), мощностью (на меньшем числе полюсов), соответствующей основной шкале мощностей односкоростных двигателей. Для указанных двигателей основным (номинальным) режимом работы является повторно-кратковременный с относительной ПВ=40%. Кроме того, в каталогах приводятся технические данные этих двигателей при повторно-кратковременных режимах работы с ПВ=15, 25, 60 и 100%. Односкоростные двигатели могут работать и в кратковременных режимах в течение 30 и 60 мин при мощностях, соответствующих основной шкале при ПВ=25 и 40%.

Таким образом, в соответствии с ГОСТ 183—74 и его дополнениями крановые двигатели могут использоваться для работы в следующих основных режимах: S3 — повторно-кратковременном с ПВ=15, 25, 40 и 60% при продолжительности цикла 10 мин и S2 — кратковременном.

Помимо перечисленных параметров, в каталогах приводятся следующие характеристики двигателей постоянного тока: $M = f(I)$, $\eta = f(I)$, $n = f(I)$ и $P = f(I)$, а переменного тока: $M = f(s)$, $I = f(s)$ и $\cos \varphi = f(s)$. Этими характеристиками и следует руководствоваться при расчетах пусковых резисторов или искусственных характеристик двигателей. Наряду с рассмотренными предполагается выпускать электродвигатели серии 4МТ мощностью до 200 кВт с вероятностью безотказной работы не менее 0,96 для кранового исполнения и 0,98 для металлургического исполнения.

Перегрузочные способности по моменту двигателей постоянного тока напряжением 220 В согласно ГОСТ 184—71 приведены в табл. 4; перегрузочные способности таких же двигателей с напряжением питания 440 В будут на 20% ниже.

Пусковые моменты крановых двигателей переменного тока с короткозамкнутым ротором составляют 2,5...3,3 $M_{ном}$, а максимальные — 2,6...3,6 $M_{ном}$; пусковые моменты двигателей с фазным ротором могут быть равны максимальным, составляющим 2,3...3,0 $M_{ном}$. Из-за неточности изготовления и нагрева двигателя, плохой изоляции пластин магнитопроводов и других факторов пусковые и максимальные моменты могут отличаться от каталожных значений соответственно на —15

Таблица 4

Возбуждение двигателя		При $P_{\text{ном}}$, кВт		При $P_{\text{ном}}$ (кВт) в момент трогания и при частоте вращения до 20% номинальной	
		до 50	свыше 50	до 50	свыше 50
Последовательное		4,0	4,5	5,0	5,5
Смешанное		3,5	4,0	4,5	5,0
Параллельное	со стабилизирующей обмоткой и номинальным напряжением возбуждения	2,5	2,8	3,0	3,3
	то же, но при удвоенном напряжении возбуждения	3,0	3,3	3,6	4,0

и —10% [3], что следует учитывать при проектировании крановых электроприводов с двигателями переменного тока.

Чтобы исключить механические передачи и увеличить ускорение при разгоне механизмов перемещения электрических тележек (талей) и им подобных устройств, перемещающихся по монорельсовым путям, в последнее время ведутся работы по использованию линейных асинхронных двигателей (ЛАД), ряд типов которых уже разработано мощностью до нескольких сот киловатт, хотя коэффициент мощности и к. п. д. их меньше по сравнению с вращающимися двигателями.

1.2. РАСЧЕТ И ВЫБОР МОЩНОСТИ ПРИВОДНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ КРАНОВЫХ МЕХАНИЗМОВ

К. п. д. передачи. Обычно в каталогах указывается к. п. д. передач, работающих в номинальных режимах ($\eta_{\text{ном}}$). Однако с изменением нагрузки к. п. д. меняется.

В то же время для определения мощности при различных нагрузках механизмов необходимо знать реальный к. п. д. передачи. В этом случае к. п. д. можно определить по кривым, изображенным на рис. 1.1, либо аналитически. На рис. 1.1 η и $\eta_{\text{ном}}$ — текущее и номинальное значения к. п. д., %; $\gamma = \frac{m + m_0}{m_{\text{ном}} + m_0}$,

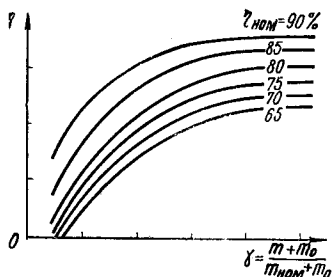


Рис. 1.1. Кривые изменения к. п. д. механической передачи в зависимости от нагрузки механизма

где m и $m_{\text{ном}}$ — текущая и номинальная массы груза, кг; m_0 — масса механизма без груза, кг.

Аналитическим путем к. п. д. передачи можно определить следующим образом. Известно, что потери условно можно разделить на *постоянные*, не зависящие от нагрузки, и *переменные*, которые зависят от нагрузки. Если обозначить коэффициент нагрузки $\gamma = \frac{m + m_0}{m_{\text{ном}} + m_0} = \frac{M}{M_{\text{ном}}}$, коэффициент постоянных потерь

$a = \frac{M_0}{M_{\text{ном}}}$ и коэффициент переменных потерь $b = \frac{\Delta M_{\text{пер}}}{M}$,

то к. п. д. передачи при любой нагрузке можно определить так:

$$\eta = \frac{M}{M + M_0 \frac{M_{\text{ном}}}{M_{\text{ном}}} + \Delta M_{\text{пер}}} = \frac{1}{1 + \frac{a}{\gamma} + b}, \quad (1.3)$$

где M и $M_{\text{ном}}$ — текущее и номинальное значения момента нагрузки; M_0 — момент холостого хода; $\Delta M_{\text{пер}}$ — момент переменных потерь.

При номинальной нагрузке, когда $\gamma = 1$, а соотношение коэффициентов потерь, известное из статистических данных, $a/b = k = 1,2 \dots 1,5$, величины a и b можно найти путем совместного решения уравнений:

$$\eta_{\text{ном}} = \frac{1}{1 + a + b} \text{ и } a = kb. \quad (1.4)$$

Отсюда:

$$a = k \frac{1 - \eta_{\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}} (1 + k)}; \quad b = \frac{1 - \eta_{\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}} (1 + k)}. \quad (1.5)$$

Подставив значения a и b в выражение (1.3), можно определить к. п. д. передачи при любой нагрузке кранового механизма.

Полученные зависимости могут быть распространены не только на крановые, но и на другие механические передачи. Значения номинальных к. п. д. обычно приводятся в справочниках: для одной цилиндрической пары $\eta_{ц.ном} = 0,9 \dots 0,98$, для червячковой пары $\eta_{ч.ном} = 0,5 \dots 0,85$, для барабанов с канатами $\eta_{б.ном} = 0,94 \dots 0,96$ и т. д.

Для механизмов подъема в справочниках к. п. д. передачи (η) указывается при подъеме груза, тогда как при работе на спуск груза к. п. д. передачи ($\eta_{оп}$) будет другим. Оба коэффициента связаны между собой определенной зависимостью, которую можно установить, исходя из следующих положений. Если момент, создаваемый грузом и приведенный к валу электродвигателя (при отсутствии потерь в передаче), назвать *грузовым*, т. е.

$$M_{гр} = \frac{(m + m_0) R_б}{iu}, \quad (1.6)$$

где i и u — соответственно кратность полиспаста и передаточное отношение редуктора; $R_б$ — радиус барабана лебедки, то действительный момент на валу двигателя при подъеме груза будет больше, а при опускании меньше грузового на величину потерь в передаче

$$\Delta M = \frac{M_{гр}}{\eta} - M_{гр} = M_{гр} \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right). \quad (1.7)$$

Учитывая потери, момент двигателя при опускании груза будет

$$M_{оп} = M_{гр} - \Delta M = M_{гр} \left(2 - \frac{1}{\eta} \right). \quad (1.8)$$

С другой стороны, при тормозном спуске груза момент двигателя

$$M_{оп} = M_{гр} \eta_{оп}. \quad (1.9)$$

Сравнив выражения (1.8) и (1.9) между собой, получим следующую формулу для определения к. п. д. передачи при опускании груза:

$$\eta_{оп} = 2 - \frac{1}{\eta}. \quad (1.10)$$

При малых нагрузках к. п. д. передачи при подъеме груза мал ($\eta < 0,5$) и к. п. д. при опускании $\eta_{\text{оп}}$ становится отрицательным; иногда он больше единицы. Это указывает на то, что двигатель работает в режиме силового спуска, когда грузовой момент и момент, развиваемый двигателем, вместе преодолевают потери в передаче. В этом случае момент двигателя при опускании груза следует определять по приближенной формуле или по диаграмме моментов (зависимости момента от нагрузки), которую можно построить, пользуясь выражениями (1.6) и (1.7). Приближенная формула выводится на основе допущения, что $\eta_{\text{ном}} = \eta = \eta_{\text{оп}}$; тогда

$$M_{\text{оп}} = M_{\text{гр}} \eta_{\text{оп}} = M \eta_{\text{ном}}^2. \quad (1.11)$$

Определение статической мощности крановых механизмов. Расчет статической мощности большинства крановых механизмов производится аналогично, т. е. исходя из заданной скорости, известного к. п. д. передачи и рассчитанного усилия при номинальном режиме работы. В этом случае исходными данными для механизмов подъема являются грузоподъемность m (кг), масса захватного приспособления m_0 (кг), номинальная скорость подъема груза $v_{\text{ном}}$ (м/с) и номинальный к. п. д. передачи $\eta_{\text{ном}}$. Тогда статическая мощность (кВт) механизма

$$P_{\text{ст}} = \frac{g(m + m_0)v_{\text{ном}} \cdot 10^{-3}}{\eta_{\text{ном}}}. \quad (1.12)$$

После приведения полученной мощности к мощности при стандартной продолжительности включения выбирают по каталогу ближайший меньший двигатель. Завод «Динамо» рекомендует считать $P_1 = 0,8 P$ [32].

При расчете статической мощности механизмов перемещения необходимо иметь в виду, что они могут быть с центральным приводом и тихоходным общим валом (один редуктор, установленный у электродвигателя) или быстроходным общим валом (два редуктора, установленные у ходовых колес), а также без общего вала с разделенными приводами ведущих колес по обе стороны моста крана. Но независимо от указанных модификаций в общем случае двигателя преодолевают следующие

сопротивления: трения ($k_p F_{\text{тр}}$), нагрузки от снега, гололеда и ветра ($F_{\text{в}}$) и уклона пути ($F_{\text{ук}}$), т. е.

$$F = k_p F_{\text{тр}} + F_{\text{в}} + F_{\text{ук}}. \quad (1.13)$$

Поэтому для определения статической мощности таких механизмов должны быть заданы или известны из конструкции механизмов и справочника следующие величины: грузоподъемность $\{m + m_0\}$, кг; масса механизма $m_{\text{кр}}$ (кг); скорость передвижения v (м/с); площадь парусности q (м²); передаточные отношения i и к.п.д. передачи η ; μ — коэффициент трения в подшипниках колес (для подшипников качения $\mu \leq 0,02$, скольжения $\mu = 0,1$); d — диаметр цапф (см) (обычно $d = 0,2 \dots 0,25 D_k$ [2], где D_k — диаметр колеса, см); f — коэффициент трения качения (для выпуклых головок рельс и стальных колес $f = 0,04 \dots 0,12$ см); $\alpha \approx \sin \alpha$ — расчетный угол подкрановых путей ($\alpha = 0,001 \dots 0,002$); v_1 — суммарная скорость ветра и крана (м/с).

Пользуясь этими данными, определяют составляющие сопротивления. При этом сопротивление трения рассчитывают по формуле

$$k_p F_{\text{тр}} = k_p (m_{\text{кр}} + m + m_0) \frac{\mu d + 2f}{D_k},$$

где k_p — коэффициент, учитывающий трение реборд ходовых колес о рельсы и трение торцов ступиц (при центральном приводе и подшипниках скольжения для мостов $k_p = 1,3 \dots 1,5$ и тележек $k_p = 1,2 \dots 1,3$, а при подшипниках качения соответственно $k_p = 2,3 \dots 2,5$ и $k_p = 2,0 \dots 2,3$ [2]).

Снеговая нагрузка определяется массой снега на площади горизонтальной проекции крана, которая для средней полосы СССР принимается равной 1000 Па; нагрузка от гололеда — площадью поверхности, подвергающейся обледенению, из расчета толщины слоя льда 1,0...1,2 см при его плотности 900 кг/м³. Нагрузки от ветра ($F'_{\text{в}}$), гололеда и снега ($F''_{\text{в}}$), а также уклона пути ($F_{\text{ук}}$) находят по следующим приближенным формулам:

$$F_{\text{в}} = F'_{\text{в}} + F''_{\text{в}} = 0,01 q v_1^2 + F''_{\text{в}};$$

$$F_{\text{ук}} = \alpha (m_{\text{кр}} + m + m_0).$$

Суммируя составляющие, определяют полное сопротивление F , а затем рассчитывают необходимую статическую мощность механизма перемещения

$$P_{\text{ст}} = \frac{gFv \cdot 10^{-3}}{\eta}. \quad (1.14)$$

Для механизмов передвижения после приведения полученной мощности к мощности при стандартной продолжительности включения выбирают по каталогу ближайший больший двигатель.

Момент сопротивления, приведенный к валу двигателя, для центрального привода определяют по суммарному усилию F :

$$M = \frac{FD_k}{2i\eta},$$

а для отдельного — по этой же формуле, но при наибольшем давлении ходовых колес на рельсы, т. е. когда тележка с грузом находится в крайнем положении моста, для которого рассчитывается момент.

К механизмам перемещения относятся также электрокары, электропогрузчики и электромобили, предназначенные для транспортировки грузов. Мощность их приводных двигателей определяется аналогично механизмам перемещения крана.

Изменение вылета стреловых кранов осуществляется наклоном стрелы или передвижением грузовой тележки (каретки) по направляющим балкам стрелы. Когда вылет изменяется путем наклона стрелы, усилие, преодолеваемое двигателем по мере изменения вылета, меняется: при наибольшем вылете оно максимально, а при наименьшем — минимально. Поэтому, чтобы определить статическую мощность механизма изменения вылета, должны быть заданы кинематическая схема, массы груза и захватного приспособления, масса стрелы, средняя скорость ее подъема, необходимое передаточное отношение и к.п.д. механизма. Пользуясь этими данными и уравнением равновесия моментов для нескольких точек (в том числе при наибольшем и наименьшем вылетах), определяют усилия, строят диаграмму усилий, по ней находят среднее усилие, пользуясь которым, а также скоростью каната на барабане и к.п.д. механизма, подобно механизмам подъема и перемещения, рассчитывают

статическую мощность. При перемещении грузовой тележки (каретки) по направляющим балкам мощность приводного двигателя определяется аналогично механизмам перемещения с учетом возможного угла наклона балки.

Что касается механизма поворота, то здесь, как и в предыдущем случае, статическая мощность изменяется в зависимости от вылета стрелы. Поскольку работа крана возможна при наибольшем вылете и наличии ветра, двигатель для механизма поворота должен выбираться по наибольшей статической мощности.

Выбор приводных двигателей для крановых механизмов. Зная статическую мощность, выбирают двигатель и проверяют его по тепловому режиму, а если нужно, и по допустимой перегрузке. При этом пользуются приближенными методами: 1) методом последовательных приближений; 2) методом эквивалентного к.п.д. (методом завода «Динамо»); 3) методом нагрузочных рядов. Так как механические постоянные времени крановых приводов достаточно велики и заметно больше электромагнитных, во всех методах учитываются только механические переходные процессы. Большой опыт в проектировании крановых приводов показал, что такое упрощение оправданно.

Метод последовательных приближений. Для правильного выбора электродвигателя того или иного механизма крана необходимо знать эквивалентные значения тока или момента либо мощности за один цикл его работы, которые предварительно неизвестны. Поэтому по статической мощности кранового механизма определяют приближенно необходимую мощность двигателя и выбирают его. С учетом параметров выбранного двигателя рассчитывают диаграмму работы привода и проверяют двигатель по одной из эквивалентных величин. Если выбранный двигатель не подходит, то выбирают ближайший (большой или меньший) по каталогу и расчет повторяют.

Порядок выбора двигателя рассмотрим подробнее на примере кранового механизма подъема, кинематические схемы которого показаны на рис. 1.2. Для механизмов подъема должны быть заданы режим работы, производительность Q (кг/ч), грузоподъемность m (кг), масса захватного приспособления m_0 (кг), высота подъема H

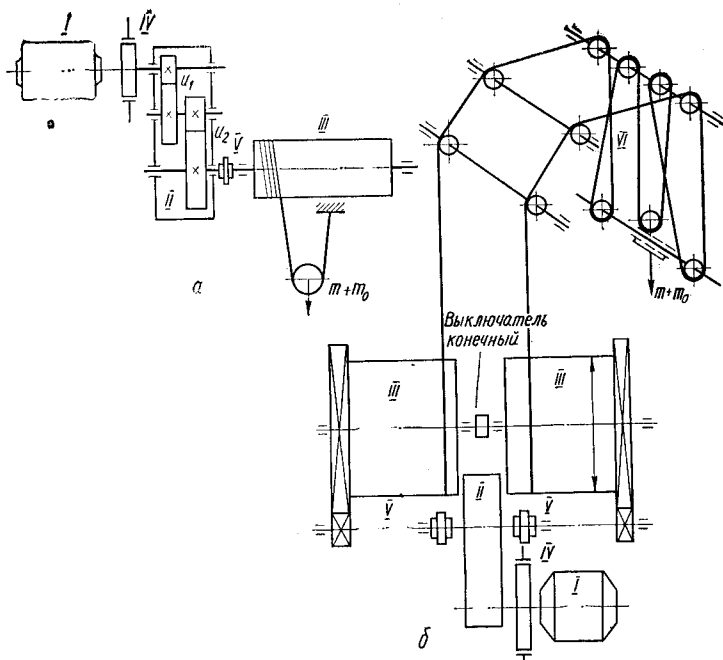


Рис. 1.2. Кинематические схемы механизма подъема мостового (а) и стрелового (б) кранов:

I — электродвигатель; II — редуктор; III — барабан лебедки; IV — тормозной шкив; V — муфта; VI — полиспаст

(м), скорость подъема v (м/с), к.п.д. при подъеме η , передаточное число редуктора u , кратность полиспаста i и радиус барабана лебедки R_6 (м) (с учетом навивки канатов). Расчет выполняют в следующем порядке.

Определяют число циклов в час z и время цикла T , которое должно быть не более 10 мин:

$$z = \frac{Q}{m}; \quad T = \frac{3600}{z_i}.$$

Считая, что средняя высота подъема и опускания груза $H_{ср}$ должна составлять 0,5...0,8 H [16], находят ее, и тогда, пренебрегая продолжительностями пуска и торможения, а также принимая все скорости равными скоростям подъема (точнее, они зависят от моментов нагрузки и механической характеристики выбранного двигателя), рассчитывают приближенно время работы t_p (с)

и относительную продолжительность включения ПВ (%) двигателя:

$$t_p = 4 \frac{H_{cp}}{v}; \quad \text{ПВ} = \frac{t_p}{T} \cdot 100.$$

Определяют статическую мощность механизма при подъеме груза

$$P_{ст} = \frac{g(m + m_0)v \cdot 10^{-3}}{\eta}.$$

Полученную мощность приводят к мощности при стандартной продолжительности включения $\text{ПВ}_{ст}$:

$$P = P_{ст} \sqrt{\frac{\text{ПВ}}{\text{ПВ}_{ст}} + \alpha \left(\frac{\text{ПВ}}{\text{ПВ}_{ст}} - 1 \right)}, \quad (1.15)$$

где $\alpha = k/v$ — отношение постоянных потерь двигателя к переменным при номинальной нагрузке (для крановых двигателей типов МТК и МТ $\alpha = 0,4 \dots 0,6$, а типа ДП $\alpha = 0,5 \dots 0,9$).

Формула (1.15) не учитывает изменения постоянной времени нагревания двигателя в различных режимах его работы и во время паузы, что может сказаться на точности расчета. Поэтому лучше пользоваться формулой

$$P = P_{ст} \sqrt{\frac{(\text{ПВ} - \text{ПВ}_{ст})(\alpha + 1)}{\text{ПВ}_{ст} \left[\frac{k_\tau \text{ПВ} + (100 - \text{ПВ})}{100} \right]} + 1}, \quad (1.16)$$

где $k_\tau = T_0/T_n$ — коэффициент, характеризующий отношение постоянных времени нагрева двигателя во время паузы (T_0) и работы (T_n). Ориентировочные значения этого коэффициента для закрытых двигателей с независимой вентиляцией $k_\tau = 1 \dots 1,1$ и для защищенных двигателей с самовентилиацией $k_\tau = 2,8 \dots 4,0$. По каталогу выбирают двигатель с ближайшей стандартной мощностью. Требуемую частоту вращения электродвигателя определяют по заданным скорости подъема, радиусу барабана лебедки и отношению передач от двигателя к рабочему органу (iu). Для двигателей с жесткой механической характеристикой

$$n = \frac{v i u \cdot 60}{2\pi R_6}, \quad \text{или} \quad \omega = \frac{v i u}{R_6}. \quad (1.17)$$

Частоту вращения двигателей с мягкой механической характеристикой находят по механической характеристике, исходя из статических моментов или мощностей, и затем проверяют ее по формуле, подобной (1.17), в которой $n_{\text{ном}} \geq n$.

После предварительного выбора двигателя рассчитывают идеализированную диаграмму его нагрузки за один цикл, в котором принимают один пуск от нуля до номинальной частоты вращения, одно торможение от номинальной частоты вращения до остановки механизма и считают, что установившиеся движения происходят с номинальной частотой при номинальном грузе и отсутствии его.

Определяют моменты при подъеме груза

$$M_1 = \frac{g(m + m_0) R_6}{\eta_1 i u}$$

и при его опускании

$$M_2 = M_1 \eta_1 \eta_2 = M_1 \eta_1 \left(2 - \frac{1}{\eta_1} \right),$$

где $\eta_2 = \eta_{\text{оп}} = 2 - \frac{1}{\eta_1}$.

Частоту вращения двигателя находят по его механической характеристике с учетом способа торможения.

Рассчитывают момент при подъеме негруженного захватного приспособления

$$M_3 = \frac{g m_0 R_6}{\eta_3 i u}.$$

К.п.д. передачи η_3 при этом находят по формуле (1.3), а частоту вращения двигателя — по его механической характеристике.

Определяют момент при опускании негруженного захватного приспособления

$$M_4 = M_3 \eta_3 \eta_4.$$

Для того чтобы согласовать время разгона электродвигателя с предполагаемыми к установке контроллером и пускорегулирующими резисторами, рассчитывают допустимое ускорение a или задаются им, определяют время разгона $t_n = v/a$ или задаются им, находят

необходимый избыточный момент при разгоне с номинальным грузом

$$M_{\text{изб}} = \frac{kGD^2n}{38,3t_{\text{п}}} + \frac{0,975g \sum mv^2}{n\eta t_{\text{п}}},$$

средний момент $M_{\text{ср}} = 1,1M_1 + M_{\text{изб}}$ и максимальный момент $M_{\text{пуск}} = 1,1M_1 + 2M_{\text{изб}}$. Затем выбирают контроллер с числом ступеней m . И тогда, если выбран приводной электродвигатель переменного тока с номинальным скольжением $s_{\text{ном}}$, определяют коэффициент λ , характеризующий степень возрастания сопротивлений по ступеням:

$$\lambda = \sqrt[m]{\frac{1}{M_{\text{пуск}}s_{\text{ном}}}}. \quad (1.18)$$

В общем случае при изменении частоты вращения от n_1 до n_2 время, в течение которого происходит это изменение, может быть найдено так:

$$t_{12} = \frac{kGD^2}{38,3} \int_{n_1}^{n_2} \frac{dn}{\pm M_{\text{дв}} \pm M_{\text{ср}}},$$

где k — коэффициент увеличения махового момента за счет неучтенных присоединенных масс к ротору двигателя ($k = 1,1 \dots 1,3$); $M_{\text{дв}}$ и $M_{\text{ср}}$ — соответственно момент, развиваемый двигателем, и момент сопротивления, Н · м. После интегрирования (при линейном законе изменения избыточного момента) получают следующее выражение:

$$t_{12} = \frac{kGD^2}{38,3} \frac{n_2 - n_1}{M_{\text{изб max}} - M_{\text{изб min}}} \lg \frac{M_{\text{изб max}}}{M_{\text{изб min}}}.$$

Однако для практических расчетов достаточно воспользоваться выражениями:

$$\left. \begin{aligned} t_{\text{п}} &= \frac{kGD^2n}{38,3M_{\text{изб}}} + \frac{0,975g \sum mv^2}{M_{\text{изб}}n\eta}; \\ t_{\text{т}} &= \frac{kGD^2n}{38,3M_{\text{изб}}} + \frac{0,975g \sum mv^2\eta}{M_{\text{изб}}n}; \\ t_{\text{у}} &= \frac{H_{\text{ср}}}{v} - \frac{t_{\text{п}} + t_{\text{т}}}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (1.19)$$

По опыту эксплуатации кранов среднее время пуска и торможения их механизмов составляет: 1,5...5 с (механизмы подъема, передвижения тележки и изменения вылета) и 5...8 с (механизмы передвижения моста поворота) [16].

Определяют эквивалентный момент двигателя

$$M_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{M_{\text{п1}}^2 t_{\text{п1}} + M_1^2 t_{y1} + M_{\text{т1}}^2 t_{\text{т1}} + M_{\text{п2}}^2 t_{\text{п2}} + M_2^2 t_{y2} + \dots}{[\beta - \alpha(1 - \beta)] \sum t_{\text{п}} + \sum t_y + [\beta - \alpha(1 - \beta)] \sum t_{\text{т}}}}, \quad (1.20)$$

где $\beta = \frac{1 + \beta_0}{2}$, а $\beta_0 = \frac{T_{\text{н}}}{T_{\text{о}}} = \frac{1}{k_{\text{т}}}$ — коэффициент, зависящий от системы вентиляции двигателя.

Если рассчитывают эквивалентную мощность, то для двигателей с фазным ротором и двигателей постоянного тока с параллельным возбуждением пусковую ($P_{\text{п1}}, P_{\text{п2}}, P_{\text{п3}}, P_{\text{п4}}$) и тормозную ($P_{\text{т1}}, P_{\text{т2}}, P_{\text{т3}}, P_{\text{т4}}$) мощности находят как произведение номинальной мощности двигателя на кратность его среднего момента при пуске и торможении. Пусковую или тормозную мощности короткозамкнутых двигателей при пуске или торможении определяют следующим образом:

$$P_{\text{п}} = \int_0^{t_{\text{п}}} P_{\text{п1}}^2 dt = \int_0^t \left(P_{\text{к}} - \frac{P_{\text{к}} - P}{t_{\text{п}}} \right)^2 dt = \\ = \frac{1}{3} (P_{\text{к}}^2 + P_{\text{к}}P + P^2) t_{\text{п}},$$

где $P_{\text{к}} = P_{\text{ном}} I_{\text{к}} / I_{\text{ном}}$; P и $P_{\text{к}}$ — установившаяся и наибольшая пусковая или тормозная мощности двигателя; $I_{\text{ном}}$ и $I_{\text{к}}$ — номинальный и пусковой или тормозной токи двигателя; $t_{\text{п}}$ — время пуска или торможения двигателя.

Если торможение механическое, то по обмоткам двигателя ток не протекает и тогда момент или мощность двигателя принимаются равными нулю. Обычно торможение бывает комбинированное.

Мощность двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением не пропорциональна моменту и току, поэтому такой двигатель проверяют по эквивалентному току. Для асинхронных двигателей также целесообразна такая проверка.

Определяют уточненное значение продолжительности включения двигателя с учетом времени переходных процессов и движения механизма с установившейся скоростью:

$$ПВ = \frac{(t_{п1} + t_{y1} + t_{т1} + t_{п2} + t_{y2} + t_{т2} + t_{п3} + \dots) \cdot 100}{T} \quad (1.21)$$

Эквивалентный момент приводят к моменту при стандартной продолжительности включения:

$$M = M_{\text{экв}} \sqrt{\frac{ПВ}{ПВ_{\text{ст}}} + \alpha \left(\frac{ПВ}{ПВ_{\text{ст}}} - 1 \right)} \leq M_{\text{ном}}$$

и сравнивают с данными выбранного двигателя.

Реальные циклы рабочих крановых механизмов отличаются от идеализированных. Так, например, при эксплуатации строительных кранов за один грузовой цикл происходит до восьми включений электродвигателя механизма подъема для выхода на номинальную скорость, а также до шести включений механизма поворота стрелы; кроме того, каждый из механизмов для обеспечения точной установки груза имеет еще по четыре—шесть толчковых включений за цикл [19]. Поэтому рассмотренный метод при выборе двигателей может давать ощутимые погрешности.

Метод эквивалентного к. п. д. (метод завода «Динамо») [3, 6]. Этот метод является разновидностью метода последовательных приближений. Он основан на вероятностно-статистических данных эксплуатации крановых механизмов и учитывает не только полную относительную продолжительность включения электродвигателя (ϵ), но и продолжительность его включения при регулировании частоты вращения (ϵ_p), а также эквивалентное (по нагреву) за единицу времени (час) число (z') включений двигателя, коэффициент усреднения статической нагрузки, потери в переходных режимах работы электродвигателя (особенно постоянные потери, независимые от нагрузки) и др.

В основу метода положен обобщенный показатель в виде эквивалентного к.п.д., значение которого за расчетный промежуток времени (1 ч) при полном использовании двигателя определяется выражением

$$\eta_{\text{экв}} = \frac{3600 \epsilon_{\text{ном}} P_{\text{ном}}}{3600 \epsilon_{\text{ном}} P_{\text{ном}} + A_y + A_{п} + A_{\text{дин}}}, \quad (1.22)$$

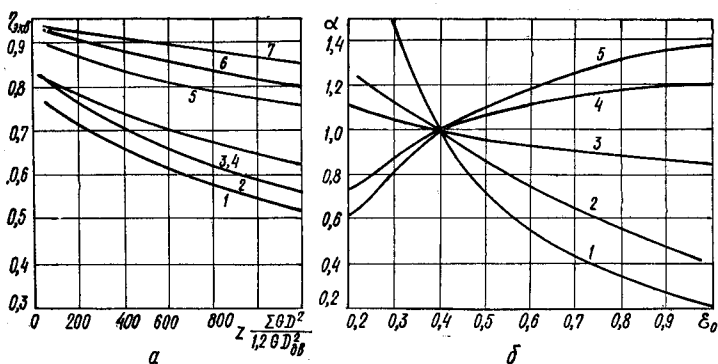


Рис. 1.3. Зависимость эквивалентного к. п. д. двигателей от эквивалентного числа их включений для электроприводов, указанных в табл. 6 (а), и зависимость изменения потерь в крановых электродвигателях от относительной продолжительности включения (б)

где $P_{\text{ном}}$ — номинальная мощность двигателя при каталожной продолжительности включения $\varepsilon_{\text{ном}}$, кВт; $A_y = \Delta P_y t_y$ — потери энергии в статических режимах перемещения груза с номинальной скоростью; $A_{\text{п}} = \Delta P_{\text{л}} q_{\text{р}} \times 3600 \varepsilon_{\text{р}}$ — потери энергии при малых и посадочных скоростях; ΔP_y и $\Delta P_{\text{р}}$ — эквивалентные потери мощности; $A_{\text{дин}} = k P_{\text{ном}} z$ — потери энергии в пусковых режимах; k — коэффициент потерь, отнесенный к одному пуску.

Указанные величины, а следовательно, и эквивалентный к. п. д. зависят от типа двигателя и эквивалентного числа включений $z' = z \frac{\sum GD^2}{1,2GD_{\text{дв}}^2}$. Значения эквивалентного к. п. д. находят по экспериментальным кривым, изображенным на рис. 1.3, а (номера кривых соответствуют вариантам приводов табл. 6).

Потери мощности в динамических (пусковых) режимах можно рассчитать, зная динамическую мощность $P_{\text{дин}}$. Если воспользоваться эквивалентным к.п.д. $\eta_{\text{экр. б}}$ и эквивалентным базовым к.п.д. $\eta_{\text{экр. б}}$ при установившемся движении электродвигателя, когда за единицу времени число его включений $z = 0$, то

$$P_{\text{дин}} = P_{\text{ном}} \frac{\eta_{\text{экр. б}} - \eta_{\text{экр. б}}}{\eta_{\text{экр. б}}} \quad (1.23)$$

Без учета соотношения между постоянными и переменными потерями в двигателе, изменений условий вентиляции и других факторов приближенно необходимую мощность кранового электродвигателя можно определить по ее статической и динамической составляющим:

$$P_{\text{ном}} \geq k_{\text{экр}} P_{\text{ст}} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\text{ном}}}} + k_{\text{дин}} P_{\text{ном}} \frac{\eta_{\text{экр. б}} - \eta_{\text{экр}}}{\eta_{\text{экр. б}}}. \quad (1.24)$$

Отсюда

$$P_{\text{ном}} \geq \frac{k_{\text{экр}} P_{\text{ст}} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\text{ном}}}}}{\eta_{\text{экр. б}} - k_{\text{дин}} (\eta_{\text{экр. б}} - \eta_{\text{экр}})}, \quad (1.25)$$

где $k_{\text{экр}} = M_{\text{экр}}/M_{\text{ном}}$ — коэффициент, определяемый режимами работы электропривода; $P_{\text{ст}}$ — статическая мощность; $k_{\text{дин}}$ — коэффициент, определяющий степень влияния динамических потерь на нагрев электродвигателя ($k_{\text{дин}} = P_{\text{пуск}}/P_{\text{ном}} = 4$ — для многоскоростных и $k_{\text{дин}} = 1,25$ — для других электродвигателей).

Соотношение между постоянными и переменными потерями зависит от конструкции, системы вентиляции и режимов работы двигателя. Оно учитывается экспериментальным коэффициентом α , который в зависимости от системы вентиляции и относительной продолжительности включения колеблется в широких пределах и определяется по экспериментальным кривым рис. 1.3, б*. Кроме того, в данном методе расчета за базовую продолжительность включения двигателя при регулировании принято значение $\varepsilon_{\text{р. б}} = 0,05$. При других значениях $\varepsilon_{\text{р}}$ в расчет необходимо вводить поправочный коэффициент $k_{\text{р}}$, который определяется следующими выражениями:

для односкоростных двигателей

$$k_{\text{р}} = 1 - \frac{q_{\text{р}} - q_{\text{ном}}}{q_{\text{ном}}} (\varepsilon_{\text{р}} - \varepsilon_{\text{р. б}}); \quad (1.26)$$

для многоскоростных двигателей

$$k_{\text{р}} = 1 - 1,2 (\varepsilon_{\text{р}} - \varepsilon_{\text{р. б}}). \quad (1.27)$$

* Цифрами возле кривых на этом рисунке обозначено: 1 — неревверсивный; 2 — двигатель постоянного тока; 3 — вентилируемый тихоходный; 4 — вентилируемый быстроходный серий МТФ и МТН; 5 — вентилируемый быстроходный серии МАП.

В выражении (1.26), как и в выражении для определения потерь энергии при малых и посадочных скоростях механизма (A_n), $q_p = \Delta P_p / P_{\text{ном}}$ и $q_{\text{ном}} = \Delta P_{\text{ном}} / P_{\text{ном}}$ — коэффициенты потерь при регулировании и номинальном режиме; $\Delta P_{\text{ном}}$ — потери мощности при номинальном режиме. Для двигателей постоянного тока необходимо учитывать изменение потерь холостого хода в зависимости от фактического ($U_{\text{факт}}$) питающего напряжения. Это изменение может быть учтено коэффициентом

$$k_H = \sqrt{\frac{U_{\text{ном}} + U_{\text{факт}}}{U_{\text{ном}} \left(1 + \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\text{ном}}}\right)}}. \quad (1.28)$$

Для двигателей переменного тока и колебаний напряжения в пределах $\pm 5\%$ $k_H = 0$, а в условиях строительных площадок, когда колебание напряжения сети достигает $\pm 15\%$, $k_H = 1,15$ [19].

С учетом α и коэффициента запаса k_3 уточненную формулу для расчета необходимой мощности крановых электродвигателей можно записать в следующем виде:

$$P_{\text{ном}} \geq \frac{k_{\text{экв}} k_3 \eta_{\text{экв.б}} k_H P_{\text{ст}} \sqrt{\varepsilon / \varepsilon_{\text{ном}}}}{k_p \alpha [\eta_{\text{экв.б}} - k_{\text{дин}} (\eta_{\text{экв.б}} - \eta_{\text{экв}})]}. \quad (1.29)$$

В этой формуле значения продолжительностей включения ε и ε_p и коэффициентов $k_{\text{экв}}$ и k_3 зависят от режимов работы кранового электропривода (табл. 5, где

Таблица 5

Режим работы двигателя	ε	$k_{\text{экв}}$ при		ε_p	k_3	$Z \frac{\Sigma GD^2}{r, 2 GD_{\text{дв}}^2}$
		подъеме груза	горизонтальном перемещении механизма			
I (Л)	0,25	0,60	0,40	0,050	1	60
II (С)	0,40	0,75	0,60	0,075	1	150
III (Т)	0,40	0,75	0,60	0,100	1	300...600
IV (ВТ)	0,60	0,80	—	0,125	1,15...1,25	600...1200
OT	> 0,60	0,90	—	0,150	1,30...1,35	600...1200

Таблица 6

№ п.п.	Электроприводы и параметры, характеризующие их энергетические свойства	Режимы работы приводов				
		Л	С	Т	ВТ	ОТ
1	Электропривод с двигателем с фазным ротором при торможении противоключением: $\eta_{\text{экв.б}} = 0,76$; $k_{\text{дин}} = 1,25$	1,45	1,20	0,95	0,75	0,45
2	Электропривод с трехскоростным двигателем ($2p = 4/8/24$): $\eta_{\text{экв.б}} = 0,83$; $k_{\text{дин}} = 4$	1,30	0,95	0,55	0,20	—
3	Электропривод постоянного тока с параметрическим регулированием: $\eta_{\text{экв.б}} = 0,81$; $k_{\text{дин}} = 1,25$	2,00	1,25	1,10	0,80	0,45
4	Электропривод с двигателем с фазным ротором при динамическом торможении: $\eta_{\text{экв.б}} = 0,81$; $k_{\text{дин}} = 1,25$	1,50	1,30	1,10	0,90	0,55
5	Частотно-регулируемый привод с неполной зоной регулирования и двухскоростным двигателем ($2p = 4/6$): $\eta_{\text{экв.б}} = 0,9$; $k_{\text{дин}} = 1,25$	1,40	1,15	1,00	0,70	0,45
6	Тиристорный электропривод постоянного тока: $\eta_{\text{экв.б}} = 0,94$; $k_{\text{дин}} = 1,25$	2,00	1,30	1,15	0,85	0,50
7	Частотно-регулируемый привод с односкоростным двигателем: $\eta_{\text{экв.б}} = 0,94$; $k_{\text{дин}} = 1,25$	1,45	1,30	1,15	1,05	0,70

$z \frac{\sum GD^2}{1,2GD_{дв}^2} \leq 2$ — для механизмов подъема и ≤ 5 — для механизмов передвижения и поворота), а в выражении (1.28) $U_{факт}$ и $U_{ном}$ — текущее и номинальное напряжения на зажимах двигателя.

Если в формуле (1.29) все величины правой части, кроме статической мощности ($P_{ст}$), обозначить тепловым коэффициентом k_T , то в общем виде необходимую мощность электродвигателя по нагреву при ПВ = 40% можно определить так:

$$P_{ном} \geq P_{ст}/k_T. \quad (1.30)$$

Тепловой коэффициент k_T зависит от режима работы кранового электропривода. При тех же соотношениях маховых моментов значение его, рассчитанное по формуле (1.29) при $\eta_{эв.б} = const$ и $k_{дин} = const$, для различных электроприводов приведено в табл. 6.

Таким образом, расчет и выбор необходимой мощности кранового электродвигателя методом эквивалентного к.п.д. сводится к следующему: по статической мощности $P_{ст}$ и тепловому коэффициенту k_T , пользуясь формулой (1.30), определяют необходимую мощность и предварительно выбирают электродвигатель; затем выбранный двигатель по формуле (1.29) проверяют на тепловой режим; если есть необходимость, то двигатель проверяют и на возможность обеспечения им пускового момента

$$M_{max} \geq k_{з.м} (M_{ст max} + M_{дин}), \quad (1.31)$$

где M_{max} и $M_{т max}$ — максимальные моменты собственно двигателя и статической нагрузки; $k_{з.м}$ — коэффициент запаса по моменту ($k_{з.м} = 1,1 \dots 1,2$); $M_{дин}$ — динамический момент.

Если предварительно выбранный двигатель по тепловому режиму или по перегрузке не подходит, следует выбрать двигатель большей мощности и повторить расчет.

Пример. Для механизма подъема башенного крана грузоподъемностью (с захватным приспособлением) $m = 8$ т при скорости подъема $v = 20$ м/мин (0,33 м/с), режиме работы тяжелом с ПВ = 40%, при 150 вкл/ч, к.п.д. механической передачи $\eta = 0,83$ и маховом моменте механизма $GD^2 = 2,1$ кг · м² выбрать электродвигатель переменного тока с фазным ротором

и синхронной частотой вращения 1000 мин⁻¹. Управление двигателем — контроллерное с динамическим торможением.

Решение. Рассчитываем необходимую статическую мощность

$$P_{ст} = \frac{gmv}{\eta} = \frac{9,81 \cdot 8 \cdot 0,33}{0,83} \text{ кВт} = 31,1 \text{ кВт.}$$

По табл. 6 находим тепловой коэффициент $k_T = 1,1$. Тогда необходимая номинальная мощность двигателя должна быть

$$P'_{ном} \geq \frac{P_{ст}}{k_T} = \frac{31,1}{1,1} \text{ кВт} = 28,4 \text{ кВт.}$$

Предварительно выбираем двигатель МТН 412-6 с $P_{ном} = 30$ кВт при ПВ = 40%, $n_{ном} = 930$ мин⁻¹, $GD_{дв}^2 = 4,3$ кг · м², $M_{max} = 1000$ Н · м.

Определяем приведенное число включений

$$z' = z \frac{1,2GD_{дв}^2 + GD^2}{1,2GD_{дв}^2} = 150 \frac{1,2 \cdot 4,3 + 2,1}{1,2 \cdot 4,3} \text{ вкл/ч} = 210 \text{ вкл/ч.}$$

По кривым рис. 1.3, а [3,30] находим $\eta_{эkv} = 0,765$, по табл. 6 — $\eta_{эkv, б} = 0,81$ и $k_{днн} = 1,25$, а по табл. 5 — $\epsilon = 0,4$, $k_{эkv} = 0,75$, $k_3 = 1$. Пользуясь ϵ и кривыми рис. 1.3, б, определяем $\alpha = 1$. Принимаем относительную продолжительность включения двигателя на малых частотах вращения равной базовой. Тогда $k_p = 1$.

Пользуясь найденными величинами, проверяем двигатель по тепловому режиму:

$$P_{ном} \geq \frac{k_{эkv} k_3 \eta_{эkv, б} P_{ст} \sqrt{\epsilon / \epsilon_{ном}} k_n}{k_p \alpha [\eta_{эkv, б} - k_{днн} (\eta_{эkv, б} - \eta_{эkv})]} =$$

$$= \frac{0,75 \cdot 1 \cdot 0,81 \cdot 31,1 \sqrt{40/40} \cdot 1,15}{1,1 [0,81 - 1,25 (0,81 - 0,765)]} \text{ кВт} = 29 \text{ кВт.}$$

Таким образом, двигатель выбран правильно. По условиям пуска его проверять нет необходимости, так как $M_{ст} = 9550 \frac{30}{930}$ Н · м = 308 Н · м $\ll M_{max}$.

Метод на грузочных ря до в. Этот метод учитывает степень нагрузки крана и предполагает наилучшее использование двигателей при соответствующей продолжительности их включения. Под *степенью (коэффициентом) нагрузки крана k* понимается отношение среднего момента (M_{cp}) между необходимым моментом

для перемещения механизма с номинальным грузом (M_1) и без груза (M_0) к моменту M_1 , т. е.

$$k = \frac{M_{\text{ср}}}{M_1} = \frac{M_1 + M_0}{2M_1} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{M_0}{M_1} \right). \quad (1.32)$$

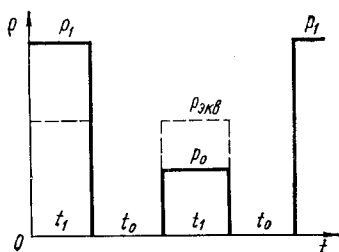


Рис. 1.4. Диаграмма нагрузки кранового механизма

Полагая, что для любых двигателей нагрузка одинаковая, при постоянной частоте вращения двигателя коэффициент нагрузки можно выразить и через мощности:

$$k = \frac{M_1 + M_0}{2M_1} = \frac{P_1 + P_0}{2P_1} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{P_0}{P_1} \right).$$

Отсюда

$$P_0/P_1 = 2k - 1. \quad (1.33)$$

Индексы здесь имеют тот же смысл, что и выше.

Пользуясь коэффициентом нагрузки k , а также максимальной (P_1) и минимальной (P_0) мощностями нагрузки двигателя за цикл его работы, можно вывести расчетную формулу для определения необходимой мощности двигателя путем следующих рассуждений. Полагаем, что цикл работы двигателя соответствует показанному на рис. 1.4. Тогда можно записать:

$$\sqrt{P_1^2 t_1 + P_0^2 t_1} = \sqrt{2P_{\text{экв}}^2 t_1}, \quad (1.34)$$

или

$$1 + \frac{P_0^2}{P_1^2} = 2 \frac{P_{\text{экв}}^2}{P_1^2}.$$

Пользуясь этим уравнением и выражением (1.33), получаем расчетную формулу в следующем виде:

$$P_{\text{экв}} = P_1 \sqrt{1 - 2k(1 - k)}. \quad (1.35)$$

Коэффициент нагрузки обычных мостовых кранов находится в следующих пределах: для механизма подъема с крюком $k = 0,55 \dots 0,65$, а с грейфером $k = 0,7 \dots 0,8$; для механизмов передвижения тележки $k = 0,65 \dots 0,75$ и моста $k = 0,75 \dots 0,9$ [22]. При выполнении инженер-

ных расчетов обычно пользуются такими значениями k : 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 и 1 независимо от типа кранового механизма.

Условно принято четыре ряда параметров двигателей (I, II, III, IV), которые характеризуют режимы их работы. Первый ряд соответствует допустимой кратковременной нагрузке двигателя (для двигателей постоянного тока она определяется безыскровой коммутацией, асинхронных двигателей переменного тока — максимальным моментом); остальные ряды соответствуют полному использованию двигателей по тепловому режиму, когда $k = 1$, т. е. второй ряд соответствует мощности двигателя при ПВ = 15%, третий ряд — мощности при ПВ = 25% и четвертый ряд — мощности при ПВ = 40%.

На основании формулы (1.35), указанных значений k и каталожных мощностей двигателей для соответствующих продолжительностей их включения в табл. 7 помещены расчетные формулы для определения необходимой мощности приводного электродвигателя кранового механизма. Мощности P_I, P_{II}, P_{III} и P_{IV} в табл. 7 отвечают соответствующему ряду параметров двигателя.

Таким образом, пользуясь табл. 7, выбор двигателя по каталожной шкале мощности производят по номинальной статической мощности P_1 механизма, его продолжительности включения и коэффициенту нагрузки.

Метод нагрузочных рядов может быть использован для выбора двигателя любого механизма, работающего в повторно-кратковременном режиме.

Таблица 7

Продолжительность включения кранового механизма, %	Мощность двигателя при постоянной нагрузке ($k = 1$)	Мощность двигателя при k , равном			
		0,9	0,8	0,7	0,6
15	P_{II}	P_{II}	P_I	P_I	P_I
25	P_{III}	$0,47 (P_{II} + P_{III})$	$0,52 (P_{II} + P_{III})$	$0,56 (P_{II} + P_{III})$	P_{II}
40	P_{IV}	$0,47 (P_{III} + P_{IV})$	$0,52 (P_{III} + P_{IV})$	$0,56 (P_{III} + P_{IV})$	P_{III}

Пример. Номинальная нагрузка двух групп общепромышленных механизмов с повторно-кратковременными режимами работы и частотой вращения около 900 мин^{-1} составляет $P_1 = 6 \text{ кВт}$. Первая группа, включающая три механизма с коэффициентами нагрузки $k_1 = 1$, $k_2 = 0,8$ и $k_3 = 0,6$, работает при ПВ = 25%. Вторая группа, состоящая из двух механизмов с коэффициентами нагрузки $k_1 = 0,8$ и $k_2 = 0,6$, работает при ПВ = 15%. Пользуясь методом нагрузочных рядов и каталожными данными, приведенными в табл. 8, выбрать приводные электродвигатели для этих механизмов.

Таблица 8

Тип двигателя	Мощность (кВт) при ПВ, %			M_{max} , Н · м
	15	25	40	
MTF 012-6	3,1	2,7	2,2	58
MTF 111-6	4,5	4,1	3,5	86
MTF 112-6	6,5	5,8	5,0	140
MTF 211-6	10,5	9,0	7,5	195
MTF 311-6	14,0	13,0	11,0	310

Решение. *Первая группа механизмов.* Для механизма, работающего с $k_1 = 1$, электродвигатель выбираем по III ряду параметров, т. е. ближайший по мощности двигатель с ПВ = 25%. Таким является двигатель типа MTF 211-6 мощностью $P_{\text{ном}} = 9 \text{ кВт}$.

Для механизма, работающего с $k_2 = 0,8$, предварительно выбираем двигатель типа MTF 112-6 и проверяем возможность использования его, пользуясь расчетной формулой $0,52(P_{\text{II}} + P_{\text{III}}) \geq P_1$. Имеем

$$0,52(P_{\text{II}} + P_{\text{III}}) = 0,52(6,5 + 5,8) \text{ кВт} = 6,4 \text{ кВт} > P_1 = 6 \text{ кВт},$$

т. е. двигатель выбран правильно.

Для механизма, работающего с $k_3 = 0,6$, электродвигатель выбираем по II ряду параметров, т. е. ближайший по мощности двигатель с ПВ = 15%. Таким является двигатель типа MTF 112-6 мощностью $P_{\text{ном}} = 6,5 \text{ кВт}$.

Вторая группа механизмов. Для обоих механизмов ($k_1 = 0,8$ и $k_2 = 0,6$) электродвигатель выбираем по I ряду параметров, т. е. ближайший по мощности двигатель с ПВ = 15%. Таким является двигатель типа MTF 111-6 мощностью 4,5 кВт, который проверяем по допустимому максимальному моменту, имея в виду, что для двигателей серии MTF максимальный момент дается при ПВ = 40%. Для выбранного двигателя максимальный момент равен 86 Н · м, а статический будет

$$M_{\text{ст}} = 9550 \frac{P_1}{n} = 9550 \frac{6}{900} \text{ Н · м} = 63,6 \text{ Н · м} < 86 \text{ Н · м},$$

т. е. двигатель выбран правильно.

Влияние схем управления на выбор мощности электродвигателей. При управлении электродвигателями посредством регулируемых вентильных преобразователей напряжение на их зажимах и ток в нагрузке имеют пульсирующий характер, а при работе на переменном токе — и не чисто синусоидальную форму. Вследствие этого и из-за явлений коммутации появляются высшие гармонические составляющие напряжений и токов, которые приводят к дополнительному нагреву двигателей. Так, например, если ток на выходе вентильного преобразователя будет колебаться от максимального (i_{\max}) до минимального (i_{\min}) значений, то в зависимости от коэффициента пульсации $k_i = \frac{i_{\max} - i_{\min}}{i_{\max} + i_{\min}}$ нагрев двигателей возрастает при $k_i = 25\%$ на 5...7%; при $k_i = 35\%$ на 15...22%, а при питании короткозамкнутого двигателя от преобразователя частоты со звеном постоянного тока потери в нем увеличатся на 10...12% [3].

При управлении асинхронными короткозамкнутыми двигателями с помощью тиристорных станций (ТСУ — Р) с уменьшением частоты вращения двигателя увеличиваются потери скольжения. Чтобы электродвигатели не перегревались, установленная мощность их должна быть выше расчетной. Это превышение $\lambda_p = P_{\text{ном}}/P_{\text{мах}}$ для двигателей типов АО-2, АОГ и МТК можно определить по кривым рис. 1.5 либо рассчитать по формуле [14], относящейся к любым крановым двигателям:

$$\lambda_p \geq 1,1 \left[(1 - \varepsilon_v) + \frac{D - 1 - s_{\text{ном}}}{D s_{\text{ном}}} \varepsilon_v \right] \frac{\varepsilon_{\text{экв}}}{\varepsilon}, \quad (1.36)$$

где $P_{\text{ном}}$ и $P_{\text{мах}}$ — необходимая мощность и мощность двигателя при наибольшей частоте вращения; $\varepsilon_v = \frac{t_2}{t_1 + t_2}$ (t_2 и $t_1 + t_2$ — время работы двигателя на пониженной частоте вращения и полное время его работы); D — необходимый диапазон регулирования частоты вращения; $s_{\text{ном}}$ — номинальное скольжение электродвигателя; $\varepsilon = t_p/T$ — относительная продолжительность его включения; t_p и T — соответственно общее время работы двигателя и время цикла; $\varepsilon_{\text{экв}} = \frac{\varepsilon}{\beta_0(1-\varepsilon) + \beta_1\varepsilon(1-\varepsilon_v) + \beta_2\varepsilon\varepsilon_v}$ (β_0 , β_1 и β_2 — коэффициенты

теплопередачи на соответствующих участках графика работы двигателя, причем для двигателей серии МТК $\beta_0 = 0,5$). Значения коэффициентов β_1 и β_2 для любой регулируемой частоты вращения в диапазонах D_1 и D_2 можно определить по формуле

$$\beta_{1,2} = \frac{D_{1,2}\beta_0 + 1 - \beta_0}{D_{1,2}}.$$

Анализ кривых рис. 1.5 показывает, что при использовании ТСУ — Р, когда $\epsilon = 0,1$ и диапазон регулирования $D = 10:1$, установленную мощность электродвигателей необходимо увеличивать примерно в два раза, а при $\epsilon_v = 0,2$ и $\epsilon_v = 0,4$ — еще больше; при существенном уменьшении диапазона регулирования необходимая установленная мощность электродвигателей снижается.

По сравнению с другими электроприводами применение ТСУ — Р, как правило, дает экономический эффект, который в зависимости от номинального тока ТСУ — Р и числа включений колеблется в широких пределах [14].

1.3. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ЭЛЕКТРОПРИВОДАМ КРАНОВЫХ МЕХАНИЗМОВ, И ЭЛЕКТРОБОРУДОВАНИЕ ИХ ТОРМОЗНЫХ УСТРОЙСТВ

К электроприводам кранов, помимо общих, предъявляются специфические требования, определяемые особенностями работы их механизмов. К специальным требованиям относятся: а) обеспечение необходимого диапазона регулирования частоты вращения; б) ограничение ускорений; в) обеспечение требуемых механических характеристик двигателей; г) наличие механических тормозов. Первые три требования зависят от назначения

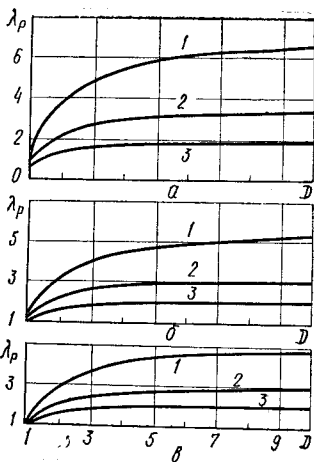


Рис. 1.5. Зависимость необходимого увеличения установленной мощности короткозамкнутых электродвигателей типов АО2 (а), АОГ (б) и МТК (в) от диапазона регулирования их частоты вращения при управлении ими с помощью ТСУ — Р:

1 — $\epsilon_v = 0,4$; 2 — $\epsilon_v = 0,2$; 3 — $\epsilon_v = 0,1$

механизмов крана и грузоподъемности их, а также от той роли, которую играет кран в технологическом процессе.

Специальные требования. Известно, что устанавливать тяжелые грузы труднее, чем легкие; поэтому посадочные скорости механизмов подъема кранов большой грузоподъемности и скорости перед остановкой механизмов перемещения должны быть небольшими, чтобы обеспечить требуемую точность установки грузов. Так, например, посадочная скорость судостроительных, монтажных и козловых кранов грузоподъемностью 30...80 т должна составлять 0,25...0,45 м/мин, чтобы точность установки грузов была 2...5 мм. Посадочные же скорости подобных кранов меньшей грузоподъемности (3...25 т) и такого же порядка точности установки грузов (5...10 мм) составляют 0,6...1,0 м/мин. Посадочная скорость строительных кранов грузоподъемностью 10...25 т при точности установки блоков 5...10 мм равна 1...1,5 м/мин, а грузоподъемностью до 5...8 т при точности установки блоков 30...50 мм — 2...4 м/мин [13].

Для большинства крановых механизмов достаточным является использование при каждом движении естественной и одной искусственной характеристик, обеспечивающих требуемую посадочную скорость. И лишь для особо точной установки грузов, перемещения жидких металлов и хрупких предметов требуется плавное или ступенчатое регулирование частоты вращения двигателей механизма при достаточно жестких механических характеристиках. Промежуточные характеристики в ряде случаев необходимы и для ограничений ускорений при разгонах и торможениях электроприводов. Поэтому диапазон регулирования частоты вращения электродвигателей подъемных механизмов колеблется в пределах от 4 : 1 до 50 : 1, а механизмов перемещения и поворота — от 4 : 1 до 70 : 1.

Для повышения производительности кранов номинальные скорости их механизмов желательно иметь достаточно большими, а поскольку моменты инерции, приведенные к валу двигателя всех крановых механизмов и грузов, намного больше моментов инерции ротора или якоря двигателя и число включений в час колеблется от 20...30 до 200...500 и более, желательно иметь и большие ускорения механизмов при их разгоне и торможении.

нии. Следствием больших скоростей и ускорений, однако, являются значительные перегрузки в звеньях механизмов, раскачивание груза, возникновение упругих колебаний системы и пробуксовка колес или юз механизмов перемещения, причем амплитуды раскачивания и упругих колебаний зависят от ряда факторов, в том числе от длины подвеса груза l , начальной ($v_{нач}$) и конечной ($v_{кон}$) скоростей точки подвеса в период разгона механизма. Например, при горизонтальном перемещении максимальное отклонение груза от вертикали происходит тогда, когда пуск механизма осуществляется сразу на большую скорость ($v_{нач} = 0$). В этом случае отклонение $\Delta L = v_{кон} \sqrt{L/g}$.

Для разгона и торможения механизмов перемещения без пробуксовки колес необходимо, чтобы сила тяги не превышала силы сцепления колес с рельсами. При этом допустимое ускорение

$$a = \varphi k g, \quad (1.37)$$

где φ — коэффициент сцепления ходовых колес с рельсами (для кранов $\varphi = 0,12 \dots 0,15$); k — отношение числа ведущих осей к общему числу осей; g — ускорение свободного падения.

Указанные факторы приводят к необходимости ограничения номинальных скоростей и допустимых ускорений крановых механизмов. На основании опыта эксплуатации кранов рекомендуется принимать следующие ускорения: а) для механизмов подъема мостовых кранов общего назначения — $0,2 \text{ м/с}^2$, монтажных кранов — $0,1 \text{ м/с}^2$, перегрузочных грейферных кранов — $0,8 \text{ м/с}^2$; б) для механизмов передвижения кранов и тележек: мостовых кранов общего назначения — $0,2 \text{ м/с}^2$, монтажных кранов — $0,15 \text{ м/с}^2$, козловых кранов — $0,1 \text{ м/с}^2$, грейферных тележек — $0,8 \text{ м/с}^2$ [16]. Кроме того, ускорение механизмов также может быть ограничено в зависимости от перемещаемых грузов и, например, для перевозки жидких металлов и хрупких предметов оно не должно превышать $0,1 \dots 0,2 \text{ м/с}^2$ [26]. Чтобы обеспечить эти ограничения ускорений, продолжительность пуска типовых контроллеров составляет $4 \dots 6 \text{ с}$. При торможении же ускорения могут быть больше ускорений при пусах в $1,3 \dots 1,6$ раза [3].

Статистические данные по эксплуатации механизмов подъема кранов показывают, что, например, для погрузочных кранов наиболее часто встречающийся груз составляет 30...50% номинального; количество операций, выполняемых башенными кранами с грузами 60...100% номинального, не превышает 30%. Масса механизмов передвижения и поворота соизмерима или больше массы груза. Например, масса тележки кранов в зависимости от их грузоподъемности колеблется в пределах 30...55% номинального груза, а в зависимости от грузоподъемности и длины пролета моста масса крана составляет 0,75...6,0 номинального груза [13]. Поэтому, если повышенные требования по обеспечению посадочной скорости или по уменьшению ускорений при переходных процессах не предъявляются, то для увеличения производительности кранов предпочтение следует отдавать двигателям с мягкой механической характеристикой, тогда как при обслуживании технологических операций, требующих высоких точностей установки перемещаемых грузов,— двигателям с жесткой механической характеристикой.

В современных приводах кранов для повышения производительности и безопасности эксплуатации всех механизмов, кроме электрического тормоза, должно быть предусмотрено механическое торможение. При этом механизмы подъема снабжаются только нормально замкнутыми тормозами, автоматически замыкающимися при выключении тока. Механизмы же передвижения кранов и тележек должны быть снабжены автоматически действующими или управляемыми тормозами нормально закрытого или комбинированного типа.

Исходной величиной для расчета и выбора элементов тормозных устройств является гарантированно развиваемый тормозной момент без учета возможного электрического торможения. Для определения этого момента должны быть известны: характер работы, выполняемой механизмом, режим работы механизма, конструктивные и расчетные данные механизма (масса груза и отдельных элементов механизма, инерционные массы и скорости движения, передаточные числа, к.п.д. и т.д.).

Расчет тормозов механизмов подъема производят по тормозному моменту, обеспечивающему удержание 125% номинального груза при его остановке. Кроме того, так

как коэффициент трения при торможении может изменяться, необходимо вводить коэффициент запаса торможения k_T , значение которого зависит от режимов работы кранов: $k_T = 1,5$ — для легких режимов, $k_T = 1,75$ — для средних, $k_T = 2$ — для тяжелых и $k_T = 2,5$ — для весьма тяжелых режимов [2]. В этом случае тормозной момент (Н · м) определяется выражением

$$M_T = k_T \cdot 9550 \frac{g(m_{\text{ном}} + m_0)v_{\text{ном}}\eta}{n_{\text{ном.т}}}, \quad (1.38)$$

где $v_{\text{ном}}$ и $n_{\text{ном.т}}$ — номинальные скорость подъема груза (м/с) и частота вращения тормозного шкива (мин^{-1}), соответствующая скорости $v_{\text{ном}}$. Для кранов, транспортирующих раскаленный металл, ядовитые и взрывчатые вещества, должны быть предусмотрены два тормоза с коэффициентом запаса торможения каждого по отношению к номинальному грузу $k_T \geq 1,25$. На механизмах с двумя приводами должно быть установлено не менее чем по одному тормозу на каждом приводе с таким же запасом торможения.

Тормозной момент тормозов, устанавливаемых на механизмах горизонтального перемещения, определяется исходя из условия обеспечения удержания механизма при наибольших возможных внешних статических нагрузках (ветер, уклон и т. п.) с учетом заданного максимального выбега s механизма при остановке [3], т. е.

$$\begin{aligned} M_{T.p} &= k_T \left(M_{ГР}\eta + \frac{GD^2 n_{\text{ном.т}}}{38,3t_T} \right) = \\ &= k_T \left(M_{\text{ст max}}\eta^2 + \frac{GD^2 v_{\text{ном}} n_{\text{ном.т}}}{76,5s} \right), \end{aligned} \quad (1.39)$$

где $M_{\text{ст max}}$ — максимальный момент статической нагрузки, действующий в направлении движения, Н · м; GD^2 — суммарный маховой момент с грузом, приведенный к валу тормоза, кг · м²; $v_{\text{ном}}$ — номинальная скорость горизонтального перемещения, м/с; $t_T = \frac{s}{v_{\text{сп}}} = \frac{2s}{v_{\text{ном}}}$ — время торможения.

Для предотвращения буксования колес о рельсы необходимо, чтобы момент сцепления колес с рельсами был не меньше момента, создаваемого тормозом при работе механизма без груза, когда коэффициент сцепления

наименьший. Поэтому с учетом коэффициента запаса $k_T \approx 1,6$ тормозной момент не должен превышать значения, определяемого выражением [3]

$$M_{T \max} < 15\,000 \frac{kv_{\text{ном}}m}{n_{\text{ном}}}, \quad (1.40)$$

где k — отношение числа тормозящих (ведущих) колес к общему числу колес опор; m — масса механизма перемещения без груза, т; $n_{\text{ном}}$ и $v_{\text{ном}}$ — номинальные частота вращения двигателя (мин^{-1}) и скорость механизма, м/с.

Необходимые тормозные моменты могут быть рассчитаны также и исходя из условий допустимых ускорений механизмов крана. В механизмах передвижения с раздельными приводами тормоза должны быть установлены на каждом приводе. Тормозной момент каждого тормоза определяется при работе крана без груза и наименьшем давлении на ведущие ходовые колеса рассматриваемой стороны крана, т. е. применительно к механизму моста момент должен определяться для случая, когда крановая тележка находится на противоположной стороне моста.

По полученным значениям тормозных моментов производят выбор тормозных шкивов и электромагнитов или электрогидравлических толкателей.

По конструктивному исполнению рабочих элементов тормоза делятся на *радиальные* и *осевые*. Радиальные, в свою очередь, разделяются на *колодочные* и *ленточные*, а осевые — на *дисковые* и *конусные*, но торможение во всех тормозах осуществляется механическим способом — посредством пружин и грузов, а растормаживание — с помощью электромагнитов или электрогидравлических толкателей. В грузоподъемных машинах широко применяются колодочные тормоза с наружными колодками. Диаметр $D_{\text{ш}}$ тормозных шкивов и радиальный отход колодок (зазоры между шкивом и тормозными колодками ϵ), исходя из полученных значений тормозных моментов M_T , выбираются в соответствии с табл. 9.

Тормозные шкивы по отношению к нагрузке обычно устанавливаются до редуктора, так как при этом частота вращения шкива выше, а необходимое усилие меньше. Если же в качестве тормозного шкива используется соединительная муфта, то тормоз устанавли-

Таблица 9

$D_{ш}$, мм	100	200	300	400	500	600	700	800
M_T , Н · м	19,6	147	490	1080	1960	3960	6370	9800
e , мм	0,5	0,75	1	1,5	1,5	1,75	1,75	2

вается так, чтобы его колодки зажимали ту половину муфты, которая соединена с редуктором, а не с двигателем.

Электромагниты, применяемые для оттормаживания, подразделяются на *длинноходовые*, например типов КМП, ВМ, КМТ, и *короткоходовые* — типов МП, МО. По роду питающего тока эти электромагниты делятся на электромагниты постоянного тока (последовательного и параллельного включений) и переменного тока (трехфазные, например КМТ, и однофазные — МО). Короткоходовые электромагниты обладают большим быстродействием по сравнению с длинноходовыми, что следует иметь в виду при выборе электромагнита.

Ток, потребляемый электромагнитами переменного тока, возрастает с увеличением зазора в магнитной системе, поскольку при этом уменьшается реактивное сопротивление катушки. Так, например, в однофазных электромагнитах типа МО, предназначенных для установки в закрытых помещениях, пусковой ток при включении, когда зазор в магнитной системе наибольший, в 5...6 раз выше номинального, а в трехфазных — еще больше. При эксплуатации электромагнитов возможно попадание мусора в зазор их магнитной системы и тогда потребляемый катушкой ток в течение всего времени включения электромагнита будет больше номинального. Эти факторы приводят к быстрому выходу из строя изоляции, а следовательно, и самих электромагнитов, тогда как у электромагнитов постоянного тока их нет. По этим причинам электромагниты переменного тока менее надежны, чем электромагниты постоянного тока, и имеют ограничения по числу включений в час (до 600). Поэтому в тормозах с диаметром шкива $D_{ш} > 300$ мм даже при общем питании от сети переменного

тока рекомендуется устанавливать тормозные магниты постоянного тока, питаемые от специальных выпрямителей [32].

Тормозные электромагниты выпускаются на следующие относительные продолжительности включения: постоянного тока параллельного и последовательного включений — на ПВ = 25, 40 и 100% при напряжении 110, 220, 440 В, а переменного тока — на ПВ = 40 и 100% при напряжении 220, 380, 500 В и вероятности безотказной работы 0,95 за год эксплуатации [3]. При выборе тормозного электромагнита необходимо учитывать его относительную продолжительность включения, ориентируясь на ближайшее большее значение, исходя из действительной, а не номинальной относительной продолжительности включения двигателя. Выбор электромагнитов последовательного включения надлежит производить по кривым зависимости тягового усилия от тока и затем проверять их по минимальному току, так как при определенных минимальных токах ($I < 0,4 \dots 0,6 I_{\text{ном}}$) электромагнит может не сработать. При отсутствии таких кривых указываются два значения тока — номинальный и минимальный, ниже которого электромагнит не срабатывает.

Все электромагниты, несмотря на наличие демпфирующих устройств, дают при включении значительные удары, которые оказывают отрицательные воздействия на тормозные устройства. Поэтому вместо электромагнитов стали применять электрогидравлические толкатели типов ТЭГ, ТГМ, ТГ и Т, исключающие удар в кинематической схеме. Кинематическая схема их такова: двигатель вращает крыльчатку, которая перекачивает масло из одной части цилиндра в другую, перемещая таким образом, и поршень, связанный с подвижным штоком, который, в свою очередь, через систему передачи воздействует на перемещение тормозных колодок. Толкатели допускают до 100 включений в час при ПВ = 100% и до 700 включений при снижении ПВ до 60%. Показатель их надежности равен 0,93...0,85 [3].

Основными характеристиками длинноходовых тормозных электромагнитов и электрогидравлических толкателей с поступательным ходом якоря являются усилие F_m и ход якоря h_m , а клапанных электромагнитов — момент магнита M_m и его угол поворота φ .

Электромагнит и электрогидравлический толкатель при размыкании тормоза перемещают на величину хода (или угла поворота) якоря, преодолевая усилие замыкающего груза или пружины, пропорциональное рабочему усилию тормоза. При этом рабочий элемент тормоза (например, колодки) перемещается на установочный зазор ϵ . Выбор тормозного электромагнита или электрогидравлического толкателя производится исходя из равенства работы, совершаемой электромагнитом на его ходе, и произведения рабочего усилия тормоза на установочный зазор. Для длинноходовых электромагнитов и электрогидравлических толкателей это равенство имеет вид

$$kF_m h_m = F_T \epsilon / \eta, \quad (1.41)$$

где $F_T = \frac{2M_T}{CD_{ш}}$ — нормальное усилие, действующее на колодки тормоза; C — коэффициент трения между шкивом и колодками (для ферродо $C = 0,35 \dots 0,45$); $k = 0,8 \dots 0,85$ — коэффициент использования хода якоря электромагнита; $\eta = 0,9 \dots 0,95$ — к. п. д. рычажной передачи.

Для тормозных электромагнитов клапанного типа уравнение (1.41) преобразуется к виду

$$kM_m \varphi = F_T \epsilon / \eta. \quad (1.42)$$

Кроме тормозов, на кранах, как правило, должны быть приборы и устройства безопасности. К этим элементам относятся: концевые выключатели, ограничители и указатели грузоподъемности, указатели угла наклона, рельсовые захваты, ограничители перекоса и т. д.

1.4. УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ КРАНОВЫХ МЕХАНИЗМОВ С ПОМОЩЬЮ КОНТАКТНЫХ ЭЛЕКТРОАППАРАТОВ

Электроприводы крановых механизмов могут быть как однодвигательные, так и двухдвигательные постоянного или переменного тока. Большинство крановых механизмов имеют однодвигательные приводы. Однако, в приводах передвижения кранов с большими пролетами, а иногда и в приводах кранов большой грузо-

подъемности устанавливаются два двигателя. При выборе схем управления ими необходимо руководствоваться требованиями технологического процесса, который обеспечивает кран. А в том случае, когда эти требования можно удовлетворить различными схемами, определяющими должны быть схемы с более высокими технико-экономическими показателями. В большинстве случаев по первоначальным затратам и надежности наилучшими электроприводами являются электроприводы переменного тока с короткозамкнутым двигателем. Поэтому, если такие приводы удовлетворяют требованиям технологического процесса, то им и следует отдавать предпочтение. Управление электроприводами крановых механизмов осуществляется с пульта, а собственными приводами каждого механизма — с помощью контактных или бесконтактных аппаратов.

Управление с помощью пускателей и контроллеров.

Двигатели электроприводов, имеющие короткозамкнутый ротор, могут быть как односкоростными, так и многоскоростными. Первые наибольшее применение нашли в приводах электрических талей, кран-блоков, монорельсовых тележек, различных лебедок и довольно часто в приводах кранов, работающих во взрыво- и пожароопасных помещениях; вторые — в приводах судовых кранов и общепромышленных кранов с легкими режимами работы. Управление односкоростными короткозамкнутыми двигателями осуществляется кулачковыми контроллерами типа ККТ63А [3] или магнитными пускателями, а многоскоростными — магнитными станциями.

В том случае, когда требуется обеспечить небольшой диапазон регулирования частоты вращения кранового механизма, что характерно для наиболее распространенных кранов, используются двигатели переменного тока с фазным ротором или постоянного тока с последовательным возбуждением, управление которыми осуществляется с помощью контактных контроллеров. Пуск, торможение и ступенчатое регулирование частоты вращения при этом производятся изменением дополнительного сопротивления в цепях обмоток ротора или якоря электродвигателей. Тогда при $I = I_{\text{ном}} = \text{const}$, $U = U_{\text{ном}} = \text{const}$ и $\Phi = \Phi_{\text{ном}} = \text{const}$ допустимый момент нагрузки будет $M = \Phi_{\text{ном}} I_{\text{ном}} = M_{\text{ном}} = \text{const}$, т. е. регулирование частоты вращения осуществляется при по-

стоянном моменте, что типично для крановых механизмов. В 1973 г. около 80% крановых электроприводов работало с асинхронными электродвигателями, имеющими фазный ротор [13]; следовательно, на эти электроприводы должно быть обращено особое внимание.

В настоящее время выпускаются кулачковые (до 300 вкл/ч) и обычные магнитные (до 1200 вкл/ч) контроллеры [3], а для механизмов подъема, работающих на переменном токе, — кулачковые и магнитные контроллеры, предусматривающие динамическое торможение с самовозбуждением. Магнитные контроллеры изготавливаются на большие мощности и срок службы, ими легче управлять, они обеспечивают автоматический пуск и торможение электродвигателей.

Контроллеры выпускаются *симметричные* (для механизмов горизонтального перемещения и поворота, схемы включения которых в обе стороны одинаковые) и *несимметричные* (для механизмов подъема в сторону подъема и опускания схемы включения разные).

Кулачковые и магнитные контроллеры, не имеющие защитной и коммутационной аппаратуры, включаются в сеть через защитные панели, а магнитные контроллеры, имеющие такую, — непосредственно. В настоящее время выпускаются защитные панели типа ПЗКБ для одновременного подключения нескольких двигателей переменного тока и типов ППЗК и ППЗБ для подключения двигателей постоянного тока на стандартные напряжения до 500 В.

Силовые кулачковые контроллеры выпускаются для переключений как в цепях постоянного тока напряжением 220 и 440 В (типов ККП и КВ1), так и в цепях переменного тока (типа ККТ) на стандартные напряжения — 220 и 380 В. Электроприводы с контроллерами без динамического торможения обеспечивают диапазон регулирования частоты вращения в пределах 2,5 : 1... ..4 : 1, а при наличии динамического торможения с самовозбуждением — до 8 : 1. Каждый контроллер, как правило, управляет одним двигателем. Исключение составляет контроллер ККТ62, с помощью которого производится управление двумя двигателями механизмов перемещения.

Электроприводы с силовыми кулачковыми контроллерами предназначены для использования в механизмах

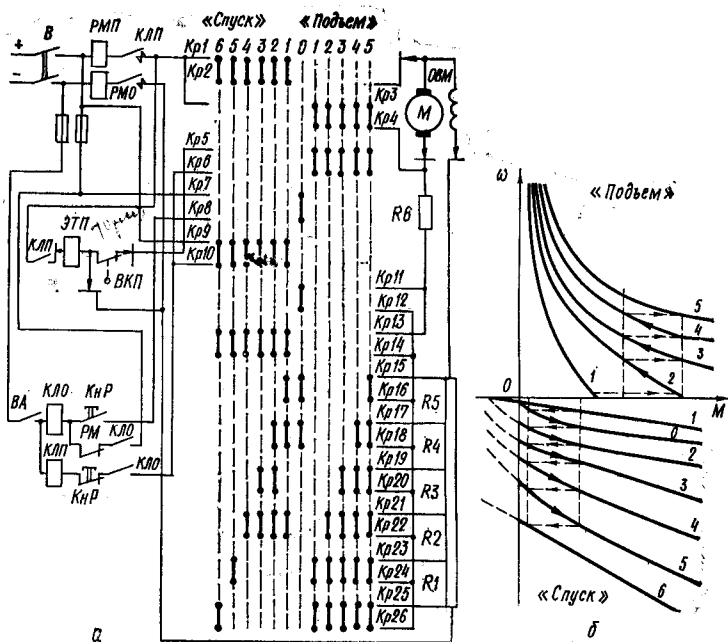


Рис. 1.6. Принципиальная схема кулачкового контроллера типа ККП-102 (а) и механические характеристики электропривода при подъеме и опускании груза (б)

с легкими и средними режимами работы и только при значительном снижении мощности статической нагрузки они могут применяться в механизмах с тяжелыми режимами работы. Мощности управляемых ими двигателей в легких и средних режимах не превышают 30 кВт (при ПВ = 40%), а при использовании магнитных реверсов — 45 кВт [3].

Номинальной мощностью кулачкового контроллера является мощность управляемого им двигателя при номинальных напряжении и токе, отнесенном к режиму работы при ПВ = 40% и общей продолжительности каждого цикла не более 4 мин.

В качестве примера использования кулачкового контроллера с несимметричной схемой для управления двигателем постоянного тока последовательного возбуждения на рис. 1.6 изображены принципиальная схема контроллера типа ККП-102 и получаемые при

этом характеристики двигателя в различных положениях рукоятки управления при подъеме и опускании груза [15]. Контроллер питается от сети через защитную панель.

На схеме напряжение к двигателю подводится посредством линейных контакторов: общего *КЛО* и подъема *КЛП*, которые, кроме того, обеспечивают защиту схемы от перегрузок и коротких замыканий. Во время подъема груза якорь электродвигателя и его обмотка возбуждения включены последовательно, а частота вращения двигателя регулируется изменением добавочного сопротивления резисторов *R2...R5*. При опускании груза электродвигатель включается по схеме безопасного спуска, когда якорь и обмотка возбуждения соединены параллельно, а частота вращения регулируется изменением сопротивления резисторов *R1...R5*. При такой схеме опускания груза обеспечивается ограничение скорости холостого хода на всех характеристиках спуска и исключается свободное падение груза при моменте нагрузки, превосходящем потери в механической передаче.

Остановка груза при подъеме и опускании производится переводом рукоятки контроллера в нулевое положение, при котором катушка электромагнитного тормоза *ЭТП* обесточивается и на тормозной шкив накладываются тормоза, причем во время опускания груза механическое торможение дополняется электрическим, что повышает интенсивность торможения и снижает износ тормозных колодок. При нулевом положении рукоятки контроллера двигатель отключается от сети и, замыкаясь на резистор *R6*, переводится в режим динамического торможения с самовозбуждением, который, в свою очередь, исключает падение груза при исчезновении питающего напряжения.

Для подготовки схемы к работе необходимо включить выключатель *B*, аварийный выключатель *ВА* и нажать кнопку *КнР*. После этого первым включается общий контактор *КЛО*, а когда кнопка *КнР* будет отпущена, работает контактор подъема *КЛП*.

При исчезновении питающего напряжения или при отключении схемы по другим причинам ее можно привести в рабочее состояние только после перевода рукоятки командоконтроллера в нулевое положение.

Схемы кулачковых контроллеров, предназначенных для управления механизмами перемещения в обоих направлениях движения, и механические характеристики двигателя аналогичны показанным на рис. 1.6 при подъеме груза.

— Принципиальная схема кулачкового контроллера переменного тока типа ККТ69А, изображенная на рис. 1.7, а [3], иллюстрирует пример использования принципа динамического торможения с самовозбуждением, а приведенные на рис. 1.7, б кривые являются механическими характеристиками электропривода при управлении этим контроллером. Схема обеспечивает ступенчатый пуск и регулирование частоты вращения электродвигателя, а также реверс и торможение его.

Включается электропривод разъединителем P с последующим включением линейного контактора $KЛ$ кнопкой $KнВ$; реверс электродвигателя производится контакторами $KВ$ и $KН$; цепь динамического торможения включается контактором $KД$, а механически и электрически заблокированный с ним контактор $KСП$ отключает статор электродвигателя при динамическом торможении; ступенчатый пуск и регулирование частоты вращения электродвигателя обеспечиваются контактором $KУ$ и контактами $K7...K12$ контроллера; защита от перегрузок осуществляется с помощью реле $РМ$; положение подъема ограничивает конечный выключатель $ВКВ$; уровень подпитки динамического торможения контролируется реле $РКТ$, а реле $РКД$ контролирует состояние выпрямительных диодов, срабатывая в случае пробоя любого из них.

Переход от одной частоты вращения к другой осуществляется переводом рукоятки контроллера из одного положения в другое.

Для получения динамического торможения с самовозбуждением две фазы обмотки статора через выпрямитель подключаются к ротору электродвигателя, а начальное подмагничивание осуществляется через контур подпитки (цепь реле $РКТ$), где ток подпитки составляет 25...30% номинального тока.

Динамическое торможение с самовозбуждением позволяет получить достаточно жесткие механические характеристики двигателя при опускании груза, обеспечивающие устойчивые посадочные скорости, причем ре-

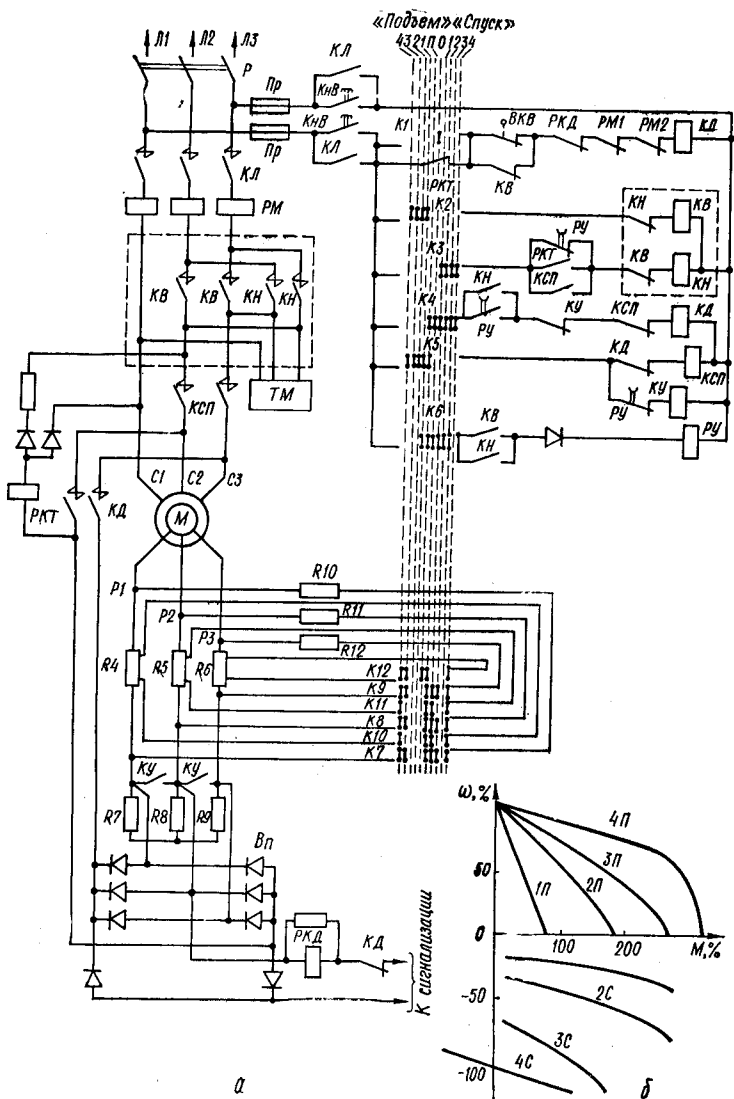


Рис. 1.7. Принципиальная схема кулачкового контроллера с динамическим самоторможением и магнитным реверсором типа ККТ69А (а) и механические характеристики электропривода при подъеме и опускании груза (б)

жим динамического торможения реализуется на всех положениях контроллера, кроме последнего, на котором двигатель работает при подключении к цепи его ротора дополнительных сопротивлений. Для исключения падения груза, когда могут быть одновременно разомкнуты контакторы *КД* и *КСП*, в схеме предусмотрено промежуточное нефиксированное положение рукоятки контроллера *П*, что обеспечивает замыкание контактов контроллера *К5* раньше, чем разомкнутся контакты контроллера *К4* при переводе рукоятки из нулевого положения в первое.

Контроллер применяется с защитной панелью и обеспечивает автоматический разгон двигателя при переводе рукоятки сразу из нулевого в крайнее положение.

Магнитные контроллеры, как и кулачковые, выпускаются для работы в силовых цепях постоянного и переменного токов. Обычные магнитные контроллеры постоянного тока (типа *П*), переменного тока (типов *Т* и *ТА* и типа *К* — металлургического исполнения) относятся к симметричным, а контроллеры типов *ПС*, *ТС*, *ТСА* и *КС* — к несимметричным контроллерам. Для управления приводами с двумя двигателями используются сдвоенные — дуплексные симметричные контроллеры типов *ДП*, *ДТ* и *ДК* и несимметричные типов *ДПС*, *ДТС*, *ДКС*; они имеют двойной комплект аппаратуры (две панели управления) и дополнительный переключатель для управления одним или двумя двигателями.

Цепи магнитных контроллеров постоянного тока по напряжению питания это силовые цепи 220 и 440 В и цепи управления 220 В; переменного тока серии *К* — это цепи управления 220 В постоянного тока, а контроллеров типов *Т* и *ТА* — это силовые цепи и цепи управления 220, 380 и 500 В. Кроме того, для управления двигателями переменного тока с фазным ротором и динамическим торможением с самовозбуждением, используемых в механизмах подъема, выпускаются магнитные контроллеры с напряжением питания силовой схемы 380 В. К их числу относятся общепромышленные контроллеры типа *ТСД* и контроллеры с бестоковой коммутацией силовых цепей типа *КСДБ*, используемые в металлургической промышленности и устанавливаемые на грейферных кранах. Цепи управ-

ления контроллеров ТСД и КСДБ питаются напряжением 220 В переменного тока при 160 и 250 А и таким же напряжением постоянного тока при 400 А. Команды управления магнитным контроллерам подаются командоконтроллерами (кулачковыми или бесконтактными — сельсинными) либо кнопочными постами.

На рис. 1.8, а изображена несимметричная схема магнитного контроллера типа ТСА, предназначенного для управления двигателем переменного тока с фазным ротором [3]. Подобно этой схеме при подъеме груза работает симметричная схема контроллера типа ТА. Контроллер ТСА подключается к сети через защитную панель. Включение двигателя осуществляется контактором *КЛ*, реверс — контакторами *КВ* и *КН* (при включенном *КЛ*), включение на режим противовключения — контактором *КП*, однофазного торможения — контактором *КО*; регулирование частоты вращения производится контакторами *КП*, *КУ1...КУ4* посредством подключения пускорегулировочных резисторов; торможение осуществляется тормозом *ТМ*, который управляется контактором *КТ*. Чтобы одновременного включения контакторов *КП* и *КО*, а также *КВ* и *КН* не было, они попарно механически заблокированы; для исключения падения груза или движения его с большей скоростью предусмотрена ножная педаль *НП*, включение которой обеспечивает работу двигателя в режиме противовключения; необходимая выдержка времени при разгоне электропривода, когда рукоятка контроллера быстро переводится из нулевого в одно из крайних положений и наоборот, достигается с помощью реле *РУ1* и *РБ*.

Рукоятка контроллера ТСА имеет четыре положения при подъеме и опускании груза, что позволяет получить соответствующее количество механических характеристик двигателя, изображенных на рис. 1.8, б. В крайнем положении рукоятки в цепи ротора двигателя остается подключенным резистор. В сторону подъема груза резисторы подключаются к цепи ротора последовательно с обмотками его фаз, а при необходимости увеличения частоты вращения — шунтируются контактами контакторов *КП* и *КУ1...КУ4* (характеристики *1П...4П*). В сторону опускания груза двигатель может работать в тормозных режимах и в режиме

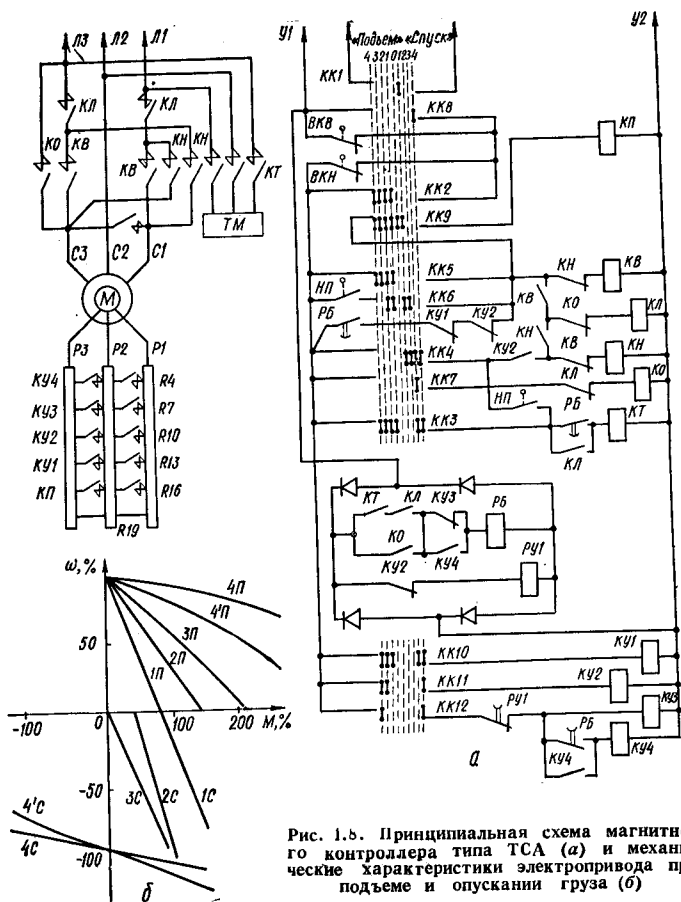


Рис. 1.5. Принципиальная схема магнитного контроллера типа ТСА (а) и механические характеристики электропривода при подъеме и опускании груза (б)

силового спуска при подключении соответствующих резисторов к цепи ротора. При номинальных грузах рукоятка контроллера устанавливается в первом и втором положениях, что соответствует режиму противовключения (характеристики 1С и 2С), в третьем положении — режим однофазного торможения (характеристика 3С), в четвертом положении осуществляется реверс (включается контактор КН) и двигатель включается в сторону опускания груза (характеристика 4С). В обоих случаях (подъема и опускания груза) на первом поло-

жении рукоятки командоконтроллера механизм растормаживается.

В схеме предусмотрены конечные выключатели с контактами *ВКВ* и *ВКН*. Для увеличения надежности контроллера реле *РУ1* и *РБ* питаются постоянным током.

Магнитные контроллеры могут использоваться при любых режимах работы крановых механизмов, причем электроприводы с магнитными контроллерами переменного тока охватывают диапазон номинальных мощностей двигателей от 11 до 180 кВт в механизмах подъема и от 3,5 до 100 кВт в механизмах передвижения, а приводы с контроллерами постоянного тока — мощности двигателей последовательного возбуждения от 2,4 до 106 кВт (при ПВ = 40%), причем все контроллеры постоянного тока снабжены индивидуальной защитой. Электроприводы с магнитными контроллерами обеспечивают регулирование частоты вращения в следующих пределах: при работе на переменном токе и обычными схемами — от 2,5 : 1 до 4 : 1, при динамическом торможении с самовозбуждением — до 8 : 1, при работе на постоянном токе и номинальном грузе — до 6 : 1.

Помимо рассмотренных, встречаются упрощенные контроллерные схемы управления крановыми электроприводами переменного тока с двигателями с фазным ротором. К ним, например, относятся [19] такие схемы строительных башенных кранов, как с тормозными электрическими машинами вихревого типа, с одно- или двухскоростной асинхронной тормозной электрической машиной, с двумя асинхронными электродвигателями, имеющими разное число полюсов, и т. д.

Номинальный ток магнитных контроллеров должен быть не меньше расчетного тока двигателя при заданных условиях эксплуатации и режимах работы кранового механизма, т. е.

$$I_{\text{ном}} \geq I_p k, \quad (1.43)$$

где I_p — расчетный ток двигателя; k — коэффициент, учитывающий тип контроллера и режим работы механизма: $k = 0,75 \dots 0,9$ — для легких режимов; $k = 0,7 \dots 1,0$ — для средних режимов; $k = 1,0 \dots 1,5$ —

Таблица 10

Номиналь- ный ток, А	63	160	250	400	630
Тип кон- роллера	К, ДК, ДП	ТС, ТА, ТСА, ДТА, ТАЗ, К, ДК, КС, ДКС, ТСД, КСДБ, П, ДП, ПС, ДПС	ТСА, К, ДК, КС, ДКС, ТДС, КСДБ, П, ДП, ПС, ДПС	КС, ТСД, КСДБ	П, ПС, ДПС

для тяжелых режимов; $k = 1,2...2,0$ — для весьма тяжелых режимов и $k = 1,5...2,0$ — для особо тяжелых режимов [3]. Номинальные значения тока магнитных контроллеров, выпускаемых заводом «Динамо», приведены в табл. 10 [3].

Помимо номинального тока, контроллеры должны быть рассчитаны на коммутацию наибольших допустимых значений токов включения, приводимых в каталогах.

Некоторые особенности контроллера управления. Из-за наличия зазоров между зубцами редукторов, вследствие ослабления канатов и из-за других причин в начале пуска крановых электродвигателей момент сопротивления минимальный ($M \approx 0$), что приводит к повышенным ускорениям двигателей в начале разгона, т. е. к ударам в кинематической схеме привода. Для их ослабления уменьшают момент двигателя путем реостатного регулирования на предварительных ступенях. Чтобы не было опускания тяжелых грузов при подъеме или чрезмерных скоростей при опускании грузов, начальные пусковые моменты на первой характеристике контроллера должны быть не менее $0,7...1,0 M_{ном}$, а на первой характеристике механизмов передвижения (определяются допустимым ускорением) — быть в пределах $0,5...0,7 M_{ном}$ [3].

В некоторых схемах контроллеров, помимо регулировочного реостата, предусматривается включение в цепь ротора неотключаемого резистора, повышающего критическое скольжение (иногда до величины, близкой к единице). Это гарантирует исключение опрокидывания двигателя, т. е. потери момента при скольжении, превышающем критическое.

При использовании симметричных контроллеров постоянного тока в обе стороны, а несимметричных в сторону подъема груза схемы включения двигателей для всех положений рукоятки (кроме первого) имеют нормальный вид, т. е. последовательно с якорем включаются пускорегулировочные резисторы. На первом же положении рукоятки якорь шунтируется дополнительным резистором, чем обеспечивается получение предварительной ступени регулирования с пониженным моментом, а в нулевом положении рукоятки двигатель включается по схеме динамического торможения с самовозбуждением. При использовании несимметричных контроллеров постоянного тока в сторону опускания груза обмотка возбуждения (*ОВ*) двигателя включается параллельно якорю (рис. 1.9), а якорь соединяется по потенциометричной схеме (*R1*, *R2*) через добавочный резистор *R3* (схема безопасного спуска).

Расчет сопротивлений ступеней пускорегулировочного реостата и механических характеристик двигателей последовательного возбуждения производят по известным параметрам двигателей и заводским или каталожным кривым, подобным тем, которые изображены на рис. 1.10. Расчет выполняют графическим или аналитическим методом [4, 30]. При известных естественных характеристиках и параметрах двигателя (напряжение $U_{ном}$, ток $I_{ном}$, сопротивление цепи якоря $R_{я.с.}$, частота вращения $n_{ном}$), а также сопротивлениям ступеней реостата R электромеханические характеристики

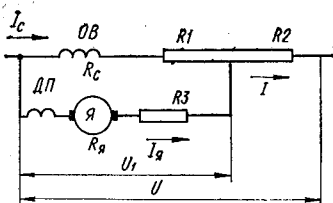


Рис. 1.9. Принципиальная схема включения электродвигателя последовательного возбуждения при опускании груза

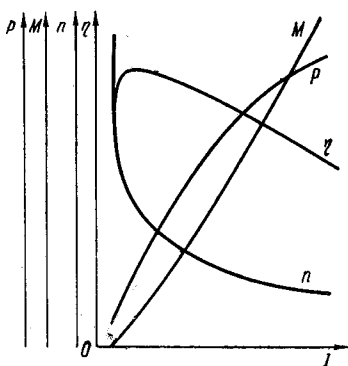


Рис. 1.10. Естественные характеристики электродвигателя последовательного возбуждения

двигателя (при нормальной схеме его включения) можно рассчитать, пользуясь соотношением

$$\frac{n_p}{n} = \frac{E_p}{E} = \frac{U_{\text{НОМ}} - I(R_{\text{я.с}} + R)}{U_{\text{НОМ}} - IR_{\text{я.с}}},$$

откуда

$$n_p = \frac{U_{\text{НОМ}} - I(R_{\text{я.с}} + R)}{U_{\text{НОМ}} - IR_{\text{я.с}}} n, \quad (1.44)$$

где I и n — текущие значения тока и частоты вращения двигателя.

В этом случае для каждой ступени пускорегулирующего реостата задаются рядом значений токов (I_1, I_2, I_3 и т. д.) и по естественной характеристике двигателя находят соответствующие этим токам частоты вращения (n_1, n_2, n_3, n_4 и т. д.). Затем по формуле (1.44) рассчитывают точки реостатной электромеханической характеристики (n_{p1}, n_{p2}, n_{p3} и т. д.). Пользуясь каталожными кривыми $M = f(I)$ и рассчитанной характеристикой, находят значения моментов, соответствующие рассчитанным частотам вращения, и строят механические характеристики $n = f(M)$.

При использовании несимметричных контроллеров постоянного тока расчет механических характеристик в сторону подъема груза производится аналогично, а в сторону его опускания, когда двигатель включается по потенциметрической схеме, — исходя из того, что при одинаковых потоках на естественной характеристике и нормальном включении двигателя (якорь и обмотка возбуждения соединены последовательно) и на искусственной характеристике, когда двигатель включен по потенциметрической схеме, частота его вращения пропорциональна э.д.с.:

$$\frac{n_e}{n_n} = \frac{E_e}{E_n}, \quad (1.45)$$

а момент пропорционален току якоря:

$$\frac{M_e}{M_n} = \frac{I_e}{I_n} (I_{\text{я}} = I_n). \quad (1.46)$$

И тогда порядок расчета сводится к следующему. Пользуясь естественными характеристиками $n_e = f(I_e)$

и $M_e = f(I_e)$ и различными значениями токов I_e , определяют э. д. с. двигателя на естественной характеристике для этих токов

$$E_e = U - I_e R_{я.с.} \quad (1.47)$$

Принимая ток I_e за ток возбуждения, при потенциометрической схеме включения двигателя находят напряжение на зажимах цепи якоря

$$U_1 = I_e (R_c + R_1). \quad (1.48)$$

Определяют полный ток и ток в цепи якоря при включении двигателя по схеме безопасного спуска:

$$I = \frac{U - U_1}{R_2}; \quad I_{я} = I - I_e (I_e = I_c). \quad (1.49)$$

Рассчитывают э. д. с. двигателя на искусственной характеристике при токе $I_{я}$ и напряжении U_1 :

$$E_n = U_1 - I_{я} (R_{я} + R_{д.п} + R_3). \quad (1.50)$$

Находят частоты вращения двигателя на его искусственной характеристике при соответствующем подключении пускорегулировочных резисторов:

$$n_n = n_e E_n / E_e. \quad (1.51)$$

Примечание. При опускании груза скорость (частота вращения двигателя) с положительным знаком смысла не имеет.

Определяют момент, развиваемый двигателем на искусственной характеристике,

$$M_n = M_e I_{я} / I_e \quad (1.52)$$

и строят механическую характеристику.

Пример. В механизме подъема крана использован электродвигатель Д-812 постоянного тока последовательного возбуждения, управляемый контроллером типа ПС. Параметры двигателя следующие: $P = 54$ кВт при ПВ = 40%; $U = 220$ В; $I = 275$ А; $n = 540$ мин⁻¹; $R_{я} = 0,014$ Ом; $R_{д.п} = 0,009$ Ом; $R_c = 0,0106$ Ом ($R_{я.с} = 0,033$ Ом). Характеристики $I_e = f(n_e)$ и $I_e = f(M_e)$ представлены табл. 11 (п. 1...3). Рассчитать и построить механическую характеристику электропривода

для второй ступени контроллера при опускании груза, если схема электропривода соответствует рис. 1.9 и разбивка сопротивлений по ступеням сделана в соответствии с рекомендацией завода «Динамо».

Р е ш е н и е. Поскольку типовая разбивка пускорегулировочных сопротивлений по ступеням заводом дается в процентах номинального значения сопротивления, определяем номинальное сопротивление

$$R_{\text{ном}} = \frac{U}{I} = \frac{220}{275} \text{ Ом} = 0,8 \text{ Ом.}$$

Таблица 11

1	$I_e, \text{ А}$	100	200	300	400	600
2	$n_e, \text{ мин}^{-1}$	930	620	530	480	220
3	$M_e, \text{ Н} \cdot \text{ м}$	295	640	980	1540	2250
4	$E_e = U - I_e (R_{\text{я}} + R_{\text{д.п}} + R_c), \text{ В}$	215	210	205	200	190
5	$U_1 = I_{\text{в}} (R_c + R_1), \text{ В}$	1,5	3	4,5	6	9
6	$I = \frac{U - U_1}{R_2}, \text{ А}$	335	332	328	327	323
7	$I_{\text{я}} = I - I_{\text{в}}, \text{ А}$	235	132	28	-73	-277
8	$E_{\text{н}} = U_1 - I_{\text{я}} (R_{\text{я}} + R_{\text{д.п}} + R_3), \text{ В}$	-75,5	-40,5	-4,7	30	100
9	$n_{\text{н}} = n_e E_{\text{н}} / E_e, \text{ мин}^{-1}$	-328	-118	-12,1	7,2	221
10	$M_{\text{н}} = M_e I_{\text{я}} / I_e, \text{ Н} \cdot \text{ м}$	660	425	93	-28,5	-1180

Для контроллера типа ПС (в соответствии со схемой рис. 1.9) находим: $R_1 = 0$, $R_2 = 82\%$ (или $R_2 = R_{\text{ном}} \frac{82}{100} \text{ Ом} = 0,655 \text{ Ом}$), $R_3 = 36\%$ (или $R_3 = 0,295 \text{ Ом}$).

Приводим сопротивления обмоток двигателя к рабочей температуре, пользуясь формулой $R_p = R_{\text{кат}} [1 + \alpha(t_p - t_{\text{кат}})]$: $R_{\text{я}} = 0,0203 \text{ Ом}$; $R_{\text{д.п}} = 0,013 \text{ Ом}$; $R_{\text{с}} = 0,0154 \text{ Ом}$.

Расчетные формулы и результаты расчета приведены в табл. 11 (п. 4...10).

Методы расчета и построения характеристик двигателей смешанного возбуждения такие же, как и характеристик двигателей последовательного возбуждения. Однако при необходимости иметь устойчивую скорость, мало зависящую от нагрузки, при опускании тяжелых грузов на последней пусковой ступени реостата последовательную обмотку возбуждения двигателя замыкают накоротко.

Механические характеристики двигателей с фазным ротором на промежуточных ступенях реостата рассчитывают по параметрам двигателя и пускорегулировочного реостата [4, 30].

При использовании обычных контроллеров характерны отсутствие устойчивых посадочных и промежуточных скоростей и большие потери при регулировании. Эквивалентный к.п.д. наиболее массовых электроприводов с параметрическим регулированием сопротивления в цепи ротора асинхронного двигателя с фазным ротором и тормозными режимами противовключения составляет 60...65% для легких режимов и снижается до 44...55% для тяжелых режимов [3]. В электроприводах постоянного тока неизбежны потери при преобразовании переменного тока в постоянный, поэтому их к.п.д. еще ниже, вследствие чего области использования таких приводов следует ограничивать.

1.5. РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЙ И ВЫБОР ПУСКРЕГУЛИРОВОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ ПРИ КОНТРОЛЛЕРНОМ УПРАВЛЕНИИ КРАНОВЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Общие сведения. Практикой и действующими нормами установлены следующие режимы работы резисторов: длительный, повторно-кратковременный (при дли-

тельности цикла 60 с) с ПВ = 6,25; 8,8; 12,5; 17,7; 25; 35; 50 и 70% и кратковременный (10, 20, 30 с; 1, 3 и 5 мин) [3]. Относительные продолжительности включений пускорегулировочных реостатов, выпускаемых заводом «Динамо», рекомендуется принимать исходя из режимов работы крана, т. е. при легких режимах ПВ = 25%, при средних и тяжелых ПВ = 35...40%, при весьма тяжелых ПВ = 60% и особо тяжелых ПВ = 100% [3]. Указанные продолжительности включений следует относить к последней ступени реостата (перед естественной характеристикой) — ПВ₁. Для остальных ступеней их можно считать меньшими: они пропорциональны доле сопротивления, выводимого при шунтировании каждой ступени, т. е. для четырехступенчатого реостата (сопротивления ступеней r_1, r_2, r_3, r_4):

$$\left. \begin{aligned} \text{ПВ}_2 &= \text{ПВ}_1 \left(1 - \frac{r_2 - r_1}{r_4}\right); \\ \text{ПВ}_3 &= \text{ПВ}_1 \left(1 - \frac{r_3 - r_2}{r_4}\right); \\ \text{ПВ}_4 &= \text{ПВ}_1 \left(1 - \frac{r_4 - r_3}{r_4}\right). \end{aligned} \right\} \quad (1.53)$$

Токовая нагрузка на сопротивления приводится для следующих режимов работы: длительного, повторно-кратковременного при ПВ = 12,5; 25 и 35% и кратковременного при $t = 0,5; 1$ и 3 мин. В том случае, когда реальные режимы работы резисторов отличаются от названных, расчетный ток должен быть приведен к указанным нормализованным режимам и по нему следует выбирать резисторы. Приведенный ток может быть определен по соответствующим кривым [3] или рассчитан для каждой ступени реостата по формуле

$$I_{\text{ст}} = I_p \sqrt{\frac{\text{ПВ}_{\text{ст}}}{\text{ПВ}}} \leq I_{\text{ном}}, \quad (1.54)$$

где ПВ_{ст} и ПВ — относительные продолжительности включения на расчетной ступени реостата и каталожное; I_p и $I_{\text{ном}}$ — расчетный ток для заданной или принятой диаграммы пуска электродвигателя и номиналь-

ный ток, приводимый в каталоге для соответствующего режима работы реостата.

За расчетный ток I_p ступеней реостата при пусках и торможениях двигателя принимается средний ток между максимальным током (I_1) и током переключения ($I_{пр}$), т. е.

$$I_p = \sqrt{\frac{1}{3}(I_1^2 + I_1 I_{пр} + I_{пр}^2)} \approx \sqrt{I_1 I_{пр}}. \quad (1.55)$$

При расчете номинальных сопротивлений пускорегулировочных резисторов пользуются формулами: для постоянного тока $R_{ном} = U_{ном}/I_{ном}$ и для переменного тока $R_{ном} = U_{2 ном}/(\sqrt{3} I_{2 ном})$, где $U_{ном}$, $I_{ном}$ и $U_{2 ном}$, $I_{2 ном}$ — соответственно номинальное напряжение и ток двигателя постоянного тока, номинальные напряжения и ток ротора двигателя переменного тока. Реальное сопротивление обмоток ротора определяется по номинальному, т. е. $R_2 = R_{ном} s$, а с учетом сопротивления контактов и соединительных проводов $r = 1,1 R_2$. Однако точнее было бы считать номинальным сопротивлением не $R_{ном}$, а полное (кажущееся) сопротивление $Z_{ном}$, но поскольку реактивное сопротивление обмоток ротора крановых двигателей невелико (для двигателей МТ $X_p = 0,1 \dots 0,05 Z_{ном}$), им пренебрегают и принимают $R_{ном} = Z_{ном}$.

Расчет сопротивлений пускорегулировочных резисторов выполняется аналитически или по диаграмме пуска электродвигателей [4, 30]. При управлении двигателями переменного тока с помощью магнитных контроллеров сопротивления во всех фазах ротора принимаются одинаковыми, т. е. включение симметричное, а при управлении с помощью кулачковых контроллеров сопротивления в фазах ротора могут быть неодинаковые (включение несимметричное).

Расчет симметричных сопротивлений пускорегулировочных резисторов. Расчет производится по сопротивлению r роторной цепи двигателя и степени возрастания сопротивлений по ступеням λ либо по числу пусковых ступеней реостата m и номинальному скольжению $S_{ном}$ без постоянно включенного сопротивления или с ним.

Из основ электропривода [4] известно, что скольжения и сопротивления по ступеням связаны с λ следующим

щими соотношениями (начиная от естественной характеристики):

$$\left. \begin{aligned} s_1 = s\lambda; s_2 = s\lambda^2; s_3 = s\lambda^3; \dots; s_{m+1} = s\lambda^{m+1}; \\ r_1 = r\lambda; r_2 = r\lambda^2; r_3 = r\lambda^3; \dots; r_m = r\lambda^m. \end{aligned} \right\} \quad (1.56)$$

Обычно реостат рассчитывают так, чтобы при его полном включении ротор двигателя оставался неподвижным, т. е. $s_{m+1} = 1$; при этом

$$\lambda = \sqrt[m+1]{\frac{1}{s}}. \quad (1.57)$$

Если за основу расчета принять не скольжение s при моменте переключения, а скольжение s' при максимальном моменте, то величину λ можно определить подстановкой вместо s равного ему значения $s = s'/\lambda$, и тогда

$$\lambda = \sqrt[m]{\frac{1}{s'}}. \quad (1.57')$$

По полученным значениям сопротивлений данной ступени можно определить сопротивление каждой шунтируемой его секции и, например, в случае трехступенчатого реостата:

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= r(\lambda - 1); \\ r_2 &= \lambda r(\lambda - 1); \\ r_3 &= \lambda^2 r(\lambda - 1). \end{aligned} \right\} \quad (1.58)$$

Полное сопротивление предварительной ступени рассчитывается по заданным номинальному моменту ($M_{\text{ном}}$) и моменту двигателя, соответствующему этой ступени ($M_{\text{пр}}$), т. е.

$$r_{\text{п}} = r \frac{M_{\text{ном}}}{M_{\text{пр}}}.$$

Расчет несимметричных сопротивлений. Для уменьшения числа контактов и размеров кулачковых контроллеров в ряде случаев сопротивления в цепи ротора двигателя изменяют поочередно по фазам, поэтому сопротивления фаз получаются разные. Несимметрия сопротивлений приводит к несимметрии токов фаз, а сле-

довательно, и к искажению механической характеристики двигателя.

Чтобы оценить влияние несимметрии, систему несимметричных токов можно разложить на две симметричные составляющие прямой и обратной последовательностей, которые создают свои намагничивающие силы (н. с.). В результате взаимодействия магнитного поля, создаваемого н. с. статора, с н. с. ротора прямой последовательности возникает вращающий момент прямой последовательности ($M_{пр}$), всегда имеющий положительное значение, а при взаимодействии н. с. статора с н. с. ротора обратной последовательности создается момент обратной последовательности ($M_{обр}$), имеющий до примерно полусинхронной частоты вращения положительный знак [$n = n_0(1 - 2s)$], а выше полусинхронной — отрицательный (рис. 1.11). На валу двигателя момент будет равен алгебраической сумме $M_{пр}$ и $M_{обр}$. В результате суммирования моментов механическая характеристика получается с провалом. Поэтому, когда имеется большая несимметрия сопротивлений фаз, двигатель может не достигнуть нужной частоты вращения и будет работать в районе полусинхронной частоты вращения, что, например для механизмов подъема, недопустимо. Приемлемое отклонение от допустимой несимметрии обеспечивается, если на всех ступенях регулирования соблюдаются следующие соотношения сопротивлений фаз:

$$\frac{r_6}{r_{cp}} = \frac{r_{cp}}{r_m} = \lambda, \text{ или } \frac{r_6}{r_m} = \lambda^2, \quad (1.59)$$

где r_6 , r_{cp} и r_m — соответственно большее, среднее и меньшее значения сопротивлений фаз в цепи ротора.

Эти соотношения приводят к тому, что при несимметричном включении сопротивления должны рассчитываться, например для контроллера на пять положений, по формулам, сведенным в табл. 12.

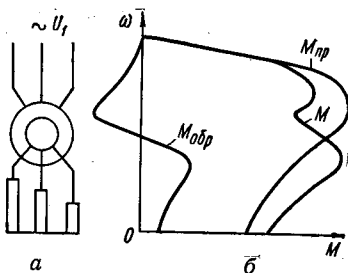


Рис. 1.11. Принципиальная схема включения (а) и механические характеристики (б) асинхронного электродвигателя при несимметричных сопротивлениях фаз в цепи ротора

Таблица 12

Положение контроллера	Сопротивление при симметричном включении	Действительные сопротивления фаз		
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
5	<i>r</i>	<i>r</i>	<i>r</i>	<i>r</i>
4	λr	$\lambda^2 r$	λr	<i>r</i>
3	$\lambda^2 r$	$\lambda^2 r$	λr	$\lambda^3 r$
2	$\lambda^3 r$	$\lambda^2 r$	$\lambda^4 r$	$\lambda^3 r$
1	$\lambda^4 r$	$\lambda^5 r$	$\lambda^4 r$	$\lambda^3 r$

Руководствуясь этой таблицей, с учетом продолжительности включения резисторов на каждой ступени производят выбор их по каталогу (по фазам r_a , r_b , r_c). При выборе резисторов возможны отклонения их сопротивлений от расчетных значений. Поэтому следует проверить, не превышает ли коэффициент несимметрии допустимых пределов:

$$\gamma = \sqrt{1 - 3 \frac{r_a r_b + r_b r_c + r_c r_a}{(r_a + r_b + r_c)^2}} \leq \gamma_{\text{доп}} = 0,25 \dots 0,30. \quad (1.60)$$

Точный расчет механических характеристик двигателей при несимметричных сопротивлениях весьма сложен. Для упрощения расчета вместо несимметричных сопротивлений пользуются эквивалентным сопротивлением $R_{\text{экр}}$ и расчет выполняют по обычной формуле

$$M = \frac{mp}{2\pi f} \frac{U^2 R'_{\text{экр}S}}{(R_1 s + R'_{\text{экр}})^2 + (X_1 + X_2)^2 s^2}, \quad (1.61)$$

где

$$R_{\text{экр}} = \frac{r_a r_b + r_b r_c + r_c r_a}{r_a + r_b + r_c} \quad \text{или} \quad R_{\text{экр}} = \frac{r_a + r_b + r_c}{3}. \quad (1.62)$$

Расчет сопротивлений невыключаемых резисторов и сопротивлений при тормозных режимах. Сопротивление невыключаемого резистора $R_{\text{нв}}$ (с учетом сопротивления обмотки ротора) может быть начиная от внутреннего сопротивления ротора r до величины, соответствующей

щей скольжению $s = 1$. Значение его можно определить по критическому скольжению $s_{кр}$ на естественной характеристике двигателя и сопротивлению ротора r при $s = 1$:

$$\frac{s}{s_{кр}} = \frac{R_{нв}}{r},$$

откуда

$$R_{нв} = r/s_{кр}. \quad (1.63)$$

При генераторном торможении двигателя, когда задана допустимая сверхсинхронная частота вращения n_c и известен тормозной момент M_T , необходимое сопротивление R_c можно рассчитать, исходя из рис. 1.12, а и уравнения

$$\frac{R_c}{r} = \frac{n_c - n_0}{n_0 - n},$$

откуда

$$R_c = \frac{n_c - n_0}{n_0 - n} r. \quad (1.64)$$

Если торможение предполагается осуществить противовключением, то при известном тормозном моменте двигателя M_T и принятой скорости опускания груза $n_{п}$ полное сопротивление $R_{п}$ можно определить, исходя из рис. 1.12, б и следующего уравнения:

$$\frac{R_{п}}{r} = \frac{\frac{n_{п} + n_0}{n_0}}{\frac{n_0 - n_{ном}}{n_0}},$$

откуда

$$R_{п} = \frac{n_{п} + n_0}{n_0 - n_{ном}} r. \quad (1.65)$$

Торможение однофазным включением двигателя проще, чем противовключением, так как при малых грузах не может быть подъема вместо опускания, а предельные скорости опускания будут меньше из-за меньшей крутизны характеристики. Поэтому данный способ торможения при включении двигателя по схеме, показанной на рис. 1.12, в, принят для одной из ступеней контроллера типа ТСА.

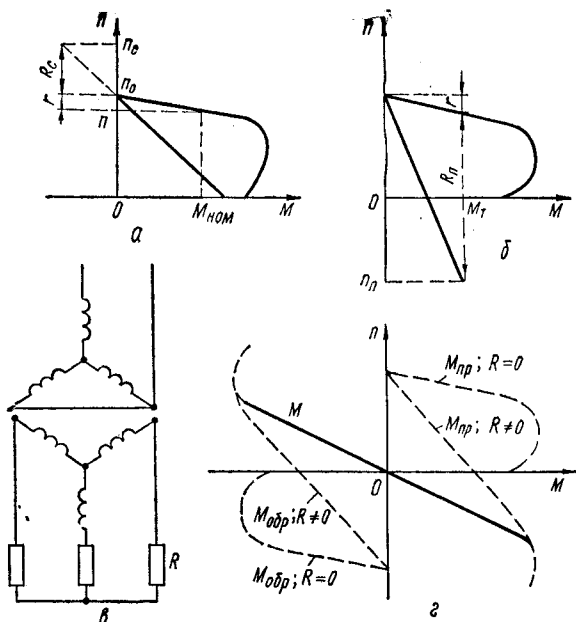


Рис. 1.12. К расчету тормозных сопротивлений асинхронного электродвигателя с фазным ротором:
 а — генераторное торможение; б — торможение противключением; в — схема включения; г — механические характеристики при однофазном торможении

При однофазном включении двигателя сопротивления в цепи ротора рассчитываются как для симметричных схем, а обмотка, будучи включенной по однофазной схеме, создает пульсирующее магнитное поле, которое для анализа можно разложить на два синхронно вращающихся в противоположные стороны поля. Каждое из этих полей, взаимодействуя с током ротора, будет создавать соответствующий момент прямой ($M_{пр}$) и обратной ($M_{обр}$) последовательностей, а результирующий момент на валу двигателя (M) будет равен их алгебраической сумме (рис. 1.12, г). Чтобы кривая $n = f(M)$ была удовлетворительной формы, необходимо иметь $R = 0,65 \dots 0,55 R_{ном}$. В серийных контроллерах $R = 0,63 R_{ном}$. Скольжение при $M_{обр}$ будет $s_{обр} = 2 - s$, и тогда характеристику момента обратной последова-

тельность можно рассчитать по обычной формуле Клосса

$$M_{\text{обр}} = \frac{2M_{\text{к. обр}}(1 + \varepsilon)}{\frac{2-s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{2-s} + 2\varepsilon}, \quad (1.66)$$

где $\varepsilon = \frac{R_1}{\sqrt{R_1^2 + (X_{\text{к}})^2}}$.

Характеристика момента прямой последовательности определяется выражением

$$M_{\text{пр}} = \frac{2M_{\text{к. пр}}(1 + \varepsilon)}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s} + 2\varepsilon}. \quad (1.67)$$

Линейные напряжения симметричных составляющих прямой и обратной последовательностей одинаковы и равны $U/\sqrt{3}$, вследствие чего критические моменты прямой и обратной последовательностей равны между собой, т. е.

$$M_{\text{к. пр}} = M_{\text{к. обр}} = M_{\text{к}}(1/\sqrt{3})^2 = M_{\text{к}}/3.$$

Выбор пускорегулировочных резисторов. В настоящее время выпускаются резисторы с константовыми, фехралевыми либо с нихромовыми проволочными или ленточными элементами. В соответствии с ГОСТ 4870—78 за номинальные параметры их принимаются сопротивление, напряжение, продолжительность включения и ток.

Сопротивления пускорегулировочных резисторов для вновь проектируемых электроприводов рассчитываются так, как изложено выше. Номинальным напряжением резисторов асинхронных двигателей считается номинальное напряжение на кольцах, а резисторов двигателей постоянного тока — линейное напряжение. Относительная продолжительность включения и нагрузочный ток резисторов принимаются исходя из режима работы кранового механизма. При длительных режимах работы резисторы выбираются по току приемника. Невыключаемые резисторы рассчитываются на ток полной нагрузки и продолжительность включения не менее, чем принятая для двигателя, а в некоторых случаях

и больше, так как постоянная времени нагревания резисторов меньше, чем двигателя.

На основании опыта проектирования и эксплуатации электроприводов подъемно-транспортных устройств, выпускаемых заводом «Динамо», применительно к типовым схемам крановых электроприводов при контроллерном управлении ими разработаны унифицированные разбивки (в процентах) сопротивлений и токов по ступеням пускорегулировочных реостатов относительно расчетных номинальных значений. Ими и следует пользоваться при выборе пускорегулировочных сопротивлений, принимая за исходную (базовую) величину базовый момент M_6 [3].

Для механизмов подъема за базовый момент принимается момент статической нагрузки при подъеме номинального груза, а для механизмов перемещения базовый момент определяется с учетом среднего ускорения, при котором время разгона механизма не превышает 5,5 с

$$M_6 = \frac{M_{изб} + M_{ст}}{1,8} = \frac{GD^2 n}{68,8t} + \frac{M_{ст}}{1,8}, \quad (1.68)$$

где GD^2 — суммарный маховой момент электропривода, приведенный к валу двигателя ($\text{кг} \cdot \text{м}^2$); n — частота вращения электродвигателя (мин^{-1}), соответствующая номинальной линейной скорости механизма $v_{\text{ном}}$ (м/с); $M_{ст}$ — статический момент нагрузки ($\text{Н} \cdot \text{м}$); $t = v/a$ — время разгона (с); a — среднее ускорение механизма (м/с^2).

Зная базовый момент ранее выбранного электродвигателя находят расчетный — базовый ток резисторов

$$I_6 = I_{\text{ном}} \frac{M_6 n_{\text{ном}}}{9550 P_{\text{ном}}}, \quad (1.69)$$

где $P_{\text{ном}}$, $I_{\text{ном}}$ и $n_{\text{ном}}$ — соответственно номинальные мощность, ток и частота вращения двигателя.

По полученному току и номинальному напряжению ротора $E_{2 \text{ ном}}$ (или якоря $U_{\text{ном}}$) выбранного электродвигателя определяют номинальное сопротивление $R_{\text{ном}} = \frac{E_{2 \text{ ном}}}{\sqrt{3} I_6}$ (или $R_{\text{ном}} = U_{\text{ном}}/I_6$). Затем, принимая расчетный ток и номинальное сопротивление за 100%, по

выполненным заводом «Динамо» разбивкам (при ПВ = =35%) находят (для принятого контроллера) сопротивления и токи по ступеням ($R_{ст}$, % и $I_{ст}$, %), которые пересчитывают в абсолютные значения ($R_{ст} = = R_{ст}R_{ном}/100$, Ом и $I_{ст} = I_{т}I_{б}/100$, А), и выбирают резисторы, пользуясь каталогом [3].

Выбранные пускорегулировочные резисторы электроприводов механизмов подъема необходимо проверить на возможность работы их в течение 60 с при токе номинальной статической нагрузки, а электропривод механизмов передвижения — на работу в течение 30 с при токе $1,3 I_{ном}$, т. е. токе, соответствующем среднему значению тока четырех подряд пусков длительностью 7,5 с. Кроме того, они могут быть проверены на среднюю мощность рассеяния.

1.6. МАЛО- И БЕСКОНТАКТНЫЕ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КРАНОВЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Наиболее перспективными схемами управления электроприводами крановых механизмов являются мало- и бесконтактные схемы, силовая часть которых выполняется на базе полупроводниковых вентилях (диодов, тиристоров, форвисторов, симисторов), а сами схемы — на базе полупроводниковых и магнитных элементов.

Общие достоинства таких схем — большой к.п.д. благодаря малым потерям при переходных режимах электродвигателей и преобразовании электроэнергии и высокая степень надежности.

Управление короткозамкнутыми двигателями. Если крановый механизм не требует регулирования частоты вращения, то для его привода используется односкоростной двигатель, управляемый тиристорным пускателем, который может работать в продолжительном и повторно-кратковременном режимах с ПВ = 60% [14]. В том случае, когда по условиям работы должен быть установлен приводной электродвигатель с короткозамкнутым ротором, а механизм требует регулирования частоты вращения, и если время работы электропривода на пониженной частоте вращения невелико, перспективным является использование односкоростных двигателей с тиристорными станциями управления (ТСУ — Р). Они

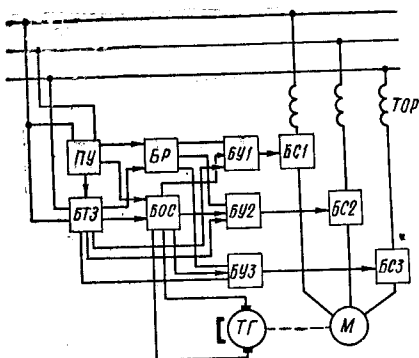


Рис. 1.13. Структурная схема нереверсивной тиристорной станции управления

бесконтактны, могут иметь быстродействие до 6000 вкл/ч и позволяют обеспечить следующие режимы работы двигателей: безударный (плавный) пуск и реверс, регулирование частоты вращения (при наличии обратной связи по частоте вращения) в диапазоне до 10 : 1 и регулируемое или нерегулируемое динамическое торможение.

Станции могут быть нереверсивными и реверсивными, длительного и повторно-кратковременного режимов работы с ПВ = 15, 25, 40, 60 % и гарантийным сроком службы не менее 18 000 включений [14]. Следовательно, они могут удовлетворять требованиям различных механизмов — от электроприводов механизмов крановых лебедок и пассажирских лифтов до электроприводов насосов, шпинделей шлифовальных головок и т. д. ТСУ — Р выпускаются на номинальные напряжения 220 и 380 В (при необходимости и на 660 В), на различные токи, в том числе 25, 63 и 100 А.

Структурная схема нереверсивной тиристорной станции управления изображена на рис. 1.13 [14]. Она включает в себя схемно-конструктивное объединение следующих блоков: токоограничивающего реактора *ТОР*, силовых блоков *БС1...БС3*, блоков управления *БУ1...БУ3*, блоков токовой отсечки и защиты *БТЗ*, пульта управления *ПУ* и блока питания *БП* (на схеме не показан). Блоки станции собраны на базе унифицированной блочной конструкции и встроены в один шкаф, причем все блоки, кроме силовых, могут быть использованы в любых модификациях станций управления. Такое исполнение их позволяет быстро устранять возможные повреждения путем замены неисправных блоков исправными.

Индуктивность токоограничивающих реакторов выбирается такой, которая обеспечивала бы ограничение токов короткого замыкания до значений, допустимых

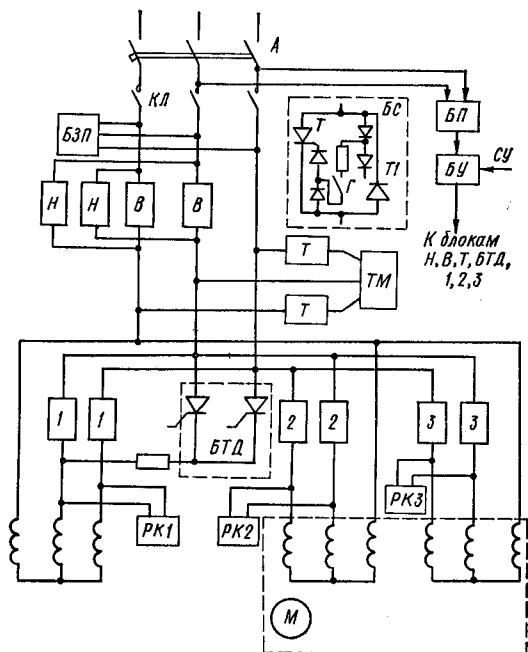


Рис. 1.14. Принципиальная схема малоконтактного контроллера КБТ

тиристорами силовых блоков за время отключения короткого замыкания. Силовые блоки выполняются однофазными и включают в себя: два встречно-параллельных тиристора, выполняющих роль бесконтактных коммутаторов и регуляторов подводимого к двигателю напряжения; выходной трансформатор управления, позволяющий получать импульсы управления тиристорами с максимальным напряжением 8 В и током 500 мА; датчик тока и сигнализации состояния тиристоров. Максимальное и обратное напряжения тиристоров блоков должны быть $U_T \leq k_3 U \sqrt{2}$, а ток нагрузки — $I_{ном} \leq \pi I_T / \sqrt{2}$ (k_3 — коэффициент запаса, учитывающий возможные перенапряжения; U — действующее значение линейного напряжения сети; I_T — допустимое среднее значение тока, проходящего через тиристор).

В том случае, когда в качестве приводного электродвигателя кранового механизма применяется многоскоростной асинхронный двигатель, для управления им

используется малоконтактный тиристорный контроллер. Примером такого управления является схема контроллера КБТ, показанная на рис. 1.14. Развернутая схема силового блока *БС* бестокового коммутатора одной фазы изображена на этом рисунке отдельно [6]. Схема контроллера включает в себя: автомат *А*; линейный контактор *КЛ*; блок защиты от перенапряжений *БЗП*; тиристорные коммутаторы направления *Н, В*; тиристорные коммутаторы обмоток двигателя *1...3*; блок динамического торможения *БТД*; реле контроля включения тиристорных коммутаторов *РК1...РК3*; тиристорный коммутатор тормоза *Т*; тормозной электромагнит *ТМ*; блок питания *БП*; блок управления *БУ*.

Управление тиристорами коммутатором *Т1* осуществляется анодным напряжением, прикладываемым к управляющим электродам тиристорных (см. схему силового блока). Здесь коммутация управляющих цепей тиристорных производится герконами *Г*, получающими сигнал управления от блока управления *БУ* подобно контроллерному управлению.

Управление двигателями переменного тока с фазным ротором. Для управления асинхронными двигателями с фазным ротором в последнее время начали применяться контроллерные схемы с тиристорными регуляторами напряжения и пусковые регулирующие бесконтактные устройства (ПРБУ).

Контроллерные схемы с тиристорными регуляторами серии ТТЗ предназначены для управления асинхронными двигателями мощностью от 1,7 до 125 кВт. При использовании этих схем в статорные обмотки включаются тиристорные регуляторы серии РСТ, аналогичные рассмотренным в схемах ТСУ или контроллерах КБТ, а в роторные цепи — резисторы аналогично магнитным контроллерам переменного тока. В схемах применяются симметричные регуляторы на длительно допустимые эффективные токи 100, 160 и 320 А при напряжении 380 В. Такие электроприводы имеют обратные связи по частоте вращения и позволяют получать диапазон регулирования в пределах до 10 : 1.

ПРБУ при регулировании частоты вращения кранового двигателя ниже номинальной возвращают энергию скольжения в сеть. Эти устройства предназначены для пуска, реверса, торможения и бесступенчатого регули-

Таблица 13

Тип устройства	Линейное напряжение, В	Частота питающего напряжения, Гц	Номинальный ток ротора и статора, А	Максимальный ток ротора, А	Номинальная мощность, кВт	К. п. д., %	Охлаждение
ПРБУ-380-50	380	50	50	80	30	95	Естественное
ПРБУ-380-100	380	50	100	160	60	95	То же

рования частоты вращения двигателей в диапазоне 30 : 1 и допускают до 1200 вкл/ч. Краткие характеристики их приведены в табл. 13.

Принципиальная схема ПРБУ изображена на рис. 1.15. Она состоит из силовой части и блока управления устройством БУУ. Силовая часть содержит: а) автомат А, ток отключения и время срабатывания которого должны быть согласованы с допустимой длительностью протекания тока короткого замыкания через вентили; б) токоограничивающий реактор *ТОР* с индуктивностью, обеспечивающей ограничение тока короткого замыкания тиристорных бесконтактного контактора до допустимого значения; в) бесконтактный контактор *БК*; г) асинхронно-вентильный каскад *АВК*, включающий в себя асинхронный двигатель *М*, выпрямитель *Вп*, инвертор *И*, ведомый сетью, и сглаживающий дроссель *Др*.

Преобразователи *АВК* выполнены из блоков, в каждый из которых входят тиристоры и диоды каждой фазы, а также импульсные трансформаторы и *RC*-цепи защиты тиристоров от коммутационных перенапряжений. Эти блоки съемные, что позволяет быстро заменять их при неисправностях.

Бесконтактный контактор обеспечивает подключение двигателя к питающей сети, смену чередования фаз при реверсах и подачу постоянного тока в обмотки статора при динамическом торможении. Он выполнен из четырех силовых тиристорных блоков, два из которых (I и IV) включают двигатель в одну сторону вращения, а два других (II и III) — в другую.

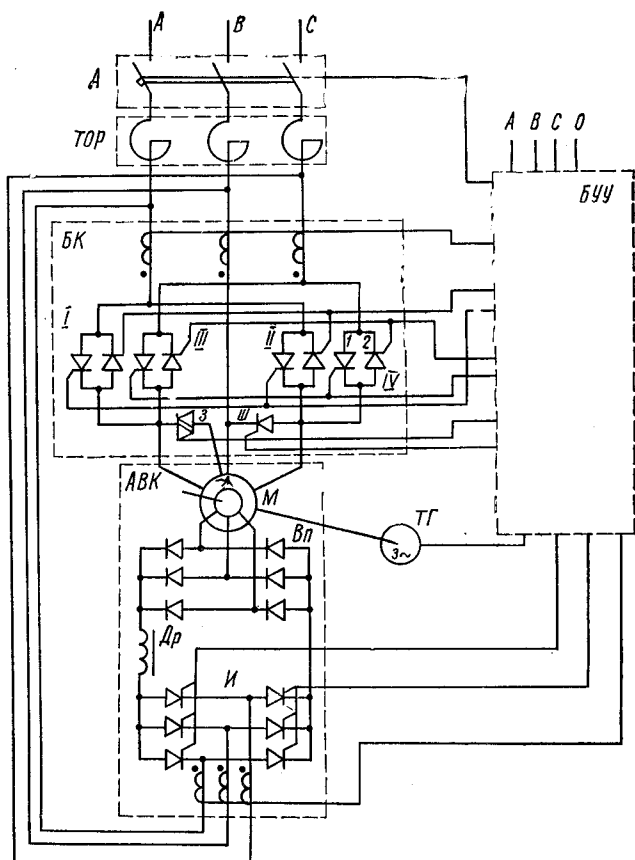


Рис. 1.15. Принципиальная схема ПРБУ

Путем включения одного из тиристоров в выпрямительный режим (тиристор *I* блока IV) подается постоянный ток в обмотки статора, благодаря чему осуществляется динамическое торможение двигателя. Силу тока динамического торможения рекомендуется выбирать для каждого двигателя отдельно, исходя из одинаковой мощности потерь в тормозном и двигательном режимах, т. е.

$$I_T^2(mr_\phi) = 3I_{\text{ном}}^2 r_\phi, \text{ или } I_T = 1,22I_{\text{ном}}, \quad (1.70)$$

где I_T — эквивалентный ток динамического торможения; m — число фаз статорной обмотки, участвующих в динамическом торможении; r_ϕ — активное сопротивление одной фазы; $I_{\text{ном}}$ — номинальный фазный ток двигателя.

Для обеспечения непрерывного тока динамического торможения служит тиристор Ш , который шунтирует обмотки статора двигателя в непроводящий полупериод тиристора, работающего на контур динамического торможения, выполняя таким образом функции нулевого вентилля.

Переменная составляющая тока динамического торможения наводит переменную э.д.с. на обмотке, не участвующей в динамическом торможении (вследствие трансформаторной связи обмоток двигателя). Поэтому мгновенное значение наведенной э.д.с., складываясь с обратным напряжением тиристорных контакторов, создает перенапряжение на них. Для исключения этого перенапряжения обмотка двигателя, не участвующая в динамическом торможении, шунтируется симметричным тиристором З .

Выпрямитель и инвертор обеспечивают пуск и регулирование частоты вращения асинхронного двигателя, причем из курса теории электропривода [30] известно, что регулирование частоты вращения двигателя с АВК осуществляется за счет введения в цепь ротора встречной э.д.с. Тогда при изменении этой э.д.с. частота вращения будет изменяться, подчиняясь следующему выражению:

$$n = n_0 \left[\frac{E_p - (E_{\text{и}} + IR_{\Sigma} + \Delta U_{\text{в}} + \Delta U_{\text{х}} + \Delta U_{\text{др}})}{E_p} \right], \quad (1.71)$$

т. е. при работе асинхронного двигателя с частотой вращения ниже синхронной выпрямленное напряжение ротора E_p , пропорциональное скольжению, должно компенсировать встречную э. д. с. инвертора $E_{\text{и}}$ и падения напряжения в активных сопротивлениях IR_{Σ} , в вентиллях выпрямителя $\Delta U_{\text{в}}$, на индуктивных сопротивлениях обмоток ротора $\Delta U_{\text{х}}$ и в сглаживающих дросселях $\Delta U_{\text{др}}$.

Все падения напряжения, входящие в (1.71), малы и практически постоянны; поэтому частота вращения регулируется путем изменения э.д.с. инвертора $E_{\text{и}}$,

направленной встречно выпрямленному напряжению ротора. Регулирование встречной э.д.с. E_n (для получения другой частоты вращения) осуществляется блоком управления устройством путем изменения угла открывания тиристорov инвертора β . После изменения э.д.с. инвертора E_n частота вращения двигателя будет изменяться до тех пор, пока не наступит новое равновесное состояние электромагнитного момента и момента сопротивления.

В последнее время ведутся работы по использованию преобразователей, позволяющих регулировать частоту вращения электродвигателей переменного тока путем изменения частоты. При этом рассматриваются преобразователи со звеном постоянного тока и с непосредственной связью. Первые (типа ПЧИ) выпускаются промышленностью на мощности 30, 60 и 80 кВт, а вторые (типа ТТС (ПЧН) — на 16, 40 и 80 кВт при ПВ = 40 %. Оба типа из-за сложности их схем управления пока не нашли широкого применения. Выходная частота преобразователей со звеном постоянного тока изменяется в пределах 5...50 Гц, напряжение — в пределах 2...340 В, а преобразователей с непосредственной связью — соответственно в пределах 2...30 Гц и 25...230 В [3], причем выходная частота f_2 последних жестко связана с частотой питающей сети f_1 следующей зависимостью:

$$f_2 = \frac{f_1 m}{2N + m - 2}, \quad (1.72)$$

где m — число тактов выпрямления и N — число участков синусоид, приходящихся на полупериод выходного напряжения.

В зависимости от схемы преобразователя (мостовая или нулевая) выходная частота $f_2 = 0,6 f_1$ или $f_2 = 0,4 f_1$. Поэтому такие преобразователи лучше использовать в схемах, подобных изображенной на рис. 1.16, или в схемах с многоскоростными двигателями, когда в пределах одной ступени осуществляется частотное регулирование.

В схемах, подобных показанной на рис. 1.16, регулирование частоты вращения двигателя производится при выходной частоте преобразователя от 4...7 до 22 Гц, а затем электродвигатель включается непосредственно в сеть. В этом случае можно получить диапазон регулирования частоты вращения в пределах 12 : 1...

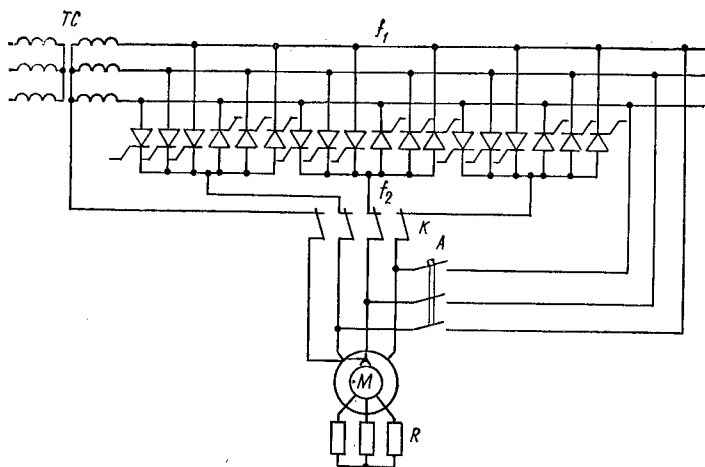


Рис. 1.16. Принципиальная схема управления асинхронным электродвигателем с помощью преобразователя с последующим включением двигателя в сеть

...8 : 1. При использовании таких схем пуск в ход двигателя производится, как обычно, начиная с минимальной частоты вращения и доводится до частоты, соответствующей наибольшей выходной частоте преобразователя, с помощью задатчика темпа. При этом с изменением частоты должно одновременно изменяться и выходное напряжение преобразователя. При опускании грузов, когда посадочная скорость должна быть низкой, схема позволяет реализовать генераторный режим работы двигателя с рекуперацией энергии торможения в сеть.

В выпускаемых промышленностью преобразователях частоты осуществляется наиболее простая для реализации прямоугольная модуляция. При этом амплитуды отдельных гармоник выходного напряжения составляют до 20% амплитуды первой гармоники, а потери в двигателе увеличиваются на 10...15%, что приводит к снижению к.п.д. электропривода по сравнению с питанием от синусоидального источника [19]. Кроме того, при естественной коммутации тиристорных преобразователей по мере снижения частоты вращения электродвигателя снижается коэффициент мощности электроприводов.

Управление электродвигателями постоянного тока.

При тиристорном управлении наиболее часто используются электродвигатели постоянного тока независимого возбуждения и в некоторых случаях электродвигатели

смешанного возбуждения. Применительно к этим двигателям разработаны и выпускаются специально крановые комплектные тиристорные преобразователи с питанием от сети переменного тока напряжением 380 В. Они содержат трехфазные мостовые схемы для питания якорных цепей напряжением 220 и 440 В и однофазовые мостовые схемы для питания независимых обмоток возбуждения, причем на напряжение 220 В комплектуются согласующими трансформаторами, а при 440 В питаются через токоограничивающие реакторы непосредственно от сети.

Электроприводы с этими преобразователями имеют две модификации: одномостовую типа АТК на токи 100, 160 и 250 А, где реверс осуществляется контактными аппаратами, и двухмостовую типа АТРК на токи 100, 160, 250 и 500 А, где реверс производится включением в работу одного или другого моста.

В электроприводах с двигателями независимого возбуждения предусмотрено как двухзонное регулирование частоты вращения, осуществляемое изменением напряжения, подводимого к якорю двигателя, и потоком возбуждения, так и однозонное — изменением напряжения на якоре.

Тиристорные электроприводы с двигателями смешанного возбуждения позволяют использовать такие преимущества этих двигателей, как большая перегрузочная способность и более благоприятная форма естественной механической характеристики, обеспечивающая при меньших грузах большие частоты вращения.

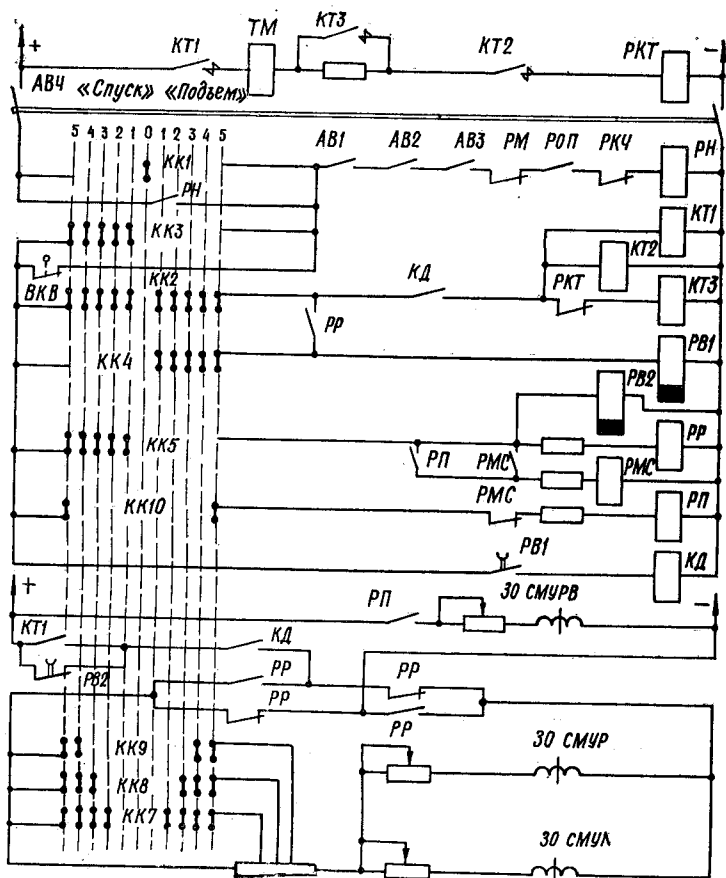
Однако при этом необходимо иметь двигатели с необычными соотношениями намагничивающих сил обмоток возбуждения.

Принципиальная схема управления электроприводом типа АТРК показана на рис. 1.17, а. Она включает в себя бесконтактные и релейно-контактные элементы. Управление электроприводом осуществляется командоконтроллером КК, а управление тиристорными преобразователями — многоканальными системами фазового управления: силового ($Bn1$) — СФУ и возбудителя ($Bn2$) — СФУВ, работающими по «вертикальному принципу» в функции сигналов на их входах, причем управление преобразователями отдельное.

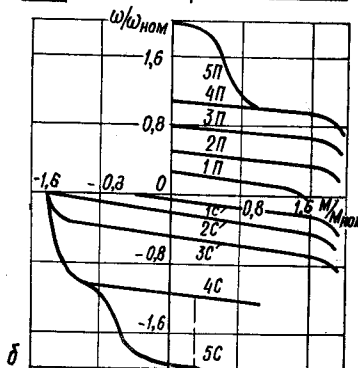
В преобразователях АТРК одна СФУ работает на обе группы тиристорov. Для переключения выхода СФУ с одной тиристорной группы на другую предусмотрен специальный коммутатор K . Сигналы на СФУ поступают с суммирующего магнитного усилителя-регулятора главной цепи СМУР или возбудителя СМУРВ. Задающее напряжение U_3 подается на задающие обмотки управления этих усилителей в зависимости от положения командoаппарата (командоконтроллера), а для СМУР — еще и от состояния логического переключающего устройства (ЛПУ).

ЛПУ обеспечивает переключение контакторов (в преобразователях АТК) или групп тиристорov (в преобразователях АТРК) в бестоковую паузу. Управление ЛПУ осуществляется суммирующим магнитным усилителем логики (СМУЛ). СМУЛ формирует двухполярный сигнал, пропорциональный разности задающего сигнала управления U_3 и сигнала обратной связи, который, в свою очередь, пропорционален напряжению, снимаемому с двигателя ($U_{дв}$): $\Delta U = U_3 - U_{дв}$. ЛПУ выполнено на базе триггера, состояние которого определяется его входным сигналом ΔU и сигналом, пропорциональным выпрямленному току преобразователя I . При положительном значении ΔU ЛПУ устанавливается в положение, соответствующее работе одной группы тиристорov («вперед» или «назад»; «подъем» или «спуск»), при отрицательном — другой.

В неперевсивных преобразователях (АТК) ЛПУ обеспечивает переключение реверсора. Если ΔU равно нулю, то состояние ЛПУ не изменяется; если же ток преобразователя не равен нулю, то ЛПУ находится в одном из двух указанных состояний и переключение его невозможно даже при смене знака ΔU . Сигнал о наличии тока в цепи нагрузки преобразователя поступает в ЛПУ с датчика нулевого тока, в качестве которого используется трансформатор постоянного тока ТПТ. Наряду с рассмотренными бесконтактными элементами на схеме указаны обмотки управления регуляторов — магнитных усилителей: задающие — 30 СМУР, 30 СМУРВ и 30 СМУЛ; обратной связи по напряжению двигателя — ОН СМУР и ОН СМУЛ и обратной связи по току — ОТ СМУРВ.



а



б

Для получения требуемых механических характеристик и необходимого характера изменения переходных процессов на входы регуляторов-усилителей *СМУР* могут быть поданы сигналы обратных связей по напряжению, току (блок токовой отсечки *БТО*), частоты вращения и другим параметрам. Кроме того, при опускании груза и переводе командоконтроллера в нулевое положение предусмотрен перевод соответствующего моста и инверторный режим, т. е. переключение электродвигателя на режим противовключения (реле *РР*).

Схема возбудителя (*Vn2*) состоит из двух выпрямительных мостов — *рабочего* и *аварийного*. Аварийный мост, выполненный на диодах по симметричной схеме, подключен через трансформатор *Tr2* к питающей сети, а рабочий однофазный несимметричный мост — непосредственно к сети. Аварийный мост обеспечивает получение минимального напряжения (25В в АТК и 54В в АТРК) на выходе возбудителя при исчезновении импульсов и запирании рабочего моста [19].

Преобразователи АТК и АТРК при номинальном режиме имеют к.п.д. не ниже 0,85...0,95, а коэффициент мощности — 0,81...0,87 и позволяют регулировать выпрямленное напряжение на якоре в пределах от 0 до $U_{ном}$ и напряжение возбуждения АТК в пределах 25...165 В, а АТРК — 54...330 В. Силовая часть набирается из модульных блоков тиристоров и имеет естественное охлаждение.

Релейно-контакторные элементы, подобно контактными схемам управления, обеспечивают включение, отключение и защиту от токов короткого замыкания, перегрузок и исчезновения напряжения с помощью автоматов *АВ1...АВ4*, максимального реле *РМ* и реле напряжения *РН*; механическое и динамическое торможение посредством тормоза *ТМ* после срабатывания контакторов *КД*, *КТ1...КТ3*; контроль превышения частоты вращения (реле *РКЧ*), обрыва поля (реле *РОП*), форсировки растормаживания (реле *РКТ*), нагрузки (дифференциальное реле *РМС*) и конечной защиты в сторону подъема (выключатель *ВКВ*); необходимые блокировки и выдержки времени во время работы схемы; выбор режима работы электропривода.

Выбор режима работы электропривода и управление им осуществляются командоконтроллером *КК*, имею-

щим по пять фиксированных рабочих положений в сторону подъема и спуска и одно нулевое положение. Положения «Подъем» и «Спуск» обеспечивают соответствующие механические характеристики электропривода, показанные на рис. 1.17, б: на подъем — 1П...5П и на спуск — 1С...5С. Характеристики 1П...4П и 1С...4С получают изменением напряжения на выходе силового тиристорного преобразователя $Bn1$ путем воздействия на задающие обмотки его магнитных усилителей (ОЗ СМУР и ОЗ СМУЛ) изменением сопротивления в их цепи; характеристики 5П и 5С — ослаблением поля двигателя при полном напряжении на его якоре (они предусмотрены для подъема и опускания легких грузов или ненагруженного крюка, причем во время опускания ослабление поля обеспечивается только до определенного тока нагрузки, по достижении этого тока срабатывает дифференциальное реле РМС, которое своими размыкающими контактами отключает цепь с катушкой реле РП, отключающего обмотку ЗО СМУРВ, в результате чего частота вращения двигателя снижается до значения, соответствующего четвертому положению контроллера).

Механические характеристики указанных электроприводов можно рассчитать и построить по их электро-механическим характеристикам. Рабочую часть этих характеристик без обратных связей в схеме (в режиме непрерывного тока, когда угол коммутации $\gamma \leq \pi/3$) можно записать в следующем виде:

$$U \approx U_0 \cos \alpha - \Delta U_a - \left(\frac{m_2}{2\pi} \omega L_a - r_a \right) I, \quad (1.73)$$

где $U_0 = \frac{m_2}{\pi} E_{2m} \sin \frac{\pi}{m_2}$ — напряжение холостого хода выпрямителя при угле открывания клапанов $\alpha = 0$; ΔU_a — потеря напряжения в клапанах; m_2 — число пульсаций выпрямленного напряжения; E_{2m} — амплитудное значение фазовой э. д. с. питающего напряжения (вторичной обмотки трансформатора или сети — при бестрансформаторном варианте схемы); L_a и r_a — индуктивность и активное сопротивление обмоток согласующего трансформатора; ω — круговая частота питающего напряжения; U и I — средние значения выпрямленного напряжения и тока.

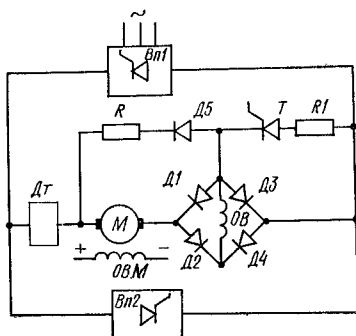


Рис. 1.18. Принципиальная схема управления электродвигателем смешанного возбуждения

строительных башенных кранов высотных зданий с диапазоном регулирования частоты вращения 20 : 1. В этой схеме от двухкомплектного тиристорного выпрямителя $Bn1$ или $Bn2$ питается якорь двигателя M , а через диагональ моста (диоды $D1...D4$) — сериясная обмотка возбуждения OB . Кроме того, в цепь якоря включен датчик нулевого тока $Дт$. Обмотка независимого возбуждения двигателя OBM получает питание от отдельного источника. Параллельно якорю и диоду $D1$ присоединена тормозная цепь, содержащая диод $D5$ и резистор R , а параллельно диоду $D3$ — шунтирующая цепь последовательно включенных резистора $R1$ и тиристора T .

При подъеме груза работает выпрямительный комплект тиристоров $Bn1$, обеспечивая питанием якорь двигателя и OB (через диоды $D2$ и $D3$). Во время опускания легких грузов, когда двигатель работает в режиме силового спуска, функционирует выпрямительный комплект $Bn2$. При опускании тяжелых грузов, когда двигатель должен работать в тормозном режиме, комплект $Bn1$ работает в инверторном режиме. В случае потери питающего напряжения противо-э.д.с. якоря оказывается замкнутой по цепи $M-D2-OB-D5-R-M$, что обеспечивает динамическое торможение с самовозбуждением двигателя и исключает тем самым возможность неуправляемого падения груза при неисправности механического тормоза.

Построенные по (1.73) электромеханические характеристики (при $\alpha = \text{const}$) в другом масштабе будут механическими характеристиками, так как $M = k\Phi I_{я}$ ($I = I_{я}$), а $U \approx c\Phi n$.

На рис. 1.18 изображена принципиальная схема управления двигателем постоянного тока смешанного возбуждения [14], которая применяется для привода механизмов подъема

Механические характеристики двигателя в первом квадранте — обычные, как и двигателей смешанного возбуждения. Однако во втором квадранте они неустойчивы, так как намагничивающаяся сила при этом является суммой намагничивающих сил OBM и OB , что может привести к значительной э.д.с. двигателя и большому напряжению на зажимах тиристорных выпрямителей, а это, в свою очередь, — к опрокидыванию инвертора. Для исключения последнего ослабляют поле, создаваемое OB , шунтируя ее резистором $R1$ и тиристором T , который отпирается только после перевода на инверторный режим работы питающих групп тиристорov. При переходе же из генераторного в двигательный режим к концу процесса торможения тиристор T автоматически закрывается обратным напряжением выпрямителя $Bn1$, который переходит в выпрямительный режим, благодаря чему исключается шунтирование OB при работе привода в первом квадранте. Ослабление поля двигателя с помощью тиристора T и резистора $R1$ может быть использовано и при работе привода в третьем квадранте для получения более высокой скорости опускания негруженного крюка и легких грузов. При работе привода в третьем и четвертом квадрантах OB получает подпитку через последовательные соединенные диод $D5$ и резистор динамического торможения R , чем достигается необходимая жесткость механической характеристики двигателя.

Кроме рассмотренных в этом параграфе и § 1.4 электроприводов, в кранах специального назначения используются электроприводы, собранные по системе «генератор — двигатель» (Г — Д), которые обеспечивают широкий диапазон регулирования частоты вращения при весьма жестких механических характеристиках двигателя. Эти приводы хорошо известны по другим применениям в промышленности и здесь не рассматриваются.

1.7. ПОНЯТИЕ О ТЕПЛОУПРАВЛЕНИИ КРАНАМИ

Управление краном из кабины, расположенной на нем, часто неудобно и даже невозможно. Поэтому появилась необходимость телемеханического управления кранами по проводам с помощью вспомогательных тролеев или по радио. В этом случае управление осуще-

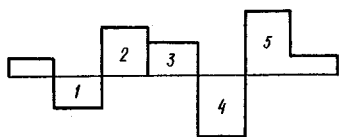


Рис. 1.19. Командные импульсы при телеуправлении краном

ствляется пультом с использованием закодированных команд, импульсы для выполнения которых подаются с распорядительного устройства. Пульта управления может быть несколько и устанавливаются они у

рабочих мест или могут быть переносными.

Кодирование команд необходимо для того, чтобы исключить ложные команды и влияние возможных посторонних помех. Способы кодирования могут быть различными. Так, например, может быть использован позиционно-амплитудно-полярный (при управлении по проводам) или частотный (при управлении по радио) код, состоящий из нескольких (например, пяти) импульсов различной полярности и амплитуды или импульсов различной частоты. Командные импульсы, к примеру, изображены на рис. 1.19. Комбинируя эти импульсы (по амплитуде или полярности), можно получить такое количество команд, какое возможно число комбинаций, а принимая ту или иную из них для соответствующего механизма или ступени его скорости, можно управлять краном. Так, например, если принять для выбора крановых механизмов импульсы 2...5 и скомбинировать их по амплитудному признаку (по одному или по три импульса), можно осуществить восемь команд (выбрать механизм подъема или механизм передвижения тележки и т. д.). Хотя принципиально может быть и большее количество комбинаций, но необходимости в этом нет. Или, если для выбора направления движения механизма (стоп, вперед, назад или стоп, вверх, вниз) использовать по полярному признаку, например импульсы 1 и 2, то комбинирование их дает возможность осуществить четыре команды. Или, если для задания скорости выбранному механизму воспользоваться полярным признаком, например импульсов 3...5, то, комбинируя их, можно получить восемь команд, из которых для задания скорости можно использовать, например, шесть команд (0С, 1С, 2С, 3С, 4С и 5С), а остальные применить для включения или отключения питания панелей управления и т. д.

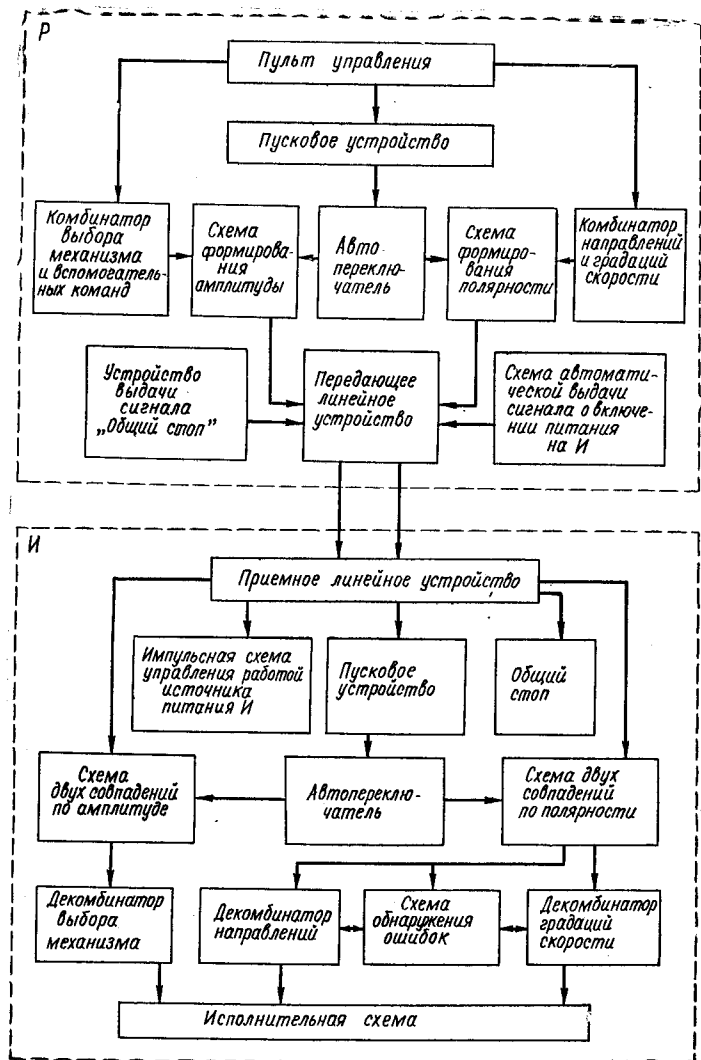


Рис. 1.20. Структурная схема телеуправления краном

Одна из возможных структурных схем телеуправления краном, где кодирование осуществляется по амплитудно-полярному коду, изображена на рис. 1.20. Эта схема включает в себя элементы распорядительной

части (*P*), которые расположены возле оператора, и элементы исполнительной части (*I*), установленные на кране. В число первых входят: пульт управления; пусковое устройство; комбинаторы выбора механизма, направлений, скорости и вспомогательных команд; автопереключатель; элементы формирования импульсов по полярности и амплитуде; передающее линейное устройство (или передатчик при радиоуправлении). Вторые включают в себя приемное линейное устройство (или приемник при радиоуправлении); пусковое устройство и автопереключатель; схемы двух совпадений по полярности и амплитуде; декомбинаторы выбора механизма, направлений и скорости; исполнительную схему управления электроприводами.

Для каждого механизма на пульте управления установлен свой командоаппарат (рычаг), который имеет необходимое количество фиксированных положений в одном и другом направлениях, а также нулевое положение. Кроме того, на пульте размещены элементы для подачи вспомогательных команд (включения и отключения питания приводов, включения и отключения сигнализации и т. д.) и может быть установлена педаль для аварийной остановки двигателей.

При включенном питании краткое и упрощенное взаимодействие указанных элементов можно представить следующим образом. Для передачи команды ручку командоаппарата соответствующего механизма необходимо поставить в требуемое положение. При этом в распорядительную часть схемы будут поданы команды комбинаторам выбора механизма, направлений, градаций скорости и пусковому устройству. Комбинатор выбора механизма, воздействуя на схему формирования амплитуды, подготавливает ее для подачи в линию кодированной команды выбора соответствующего механизма. Комбинатор выбора направлений и градаций скорости, воздействуя на схему формирования полярности, подготавливает ее для выдачи в линию кодированной команды, импульсы которой имеют различную полярность, причем первые два выбирают направление, а последующие три — скорость. Пусковое устройство, действуя на автопереключатель, запускает его. Автопереключатель обеспечивает последовательное во времени распределение импульсов кода различной полярности

и амплитуды. Линейное устройство служит для передачи кода с распорядительной части схемы на исполнительную.

В исполнительной части схемы импульсы кода переданной команды поступают на приемное линейное устройство, которое сначала выявляет их по амплитуде и полярности, а затем одновременно воздействует на пусковое устройство и схемы двух совпадений. Пусковое устройство запускает приемный автопереключатель, который обеспечивает прием последовательно распределенных во времени импульсов кода. Схемы же двух совпадений воздействуют на соответствующие декомбинаторы только при наличии двух совпадений: одного, обусловленного работой приемного автопереключателя, и другого, обусловленного работой приемного линейного устройства. Декомбинаторы, получив сигналы от схем двух совпадений, выявляют команды и передают их для исполнения в схему управления электроприводом.

Примером телеуправляемого крана является разработанный ЦКБстроймашем башенный кран для строительства высотных зданий (до 50 этажей) максимальной грузоподъемности 12,5 т с вылетом стрелы 50 м. Кран наверху не имеет кабины для крановщика, а управляется дистанционно по заранее намеченной оптимальной программе с помощью портативных пультов стропелем или бригадиром монтажников. Кроме того, телеуправляемый кран установлен на Братской ГЭС, а во Львове выпускают аппаратуру для дистанционного управления кранами («Адук»). Наряду с телеуправлением кранами-штабелерами используется программное управление ими, причем программы формируются в соответствии с назначением и использованием кранов и реализуются при наличии или отсутствии оператора.

1.8. ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ КРАНОВ И ДРУГИХ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Электроснабжение подъемно-транспортных механизмов осуществляется посредством гибкого кабеля или с помощью троллеев. Гибкий кабель используется только в особых случаях: когда недопустима установка троллеев (взрывоопасные помещения и др.); когда трол-

леи не могут быть размещены; когда подъемно-транспортные механизмы применяются редко. В остальных случаях используются троллеи, которые выполняются обычно из стальных профилей (уголка, двутавра, швеллера, квадрата) и монтируются на специальных конструкциях, включающих в себя изоляторы с держателями. Конструкции для крепления троллеев рекомендуется монтировать на подкрановых балках на расстоянии не более 3...3,5 м и друг от друга (для электрических талей на прямых участках — 2 м и на закруглениях — 1 м). При длинных троллейных линиях необходимо устанавливать температурные компенсаторы через каждые 50 м и в местах температурных швов зданий. Иногда троллейные линии выполняются круглыми или профильными проводами, обычно из меди. Крепление их осуществляется в виде свободной подвески.

Согласно правилам устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов Госгортехнадзора СССР троллеи должны монтироваться со стороны пролета, противоположной местонахождению крановой кабины (посадочной площадки). Исключение допускается только в тех случаях, когда троллеи недоступны для случайного прикосновения из кабины, посадочной площадки или с лестницы [21].

В соответствии с ПУЭ электроприводы кранов относятся к категории потребителей не ниже второй, для которых перерыв электроснабжения допускается только на время переключения питания с основного источника на резервный. Ряд кранов (литейные, для перегрузки взрывоопасных, ядовитых, радиоактивных грузов и некоторые другие) относятся к потребителям первой категории и должны обеспечиваться питанием от двух независимых источников, а перерыв электроснабжения может быть только на время автоматического переключения на резервное питание. Поэтому электроснабжение грузоподъемных машин (обычно через троллеи) осуществляется посредством специальных линий: от подстанционного щита, от ближайшего цехового распределительного щита или от ответвлений магистральных шинопроводов.

Характерны следующие схемы питания троллеев: из одного места в одну точку троллеев; то же, но с индукционной подпиткой; то же, но с безындукционной под-

питкой; из двух и более мест в соответствующее число точек троллеев. Схемы с подпиткой и схемы питания из нескольких мест применяются только тогда, когда потери напряжения до наиболее удаленной точки потребления энергии при пиковом токе превышают допустимые значения. Однако в некоторых случаях целесообразно бывает увеличивать площадь сечения подводящих кабелей или проводов, но не делать подпитки и не секционировать троллеи.

Подпитку обычно осуществляют алюминиевой лентой, прокладываемой и закрепляемой на тех же держателях, что и троллеи, или проводом, проложенным в стальных трубах, либо кабелем.

Троллеи, питаемые из нескольких мест, секционируются на участки по числу точек питания. Секционирование производится путем установки между участками троллеев изоляционных вставок (промежутков), которые бывают длиной больше токоъемника (тогда происходит перерыв питания) или меньше токоъемника (перерыв питания не происходит). Второй способ может быть применен тогда, когда секции питаются от одного или нескольких параллельно работающих трансформаторов. При питании секций с малыми изоляционными промежутками от разных трансформаторов в момент перекрытия секций могут появиться значительные уравнильные токи, которые, в свою очередь, могут привести к сгоранию предохранителей и перерыву питания троллеев.

В том случае, когда сооружение троллеев вдоль линии движения крана невозможно, их монтируют непосредственно на самом подъемно-транспортном устройстве в виде салазок, а токоподводы располагают на поверхностях опор вдоль линии движения. При этом длина троллеев (салазок) должна быть больше расстояния между токоподводами.

Выбор сечения троллеев производится по допустимому расчетному току нагрузки с последующей проверкой их по потере напряжения. Такая проверка необходима для того, чтобы обеспечить нормальный технологический процесс, так как, например при использовании асинхронных двигателей переменного тока, момент пропорционален квадрату напряжения и в случае низкого напряжения на зажимах двигателя он не сможет

развить нужный момент и нарушит тем самым технологический процесс.

Известно несколько приближенных способов определения расчетного тока, которые базируются на опыте эксплуатации кранов. Чаще всего этот ток рассчитывают по мощности двигателей и опытным коэффициентам или исходя из эффективного числа приемников. По первому способу потребляемая мощность из сети P , а следовательно, и ток определяются исходя из мощностей двигателей крановых механизмов, т. е.

$$P = cP_3 + bP_c, \quad (1.74)$$

где P_3 — установленная мощность трех наибольших в группе двигателей при ПВ = 25%, кВт; P_c — суммарная мощность всех двигателей группы при ПВ = 25%, кВт; $c = 0,3$ и $b = 0,06 \dots 0,18$ — опытные коэффициенты.

По этой мощности находятся:

а) расчетный переменный ток

$$I = \frac{P \cdot 10^3}{\sqrt{3} U_{\text{ном}} \cos \varphi}; \quad (1.75)$$

б) расчетный постоянный ток

$$I = \frac{P \cdot 10^3}{U_{\text{ном}}}, \quad (1.76)$$

где $U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение сети, В; $\cos \varphi$ — средний коэффициент мощности двигателей.

По рассчитанным токам предварительно могут быть выбраны троллеи и питающие кабели или провода, причем уголки меньше чем № 5 ($50 \times 50 \times 5$ мм), вследствие их недостаточной жесткости, не применяются. В тех случаях, когда необходимая площадь сечения их получается большой, используется не уголок железный, а другой профиль или подпитка, осуществляемая дополнительными линиями. Если допустимая нагрузка троллеев задана при ПВ = 100%, то при ПВ = 40% для переменного тока она может быть увеличена в 1,5 раза, а для постоянного — в 1,5...2 раза.

Выбранные троллеи и питающие сети проверяются по допустимым потерям напряжения. Потери напряжения в сети от подстанций до двигателей при протекании пусковых (пиковых) токов не должны превышать

8...12% (максимально допустимые по ПУЭ значения $\Delta U_{\text{ном}} \leq 15\%$). Эти потери могут быть распределены следующим образом, %:

- главные троллеи.....3...4;
- магистраль до главных троллеев...4...5;
- сеть в пределах крана.....1...3.

При расчете потерь напряжения на участках (%) используются следующими выражениями:

а) для проводов, кабелей и троллеев при работе на постоянном токе

$$\Delta U = \frac{2I_{\text{п}}L \cdot 100}{\gamma S U_{\text{ном}}}; \quad (1.77)$$

б) для кабелей и проводов при работе на переменном токе

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} I_{\text{п}}L \cos \varphi \cdot 100}{\gamma S U_{\text{ном}}}; \quad (1.78)$$

в) для стальных троллеев при работе на переменном токе

$$\Delta U = \frac{I_{\text{п}}L \sqrt{3} (R \cos \varphi + X \sin \varphi) \cdot 100}{U_{\text{ном}}} = I_{\text{п}}LK,$$

откуда коэффициент

$$K = \frac{\Delta U}{I_{\text{п}}L}. \quad (1.79)$$

Здесь L , S , γ — соответственно длина троллеев, кабелей или проводов (м), площадь сечения (мм^2) и удельная проводимость их материалов (МСм/м); $I_{\text{п}}$ — пиковый ток нагрузки, А; R и X — активное и реактивное сопротивления 1 м длины троллеев, Ом/м; $\cos \varphi$ — средний коэффициент мощности двигателей при пуске наиболее мощного из них (для двигателей типов МТ и МТК $\cos \varphi \approx 0,5...0,65$).

Пиковый ток нагрузки зависит от числа кранов, питающихся от данных троллеев:

а) при одном кране

$$I_{\text{п}} = k_{\text{т}} I_{\text{ном} 1} + I_{\text{ном} 2}; \quad (1.80)$$

б) при двух кранах

$$I_{\text{п}} = k_{\text{т}} I_{\text{ном 1}} + I_{\text{ном 2}} + I_{\text{ном 12}}. \quad (1.81)$$

Здесь $I_{\text{ном 1}}$ — номинальный ток наиболее мощного двигателя крана, А; $I_{\text{ном 2}}$ — номинальный ток второго по мощности двигателя того же крана, А; $I_{\text{ном 12}}$ — номинальный ток наиболее мощного двигателя второго крана, А; $k_{\text{т}}$ — кратность пускового тока.

Если руководствоваться допустимыми потерями напряжения в главных троллеях $\Delta U = 3 \dots 4\%$, то при данной их длине и рассчитанном пиковом токе $I_{\text{п}}$ площадь сечения троллеев можно выбрать по рассчитанному значению коэффициента K , пользуясь соответствующими таблицами [5], где указывается площадь сечения троллеев при определенных токах $I_{\text{п}}$ и $\cos \varphi = \text{const}$. Когда рассчитанный ток не совпадает с табличным, коэффициент K можно определить по формуле

$$K = K_1 - (K_1 - K_2) \frac{I_{\text{п}} - I'}{I'' - I'}, \quad (1.82)$$

где I' — ток, меньший тока $I_{\text{п}}$; I'' — ток, больший тока $I_{\text{п}}$; K_1 и K_2 — соответствующие этим токам коэффициенты, определяемые по справочным таблицам.

Пользуясь коэффициентом K , находят истинную потерю напряжения и сравнивают ее с допустимой:

$$\Delta U_{\text{доп}} \geq \Delta U_{\text{ист}} = KI_{\text{п}}L. \quad (1.83)$$

Суммарные потери напряжения от трансформатора до двигателя не должны превышать допустимых по ПУЭ.

При проектировании и выборе троллеев для крановых установок нужно иметь в виду, что в ряде случаев можно воспользоваться типовыми троллейными шинопроводами. Так, например, при нормальной среде в помещениях для питания кранов небольшой грузоподъемности, электрических талей, подвесных кранбалок и других установок на переменный ток 200 А напряжением до 660 В можно использовать троллейные шинопроводы типа ШТМ-70, а на ток 250 А — типа ШТМ-73 [14]. Эти шинопроводы прокладываются по трассе, параллельной однорельсовому пути, по которому перемещается кран.

В целях безопасности обслуживания и эксплуатации кранов напряжение их рабочего освещения при переменном токе не должно превышать 220 В, при постоянном токе — 600 В, а ремонтное освещение — 12 В [29].

1.9. ПРИМЕР РАСЧЕТА И ВЫБОРА ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КРАНОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Расчитать и выбрать основные элементы контактной и малоcontactной силовых схем электропривода моста и главные троллеи мостового крана грузоподъемностью 15 т. Исходные данные: напряжение питающей сети 380 В переменного тока, кран при ПВ = 40% работает в помещении прокатного цеха длиной $L \approx 150$ м, от троллеев питается два одинаковых крана. Параметры крана: масса моста 34 т; масса тележки 7,8 т; масса крюка 100 кг; скорость перемещения моста $v = 120$ м/мин $= 2$ м/с; диаметр ходовых колес $D = 350$ мм; диаметр цапф $d = 40$ мм; передаточное число редуктора $u = 6,5$; механический к.п.д. $\eta = 0,92$ (каждая сторона крана имеет свой привод); отношение числа ведущих осей к их общему числу $k = 0,5$.

В механизме подъема крана установлен двигатель мощностью 40 кВт с ПВ = 40%, $U = 380$ В, $I = 91$ А, $n = 580$ мин⁻¹, $\cos \varphi = 0,74$, $I_{2ном} = 140$ А, $U_{2ном} = 172$ В, $M_{max} = 1860$ Н·м; в механизме передвижения тележки — двигатель мощностью 5 кВт с ПВ = 40%, $U = 380$ В, $I = 14,3$ А, $n = 905$ мин⁻¹, $\cos \varphi = 0,73$, $I_{2ном} = 17,3$ А, $U_{2ном} = 204$ В, $M_{max} = 133$ Н·м.

Решение. 1. *Выбор электродвигателей и устройства управления ими.* Для выбора двигателей воспользуемся методом последовательных приближений.

Полагая нагрузку двигателей одинаковой и пренебрегая ветровой нагрузкой, рассчитываем усилия, которые должны преодолевать электродвигатели при перемещении крана с полным грузом (F_1) и без него (F_2):

$$F_1 = (k_p F_{тр} + F_{ук} + F_B) g = \left[2,5 \cdot 34 + 7,8 + 15 + 0,1 \right] \cdot 10^3 \times \\ \times \frac{0,1 \cdot 4 + 0,1 \cdot 2}{35} + 0,002 (34 + 7,8 + 15 + 0,1) \cdot 10^3 \cdot 9,81 \text{ Н} = \\ = 25\,000 \text{ Н};$$

$$F_2 g = \left[2,5 \cdot 34 + 7,8 + 0,1 \right] \cdot 10^3 \frac{0,1 \cdot 4 + 0,1 \cdot 2}{35} + 0,002 \times \\ \times (34 + 7,8 + 0,1) \cdot 9,81 \text{ Н} = 18\,500 \text{ Н}.$$

Определяем необходимые мощность и частоту вращения электродвигателя при перемещении номинального груза:

$$P_1 = \frac{F_1 U \cdot 10^{-3}}{\eta} = \frac{25\,000 \cdot 120 \cdot 10^{-3}}{0,92 \cdot 60} \text{ кВт} = 54,3 \text{ кВт};$$

$$n = \frac{U\ell}{\pi D} = \frac{120 \cdot 6,5}{3,14 \cdot 0,35} \text{ мин}^{-1} = 710 \text{ мин}^{-1}.$$

Для каждой стороны крана выбираем двигатели номинальной мощности, несколько большей половины расчетной статической мощности, с независимой вентиляцией: $P_{\text{ном}} = 30 \text{ кВт}$ при ПВ = 40%; $U_{\text{ном}} = 380 \text{ В}$; $I_{\text{ном}} = 77 \text{ А}$; $n_{\text{ном}} = 715 \text{ мин}^{-1}$; $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,75$; $\eta_{\text{ном}} = 0,84$; $I_{2\text{ном}} = 66 \text{ А}$; $U_{2\text{ном}} = 288 \text{ В}$; $M_{\text{max}} = 1130 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $GD^2 = 5,7 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$;

$$M_{\text{ном}} = 9550 \frac{P_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} = 9550 \frac{30}{715} \text{ Н} \cdot \text{м} = 400 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$s_{\text{ном}} = \frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{750 - 715}{750} = 0,0465.$$

Для управления двигателями можно использовать дуплексный контроллер или асинхронно-вентильный каскад (ПРБУ). В первом случае это может быть дуплексный контроллер типа ДТА 150 [$U = 380 \text{ В}$; $I = 2(100 + 185) \text{ А}$, $I_p = 2 \times 185 \text{ А}$], включаемый через защитную панель типа ПКЗ, с командоконтроллером типа КК-8205 на пять положений ($m = 5$), а во втором — ПРБУ-380-50 для каждого двигателя с общей рукояткой ($P_{\text{ном}} = 30 \text{ кВт}$; $U = 380 \text{ В}$; $I_{p.\text{ном}} = I_{\text{ст.ном}} = 50 \text{ А}$; $I_{p.\text{max}} = 80 \text{ А}$; $\eta = 0,95$).

2. *Определение необходимых элементов идеализированной диаграммы нагрузки двигателей и проверка выбранного ПРБУ.* Рассчитываем статические моменты сопротивления при движении крана с номинальным грузом (M_1) и без него (M_2), считая $\eta = \text{const}$:

$$M_1 = \frac{F_1 D}{2i\eta} = \frac{25\,000 \cdot 0,35}{2 \cdot 6,5 \cdot 0,92} \text{ Н} \cdot \text{м} = 732 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_2 = \frac{F_2 D}{2i\eta} = \frac{18\,500 \cdot 0,35}{2 \cdot 6,5 \cdot 0,92} \text{ Н} \cdot \text{м} = 543 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

При контроллерном управлении в период разгона принимаем максимальный момент двигателя $M_{\text{max}} = 1,9M_1 = 1390 \text{ Н} \cdot \text{м} < M_{\text{дв max}} = 2 \cdot 1130 \text{ Н} \cdot \text{м}$, кратность пускового момента будет

$$K = \frac{1390}{2 \cdot 400} = 1,74.$$

Находим скольжение при максимальном моменте двигателя

$$s = s_{\text{ном}} M_{\text{max}} / M_{\text{ном}} = 0,0465 \cdot 1,74 = 0,081.$$

Определяем отношение максимального момента к моменту переключения (λ), момент переключения ($M_{\text{пр}}$) и средний момент ($M_{\text{ср}}$) при разгоне электродвигателя:

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{1}{s}} = \sqrt[4]{\frac{1}{0,081}} = 1,86;$$

$$M_{\text{пр}} = \frac{M_{\text{max}}}{\lambda} = \frac{1390}{1,86} \text{ Н} \cdot \text{м} = 746 \text{ Н} \cdot \text{м} > M_1 = 732 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{ср}} = \frac{M_{\text{max}} + M_{\text{пр}}}{2} = \frac{1390 + 746}{2} \text{ Н} \cdot \text{м} = 1068 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Если считать, что время разгона двигателя при управлении с помощью ПРБУ такое же, как и при контроллерном управлении, то момент, развиваемый двигателем при использовании ПРБУ, должен быть $M = M_{\text{ср}}$. Имея это в виду, проверяем выбранное ПРБУ по допустимому максимальному току:

$$I_{2\text{ном}} \frac{M_{\text{ср}}}{2M_{\text{ном}}} = 66 \frac{1068}{2 \cdot 400} \text{ А} = 88 \text{ А} > I_{\text{max}} = 80 \text{ А},$$

т. е. ПРБУ-380-50 по максимальному току не подходит и нужно применить ПРБУ-380-100, максимальный ток в роторной цепи которого может достигать 160 А.

Рассчитываем элементы диаграммы нагрузки двигателей за идеализированный цикл работы, считая при этом, что средний путь движения крана равен $L/2$.

Определяем время разгона крана до номинальной скорости с грузом ($t_{\text{п1}}$) и без него ($t_{\text{п2}}$), принимая $\eta = \text{const}$ и $n = n_1 = n_2 = \text{const}$:

$$t_{\text{п1}} = \frac{k \cdot 2GD^2 n}{38,3 (M_{\text{ср}} - M_1)} + \frac{0,975g \sum mv^2}{n\eta (M_{\text{ср}} - M_1)} =$$

$$= \left[\frac{1,1 \cdot 2 \cdot 5,7 \cdot 715}{38,3 (1068 - 732)} + \frac{0,975 \cdot 9,81 \cdot 56,9 \cdot 10^3 \cdot 2^2}{715 \cdot 0,92 (1068 - 732)} \right] \text{ с} = 9,7 \text{ с};$$

$$t_{\text{п2}} = \left[\frac{1,1 \cdot 2 \cdot 5,7 \cdot 715}{38,3 (1068 - 543)} + \frac{0,975 \cdot 9,81 \cdot 41,9 \cdot 10^3 \cdot 2^2}{715 \cdot 0,92 (1068 - 543)} \right] \text{ с} = 5,1 \text{ с}.$$

Находим истинные (a_1 и a_2) и допустимое ($a_{\text{доп}}$) ускорения крана при отношении числа ведущих осей к общему их числу $k = 0,5$:

$$a_1 = \frac{v}{t_{\text{п1}}} = \frac{2}{9,7} \text{ м/с}^2 = 0,23 \text{ м/с}^2; \quad a_2 = \frac{2}{5,1} \text{ м/с}^2 = 0,393 \text{ м/с}^2;$$

$$a_{\text{доп}} = \varphi kg = (0,12 \dots 0,15) \cdot 0,5 \cdot 9,81 \text{ м/с}^2 = 0,59 \dots 0,74 \text{ м/с}^2.$$

Таким образом, $a_{\text{доп}} > a_2$, так что в период разгона крана пробуксовки колес не будет.

Считая времена разгона равными временам торможения, а также $\eta = \text{const}$ и $n = n_1 = n_2$, рассчитываем необходимые избыточные моменты при торможении крана с полным грузом и без него от номинальной скорости до остановки и определяем режимы работы двигателей:

$$M_{\text{изб1}} = \frac{k \cdot 2GD^2 n}{38,3 t_{\text{т1}}} + \frac{0,975g \sum mv^2 \eta}{n t_{\text{т1}}} =$$

$$= \left(\frac{1,1 \cdot 2 \cdot 5,7 \cdot 715}{715 \cdot 9,7} + \frac{0,975 \cdot 9,81 \cdot 56,9 \cdot 10^3 \cdot 2^2 \cdot 0,92}{715 \cdot 9,7} \right) \text{Н} \cdot \text{м} =$$

$$= 314 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{дв1}} = M_1 - M_{\text{исб1}} = (732 - 314) \text{ Н} \cdot \text{м} = 418 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{исб2}} = \left(\frac{1,1 \cdot 2 \cdot 5,7 \cdot 715}{3,83 \cdot 5,1} + \frac{0,975 \cdot 9,81 \cdot 41,9 \cdot 10^3 \cdot 2^2 \cdot 0,92}{715 \cdot 5,1} \right) \text{Н} \cdot \text{м} = 451 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{дв2}} = M_2 - M_{\text{исб2}} = (543 - 451) \text{ Н} \cdot \text{м} = 92 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

В обоих случаях двигатели должны работать в двигательных режимах и моменты, развиваемые ими, равны соответственно $M_{\text{дв1}}$ и $M_{\text{дв2}}$.

Находим время работы электропривода с установившейся скоростью при номинальном грузе (t_{y1}) и без него (t_{y2}):

$$t_{y1} = \frac{L}{2v} - \frac{t_{n1} + t_{r1}}{2} = \left(\frac{150}{2 \cdot 2} - \frac{9,7 + 9,7}{2} \right) \text{с} = 27,8 \text{ с};$$

$$t_{y2} = \left(\frac{150}{2 \cdot 2} - \frac{5,1 + 5,1}{2} \right) \text{с} = 32,4 \text{ с}.$$

Определяем эквивалентный момент и устанавливаем пригодность выбранных двигателей по тепловому режиму:

$$M_{\text{ЭКВ}} =$$

$$= \sqrt{\frac{M_{n1}^2 t_{n1} + M_1^2 t_{y1} + M_{\text{дв1}}^2 t_{r1} + M_{n2}^2 t_{n2} + M_{y2}^2 t_{y2} + M_{\text{дв2}}^2 t_{r2}}{t_{n1} + t_{y1} + t_{r1} + t_{n2} + t_{y2} + t_{r2}}} =$$

$$= \sqrt{\frac{1068^2 \cdot 9,7 + 732^2 \cdot 27,8 + 418^2 \cdot 9,7 + 1068^2 \cdot 5,1 + 543^2 \cdot 32,4 + 92^2 \cdot 5,1}{9,7 + 27,8 + 9,7 + 5,1 + 32,4 + 5,1}} =$$

$$= \sqrt{\frac{39,24 \cdot 10^6}{89,8}} \text{ Н} \cdot \text{м} = 661 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Выбранные двигатели и механизм при номинальном режиме работают с ПВ = 40%; поэтому нет необходимости приводить эквивалентный момент к моменту при стандартной продолжительности включения, а так как $2M_{\text{НОМ}} = 800 \text{ Н} \cdot \text{м} > M_{\text{ЭКВ}} = 661 \text{ Н} \cdot \text{м}$, то можно утверждать, что по тепловому режиму двигатели будут иметь некоторый запас (около 17%).

3. Расчет и выбор пускорегулировочного резистора при контрольном управлении двигателями. Определяем активное сопротивление роторной цепи двигателя и рассчитываем необходимые сопротивления пускорегулировочного реостата:

$$r = 1,1 \frac{U_{2\text{НОМ}}}{\sqrt{3} I_{2\text{НОМ}}} s_{\text{НОМ}} = 1,1 \frac{288}{\sqrt{3} \cdot 66} \cdot 0,0465 \text{ Ом} =$$

$$= 0,129 \text{ Ом};$$

$$R_4 = r\lambda = 0,129 \cdot 1,86 \text{ Ом} = 0,24 \text{ Ом};$$

$$R_3 = r\lambda^2 = 0,129 \cdot 1,86^2 \text{ Ом} = 0,447 \text{ Ом};$$

$$R_2 = r\lambda^3 = 0,129 \cdot 1,86^3 \text{ Ом} = 0,84 \text{ Ом};$$

$$R_1 = r\lambda^4 = 0,129 \cdot 1,86^4 \text{ Ом} = 1,55 \text{ Ом}.$$

Считая, что продолжительность включения сопротивления последней ступени реостата $\text{ПВ}_4 = 35\%$, находим продолжительность включения сопротивлений других ступеней реостата:

$$\text{ПВ}_3 = \text{ПВ}_4 \left(1 - \frac{R_3 - R_4}{R_1} \right) = 35 \left(1 - \frac{0,447 - 0,24}{1,55} \right) \% = 30,15\%;$$

$$\text{ПВ}_2 = \text{ПВ}_4 \left(1 - \frac{R_2 - R_3}{R_1} \right) = 35 \left(1 - \frac{0,84 - 0,447}{1,55} \right) \% = 26,1\%;$$

$$\text{ПВ}_1 = \text{ПВ}_4 \left(1 - \frac{R_1 - R_2}{R_1} \right) = 35 \left(1 - \frac{1,55 - 0,84}{1,55} \right) \% = 16,1\%.$$

Находим расчетный пусковой ток двигателя ($I_{\text{ср}}$) и приведенные токи в ступенях реостата, полагая, что в каталогах нагрузка для сопротивлений задана при $\text{ПВ} = 100\%$:

$$I_{\text{ср}} = \sqrt{I_{\text{max}} I_{\text{пр}}} = \sqrt{115 \cdot 62,5} \text{ А} = 85 \text{ А},$$

где

$$I_{\text{max}} = I_2 \frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}} = 66 \frac{1320}{2 \cdot 400} \text{ А} = 115 \text{ А};$$

$$I_{\text{пр}} = I_2 \frac{M_{\text{пр}}}{M_{\text{ном}}} = 66 \frac{746}{2 \cdot 400} \text{ А} = 62,5 \text{ А};$$

$$I_4 = I_{\text{ср}} \sqrt{\frac{\text{ПВ}_4}{100}} = 85 \sqrt{\frac{35}{100}} \text{ А} = 51 \text{ А};$$

$$I_3 = I_{\text{ср}} \sqrt{\frac{\text{ПВ}_3}{100}} = 85 \sqrt{\frac{30,15}{100}} \text{ А} = 47 \text{ А};$$

$$I_2 = I_{\text{ср}} \sqrt{\frac{\text{ПВ}_2}{100}} = 85 \sqrt{\frac{26,1}{100}} \text{ А} = 44 \text{ А};$$

$$I_1 = I_{\text{ср}} \sqrt{\frac{\text{ПВ}_1}{100}} = 85 \sqrt{\frac{16,1}{100}} \text{ А} = 34 \text{ А}.$$

Выбираем резисторы типа 2ТД.754.005.9 сопротивлением 1,6 Ом при допустимом токе продолжительной нагрузки 54 А.

4. Расчет и выбор тормозных электромагнитов. Для наилучшего случая, т. е. для времени торможения $t_{\text{т}} = 5,1 \text{ с}$, рас-

считываем необходимый тормозной момент тормоза при номинальном грузе крана

$$M_T = \frac{k \cdot 2GD^2 n}{38,3t_T} + \frac{0,975g \sum mv^2 \eta}{nt_T} = \left(\frac{1,1 \cdot 2 \cdot 5,7 \cdot 715}{38,3 \cdot 5,1} + \frac{0,975 \cdot 9,81 \cdot 56,9 \cdot 10^3 \cdot 2^2 \cdot 0,92}{715 \cdot 5,1} \right) \text{ Н} \cdot \text{м} = 553 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

т.е. на каждую сторону крана $M_T = 277 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Считая, что будут установлены колодочные тормоза, по полученному моменту и табл. 9 находим диаметр тормозных шкивов $D_{ш} = 300 \text{ мм}$ и радиальный отход колодок $e = 1 \text{ мм}$.

Принимая коэффициент трения между колодками и шкивами $C = 0,4$, определяем нормальное усилие, действующее на колодки тормоза,

$$F = \frac{2M_T}{CD_{ш}} = \frac{2 \cdot 277}{0,4 \cdot 0,3} \text{ Н} = 4600 \text{ Н}.$$

Рассчитываем работу, которую должен совершить тормозной электромагнит при его тяговом усилии F_M и ходе якоря h_M с учетом потерь в передаче $\eta = 0,9$ и коэффициента использования хода якоря $k = 0,85$:

$$F_M h_M = \frac{F e}{\eta k} = \frac{4600 \cdot 0,001}{0,9 \cdot 0,85} \text{ Н} \cdot \text{м} = 6,1 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Выбираем электромагниты постоянного тока параллельного включения типа КМП-4 с тяговым усилием $F_M = 30 \text{ кГ}$ при ПВ = 40% и ходом якоря $h_M = 80 \text{ мм}$ и проверяем их по рас- полагаемой работе:

$$F_M h_M = 9,81 \cdot 30 \cdot 0,08 \text{ Н} \cdot \text{м} = 23,5 \text{ Н} \cdot \text{м} > 6,1 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

т. е. выбранные электромагниты имеют значительный запас, однако так как меньший электромагнит типа КМП-2 не располагает необходимой работой, оставляем выбранным электромагнит типа КМП-4.

5. *Расчет и выбор главных троллеев.* Определяем пиковый ток при пуске электродвигателя привода моста, считая, что пусковой ток обоих двигателей одинаков:

$$I_n = k_i I_{н1} + I_{н2} + I_{н12} = (1,9 \cdot 2 \cdot 77 + 91 + 77) \text{ А} = 509 \text{ А}.$$

Таблица 14

Размеры уголкового стали, мм	Значения K при $\cos \varphi$, равном						
	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
50 × 50 × 5	0,740	0,760	0,780	0,800	0,811	0,825	0,830
50 × 50 × 6	0,725	0,750	0,770	0,785	0,800	0,810	0,820
60 × 60 × 6	0,600	0,620	0,635	0,646	0,655	0,665	0,670
75 × 75 × 8	0,462	0,475	0,488	0,495	0,502	0,509	0,512
75 × 75 × 10	0,445	0,455	0,465	0,475	0,482	0,488	0,491

Принимаем, что потери напряжения в главных троллеях $\Delta U = 3\%$, а питание их осуществляется в средней части. Исходя из этого, рассчитываем коэффициент K :

$$K = \frac{\Delta U}{I_{\Pi} L / 2} = \frac{3}{509 \cdot 0,075} = 0,785.$$

Пользуясь табл. 14 [5] и считая, что средний коэффициент мощности электроприводов крана $\cos \varphi = 0,6$, выбираем троллеи из уголкового железа размерами 50 × 50 × 6 мм.

ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И ЭЛЕКТРОПРИВОД ЛИФТОВ, ЭКСКАВАТОРОВ И АВТОНОМНЫХ МЕХАНИЗМОВ

2.1. КРАТКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИФТОВ, ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ И ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ЭЛЕКТРОПРИВОДАМ ЛИФТОВ

Краткие характеристики. Лифты используются для вертикального перемещения пассажиров и грузов, а подъемники — для перемещения грузов из забоев шахт или для перемещения скипов в металлургической промышленности и в некоторых случаях для перемещения пассажиров по наклонному пути. Поскольку подъемники не являются типичными общепромышленными механизмами, наибольшее внимание уделим здесь однокабинным лифтам.

Конструирование, изготовление, монтаж и эксплуатация лифтов регламентированы «Правилами устройства и безопасной эксплуатации лифтов» (ПУБЭЛ), которыми следует руководствоваться при изучении этого параграфа.

Основными элементами однокабинных лифтов являются кабина, подъемная лебедка (при наличии редуктора), канаты, противовес (контргруз), электродвигатель, тормозное устройство и аппараты управления. Питание двигателей дверей и вентиляторов, освещение кабины, связь аппаратуры управления и сигнализации с оборудованием, находящимся вне кабины, осуществляются гибким кабелем или, в некоторых случаях, троллеями. Однокабинные лифты бывают пассажирские, грузовые, грузопассажирские и др. Пассажирские лифты получили наибольшее распространение в жилых и служебных зданиях высотой более чем 5 этажей. Так, например, в Чикаго 110-этажный небоскреб высотой 443 м обслуживается 103 лифтами и 18 эскалаторами.

Характеристики лифтов установлены соответствующими стандартами: обычных пассажирских лифтов — ГОСТ 5746—67, скоростных — ГОСТ 13023—67, гру-

зовых общего назначения — ГОСТ 8828—75 и т. д. В зависимости от этажности зданий и принятого за норму допустимого времени ожидания расчетные скорости движения кабины пассажирских лифтов по стандартизации СЭВ могут быть от 0,5 до 5,6 м/с, а в исключительных случаях и до 9 м/с [29]. При этом лифты обычно разделяют на четыре категории: *тихоходные* (0,5...0,65 м/с), *быстроходные* (1,0...1,5 м/с), *скоростные* (2,0...2,5 м/с) и *высокоскоростные* (3,5...5,6 м/с и больше). Грузовые лифты в зависимости от грузоподъемности (от 320 до 2000 кг) по той же стандартизации могут иметь скорость движения от 0,25 до 2 м/с, а при грузоподъемности 3200 и 5000 кг — до 0,5 м/с [29].

Однокабинные лифты могут быть как *безредукторные* (электродвигатель непосредственно соединен с канатоведущим шкивом), так и *редукторные*, когда электродвигатель и канатоведущий шкив соединены между собой через редуктор. Примером безредукторного лифта является лифт, кинематическая схема, которая изображена на рис. 2.1, где канатоведущий шкив ($D_{ш}$) приводится во вращение электродвигателем (на рисунке не показан), а шкив благодаря силам трения (между канатом и шкивом) приводит в движение главный тяговый канат. К концам последнего подвешены кабина (m_0) с грузом (m) и противовес ($m_{пв}$). Безредукторный привод по сравнению с редукторным более надежный, малозумный и применяется главным образом в скоростных и высокоскоростных лифтах с тихоходными двигателями (например, типа МПЛ с частотой вращения 60...120 мин⁻¹). Поскольку для создания необходимого запаса кинетической энергии якоря двигателя и связанных с ним других масс ($J\omega^2/2$) тихоходный двигатель требует меньшее количество электрической энергии, чем быстроходный, использование электропри-

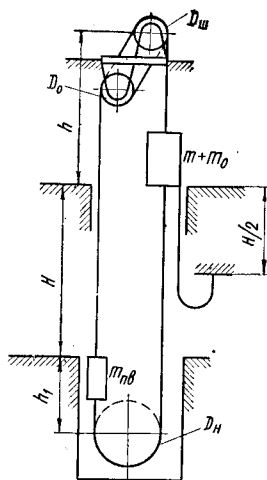


Рис. 2.1. Кинематическая схема однокабинного безредукторного лифта

водов с тихоходными двигателями более предпочтительно.

Современные пассажирские и грузопассажирские лифты выполняются с противовесом — контргрузом, масса которого выбирается такой, чтобы он уравновешивал массу подъемной кабины и тягового каната, а также часть поднимаемого груза, т. е.

$$m_{\text{пв}} = m_0 + \alpha m_{\text{ном}}, \quad (2.1)$$

где $m_{\text{ном}}$ — номинальный груз; $\alpha = 0,4 \dots 0,6$ — коэффициент уравновешивания.

Однако окончательную массу противовеса следует принимать из условия получения оптимальной диаграммы неуравновешенности, при которой абсолютные значения неуравновешенностей при верхней и нижней отметках остановки кабины примерно одинаковы. В этом случае необходимая установленная мощность двигателя будет наименьшей. Кроме того, лифты при высоте подъема более 50 м иногда снабжаются уравновешивающими канатами.

Определение режима работы, расчет необходимой мощности и выбор приводного электродвигателя. Режим работы приводного электродвигателя однокабинного лифта является повторно-кратковременным, где за время цикла (T) следует принимать длительность кругового рейса кабины (путь, который проходит кабина от основного посадочного этажа до возвращения ее на этот же этаж), а за продолжительность работы — время нахождения электродвигателя под нагрузкой. Тогда при известных величинах: максимальной высоте подъема (H , м), номинальной скорости ($v_{\text{ном}}$, м/с), количестве возможных остановок выше или ниже посадочного этажа (N) и вместимости кабины (E , чел.), а также с учетом вероятностных факторов длительность кругового рейса можно определить, используя уравнение [29]:

$$T = \frac{2k_{\text{п}}H - h_{\text{п}}(N_{\text{п}} + N_{\text{с}} + 1)}{v_{\text{ном}}} + k_t [(t_1 + t_2 + t_3)(N_{\text{п}} + N_{\text{с}} + 1) + t_{4\text{п}} + t_{5\text{п}} + t_{4\text{с}} + t_{5\text{с}}], \quad (2.2)$$

в котором первое слагаемое является временем установившегося движения кабины, а второе (с учетом вероятного коэффициента неучтенного времени $k_t =$

$= 1,05 \dots 1,15$) — временем переходных режимов и временем (паузой), в течение которого двигатель не работает. Поэтому, если рассчитать составляющие этих слагаемых, то можно определить и относительную продолжительность включения (ПВ, %), т. е. режим работы электродвигателя.

С учетом исходных данных, вероятностных факторов и опыта эксплуатации пассажирских лифтов составляющие уравнения (2.2) можно рассчитать следующим образом. Вероятную среднюю высоту подъема кабин $k_n H$ находят путем введения вероятного коэффициента $k_n = 0,7 \dots 0,9$. Высоту h_p , пройденную кабиной за время разгона до номинальной скорости $v_{ном}$, определяют, зная эту скорость, а также скорость перед механическим торможением v_0 , допустимое ускорение a и производную ускорения ρ [12]:

$$h_p = \frac{(v_{ном} - v_0)^2}{2a} + \frac{av_{ном}}{2\rho} + \frac{v_0^2}{2a}. \quad (2.3)$$

Вероятные количества остановок при подъеме (N_n) и опускании (N_c) кабины находят с учетом вероятных коэффициентов ее заполнения при подъеме $\gamma_n = 0,6 \dots 0,8$ и опускании $\gamma_c = 0,4 \dots 0,6$, используя уравнения:

$$\left. \begin{aligned} N_n &= N - N \left(\frac{N-1}{N} \right)^{\gamma_n E}; \\ N_c &= N - N \left(\frac{N-1}{N} \right)^{\gamma_c E}. \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

Из опыта эксплуатации пассажирских лифтов известно [29], что сумма времен ускорения (t_1), замедления (t_2), открывания и закрывания дверей кабины (t_3) находится в пределах $10 \dots 16$ с, а сумма времен входа пассажиров при подъеме (t_{4n}) и опускании (t_{4c}) и сумма времен выхода их при подъеме (t_{5n}) и опускании (t_{5c}) кабины определяются выражениями:

$$\left. \begin{aligned} t_{4n} + t_{5n} &= 2 \Delta t \gamma_n E; \\ t_{4c} + t_{5c} &= 2 \Delta t \gamma_c E, \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

где $\Delta t = 0,8 \dots 2$ с — время входа или выхода одного пассажира.

Имея в виду, что во время входа и выхода пассажиров, открывания и закрывания дверей кабины, а также

во время механического торможения (t_T), определяемого по последнему слагаемому уравнения (2.3), ток по обмоткам электродвигателя не протекает, находят относительную продолжительность его включения

$$ПВ = \frac{T - t_{4п} - t_{4с} - t_{5п} - t_{5с} - t_3 - t_T (N_{п} + N_{с} + 1)}{T} \cdot 100. \quad (2.6)$$

Расчет необходимой мощности, выбор электродвигателя и его проверку необходимо производить методом последовательных приближений исходя из диаграммы нагрузки электропривода, которая с учетом механического к.п.д. определяется диаграммой неуравновешенности подвижных частей лифта. Поэтому по параметрам подвижных частей вначале необходимо рассчитать и построить диаграмму неуравновешенности по всей высоте подъема кабины. Так, например, для безредукторного лифта, кинематическая схема которого показана на рис. 2.1, расчет диаграммы неуравновешенности можно произвести по формуле

$$F_{н} = m + m_0 - m_{пв} \pm q_T L_T \pm q_k L_k \pm q_{кб} L_{кб}, \quad (2.7)$$

где m , m_0 и $m_{пв}$ — соответственно масса груза, кабины и контргруза; q_T , q_k и $q_{кб}$ — соответственно масса 1 м несущего и компенсирующего канатов и подвесного кабеля; L_T , L_k и $L_{кб}$ — соответственно длина несущего и компенсирующего канатов и кабеля.

Поскольку неуравновешенность подвижной системы не зависит от направления движения кабины, а изменяется по высоте практически по линейному закону, неуравновешенность можно определить при нагруженной номинальным грузом и ненагруженной кабине для нижней и верхней отметок ее остановки, а затем с учетом к.п.д. механической передачи (η) построить диаграмму неуравновешенности, которая в общем виде может быть подобна рис. 2.2. Полученная диаграмма имеет четыре участка (l_1 , l_2 , l_3 и l_4), которые в общем случае могут существенно отличаться друг от друга; поэтому предварительно выбирать электродвигатель по средней неуравновешенности из средних величин по участкам ($F_{ср1}$, $F_{ср2}$, $F_{ср3}$, $F_{ср4}$) нельзя, так как они действуют в течение разных промежутков времени. Следовательно, для того чтобы более правильно учесть

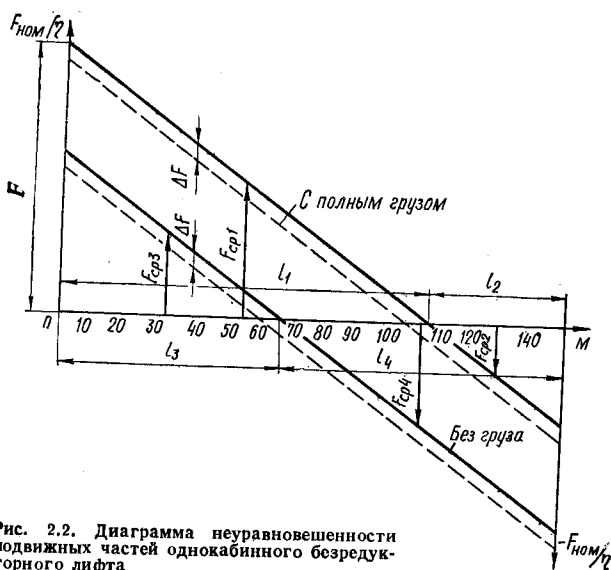


Рис. 2.2. Диаграмма неуравновешенности подвижных частей однокабинного безредукторного лифта

влияние каждой средней величины, предварительный выбор двигателя следует производить исходя из средневзвешенной неуравновешенности, т. е.

$$F_{\text{ср}} = \frac{F_{\text{ср}1}l_1 + F_{\text{ср}2}l_2 + F_{\text{ср}3}l_3 + F_{\text{ср}4}l_4}{l_1 + l_2 + l_3 + l_4}. \quad (2.8)$$

Тогда необходимую статическую мощность двигателя можно определить по известной формуле

$$P_{\text{ст}} = kF_{\text{ср}}v_{\text{ном}},$$

где k — коэффициент, учитывающий пусковые режимы двигателя ($k = 1, 1, \dots, 1, 2$).

Полученную мощность следует привести к относительной продолжительности включения предполагаемого к установке электродвигателя, т. е.

$$P = P_{\text{ст}} \sqrt{\frac{\text{ПВ}}{\text{ПВ}_{\text{ст}}} + \alpha \left(\frac{\text{ПВ}}{\text{ПВ}_{\text{ст}}} - 1 \right)}, \quad (2.9)$$

где $\text{ПВ}_{\text{ст}}$ — относительная продолжительность включения двигателя; α — отношение постоянных потерь к переменным у предполагаемого двигателя.

После этого предварительно выбирают электродвигатель, исходя из условий:

$$P \leq P_{\text{ном}} \text{ и } n \leq \frac{v_{\text{ном}} t \cdot 60}{\pi D_{\text{ш}}}.$$

Выбранный электродвигатель должен быть проверен по допустимой перегрузке при разгоне кабины, ее движении с перегрузкой двигателя и по тепловому режиму.

Проверку двигателя по перегрузке следует производить, пользуясь полученной диаграммой неуравновешенности (рис. 2.2) и допустимым ускорением кабины лифта при наибольшей ординате неуравновешенности F . Для этой точки и определяется необходимый пусковой момент двигателя, т. е.

$$M = M_{\text{ст}} + M_{\text{изб}} = R_{\text{ш}} F + \frac{GD^2 n}{38,3 t_{\text{п}}} + \frac{0,975 g \sum m v_{\text{ном}}^2}{n t_{\text{п}} \eta}, \quad (2.10)$$

где $R_{\text{ш}}$ — радиус тягового шкива; $t_{\text{п}} = h_{\text{р}}/v_{\text{ср}} \approx v_{\text{ном}}/a$ — время разгона кабины до номинальной скорости, с; n и GD^2 — соответственно номинальная частота вращения (мин^{-1}) и суммарный маховой момент якоря или ротора двигателя и шкива ($\text{кг} \cdot \text{м}^2$); $\sum m$ — суммарная масса подвижных частей, кг; η — к.п.д. механической передачи.

Полученный момент должен быть не больше максимально допустимого момента электродвигателя. После достижения кабиной номинальной скорости приводной электродвигатель может продолжать работать с перегрузкой. В этом случае, пользуясь также диаграммой неуравновешенности, необходимо определить время существования перегрузки и установить допустимо или недопустимо время перегрузки электродвигателя, которое в соответствии с действующими стандартами на двигатели ограничено. После проверки выбранного электродвигателя по допустимой перегрузке он может быть проверен по тепловому режиму с использованием диаграммы неуравновешенности и известных методов эквивалентного момента или мощности.

Основные требования, предъявляемые к электроприводам. Основные требования, которым должны удовлет-

ворять приводы лифтов, следующие: а) обеспечение минимального времени переходных процессов при ограниченных ускорениях (порядка $1...5 \text{ м/с}^2$) и ограниченных производных ускорений — рывке, который в зависимости от номинальной скорости кабины ограничивается и для пассажирских лифтов допустим в пределах $3,0...10 \text{ м/с}^3$ (ограничение ускорений и их производных определяется нормальным самочувствием пассажиров и необходимостью снижения динамических усилий на несущие канаты и кабины лифта); б) скорости и ускорения не должны зависеть от загрузки лифта; в) должна быть обеспечена определенная точность установки кабины на заданной отметке; г) для обеспечения безопасности обслуживания напряжение силовых электрических цепей в машинных помещениях не должно превышать 660 В , в кабине, шахте и на этажных площадках — 380 В переменного тока и 220 В постоянного тока, а в цепях управления, освещения и сигнализации во всех помещениях оно должно быть не выше 220 В ; напряжение аварийного освещения и переносных ламп не должно превышать 36 В [29].

Чтобы обеспечить выполнение перечисленных требований, для лифтов проектируют специальные схемы управления. Механические характеристики приводных электродвигателей должны быть жесткими; поэтому для электропривода лифтов используют двигатели постоянного тока с параллельным возбуждением или двигатели переменного тока с короткозамкнутым (одно- и многоскоростные) или с фазным ротором, а для получения заданной точности останова кабины производят специальные расчеты, на основании которых вносят необходимые коррективы в схемы управления.

В соответствии с технологическими требованиями и нормами примерные допустимые отклонения от заданной отметки (точность останова) для различных лифтов и подъемников находятся в следующих пределах: а) пассажирские и грузопассажирские — $\pm 35...50 \text{ мм}$; б) грузовые с грузами на тележках — $\pm 10...15 \text{ мм}$; в) скиповые шахтные подъемники — $\pm 250...330 \text{ мм}$ и т. д. Пользуясь этими данными и кинематической схемой лифта с реальными параметрами ее элементов, можно установить минимально необходимую скорость кабины перед ее остановкой (v_0) и отклонение от этой скорости

(Δv), а следовательно, и определить требуемые диапазон регулирования частот вращения приводного двигателя лифта и жесткость его механической характеристики. Вывод исходного уравнения, которое позволило бы найти эти величины, сводится к следующему [26].

При подходе кабины к этажной площадке осуществляется переключение датчика снижения скорости, после отработки которого кабина будет двигаться с постоянной скоростью $v_{\text{нач}}$ до тех пор, пока не сработают аппараты точной остановки, вырабатывающие импульсы на отключение двигателя и наложение механического тормоза. Путь, пройденный кабиной при скорости $v_{\text{нач}}$, будет

$$S' = v_{\text{нач}} t. \quad (2.11)$$

При торможении пройденный кабиной путь S'' будет определяться кинетической энергией, запасенной в движущихся частях и расходуемой на совершение работы по преодолению сил сопротивления на этом пути, т. е.

$$S'' = \frac{mv_{\text{нач}}^2}{2(F_T + F_{\text{ст}})}. \quad (2.11')$$

Полный путь до точной остановки кабины с момента воздействия на датчик снижения скорости будет

$$\begin{aligned} S &= S' + S'' = v_{\text{нач}} t + \frac{mv_{\text{нач}}^2}{2(F_T + F_{\text{ст}})} = \\ &= v_{\text{нач}} t + \frac{mv_{\text{нач}}^2}{2F}. \end{aligned} \quad (2.12)$$

Величины, от которых зависит пройденный путь S , изменяются в зависимости от загрузки кабины. Если средние значения их равны m_0 , v_0 , t_0 и F_0 , а отклонения от них — Δm , Δv , Δt и ΔF , то значения этих величин в уравнении (2.12) будут: $m = m_0 \pm \Delta m$, $v_{\text{нач}} = v_0 \pm \Delta v$, $t = t_0 \pm \Delta t$ и $F = F_0 \pm \Delta F$.

На основании теории погрешностей наибольшее отклонение пройденного пути может составить величину

$$\Delta S = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial S(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_i} \Delta x_i \right|,$$

где $x_1 = v$, $x_2 = t$ и т. д. Тогда, дифференцируя уравнение (2.12), можно записать:

$$\Delta S = \left| \frac{\partial S}{\partial v} \Delta v \right| + \left| \frac{\partial S}{\partial t} \Delta t \right| + \left| \frac{\partial S}{\partial m} \Delta m \right| + \left| \frac{\partial S}{\partial F} \Delta F \right|, \quad (2.13)$$

или

$$\Delta S = \Delta v t_0 + \frac{m_0 v_0}{F_0} \Delta v + v_0 \Delta t + \frac{v_0^2}{2F_0} \Delta m + \frac{m_0 v_0^2}{2F_0^2} \Delta F. \quad (2.14)$$

Если сгруппировать здесь подобные члены, для определения максимального отклонения можно получить следующее расчетное выражение:

$$\Delta S_{\max} = \Delta S_{\text{доп}} = v_0 t_0 \left(\frac{\Delta v}{v_0} + \frac{\Delta t}{t_0} \right) + \frac{m_0 v_0^2}{2F_0} \times \\ \times \left(2 \frac{\Delta v}{v_0} + \frac{\Delta m}{m_0} + \frac{\Delta F}{m_0} \right). \quad (2.15)$$

Задавая значениями v_0 и $S_{\text{доп}}$ и пользуясь этим выражением, находят отношение $\Delta v/v_0$, а затем и отклонение Δv . Следовательно, становятся известными требования к схеме управления по обеспечению необходимого диапазона регулирования частоты вращения двигателя ($D = v/v_0$) и к жесткости его механической характеристики, так как величина $\Delta v \equiv \Delta \omega$ определяет требуемую жесткость механической характеристики двигателя.

Буквенные обозначения в (2.11)...(2.15) расшифровываются так: v_0 — средняя скорость кабины перед ее остановкой, м/с; t — сумма времени работы аппаратов и движения кабины со скоростью $v_{\text{нач}}$, с; m — приведенная к скорости кабины масса всех движущихся частей лифта, кг; F_T и $F_{\text{ст}}$ — соответственно усилие тормоза и статическое сопротивление, приведенные к скорости кабины, Н; $F = F_T + F_{\text{ст}}$ — динамическое усилие, Н; Δv и $\Delta \omega$ — соответственно отклонения скорости кабины от средней и угловой скорости двигателя от номинальной; Δt , Δm и ΔF — соответственно возможные отклонения времени работы аппаратов, массы подвижных частей и динамического усилия.

Исходя из заданной скорости лифта, требований к диапазону регулирования частоты вращения его приводного двигателя и жесткости механической характеристики двигателя, выбирают или проектируют схему управления электроприводом лифта.

2.2. СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ЛИФТОВ

В зависимости от быстроходности пассажирских лифтов приняты следующие разновидности силовых схем управления ими: тихоходные лифты имеют двигатели с короткозамкнутым или с фазным ротором и кнопочное или рычажное управление; быстроходные лифты — двух- или односкоростные двигатели, управляемые магнитными станциями или тиристорными станциями управления (ТСУ—Р) с кнопочными командоаппаратами; скоростные и высокоскоростные лифты — двигатели постоянного тока, управляемые по системе «генератор — двигатель» с различными схемами возбуждения или по системе «тиристорный преобразователь — двигатель» с кнопочными командоаппаратами; могут использоваться также схемы асинхронно-вентильных каскадов (АВК), применение которых позволяет увеличить к.п.д. установки.

Пассажирские лифты в зависимости от пассажиропотока, высоты подъема и количества лифтов, обслуживающих пассажиров, разделяются на *одиночные* и *с групповым управлением*. К одиночным относятся; а) лифты, работающие по единичным приказам и вызовам без попутных остановок при спуске и подъеме пассажиров; б) лифты с собиранием пассажиров при спуске, но с запрещением вызовов при подъеме; в) то же, но с регистрацией вызовов на спуске с последующим их исполнением. К лифтам с групповым управлением относятся: а) лифты с одной вызывной кнопкой на посадочных площадках независимо от количества установленных лифтов (чаще используется парное управление) и с собиранием пассажиров при спуске; б) то же, но с полным собиранием пассажиров на промежуточных этажах на подъем и спуск (обычно устанавливаются в административных, учебных и других зданиях). Кроме того, в связи с увеличением количества пассажирских лифтов стала использоваться диспетчеризация лифтов ряда домов и целых районов, когда с одного диспетчерского пульта осуществляется контроль состояния схем и производится управление несколькими лифтами.

Независимо от быстроходности лифтов, одиночного или группового управления ими необходимыми элемен-

тами большинства их схем являются следующие: кнопки с самовозвратом, залипающие или западающие кнопки для вызова кабин и подачи приказа из кабины; различные датчики селекции и точной остановки — позиционно согласующие устройства (ПСУ) для регистрации места нахождения кабины и состояния электрических цепей; датчики и блокировки состояния подъемных канатов, состояния дверей шахты и кабины (открыты или закрыты); конечные выключатели ограничения скорости и степени загрузки кабины; указатели направления движения кабины и в некоторых лифтах наличия груза в кабине.

Из названных элементов более подробно остановимся на ПСУ, которые определяют место, где должна остановиться кабина в шахте при появлении вызова или приказа, и движение ее вверх или вниз. Остальные же элементы обычно представляют собой различные модификации конечных выключателей, известных из других курсов.

Конструктивно ПСУ выполняют в виде набора трехпозиционных электромеханических или индуктивных либо магнитных (герконовых) датчиков, размещенных в шахтах, с выводом сигналов на релейный или бесконтактный селектор либо копираппарат в машинное помещение (ПСУ иногда выполняются в виде центральных этажных аппаратов, размещаемых в машинном помещении).

Датчики, размещаемые в шахте, взаимодействуют с установленными на кабине отводками (при электромеханических) или магнитными шунтами (при индуктивных или герконовых датчиках) и выдают сигналы в центральный этажный аппарат (шаговый копираппарат или релейный селектор), установленный в машинном помещении, а последний передает в схему управления сигнал на исполнение полученной команды. Датчики сигналов о движении кабины вверх или вниз целесообразнее размещать на кабине (требуется меньше проводов), а магнитные шунты устанавливать в шахтах в требуемых точках. В этом случае при цифровом управлении число столбцов устанавливаемых шунтов по шахте равно числу разрядов передаваемого номера этажа в двоичном или ином коде.

Трехпозиционные электромеханические переключатели фигурной отводкой переводятся в одно из положе-

ний, соответствующее движению кабины вверх или вниз, либо ее остановке. В этом случае при движении кабины контакты переключателей пройденных этажей включаются в одно из крайних положений, подготавливая к действию цепи вызовов и приказов, а при остановке кабины переключатель переводится в среднее положение, отключая цепь управления от контакторов направления и исключая тем самым уход кабины с этажа при ошибочном нажатии кнопки приказа или вызова.

Для обеспечения относительно точной остановки кабины лифта в схемах управления ими в последнее время стали применять *бесконтактные индуктивные* (например, типа ИКВ-22) или *контактные герметизированные магнитоуправляемые (герконовые)* датчики (например, типа ДПЭ-101). Эти датчики устанавливают как в шахте, так и на кабине: в шахте — датчики селекции (замедления), а на кабине — датчик точной остановки. Для взаимодействия с датчиками на кабине размещают ферромагнитный шунт селекции, а в шахте (на каждом этаже) — ферромагнитные шунты точной остановки.

Индуктивные датчики состоят из разомкнутого П-образного магнитопровода с катушкой, заключенной в кожух. Последовательно с ней включается катушка исполнительного реле, и на них подается напряжение переменного тока (U). При разомкнутом магнитопроводе магнитный поток, пересекающий катушку, мал. Поэтому э.д.с. и ток самоиндукции в проводниках катушки, а также обусловленное им индуктивное сопротивление (X) практически отсутствуют, так что сопротивление катушки носит активный характер (R). Ток в последовательно включенных катушках

$$I = \frac{U}{\sqrt{(R + R_{\text{реле}})^2 + (X + X_{\text{реле}})^2}}$$

относительно большой; он как бы имитирует замыкание контактов в контактной системе (реле включается). При замыкании шунтом П-образного магнитопровода магнитный поток, пересекающий его катушку, возрастает, в связи с чем увеличиваются э.д.с. самоиндукции, а также обусловленное им индуктивное сопротивление катушки. Вследствие этого ток в последовательно включенных катушках уменьшается, имитируя размыкание

цепи в контактной системе (исполнительное реле отключается).

Герконовый датчик представляет собой П-образный корпус, в котором размещены с одной стороны от паза две герметизированные стеклянные колбы с вакуумом внутри и укрепленными на пружинящих пластинах контактами, подключенными к соответствующим цепям управления лифтом; с другой стороны от паза находится постоянный магнит. Рабочим элементом таких датчиков является ферромагнитный шунт, который проходит через П-образный разрез при движении кабины лифта. Принцип работы этих датчиков следующий: пружинящие силы пластин контактов герконов направлены так, что если на них поле постоянного магнита не действует, то нормально разомкнутые контакты разомкнуты, а нормально замкнутые — замкнуты, т. е. цепи, к которым подключены эти контакты, будут разомкнуты или замкнуты. Такое состояние геркона будет тогда, когда ферромагнитный шунт находится в пазе П-образного корпуса, поскольку магнитные силовые линии постоянного магнита замыкаются через шунт. После того как шунт выйдет из паза, магнитные силовые линии замыкаются через пластины, преодолевая их пружинящее действие, и контакты геркона, а следовательно, цепи к которым они подключены, переходят в противоположное состояние.

В качестве примера, отражающего основные особенности схем управления лифтами, рассмотрим схему управления одиночным лифтом без попутных остановок, показанную на рис. 2.3. Лифт обслуживает четыре этажа, в качестве исполнительного двигателя здесь использован двухскоростной асинхронный двигатель *М*. Включение на малую (*Мл*) или большую (*Б*) частоту вращения двигателя производится соответствующими контакторами *Мл* и *Б*. Направление вращения двигателя определяется контакторами *В* и *Н*, замедление — дополнительным резистором *Р*, торможение — электромагнитным тормозом *ЭТ*. В качестве этажных переключателей использованы бесконтактные индуктивные датчики (*ДТС*, *ДТОВ* и *ДТОН*), включенные последовательно с катушками реле (*РИС*, *РИТОВ*, *РИТОН*). Датчики *ДТС* служат для включения привода лифта на высокую частоту вращения и подачи импульса на его

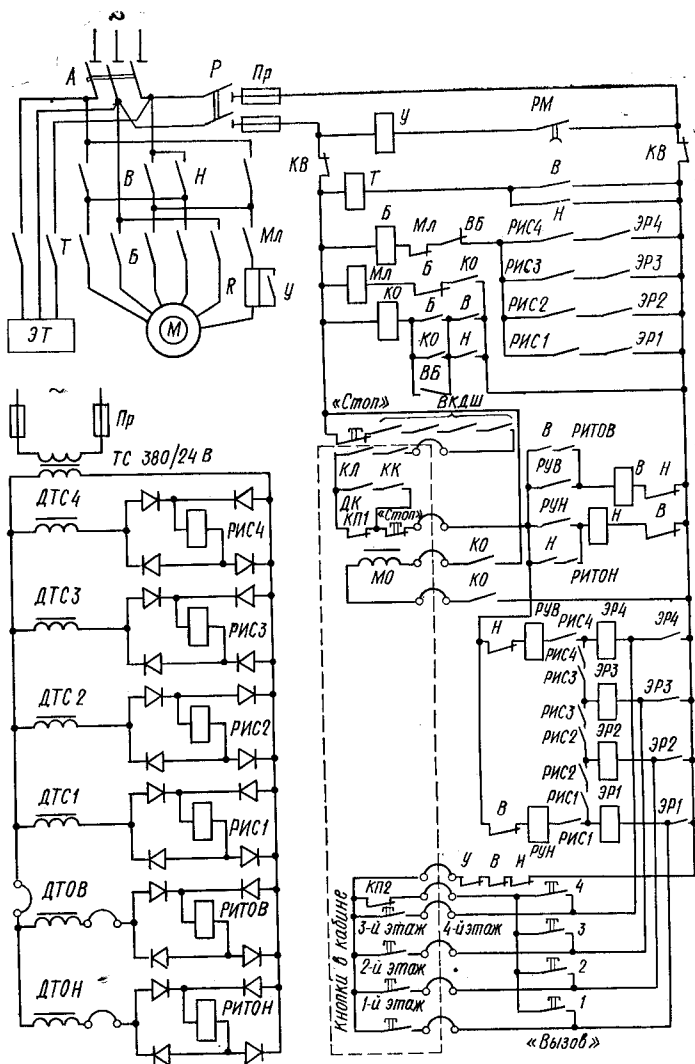


Рис. 2.3. Принципиальная схема управления одиночным лифтом без попутных остановок

замедление, а датчики ДТОВ и ДТОН предусмотрены для точной остановки лифта на уровне пола соответствующего этажа и размещены на кабине; магнитные шунты для них устанавливаются в стволе шахты.

Назначение остальных элементов схемы и ее работу рассмотрим на примере перемещения кабины с пассажиром с 1-го на 3-й этаж, полагая при этом, что автомат *A*, разъединитель *P* и конечные выключатели *KB*, ограничивающие ход кабины вверх и вниз в аварийных режимах, замкнуты, а кабина находится на первом этаже. В этом случае катушки реле *РИС*, кроме реле первого этажа, обтекаются номинальным током. При нажатии кнопки «3-й этаж» образуется следующая электрическая цепь: фаза сети — полюс разъединителя *P* — предохранитель *Пр* — конечный выключатель *KB* — кнопка «Стоп» — блокировки дверей шахты *Дв 1... Дв 4* — контакты натяжения каната *КК* — конечный выключатель ловителя *КЛ* — дверные выключатели кабины *ДК* — контакты кнопки «Стоп» — размыкающий блок-контакт *H* — катушка реле *РУВ* — замыкающие контакты реле *РИС4* и *РИС3* (катушки этих реле обтекаются током) — катушка этажного реле *ЭР3* — кнопка «3-й этаж» — размыкающие блок-контакты контакторов *У*, *В*, *Н* — конечный выключатель *KB* — предохранитель *Пр* — полюс разъединителя *P* — фаза сети.

После срабатывания реле *РУВ* и *ЭР3* включаются контактор движения вперед *В*, контактор быстрого движения *Б* (по цепи катушки *Б* — блок-контакт *Мл* — выключатель большой частоты вращения *ВВ* — контакты реле *РИС3* и *ЭР3*). При замыкании контактов *В* и *Б* двигатель подключается к сети, включаются контактор *Т*, растормаживающий канатоведущий шкив, и контактор отводки *КО*, включающий электромагнит отводки *МО* и подготавливающий к включению цепь катушки контактора малой частоты вращения *Мл*. Отводка втягивается, освобождая рычаг замка, и кабина приходит в движение.

При подходе кабины к третьему этажу ферромагнитный шунт замыкает катушку датчика *ДТС3*, ее сопротивление увеличивается и реле *РИС3* отпадает, отключая реле *ЭР3* и *РУВ*. В результате этого контактор *Б* отпадает, замыкая свой контакт, включает контактор малой частоты вращения *Мл*, а контактор *В* остается включенным, так как при движении кабины еще не замкнута магнитная цепь датчика точной остановки вверх, поэтому и контакт *РИТОВ* еще не разомкнут. Двигатель тормозится до малой частоты вращения, ра-

ботая в генераторном режиме с введенным в одну фазу статора резистором R . Выдержка времени торможения задается маятниковым реле PM , работающим при включении контактора $Mл$. Как только пол кабины выравнивается с полом этажного перекрытия, магнитный шунт замыкает магнитную цепь катушки датчика точной остановки $ДТОВ$, реле $РИТОВ$ отпадает и происходит отключение контакторов B , затем $КО$ и, наконец, $Mл$. В результате двигатель и тормозной электромагнит отключаются от сети, накладывается механический тормоз и кабина останавливается.

Для того чтобы получить собирательную схему управления лифтом с попутными остановками только при опускании кабины или полностью собирательную схему, т. е. при попутных остановках во время движения кабины вверх и вниз, необходимо в схему, подобную рассмотренной на рис. 2.3, ввести некоторые дополнения. Например, в схеме, с двухскоростными двигателем разработанной Союзлифтмашем [12], индуктивные датчики $ИД$, реле $РИС$ и кнопки вызова и приказа на каждом этаже включаются так, как показано на рис. 2.4.

В схеме с попутными остановками при опускании кабины (рис. 2.4, а) вызовы и приказы подаются раздельными залипающими кнопками и поэтому могут регистрироваться в любое время, а передаваться в схему сразу же, кроме периода движения кабины с пассажирами вверх, когда шина питания контактов передачи вызовов в исполнительную схему отключается избирательными контактами от плюсовой шины.

В полной собирательной схеме управления (рис. 2.4, б) дополнительно имеются вызывные цепи для подъема ($ШДВ^в$) и опускания ($ШДВ^п$) кабины, контакты блокировочных реле направления $РБВ$ и $РБН$ соединены с контактами избирательной секционированной цепочки исполнительной схемы.

В схемах, изображенных на рис. 2.3 и 2.4, при отсутствии кабины на этаже катушки индуктивного датчика $ИД$ и реле $РИС$ возбуждены. Поэтому при нажатии кнопки приказа $КП$ или вызова $КВ$ (они удерживаются во включенном состоянии удерживающими магнитами $УМ$ до тех пор, пока их не зашунтируют контакты дверей шахты данного этажа $ДШ$) образуется цепь (на ри-

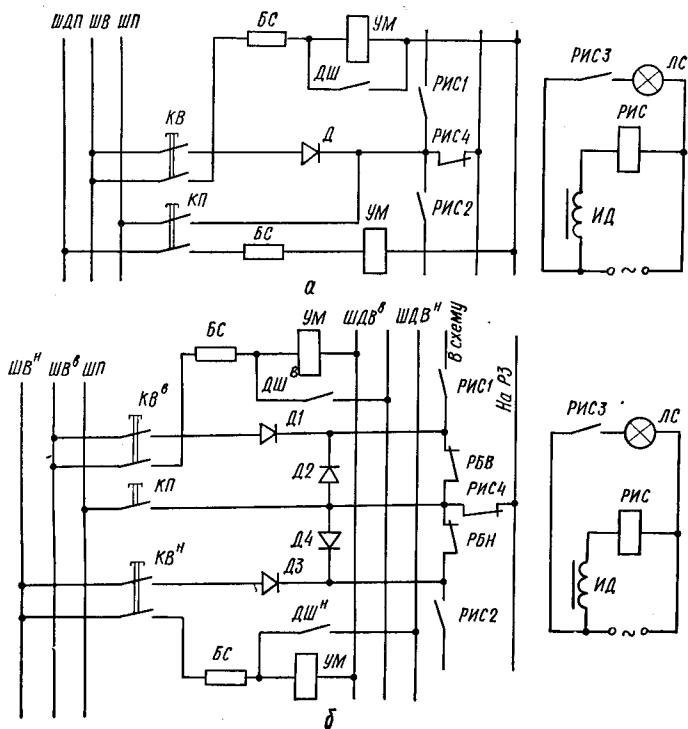


Рис. 2.4. Фрагменты дополнений к собирательным схемам управления лифтом (для одного этажа)

сунках не показана), включающая в себя реле управления вверх *РУВ*, если этаж назначения выше этажа стоянки кабины, или реле управления вниз *РУН*, если этаж назначения ниже стоянки кабины. После прибытия кабины на этаж вызова обесточивается индуктивный датчик *ИД*, отключается реле *РИС*, размыкая свои контакты, которые отключают реле *РУВ* или *РУН* и лампу *ЛС* (кабина останавливается), а замыканием контакта *РИС4* подготавливается цепь для выполнения приказа, поступающего из кабины.

В полной собирательной схеме секционированная контактами *РИС1* и *РИС2* цепочка на этаже стоянки кабины разрывается не только этими контактами, но еще и контактами реле блокировки вверх *РБВ* или

вниз *РБН* (катушки их на схеме не показаны), а вызывные цепи подъема, спуска и цепи приказов отделяются друг от друга разделительными диодами *Д1... Д4*. Перед нажатием кнопки вызова или приказа, если направление движения кабины еще не выбрано, все контакты в цепочке выбора направления замкнуты, кроме контактов *РИСА* на этаже стоянки кабины. Поэтому при нажатии одной из этих кнопок сигналы вызовов с этажей, расположенных выше этажа стоянки кабины, подключаются к катушке реле *РУН*, а сигналы вызовов с этажей ниже стоянки кабины включают реле *РУВ*. После выбора направления одновременно с реле *РУВ* или *РУН* включается одно из реле блокировки противоположного направления *РБВ* или *РБН*, разрывающее своими контактами выход через секционную цепочку сигналов вызова nepoпутного направления.

В схеме, показанной на рис. 2.4, а, для опускания пассажиров кабина без остановок проходит до наиболее высокого этажа вызова и затем опускается с попутными остановками, а в схеме, изображенной на рис. 2.4, б, при необходимости подъема пассажиров кабина проходит до наиболее низкого этажа вызова, после чего поднимается с попутными остановками.

В рассмотренных схемах копираппараты-селекторы выполнены на релейных элементах. Наряду с этим применяются и другие копираппараты: кулачковые, фотоэлектрические, щеточные непрерывного слежения, шаговые, на статических элементах и т. д.

При больших пассажиропотоках в одном холле устанавливают несколько лифтов, которые для повышения комфортабельности и улучшения электроэнергетических показателей имеют объединенное *парное* или *групповое* управление. Количество лифтов, соединенных в группы, обычно не превышает четырех, а чаще трех, хотя известны системы, содержащие в группе до восьми лифтов [12]. При групповом управлении обычно различают три основных режима работы лифтов: пик подъема, пик спуска и уравновешенное движение в обоих направлениях. Включение лифтов на тот или иной режим осуществляется диспетчером или автоматически посредством программирующих часов, устанавливаемых на каждую группу лифтов. В высотных зданиях каждая группа лифтов закрепляется для обслуживания опре-

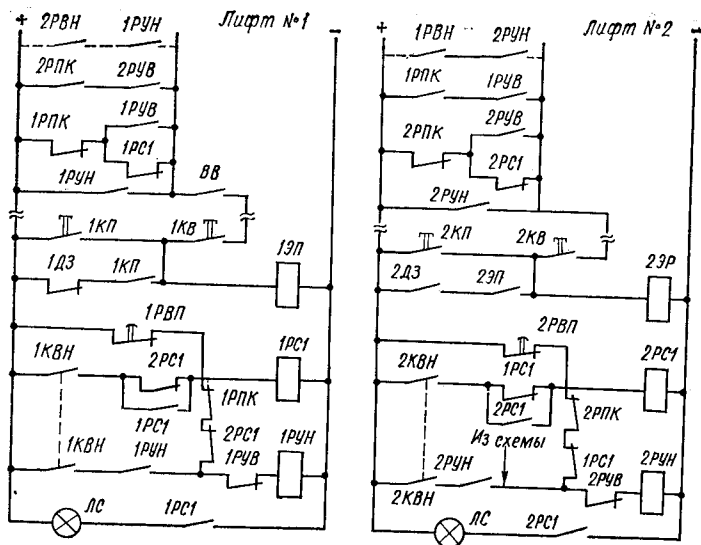


Рис. 2.5. Фрагмент принципиальной схемы парного управления лифтами: ЭР — этажное реле; РПК — реле переключения каналов; РВП — реле автоматического пуска

деленной зоны этажей, другие этажи ею не обслуживаются. При наличии нескольких лифтов в группе, обслуживающих одну зону или невысокое здание, в целях повышения средней скорости движения путем сокращения числа остановок отдельные лифты могут выделяться для обслуживания четных и нечетных этажей.

Для осуществления парного или группового управления лифтами схемы управления ими должны быть собирательными, а вызовы с каждого этажа в обоих направлениях должны регистрироваться отдельно в каждом направлении соответствующими запоминающими устройствами, содержащими реле, транзисторы и т. д. В качестве примера, отражающего специфику работы при парном управлении лифтами с дополнительными реле стоянки первого лифта 1РС и второго лифта 2РС, рассмотрим фрагмент принципиальной схемы, показанный на рис. 2.5 [12]. В этом случае кабина, опустившаяся с пассажирами на первый этаж, не отвечает на вызовы с других этажей и ожидает пассажиров. Если же кабины на первом этаже нет, то поднимающаяся

по приказу и освободившаяся кабина автоматически направляется на первый этаж, а при спуске другой кабины или ее стоянке последняя остается на этаже окончания рейса либо направляется к центру нагрузки и используется для работы по вызовам в основном в направлении опускания. Реле стоянки кабины на первом этаже $1PC1$ или $2PC1$ включается после прибытия кабины на первый этаж от конечного выключателя $1KBH$ или $2KBH$ (устанавливаются в шахтах на копираппарате). Эти реле взаимно заблокированы. Поэтому включение одного из них указывает на то, что данная кабина прибыла на первый этаж раньше другой. В этом случае реле $1PC1$ или $2PC1$ своим замыкающим контактом включает сигнальную лампу $ЛС$, а размыкающим — разрывает вызывную цепь своего лифта, отключая вызов на время стоянки кабины на первом этаже.

При уходе кабины с первого этажа ее сигнальная лампа $ЛС$ гаснет, питание вызываемых цепей этого лифта после освобождения кабины сразу же восстанавливается, а после прихода кабины другого лифта на первый этаж включается ее реле PC . Эта кабина остается стоять на первом этаже в ожидании пассажиров (о чем сигнализирует зажиганием ее сигнальная лампа $ЛС$). При освобождении поднявшейся по приказу кабины и отсутствии вызовов в схему подается сигнал, включающий размыкающими контактами конечного выключателя $1KBH$ или $2KBH$ реле $1РУН$ или $2РУВ$ катушки реле $1РУН$ или $2РУВ$, и кабина направляется на первый этаж и т. д.

Аппаратура управления двигателями типовых лифтов при одиночном, парном и групповом управлениях обычно располагается на типовых панелях, станциях или блоках управления, устанавливаемых в машинных помещениях.

2.3. ПРИМЕР РАСЧЕТА И ВЫБОРА СИЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПАССАЖИРСКОГО ЛИФТА

Для пассажирского лифта, предназначенного к установке в 40-этажной гостинице, выбрать силовое оборудование электропривода кабины и сформулировать требования к схеме управления. Электропривод должен удовлетворять следующим основным требованиям: схема управления собирательная при

подъеме и опускании кабины, наибольшее количество возможных остановок кабины $N = 38$, ее вместимость $E = 12$ чел. ($m = 1000$ кг). Номинальная скорость кабины $v_{\text{ном}} = 2,5$ м/с, скорость подхода ее к этажу $v_0 = 0,25$ м/с, допустимое ускорение $a_{\text{доп}} = 2$ м/с², средняя точность остановки $\Delta S = \pm 30 \dots 50$ мм.

Основные исходные данные: кинематическая схема лифта — рис. 2.1, где $m = 1000$ кг; $m_0 = 2000$ кг; $m_{\text{пв}} = 2640$ кг; $H = H_{\text{max}} = 150$ м ($h = 5$ м, $h_1 = 2,5$ м); расчетные длины канатов: несущего $L_{\text{T}} = (H + 2h_1 + 10)$ м = 165 м, компенсирующего $L_{\text{к}} = (H + 2h_1 + 5)$ м = 160 м; ограничения $L_0 = 2(H + h + h_1 + 2,5)$ м = 320 м и длина кабеля $L_{\text{кб}} = (H/2 + 10)$ м = 85 м; масса 1 м канатов: $q_{\text{T}} = 6 \cdot 7$ кг/м, $q_{\text{к}} = 3 \cdot 9,3$ кг/м, $q_0 = 1 \times 0,55$ кг/м, $q_{\text{кб}} = 2 \cdot 3,35$ кг/м; привод безредукторный с механическим к. п. д. $\eta = 0,82$; размеры и маховые моменты шкивов: $D_{\text{н}} = 850$ мм и $GD_{\text{н}}^2 = 63$ кг · м², $D_{\text{ш}} = 575$ мм и $GD_{\text{ш}}^2 = 45$ кг · м², $D_{\text{от}} = 575$ мм и $GD_{\text{от}}^2 = 45$ кг · м², $D_0 = 250$ мм и $2GD_0^2 = 2 \times 8,5$ кг · м²; маховой момент тормозного шкива $GD_{\text{T}}^2 = 60$ кг · м².

1. Расчет относительной продолжительности включения приводного электродвигателя. Определяем вероятное количество остановок кабины при подъеме ($N_{\text{п}}$) и опускании ($N_{\text{с}}$) ее:

$$N_{\text{п}} = N - N \left(\frac{N-1}{N} \right)^{\gamma_{\text{п}} E} = 38 - 38 \left(\frac{38-1}{38} \right)^{0,75 \cdot 12} = 7,2 \approx 7;$$

$$N_{\text{с}} = N - N \left(\frac{N-1}{N} \right)^{\gamma_{\text{с}} E} = 38 - 38 \left(\frac{38-1}{38} \right)^{0,5 \cdot 12} = 5,2 \approx 5.$$

Находим время входа и выхода пассажиров при подъеме и опускании кабины:]

$$t_{4\text{п}} + t_{5\text{п}} = 2\Delta t \gamma_{\text{п}} E = 2 \cdot 1 \cdot 0,75 \cdot 12 \text{ с} = 18 \text{ с};$$

$$t_{4\text{с}} + t_{5\text{с}} = 2\Delta t \gamma_{\text{с}} E = 2 \cdot 1 \cdot 0,5 \cdot 12 \text{ с} = 12 \text{ с}.$$

Рассчитываем путь и время при разгоне и торможении кабины, принимая ускорение $a = 1,5$ м/с², а производную ускорения $\rho = 5$ м/с³:

$$h_{\text{п}} = \frac{(v-v_0)^2}{2a} + \frac{av}{2\rho} + \frac{v_0^2}{2a} = \left[\frac{(2,5-0,25)^2}{2 \cdot 1,5} + \frac{1,5 \cdot 2,5}{2 \cdot 5} + \frac{0,25^2}{2 \cdot 1,5} \right] \text{ м} = 2,06 \text{ м}; \quad t_2 \approx \frac{h_{\text{п}}}{v_{\text{ср}}} = \frac{2,06}{1,25} \text{ с} = 1,65 \text{ с}.$$

Принимая $k_{\text{п}} = 0,8$, а $k_{\text{т}} = 1,1$ и $t_1 + t_2 + t_3 = 13$ с, определяем время цикла (кругового рейса кабины)

$$T = \frac{2k_{\text{п}} H_{\text{max}} - h_{\text{п}} (N_{\text{п}} + N_{\text{с}} + 1)}{v_{\text{ном}}} + k_{\text{т}} [(t_1 + t_2 + t_3) (N_{\text{п}} + N_{\text{с}} + 1) + t_{4\text{п}} + t_{5\text{п}} + t_{4\text{с}} + t_{5\text{с}}] =$$

$$= \left\{ \frac{2 \cdot 0,8 \cdot 150 - 2,06(7 + 5 + 1)}{2,5} + 1,1[13(7 + 5 + 1) + 18 + 12] \right\} c = 304,6 \bar{c}.$$

Находим относительную продолжительность включения двигателя

$$PV = \frac{T - \left[t_s + (t_{4п} + t_{5п}) + (t_{4с} + t_{5с}) + \frac{v_0^2}{2a}(N_{п} + N_{с} + 1) \right]}{T} \times$$

$$\times 100 = \frac{304,6 - \left[(13 - 2 \cdot 1,65) + 18 + 12 + \frac{0,25^2}{2 \cdot 1,5}(7 + 5 + 1) \right]}{304,6} \times$$

$$\times 100\% = 87\%.$$

2. Расчет статической мощности. Без учета потерь для высшей и низшей точек рассчитываем диаграмму неуравновешенности с номинальным грузом кабины (F_1 и F_2) и без груза (F_3 и F_4), а затем строим ее (штриховая линия на рис. 2.2):

$$F_1 = (m + m_0 - m_{пв} \pm q_{к}L_{к} \pm q_{кб}L_{кб} \pm q_{т}L_{т})g = 22600 \text{ Н};$$

$$F_2 = -10000 \text{ Н}; \quad F_3 = 12800 \text{ Н}; \quad F_4 = -19800 \text{ Н}.$$

По полученной диаграмме находим абсолютное средневзвешенное значение неуравновешенности

$$F_{ср} = \frac{(11,1 \cdot 104 + 5,1 \cdot 46 + 6,2 \cdot 60 + 9,9 \cdot 90) \cdot 10^3}{104 + 46 + 60 + 90} \text{ Н} =$$

$$= 7,7 \cdot 10^3 \text{ Н}.$$

Определяем потери $\Delta F = F_{ср}(1 - \eta) = 1,4 \cdot 10^3 \text{ Н}$ и строим диаграмму неуравновешенности с учетом этих потерь (сплошные линии на рис. 2.2), пользуясь которой находим абсолютное значение средневзвешенной неуравновешенности с учетом потерь $F_5 = 9,1 \cdot 10^3 \text{ Н}$.

Рассчитываем необходимую статическую мощность

$$P_{ст} = kF_5 v_{ном} \cdot 10^{-3} = 1,1 \cdot 9,1 \cdot 10^3 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ кВт} = 25 \text{ кВт}.$$

3. Выбор двигателя. Пользуясь методом последовательных приближений, в качестве первого приближения принимаем статическую мощность. Определяем необходимую угловую скорость электродвигателя

$$\omega_{ном} = \frac{2\pi i v_{ном}}{D_{ш}} = \frac{2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2,5}{0,575} \text{ рад/с} = 8,7 \text{ рад/с} (83 \text{ мин}^{-1}).$$

Из имеющихся тихоходных двигателей выбираем двигатель постоянного тока независимого возбуждения ДРЛ 70/28

со следующими номинальными данными: $P_{\text{ном}} = 28$ кВт при $P_{\text{ст}} = 100\%$;

$$U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}; \quad I_{\text{ном}} = 160 \text{ А}; \quad n_{\text{ном}} = 83 \text{ мин}^{-1};$$

$$GD^2 = 50 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \quad U_{\text{в}} = 110 \text{ В}; \quad i_{\text{в}} = 20 \text{ А}; \quad R_{\text{я}} = 0,11 \text{ Ом};$$

$$R_{\text{д.п}} = 0,023 \text{ Ом}; \quad R_{\text{к.о}} = 0,041 \text{ Ом} \quad (R_{\text{я.с}} = 0,174 \text{ Ом}); \quad \Phi_{\text{ном}} = 0,02 \text{ Вб}; \quad p = 4; \quad a = 1; \quad N = 792; \quad c_e = \frac{p}{a} \frac{N}{60} = 52,8; \quad c_m = 51,3;$$

$$M_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}} \cdot 10^3}{\omega_{\text{ном}}} = \frac{28 \cdot 10^3}{8,7} \text{ Н} \cdot \text{м} = 3220 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

4. Проверка двигателя. По механической перегрузке двигатель проверяем для наиболее тяжелого случая — трогании кабины с нижнего этажа при ее номинальной загрузке. В этом случае тяговое усилие, пропорционально которому будет протекать ток в обмотках якоря, согласно диаграмме неуравновешенности составит

$$F = (22\,600 + 1400) \text{ Н} = 24\,000 \text{ Н}.$$

Тогда необходимый статический момент

$$M_{\text{ст}} = R_{\text{ш}} F = \frac{0,575}{2} \cdot 24\,000 \text{ Н} \cdot \text{м} \approx 6900 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

При заданной скорости кабины $v_{\text{ном}} = 2,5$ м/с, принятом ускорении $a = 1,5$ м/с² и времени разгона $t_p = v_{\text{ном}}/a = 1,65$ с необходимый избыточный момент

$$M_{\text{изб}} = \frac{\sum GD^2 n}{38,3 t_p} + \frac{0,975 g \sum m v_{\text{ном}}^2}{n t_p \eta} = \left(\frac{223,6 \cdot 83}{38,3 \cdot 1,65} + \frac{0,975 \cdot 9,81 \cdot 2440 \cdot 2,5^2}{83 \cdot 1,65 \cdot 0,82} \right) \text{ Н} \cdot \text{м} = 1570 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где $\sum GD^2 = GD_{\text{ш}}^2 + GD_{\text{н}}^2 (D_{\text{ш}}/D_{\text{н}})^2 + 2GD^2 (D_{\text{ш}}/D_{\text{н}})^2 + GD_{\text{от}}^2 + GD_{\text{т}}^2 = 223,6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ и $\sum m = F/g = 24\,000/9,81 \text{ кг} = 2440 \text{ кг}$ — неуравновешенная масса подвижных частей.

Тогда перегрузка двигателя

$$k = \frac{M_{\text{ст}} + M_{\text{изб}}}{M_{\text{ном}}} = \frac{6900 + 1570}{3220} = 2,63.$$

Согласно действующим стандартам при трогании с места (без форсировки возбуждения) допускается $k = 3$, т. е. по перегрузке двигатель выбран правильно.

Проверку двигателя по тепловому режиму производим, используя диаграмму неуравновешенности (сплошные линии на рис. 2.2) и имея в виду, что при двигательном режиме механические потери следует прибавить к тяговому усилию, а при генераторном — вычесть. Тогда, исходя из средних значений

усилий на отдельных участках диаграммы, эквивалентный момент двигателя

$$M_{\text{экв}} = \frac{D_{\text{ш}}}{2} \times \sqrt{\frac{(F_{\text{ср1}} + \Delta F)^2 l_1 + (F_{\text{ср2}} - \Delta F)^2 l_2 + (F_{\text{ср3}} + \Delta F)^2 l_3 + (F_{\text{ср4}} - \Delta F)^2 l_4}{l_1 + l_2 + l_3 + l_4}} =$$

$$= \frac{0,575 \cdot 10^3}{2} \sqrt{\frac{12^2 \cdot 110 + 4,5^2 \cdot 40 + 7,2^2 \cdot 66 + 9^2 \cdot 84}{110 + 40 + 66 + 84}} \text{ Н} \cdot \text{м} =$$

$$= 2720 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Полученный момент приводим к относительной продолжительности включения двигателя:

$$M_{\text{ст}} = M_{\text{экв}} \sqrt{\frac{\text{ПВ}}{\text{ПВ}_{\text{ст}}} + \alpha \left(\frac{\text{ПВ}}{\text{ПВ}_{\text{ст}}} - 1 \right)} =$$

$$= 2720 \sqrt{\frac{87}{100} + 0,5 \left(\frac{87}{100} - 1 \right)} \text{ Н} \cdot \text{м} = 2640 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Таким образом, $M_{\text{ном}} = 3220 \text{ Н} \cdot \text{м} > M_{\text{ст}} = 2640 \text{ Н} \cdot \text{м}$, т. е. и по тепловому режиму двигатель выбран правильно.

5. *Расчет и выбор тормозного устройства.* Принимая коэффициент запаса $k_{\text{T}} = 1,75$ и пренебрегая потерями, рассчитываем необходимый тормозной момент при наибольшем неуравновешенном состоянии системы:

$$M_{\text{T}} = k_{\text{T}} \frac{F_1 D_{\text{ш}}}{2ui} = \frac{1,75 \cdot 22\,600 \cdot 0,575}{2 \cdot 1 \cdot 1} \text{ Н} \cdot \text{м} = 11\,300 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

По полученному моменту выбираем тормозной шкив диаметром $D_{\text{ш}} = 800 \text{ мм}$, радиальный отход колодок $\epsilon = 2 \text{ мм}$ и определяем нормальное усилие на колодки тормоза:

$$F_{\epsilon} = \frac{2M_{\text{T}}}{CD_{\text{T}}} = \frac{2 \cdot 11\,300}{0,35 \cdot 0,8} \text{ Н} = 81\,000 \text{ Н},$$

где $C = 0,35$ — коэффициент трения между тормозным шкивом и колодками тормоза.

Принимая коэффициент использования хода якоря электромагнита или электрогидравлического толкателя $k = 0,85$, находим необходимую работу, которую должен совершать электромагнит или электрогидравлический толкатель при растормаживании системы:

$$F_{\text{M}} h_{\text{M}} = F_{\epsilon} \epsilon \frac{1}{k\eta} = 81\,000 \cdot 0,002 \frac{1}{0,85 \cdot 0,9} \text{ Н} \cdot \text{м} = 211 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где $\eta = 0,9$ — к.п.д. передачи.

По полученной работе выбираем электрогидравлический толкатель типа ТГ-160 с располагаемым усилием $F_{\text{э}} = 1565 \text{ Н}$

и ходом $h = 140$ мм. Выбранный толкатель проверяем по предполагаемой работе, т. е.

$$F_3 h = 1565 \cdot 0,14 \text{ Н} \cdot \text{м} = 219 \text{ Н} \cdot \text{м} > 211 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Следовательно, выбранный электрогидравлический толкатель обеспечивает необходимую работу системы.

6. Выбор силовой схемы управления и типа преобразователя.

Для управления приводным электродвигателем лифта используем реверсивный двухмостовой тиристорный преобразователь, который на выходе должен обеспечивать номинальные напряжения 230 В и ток не менее 160 А. Имея в виду, что в соответствии с диаграммой на рис. 2.2 в начале подъема кабины с нижнего этажа, а также при ее опускании с верхнего этажа двигатель будет работать с перегрузкой, определяем время работы двигателя в данном режиме. Для этого сначала находим усилие, соответствующее номинальному моменту,

$$F_{\text{ном}} = \frac{M_{\text{ном}}}{R_{\text{ш}}} = \frac{3220 \cdot 2}{0,575} \text{ Н} = 11\,200 \text{ Н},$$

а затем и наибольшее время перегрузки, которое соответствует подъему грузовой кабины с нижнего этажа. Пользуясь диаграммой на рис. 2.2 и полученным усилием (полагаем, что кабина будет подниматься без промежуточных остановок), определяем высоту, до которой двигатель будет работать с перегрузкой: ординате $F_{\text{ном}} = 11\,200 \text{ Н}$ соответствует абсцисса $H = 62 \text{ м}$.

Пренебрегая временем разгона, получаем $t_{\text{пр}} = H/v_{\text{ном}} = 62/2,5 \text{ с} = 25 \text{ с}$, причем перегрузка в период разгона двигателя ($t_2 = 1,665 \text{ с}$) составляет $k = 2,63$ $I_{\text{ном}} = 2,63 \cdot 160 \text{ А} = 420 \text{ А}$, а затем при установившемся движении кабины снижается до $k = \frac{6900}{3220} I_{\text{ном}} = 2,14 \cdot 160 \text{ А} = 343 \text{ А}$ и далее до нуля.

При выборе преобразователей необходимо учитывать их перегрузочные возможности. Так, например, преобразователи ХЭМЗ допускают перегрузку по току в циклическом режиме работы не более $0,75 I_{\text{ном}}$ в течение 1 мин и не более $I_{\text{ном}}$ в течение 15 с; при этом среднеквадратичный ток не должен превышать номинальный при времени усреднения 10 мин.

В рассматриваемом случае временем усреднения является длительность кругового рейса кабины $T = 304,6 \text{ с}$ (или 5,1 мин), т. е. меньше 10 мин, а среднеквадратичный ток $I = I_{\text{ном}} \frac{M_3}{M_{\text{ном}}} = 160 \frac{2720}{3220} \text{ А} = 135 \text{ А} < I_{\text{ном}}$. Следовательно, в

данном случае преобразователь можно выбирать по допустимой перегрузке. Пуск двигателя происходит в течение 1,65 с, т. е. меньше 15 с; поэтому выбираем преобразователь с допустимой 100%-ной перегрузкой. С учетом изложенного из имеющейся номенклатуры выбираем реверсивный преобразователь типа КТУ-230/200 Р при номинальных токе $I_{\text{ном}} = 200 \text{ А}$ и напряжении 230 В.

7. Требования к схеме управления. Пренебрегая малыми величинами, определяем необходимую жесткость механической характеристики двигателя, которая обеспечила бы заданную точность остановки кабины:

$$\Delta s' = 0,03 \dots 0,05 = v_0 t_0 \left(\frac{\Delta v}{v_0} + \frac{\Delta t}{t_0} \right) + \frac{m_0 v_0^2}{2F_0} \left(2 \frac{\Delta v}{v_0} + \frac{\Delta m}{m_0} + \frac{\Delta F}{F_0} \right) =$$

$$= 0,25 \cdot 0,25 \left(\frac{\Delta v}{0,25} + 0,15 \right) + \frac{2013 \cdot 0,25^2}{2 \cdot 83\,450} \left(2 \frac{\Delta v}{0,25} + \frac{500}{2013} + \frac{9550}{83\,450} \right).$$

Отсюда

$$\Delta v = \frac{0,03 \dots 0,05 - 0,0096}{0,253} \text{ м/с} = 0,085 \dots 0,163 \text{ м/с}.$$

Здесь Δv — искомая величина; $t_0 = 0,25$ с — среднее время срабатывания автомата и реле; $\Delta t/t_0 = 0,15$ — относительное время срабатывания этих аппаратов; m_0 — средняя масса движущихся частей лифта; Δm — среднее отклонение этой массы; F_0 — динамическое усилие; ΔF — отклонение этого усилия.

Среднюю массу рассчитываем, исходя из диаграммы неуравновешенности системы, с полным грузом и без него:

$$m_0 = \frac{\sum GD^2}{4gR_{III}^2} + \frac{(F_1 + \Delta F) + (F_3 + \Delta F)}{2g} =$$

$$= \left[\frac{223,6}{4 \cdot 9,81 \left(\frac{0,575}{2} \right)^2} + \frac{(22\,600 + 1400) + (12\,800 + 1400)}{2 \cdot 9,81} \right] \text{ кг} =$$

$$= 2013 \text{ кг}.$$

Среднее отклонение массы находим как отсутствие пассажиров в кабине лифта:

$$\Delta m = \frac{(F_1 + \Delta F) - (F_3 + \Delta F)}{2g} = \frac{24\,000 - 14\,200}{2 \cdot 9,81} \text{ кг} = 500 \text{ кг}.$$

Среднее динамическое усилие определяем для наихудшего режима работы двигателя при движении кабины от нижней отметки с полным грузом и без него. В этом случае

$$F_{\text{ср max}} = \frac{22\,600 + 1400}{2} \text{ Н} = 12\,000 \text{ Н};$$

$$F_{\text{ср min}} = \frac{12\,800 + 1400}{2} \text{ Н} = 7\,100 \text{ Н};$$

$$F_{\text{max}} = F_6 + F_{\text{ср max}} = (81\,000 + 12\,000) \text{ Н} = 93\,000 \text{ Н};$$

$$F_{\text{min}} = F_6 - F_{\text{ср min}} = (81\,000 - 7\,100) \text{ Н} = 73\,900 \text{ Н};$$

$$F_{\text{ср}} = \frac{F_{\text{max}} + F_{\text{min}}}{2} = \frac{93\,000 + 73\,900}{2} \text{ Н} = 83\,450 \text{ Н};$$

$$\Delta F = \frac{F_{\text{max}} - F_{\text{min}}}{2} = \frac{93\,000 - 73\,900}{2} \text{ Н} = 9\,550 \text{ Н}.$$

Рассчитываем среднее снижение скорости двигателя ($\Delta\omega_{\text{ср}}$) при отсутствии обратных связей в схеме управления им и работе двигателя на естественной характеристике, т. е. при наибольшей и номинальной нагрузках:

$$\Delta\omega_{\text{max}} = \frac{kI_{\text{ном}} \sum R}{\alpha\Phi} = \frac{2,14 \cdot 160 \cdot 0,304}{22,1} \text{ рад/с} = 4,70 \text{ рад/с};$$

$$\Delta\omega_{\text{min}} = \frac{I_{\text{ном}} \sum R}{\alpha\Phi} = \frac{160 \cdot 0,304}{22,1} \text{ рад/с} = 2,2 \text{ рад/с},$$

где $\alpha\Phi = \frac{U - I_{\text{ном}} R_{\text{я.с}}}{\omega_{\text{ном}}} = \frac{220 - 160 \cdot 0,174}{8,7} \text{ с/рад} = 22,1 \text{ с/рад};$

$\sum R = R_{\text{я.с}} + 2R_{\text{др}} + R_{\text{к}} + R_{\text{тр}} = 0,304 \text{ Ом}$ ($R_{\text{др}} = 0,018 \text{ Ом}$ — сопротивление уравнивающих дросселей; $R_{\text{к}} = 0,056 \text{ Ом}$ — сопротивление при коммутации вентилях; $R_{\text{тр}} = 0,056 \text{ Ом}$ — сопротивление обмоток согласующего трансформатора). Тогда

$$\Delta\omega_{\text{ср}} = \frac{\Delta\omega_{\text{max}} + \Delta\omega_{\text{min}}}{2} = \frac{4,70 + 2,2}{2} \text{ рад/с} = 3,45 \text{ рад/с}.$$

При пересчете на линейную скорость движения кабины снижение ее скорости составит $\Delta v_{\text{ср}} = 1 \text{ м/с}$.

Полученное снижение скорости существенно больше допустимого, т. е. $\Delta v_{\text{ср}} \gg \Delta v$; поэтому для обеспечения заданной точности остановки кабины в схеме управления необходимо предусмотреть корректирующие обратные связи. В этом случае может быть принята замкнутая система управления двигателем с последовательной коррекцией и подчиненным регулированием параметров, которая обеспечивала бы получение необходимой механической характеристики двигателя, т. е.

$$\omega = \omega_{\text{с}} - \Delta\omega k,$$

где k — коэффициент, уменьшающий погрешности скорости в замкнутой системе регулирования до необходимого значения. Величина $\Delta\omega k$ определяется элементами схемы и в относительных единицах не должна превышать 0,085...0,163.

2.4. КРАТКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭКСКАВАТОРОВ, ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ И ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ЭЛЕКТРОПРИВОДАМ ЭКСКАВАТОРОВ

Краткие характеристики. Экскаваторы используются на строительстве городов, фабрик, заводов, гидротехнических сооружений, на угольных и рудных раз-

резах, на строительстве дорог и т. д. По конструкции они бывают *одноковшовые, роторные* и *многоковшовые* (обычно землечерпалки). По характеру рабочего оборудования наиболее распространенные одноковшовые экскаваторы можно разделить на две группы: *экскаваторы с прямой и обратной лопатами*, у которых ковши имеют коленчато-рычажное (ЭВГ-15) или шарнирное (ЭВГ-3565) сочленение со стрелой, и *драглайны*, у которых ковш подвешен на канатах и наполняется при его движении на расстоянии $l = 3...4 l_{\text{ковша}}$. Наряду с этими встречаются экскаваторы и с другими рабочими органами: стругом, грейфером, копром и пр.

По назначению и конструктивным особенностям одноковшовые экскаваторы с электрическим приводом можно разделить на *универсальные* с емкостью ковша до 5 м^3 и *специальные* с емкостью ковша $2...168 \text{ м}^3$. Специальные экскаваторы включают карьерные, вскрышные, шагающие и траншейные. К универсальным, например, относятся экскаваторы карьерно-строительные и дизель-электрические (Э-2503Б-1 и Э-2505СА-1) с емкостью ковша от $0,15$ до $2,5...3,2 \text{ м}^3$, которые могут работать прямой лопатой, драглайном или краном как автономно, так и от посторонней электрической сети; к специальным — электрические экскаваторы ЭКГ-4,6Б и ЭКГ-20 с емкостью ковша прямой лопаты соответственно $4,6$ и 20 м^3 , работающие от постороннего источника электроэнергии (на угольном разрезе «Назаровский» работает электрический экскаватор-драглайн с емкостью ковша 100 м^3 и стрелой длиной 100 м). По ходовому оборудованию одноковшовые экскаваторы делятся на гусеничные и шагающие. Обычно тяжелые грунты разрабатываются экскаваторами-лопатами, а мягкие — драглайнами.

Роторные экскаваторы используются при вскрытии и разработке залежей полезных ископаемых, при строительстве каналов, крупных плотин, дамб и т. д. Рабочий орган роторных поворотных экскаваторов находится на стреле, которая может поворачиваться в вертикальной и горизонтальной плоскостях, а у некоторых и выдвигаться вперед. Создано несколько моделей роторных экскаваторов производительностью от $150...250 \text{ м}^3/\text{ч}$ (с малой емкостью ковша) до $900...1200 \text{ м}^3/\text{ч}$ (при больших емкостях ковша — до 1600 л).

Многоковшовые экскаваторы используются для углубительных и очистительных работ различных водоемов, а также на приисках. Производительность таких экскаваторов зависит от их назначения. Поскольку экскаваторы являются не стационарными механизмами, для электроснабжения их обычно строят временные воздушные линии на территории разработок или строительства. При этом линии оканчиваются шкафом с автоматом и разъединителем (при высоком напряжении), от которого энергия передается по кабелю через кольцевые токоприемники или другие аппараты для питания преобразователей или трансформаторов экскаваторов. Напряжение питания может быть 380, 660 3000, 6000 и 10000 В.

Расчет необходимой мощности и выбор электродвигателей. Приводы экскаваторов, обеспечивающие заданную производительность, условно назовем *основными механизмами*. К ним относятся: механизмы напора и подъема лопаты и ротора, привод цепи многоковшового экскаватора, приводы тягового механизма драглайна, механизм поворота экскаватора и ротора, а также механизм хода, причем электроприводы этих механизмов обычно являются индивидуальными, хотя встречаются экскаваторы и с групповыми электроприводами. Выбор мощности электродвигателей основных механизмов существенно осложняется неопределенностью исходных данных, так как нагрузочные диаграммы их зависят не только от состояния забоя, но и от действия машиниста; поэтому для всех экскаваторных механизмов, и особенно участвующих в копании, расчет и выбор двигателей производится методом последовательных приближений.

Внешние сопротивления при копании грунта любым рабочим оборудованием складываются из сопротивления копании, а также подъема рабочего органа и грунта в процессе копания. Составляющие сопротивления копанию грунта прямой и обратной лопатами показаны на рис. 2.6, а. Здесь R_p — сопротивление грунта резанию; R_n — напорная составляющая сопротивления грунта резанию.

Расчет необходимой мощности двигателей производится с учетом этих составляющих и конструктивных данных экскаватора. Например, полные сопротивления

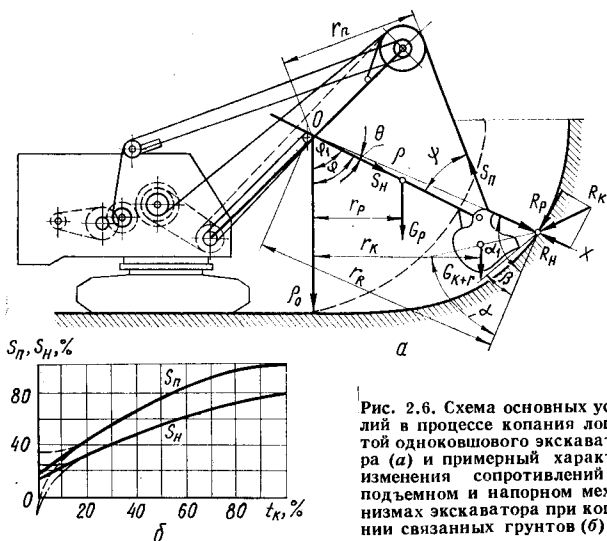


Рис. 2.6. Схема основных усилий в процессе копания лопатой однобарабанного экскаватора (а) и примерный характер изменения сопротивлений в подъемном и напорном механизмах экскаватора при копании связанных грунтов (б)

подъемного и напорного механизмов лопаты находятся путем механических расчетов с использованием кинематической схемы и основных усилий при копании (рис. 2.6). В этом случае для механизма подъема усилие направлено вдоль канатов (S_n), а для механизма напора — вдоль рукоятки (S_h). Эти величины могут быть найдены по их составляющим:

$$S_n = \frac{R_p r_r R + G_{k+\Gamma} r_k + G_p r_p}{r_n}; \quad (2.16)$$

$$S_h = S_n \cos \psi + R_h - G_p \cos \phi - G_{k+\Gamma} \cos \phi. \quad (2.17)$$

Пользуясь значениями S_n и S_h , а также параметрами механической части приводов, определяют статические моменты:

$$M_n = \frac{S_n R_{б.п}}{i_n \eta_n}; \quad M_h = \frac{S_h R_{б.н}}{i_h \eta_h}, \quad (2.18)$$

где $R_{б.п}$ и $R_{б.н}$ — радиусы барабана лебедки механизма подъема и шестерни напорного механизма; i_n и i_h —

полные передаточные отношения от ковша до электродвигателя; η_n и η_n — полные к. п. д. этих механизмов.

Для выбора электродвигателей по методу последовательных приближений полученные статические моменты для первого приближения могут быть приняты за номинальные моменты двигателей и в соответствии с этим выбираются электродвигатели с моментами $M_{ном} \geq M_n$ и $M_{ном} \geq M_n$. Предварительный выбор двигателей этих механизмов также может быть произведен и по заданному стопорному моменту с учетом того, что копание будет производиться с моментом порядка 65% стопорного момента.

Необходимая мощность электродвигателей для механизмов подъема экскаваторов-драглайнов выбирается таким же методом, как и для механизмов подъема крана с учетом поддерживающего механизма и перегрузки при копании.

Практика эксплуатации одноковшовых экскаваторов показала, что статический момент сопротивления при повороте механизма с номинальным грузом (без учета уклона и ветра) составляет 3...15% эквивалентного момента за цикл работы механизма поворота ($M_{экр}$), т. е. $M_{ст} = 0,03...0,15 M_{экр}$ [8]. Поэтому в качестве первого приближения при выборе двигателей механизмов поворота можно принимать следующую величину:

$$M_{экр} = \frac{M_{ст} \cdot 100}{3...15}. \quad (2.19)$$

Для повышения производительности экскаватора операции поворота и подъема или опускания ковша обычно совмещают.

Статическое сопротивление передвижения у гусеничных одноковшовых и роторных экскаваторов складывается из сопротивления от трения в кинематических парах гусеничного движения, сопротивления перекачивания, сопротивления подъема, сопротивления разворота и сопротивления ветру. Эти составляющие также определяются путем механических расчетов, исходя из параметров экскаватора, рельефа пути и характера грунта. Однако для первого приближения при выборе мощности двигателя подобно механизму поворота можно воспользоваться тем, что сопротивление перекачивания гусеничных экскаваторов составляет в среднем 7...15%

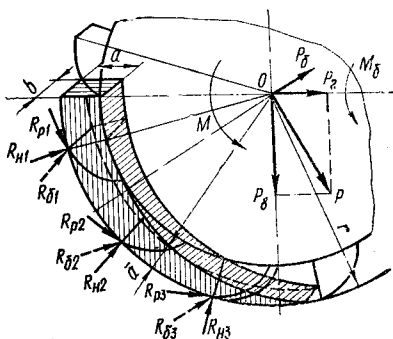


Рис. 2.7. Основные усилия, действующие на роторном колесе

массы экскаватора, т. е. 14...30% полного сопротивления передвижению.

Мощность приводного двигателя экскаваторов с групповым электроприводом выбирается по мощности механизма, работающего в наиболее тяжелом режиме.

Роторные поворотные экскаваторы разрабатывают забой

последовательными стружками, которые снимаются в результате вращения ротора и изменения его высоты в вертикальной плоскости или поворота платформы со стрелой в горизонтальной плоскости. Общее сопротивление грунта копанию при использовании таких экскаваторов складывается из сопротивления на отдельных ковшах, взаимодействующих с грунтом, причем для каждого из них суммарное сопротивление может быть определено путем механических расчетов с учетом параметров экскаватора и составляющих усилий. Для каждого ковша общее сопротивление включает три составляющих: R_p — касательную, R_H — нормальную и R_{δ} — боковую (рис. 2.7). Зная эти величины, можно найти необходимую мощность приводного электродвигателя.

Рассчитанные необходимые мощности основных механизмов экскаватора должны быть приведены к ближайшим стандартным продолжительностям включения двигателей экскаваторной серии (например, типа ДПЭ), а затем из этой серии следует выбрать двигатели, причем для привода ротора и ковшовой цепи с достаточным приближением двигателя можно выбирать так же, как и для механизмов длительного режима, а для механизмов поворота ротора и платформы и других основных механизмов одноковшовых экскаваторов — как для механизмов, работающих в повторно-кратковременном или кратковременном режимах работы. Выбранные двигатели должны быть проверены по тепловому режиму реального цикла их работы.

Для приводов вспомогательных механизмов экскаваторов, таких, например, как компрессоров, маслососов, вентиляторов, конвейеров, обслуживающих экскаваторы, и других, а также для приводов двигателей генераторов системы «генератор — двигатель» используются двигатели переменного тока.

Основные требования, предъявляемые к электроприводам. Электроприводы всех экскаваторов работают в тяжелых условиях, которые определяются тряской и вибрацией, запыленностью, повышенной влажностью и колебаниями температуры, а для одноковшовых экскаваторов еще и частыми пусками (до 600...800 вкл/ч), быстрыми разгонами и резкими торможениями; поэтому электроприводы их должны быть просты и надежны.

Для получения высокой производительности экскаваторов к электроприводам основных механизмов предъявляются требования большого быстродействия как при установившихся, так и в переходных режимах, а для обеспечения надежности работы механические характеристики их электроприводов должны иметь *экскаваторную форму* со стопорным моментом около $1,5...2,5 M_{ном}$, причем требования по жесткости этих характеристик на рабочей своей части зависят как от механизма, так и от характера разрабатываемого грунта. Известно, например, что продолжительность работы механизмов поворота одноковшовых экскаваторов составляет 70...85% общего времени цикла работы экскаватора [8]. Поэтому, чтобы получить большую производительность экскаваторов, разгон и торможение их должны осуществляться при моменте, близком к стопорному, а рабочая часть характеристики должна быть максимально жесткой.

Вследствие периодического входа и выхода из грунта ковшей, из-за неоднородности разрабатываемого грунта и его скола нагрузка на валу двигателя роторного колеса все время меняется. Чтобы это колебание на производительности экскаватора не отразилось, механическая характеристика электродвигателя на своей рабочей части также должна быть жесткой, тогда как для тягового механизма драглайна она должна быть менее жесткой. Что касается требований к жесткости механической характеристики в зависимости от характера

грунта, то при легких грунтах она должна быть жесткой, а при тяжелых и особенно в скальных грунтах — сравнительно мягкой. Требуемые характеристики формируются, как правило, с помощью обратных связей в схемах управления электродвигателями механизмов экскаваторов.

Указанные требования к механическим характеристикам экскаваторных приводов основных механизмов предопределили преимущественное применение двигателей постоянного тока, хотя на экскаваторах малой производительности устанавливаются и двигатели переменного тока. Обычно используются один или несколько двигателей постоянного тока с номинальной частотой вращения от 200...300 до 1200 мин⁻¹ и промежуточными редукторами или без них. В экскаваторах, предназначенных для работы в скальных грунтах, целесообразно применять тихоходные двигатели ($n \leq \leq 300$ мин⁻¹), так как у них запас кинетической энергии вращающихся частей, соединенных с якорем, ($J\omega_{\text{ном}}^2/2$) при номинальной частоте вращения меньше, чем у быстроходных двигателей; поэтому при врезании ковша в грунт сила удара его и нагрузка на механическое оборудование меньше. Данное обстоятельство привело к тому, что в последние годы наметилась тенденция к использованию на мощных вскрышных экскаваторах-лопатах безредукторных приводов с тихоходными двигателями (ЭВГ-15 и ЭВГ-100/70).

При проектировании схем управления всеми основными механизмами экскаваторов не ограничиваются только основной (естественной) характеристикой, а предусматривают несколько регулировочных характеристик, позволяющих работать на пониженной частоте вращения. Такие характеристики необходимы при разработке особо тяжелых скальных и плохо взорванных пород, при работе с малыми углами поворота, а также для работы на вспомогательных операциях, при очистке и подготовке карьеров, при наладке схем и загрузке платформ и т. д. Кроме того, наличие зазоров в механической части экскаваторов (особенно в механизмах поворота) и возможности ослабления капатов (где они есть) могут привести при разгоне к ударным динамическим нагрузкам механических частей. Чтобы исключить эти нагрузки, разгонять механизмы нужно

плавно. Для этой цели необходимы пониженные частоты вращения. Поэтому обычно для большинства экскаваторных механизмов диапазон регулирования частот вращения в двигательном режиме принимают около 4...5 : 1, а при опускании порожнего ковша и при перемещении рукоятки напорных механизмов частота вращения может быть выбрана выше номинальной (обычно регулирование осуществляется потоком возбуждения двигателя с диапазоном регулирования частоты вращения 2 : 1) [8].

Частота вращения электродвигателей может регулироваться ступенчато или плавно. Кроме того, электроприводы механизмов подъема должны обеспечивать надежное удержание груженого ковша без включения тормозов. При этом двигатель может иметь незначительную «ползучую» частоту вращения, которая не должна затруднять работу оператора и требовать периодического воздействия на привод.

Электроприводы роторного колеса должны обеспечивать диапазон регулирования частоты вращения вниз от номинальной не менее 30...35%, а поворота стрелы с роторным колесом — плавное регулирование частоты вращения в широком диапазоне.

2.5. СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ЭКСКАВАТОРОВ

В настоящее время наибольшее распространение получили схемы электроприводов экскаваторов на постоянном токе и только некоторые экскаваторы имеют электроприводы на переменном токе (Э-504, Э-753, Э-1103, Э-2001). Электроприводы на постоянном токе выполнялись и выполняются по следующим основным схемам: а) «генератор с трехобмоточным возбудителем — двигатель»; б) «генератор с возбуждением от ЭМУ — двигатель»; в) «генератор с возбуждением от магнитного усилителя с выпрямителем или с тиристорным возбудителем — двигатель»; г) «тиристорный преобразователь — двигатель» (ТП — Д). Для карьерных экскаваторов с емкостью ковша 4 и 8 м³ разработана серия экскаваторных тиристорных преобразователей типа КТП-Э на токи 100...1500 А и напряжения 400...700 В. Однако следует помнить, что при обычных схемах включения при естественной коммутации и малых частотах вращения элект-

род двигателей у этих систем низкий коэффициент мощности. Кроме названных схем, в Японии для морской землечерпалки разработана система управления в виде вентильно-машинного каскада, позволяющая регулировать частоту вращения двигателя в пределах 270...344 мин⁻¹.

Возбуждение двигателей для большинства основных механизмов указанных систем независимое и обычно выполняется от отдельного источника постоянного тока, нерегулируемого по напряжению и, как правило, регулируемого для механизмов подъема и перемещения рукоятки напорных механизмов.

Электроприводы механизмов экскаваторов можно разбить на две группы: *электроприводы с малым моментом инерции* (подъема и напора лопаты, тяги и подъема драглайна) и *электроприводы с большим моментом инерции* (механизмы поворота одноковшовых и роторных экскаваторов). Время разгона электродвигателей первой группы определяется в основном электромагнитной постоянной времени генератора ($T_r = \frac{L_{в.г}}{R_{в.г}}$), а второй — электромеханической постоянной времени привода ($\theta = \frac{J_{дв} R_{я}}{k_e k_M}$). Поэтому схемы управления электродвигателями этих механизмов должны отражать названные особенности групп.

Электроприводы механизмов с малым моментом инерции должны иметь хорошую управляемость, для чего необходимо сокращать время нарастания э.д.с. генераторов и частоты вращения двигателя. С этой целью в систему управления должны вводиться отрицательные обратные связи по напряжению генератора либо частоты вращения двигателя, которые позволили бы форсировать переходные процессы в цепи возбуждения генератора.

При разгоне электроприводов механизмов с большими моментами инерции ток якоря электродвигателя может превысить предельно допустимые значения. Чтобы избежать этого, необходимо замедлять нарастание э.д.с. генератора, т. е. снижать темп разгона механизма. Поэтому для таких электроприводов необходимо вводить отрицательную обратную связь по току с отсечкой или

обеспечивать заданное ускорение при разгоне и торможении путем автоматического поддержания определенного темпа изменения э.д.с. генератора.

Для обеспечения устойчивого характера переходных процессов в замкнутых системах автоматического регулирования, а также для формирования переходных процессов системы экскаваторных электроприводов должны содержать гибкие отрицательные обратные связи. Эти связи могут быть *линейными* или *нелинейными* по различным параметрам системы (напряжению генератора, току якоря и т. д.), причем нелинейная гибкая обратная связь автоматически вводится только на определенных этапах переходного процесса. Например, для уменьшения ударов в редукторах механизмов поворота экскаватора при выборе зазоров должна вводиться гибкая обратная связь по напряжению генератора, которая замедляла бы темп разгона двигателя в период выбора зазора. После выбора зазора эта связь автоматически должна отключаться, чтобы не снижать темп переходных процессов разгона или торможения поворотной платформы экскаватора. При использовании тиристорных преобразователей, которые имеют незначительную электромагнитную инерцию, необходимо искусственно замедлять интенсивность переходных процессов. Это замедление можно получить путем охвата преобразователя гибкой отрицательной обратной связью по напряжению.

В качестве примера рассмотрим принципиальную схему управления приводом напора или подъема экскаватора ЭКГ-4 (рис. 2.8, а), которая наиболее полно отражает специфические особенности экскаваторных электроприводов. На этой схеме указаны только те элементы, которые участвуют в формировании механической характеристики электроприводов в их рабочих режимах. Схема выполнена по системе «генератор — двигатель». Генератор (Г) имеет две обмотки возбуждения: независимую, состоящую из двух полуобмоток (10НГ и 20НГ), которая получает питание по мостовой схеме от магнитных усилителей (УМ1 и УМ2), и обмотку шунтового возбуждения, включенную параллельно якорю генератора (ОШГ). Обмотки 10НГ и 20НГ вместе с балластными резисторами СБ образуют мостовую схему, включенную на выходе магнитных уси-

лителей УМ1 и УМ2. Сопротивления балластных резисторов примерно равны сопротивлениям полуобмоток возбуждения, т. е. мост уравновешен, причем по балластным резисторам протекает сумма токов магнитных усилителей, а по полуобмоткам возбуждения — их разность.

Использование шунтовой обмотки обусловлено стремлением снизить необходимую мощность независимой обмотки, а следовательно, и мощность возбудителя и его системы управления. Мощность шунтовой обмотки составляет около 40% мощности независимой обмотки. Двигатель (М) имеет независимое возбуждение (ОВМ) с возможностью ослабления потока (при разомкнутом контакте ПП).

У магнитного усилителя имеются следующие обмотки: задающая ОЗ, с помощью которой задаются направление и частота вращения двигателя; обмотки непрерывной жесткой обратной связи по напряжению генератора ОН и по току главной цепи с отсечкой ОТ (ОТ иногда подключают к специально установленным шунтам, чтобы снизить влияния температурных изменений на работу обратной связи по току); обмотка ОС1, включенная в диагональ динамического моста и обеспечивающая глубокую гибкую отрицательную связь по напряжению генератора, и обмотка ОС2, которая полу-

чает сигналы от специальной обмотки на добавочных полюсах генератора ОСГ и обеспечивает гибкую отрицательную обратную связь по току главной цепи.

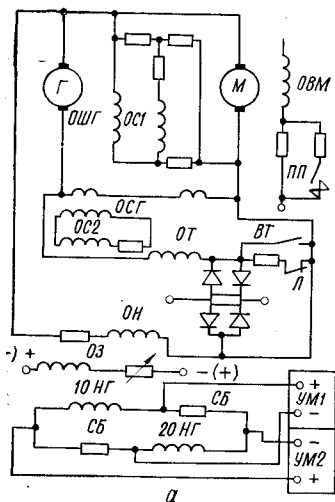
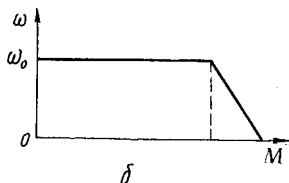


Рис. 2.8. Принципиальная схема управления электроприводом напора или подъема экскаватора ЭКГ-4 (а) и характер экскаваторной характеристики (б)



Обратные связи в этой схеме работают следующим образом: с ростом э. д. с. генератора увеличивается ток в *ОН*, стабилизируя тем самым переходный процесс генератора; если при разгоне привода ток главной цепи превышает ток отсечки, то вступает в работу *ОТ*, ограничивающая этот ток. Гибкие обратные связи по напряжению и току обеспечивают устойчивый характер переходных процессов и формируют их.

После того как ковш с грузом поднят на заданную высоту, для удержания его примерно на этой же высоте (во время поворота экскаватора) двигатель переводится в режим динамического торможения (механические тормоза используются как аварийные). В этом случае под действием момента груза $M_{гр}$ двигатель развивает частоту вращения в направлении опускания ковша, благодаря чему создается э. д. с. и в якорной цепи появляется ток $I_я$, который, взаимодействуя с магнитным потоком двигателя $\Phi_{дв}$, создает электромагнитный момент $M_{дв} = c_m I_я \Phi_{дв}$, препятствующий разгону двигателя в направлении опускания груза. В результате возникает примерно равновесное состояние, когда $M_{гр} \approx M_{дв}$, а груз может продолжать опускаться с малой скоростью.

При опускании ковша размыкается контакт *ПП* и в цепь возбуждения электродвигателя вводится повышенное сопротивление, обеспечивая тем самым ослабление его магнитного потока, а следовательно, и повышенную частоту вращения двигателя.

Для надежного гашения остаточного напряжения генератора при отключении привода цепь обмотки обратной связи по току *ОТ* замыкается (помимо запирающего напряжения через диоды) блок-контактом линейного контактора *Л* или выключателем тормоза *ВТ*.

В схемах электроприводов основных механизмов экскаваторов обычно помимо динамического торможения или торможения противовключением предусматриваются конечные выключатели, которые не должны допускать чрезмерного выдвигания или возврата рукояти, чрезмерного подъема ковша и т. д. Расчеты режимов работы и особенно электромеханических или механических характеристик этих механизмов могут быть произведены аналитическим, графоаналитическим либо графическим способами.

2.6. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОСНОВНЫХ МЕХАНИЗМОВ ЭКСКАВАТОРОВ

Для привода основных механизмов мощных одноковшовых и роторных экскаваторов преимущественное распространение получила система «генератор — двигатель» с двигателями независимого возбуждения. В этом случае, как известно, управление осуществляется воздействием на цепь возбуждения генераторов, получающих питание от электромашинных или от магнитных усилителей либо от тиристорных возбудителей. При этом формируются статические и динамические механические характеристики электроприводов с помощью замкнутых систем автоматического регулирования. Применительно к таким системам, упрощенная схема которых показана на рис. 2.9, и рассмотрим расчет механических характеристик экскаваторных электроприводов аналитическим способом с учетом обычных допущений: частота вращения генератора и магнитный поток двигателя неизменны, генератор ненасыщен, генератор и двигатель имеют компенсационные обмотки и т. д.

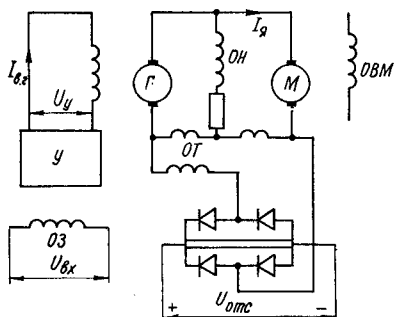
Тогда нарастание тока и процесс разгона двигателя при подаче на обмотку возбуждения генератора постоянного напряжения U_y можно описать следующей системой уравнений:

$$U_y = I_{в.г} R_{в.г} + L_{в.г} dI_{в.г}/dt; \quad (2.20)$$

$$E_{г} = k_{y1} I_{в.г} \omega_{г} = k_{г} I_{в.г}; \quad (2.21)$$

$$E_{дв} = c_e \omega_{дв} \Phi_{дв} = k_e \omega_{дв}; \quad (2.22)$$

$$E_{г} - E_{дв} = I_{я} R_{я} + L_{я} dI_{я}/dt; \quad (2.23)$$



$$M_{дв} = c_m I_{я} \Phi_{дв} = k_m I_{я}; \quad (2.24)$$

$$M_{дв} = J_{дв} d\omega_{дв}/dt; \quad (2.25)$$

$$\left. \begin{aligned} k_e &= c_e \Phi_{дв}; \\ k_m &= c_m \Phi_{дв}; \end{aligned} \right\} (2.26)$$

где $R_{в.г}$, $R_{я}$, $L_{в.г}$ и $L_{я}$ — сопротивления и индуктивности цепи возбуждения генератора и главной цепи

Рис. 2.9. Упрощенная принципиальная схема электропривода экскаватора

электрических машин; $I_{в.г}$ и $I_{я}$ — ток возбуждения генератора и ток главной цепи; E_r и $E_{дв}$ — э. д. с. генератора и двигателя; $M_{дв}$, $\omega_{дв}$ и $\Phi_{дв}$ — электромагнитный момент, угловая скорость и магнитный поток двигателя; $k_y (k_{y1})$, $k_e (c_e)$ и $k_m (c_m)$ — коэффициенты пропорциональности; $J_{дв}$ — момент инерции якоря и связанного с ним механизма.

Если учесть работу усилителя, то его выходное напряжение, поступающее на обмотку возбуждения генератора и зависящее от результирующих ампер-витков обмоток управления (полагая усилитель безынерционным и число обмоток одинаковым), в общем случае можно выразить так:

$$U_y = k_y (i_{O3} - i_{OH} - i_{OT}), \quad (2.27)$$

где i_{O3} , i_{OH} , i_{OT} — соответственно токи задающей обмотки (O3) и обмоток отрицательной обратной связи по напряжению (OH) и току (OT); k_y — коэффициент пропорциональности.

Напряжение и э. д. с. генератора близки между собой, поэтому ток в обмотке обратной связи по напряжению

$$i_{OH} = E_r / r_{OH}, \quad (2.28)$$

где r_{OH} — сопротивление цепи этой обмотки.

Обмотка обратной связи по току включена через полупроводниковые вентили на разность двух напряжений — падения напряжения от тока главной цепи $R_{ш} (I_{я} R_{ш})$ и напряжения отсечки $U_{отс}$. Поэтому ток в ее цепи будет протекать только при условии $I_{я} R_{ш} > U_{отс}$ и будет определяться выражением

$$i_{OT} = \frac{I_{я} R_{ш} - U_{отс}}{r_{OT}}, \quad (2.28')$$

где r_{OT} — сопротивление цепи данной обмотки.

Для получения экскаваторной электромеханической характеристики систему уравнений (2.20)...(2.28) необходимо решить совместно, используя ЭВМ или другие вычислительные средства. Электропривод должен работать в двух режимах: а) когда двигатель работает на жестком участке характеристики ($I_{я} R_{ш} < U_{отс}$ и $i_{OT} = 0$); б) когда двигатель работает на мягком участке

характеристики ($I_{я}R_{ш} > U_{отс}$ и $i_{от} > 0$). Для рассмотрения наиболее общего случая примем, что электропривод работает во втором режиме. Тогда, решив совместно уравнения (2.20)...(2.28), получим следующие дифференциальные уравнения для тока якоря $I_{я}$ и угловой скорости двигателя $\omega_{дв}$:

$$\frac{d^2 I_{я}}{dt^2} T_{г. экв} \theta + \frac{d I_{я}}{dt} \left[T_{г. экв} + \theta + \theta \frac{k_T}{(1 + k_H R_{я})} \right] + I_{я} = 0; \quad (2.29)$$

$$\frac{d^2 \omega_{дв}}{dt^2} T_{г. экв} \theta + \frac{d \omega_{дв}}{dt} \left[T_{г. экв} + \theta + \theta \frac{k_T}{(1 + k_H R_{я})} \right] + \omega_{дв} = \omega_2. \quad (2.30)$$

Здесь $T_{г. экв} = \frac{T_g}{1 + k_H}$ — эквивалентная постоянная времени цепи возбуждения генератора; $T_g = \frac{L_{в. г}}{R_{в. г}}$ — электромагнитная постоянная времени этой же цепи; $k_H =$

$= m_H m_r$ — коэффициент усиления системы по контуру обратной связи по напряжению ($m_H = k_y / r_{OH}$ — коэффициент усиления усилителя по контуру обратной связи по напряжению; $m_r = k_r / R_{в. г}$ — коэффициент усиления генератора по напряжению); $\theta = \frac{J_{дв} R_{я}}{k_e k_M}$ — электромеханическая постоянная времени электропривода; $k_T =$
 $= m_r m_r R_{ш}$ — коэффициент усиления системы по контуру обратной связи по току при разомкнутой цепи обратной связи по напряжению (m_r — коэффициент усиления усилителя по контуру обратной связи по току);

$$\omega_2 = \frac{k_p U_{вх} + k_T U_{отс}}{(1 + k_H) k_e}; \quad (2.31)$$

$k_p = m_s m_r$ — коэффициент усиления разомкнутой системы «усилитель — генератор» ($m_s = k_s / r_{O3}$ — коэффициент усиления независимой обмотки усилителя); $U_{вх}$ — напряжение на входе независимой обмотки.

При работе электропривода на первом, т. е. жестком, участке экскаваторной характеристики ($I_{я} < I_{отс}$), когда $i_{от} = 0$, в уравнениях (2.29) и (2.30) $k_T = 0$.

И тогда решение этих уравнений при нулевых начальных условиях дает:

$$I_{я} = I_{к} \frac{\theta}{T_{г. экв} - \theta} (e^{-t/T_{г. экв}} - e^{-t/\theta}); \quad (2.32)$$

$$\omega_{дв} = \omega_{у} \left(1 - \frac{T_{г. экв}}{T_{г. экв} - \theta} e^{-t/T_{г. экв}} + \frac{\theta}{T_{г. экв} - \theta} e^{-t/\theta} \right), \quad (2.33)$$

где $\omega_{у} = \frac{k_p U_{вх}}{(1 + k_H) k_e}$ — установившееся значение скорости;

$I_{к} = \frac{k_p U_{вх}}{(1 + k_H) R_{я}}$ — ток короткого замыкания.

При работе электропривода на втором, т. е. мягком, участке экскаваторной характеристики ($I_{я} > I_{отс}$), когда $i_{от} > 0$, решение уравнений (2.29) и (2.30) при начальных для этого участка условиях дает

$$I_{я} = \frac{I_{01} - I_{отс} p_2}{p_1 - p_2} e^{p_1 t} - \frac{I_{01} - I_{отс} p_1}{p_1 - p_2} e^{p_2 t}; \quad (2.34)$$

$$\omega_{дв} = \omega_2 + \frac{\omega_{01} - (\omega_{01} - \omega_2) p_2}{p_1 - p_2} e^{p_1 t} - \frac{\omega_{01} - (\omega_{01} - \omega_2) p_1}{p_1 - p_2} e^{p_2 t}, \quad (2.35)$$

где I_{01} и ω_{01} — начальные для второго участка условия, определяемые из расчета первого участка; p_1 и p_2 — корни характеристического уравнения

$$T_{г. экв} \theta p^2 + \left[T_{г. экв} + \theta + \theta \frac{k_T}{(1 + k_H) R_{я}} \right] p + 1 = 0.$$

Пользуясь уравнениями (2.32)...(2.35), можно рассчитать электромеханические характеристики электроприводов экскаваторов, а так как приводными двигателями у них являются двигатели постоянного тока параллельного возбуждения, у которых момент пропорционален току, то расчетные характеристики в ином масштабе будут механическими характеристиками. Чтобы учесть нелинейности генератора, электродвигателя и возбудителя, входящих в состав электроприводов экскаваторных механизмов, расчет механических характеристик иногда производят графическим путем [13].

Торможение экскаваторных электроприводов может быть *динамическое* (при отключенной задающей обмотке)

и *противовключением* (при изменении направления тока в задающей обмотке). При переводе привода в режим динамического торможения напряжение на выходе усилителя (когда включена только обмотка напряжения), а затем и ток якоря изменяют знак, вследствие чего и происходит торможение. При торможении *противовключением* аналогичные процессы протекают с большей интенсивностью.

2.7. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И ЭЛЕКТРОПРИВОД АВТОНОМНЫХ МЕХАНИЗМОВ

К автономным механизмам относится группа *транспортирующих механизмов*, имеющих собственные источники электроэнергии в виде аккумуляторных батарей или другие источники энергии, от которых питаются приводные электродвигатели их колес и другие потребители энергии. Эта группа включает в себя электрокары, электропогрузчики, электроштабелеры и электромобили, причем электропогрузчики и электроштабелеры могут иметь различные захватные приспособления, почему и используются не только для перемещения, но и для укладки различных грузов (рулонов бумаги, пакетов на судах или наземных складах и т.д.).

С помощью транспортирующих механизмов перемещают грузы по горизонтальному или несколько наклонному пути, поэтому расчет и выбор приводных электродвигателей для них производят подобно крановым механизмам перемещения.

Основными эксплуатационными характеристиками этих механизмов являются: грузоподъемность, скорость перемещения и располагаемый запас электроэнергии. Для электрокар, электропогрузчиков и электроштабелеров эти характеристики практически унифицированы и составляют соответственно: грузоподъемность 0,75...3,0 т, 0,5...2,0 т и 0,5...1,0 т; скорость перемещения первых — до 7...20 км/ч, а последних — 5...8,5 км/ч (высота подъема грузов электроштабелерами составляет ~4,5 м при возможности поворота вил с грузом в пределах $\pm 90^\circ$). Что касается электромобилей, то в настоящее время их характеристики еще не унифицированы, так как созданы только небольшие опытные партии или отдельные экземпляры их.

Длительность работы транспортирующих механизмов или расстояние, на которое они могут перемещаться без подзарядки, ограничены запасом энергии собственных источников. Для продолжения работы необходимо эти источники пополнять энергией (заряжать аккумуляторные батареи), что требует строительства зарядных станций. Одним из решающих эксплуатационных показателей электрокаров, электропогрузчиков, электроштабелеров и особенно электромобилей является *удельная емкость* их аккумуляторных батарей. В связи с этим в настоящее время ведутся большие работы по созданию и внедрению автономных источников с большими удельными показателями: внедряются щелочные аккумуляторные батареи с удельной энергоемкостью 70...100 Вт · ч/кг; создана серия марганцево-воздушно-цинковых элементов, позволивших повысить удельную энергоемкость до 180 Вт · ч/кг; разрабатываются источники тока с литиевым анодом, а также никель-цинковые системы, превосходящие по удельным показателям традиционные свинцовые аккумуляторы и позволяющие производить более быструю зарядку их, и т. д. Кроме того, перспективными и экономичными источниками для электромобилей являются: электрохимические генераторы — топливные элементы, к.п.д. которых достигает 80%, а также воздушно-кислородные и особенно водородно-воздушные генераторы. Внедрение названных источников электроэнергии существенно расширит возможности автономных механизмов и особенно электромобилей. Поскольку в настоящее время еще широко применяются кислотные и щелочные аккумуляторные батареи, рассмотрим их основные характеристики.

Из соображений безопасности напряжение кислотных и щелочных батарей, как правило, не превышает 65 В и только в некоторых случаях оно может быть больше. Основными характеристиками аккумуляторных батарей, кроме напряжения, являются: *отдача по току* (отношение ампер-часов разряда к ампер-часам заряда) и *отдача по энергии*, которые для кислотных аккумуляторных батарей составляют соответственно 0,80...0,85 и 0,70...0,75, а для щелочных — несколько меньше. После того как электроэнергия аккумуляторных батарей будет израсходована (батареи разрядятся), их следует подзарядить от специального источника. Основным

показателем разряда батарей является напряжение на зажимах каждого элемента, которое для кислотных (свинцовых) батарей составляет около 1,8 В, а для щелочных (железно-никелевых) — 1,6 В. Заряд аккумуляторных батарей осуществляется при постоянной силе тока или при постоянном напряжении либо по мере заряда ток уменьшается. При постоянной силе тока в течение всего заряда неизменный ток поддерживается до начала усиленного газовыделения, при постоянном напряжении — напряжение все время поддерживается неизменным. Значения зарядных тока и напряжения берутся по паспортным данным аккумуляторных батарей. Напряжение в процессе заряда для свинцовых аккумуляторов меняется от 1,8 до 2,5...2,8 В на элемент, а для железно-никелевых (щелочных) — соответственно от 1,6 В до 1,8...1,9 В.

Электрокары, электропогрузчики, электроштабелеры и электромобили приводятся в движение одним или двумя электродвигателями постоянного тока, которые питаются от аккумуляторных батарей. Электродвигатели используются закрытого или взрывозащищенного исполнения (могут быть и двигатели-колеса). Для электрокара и электропогрузчиков они обычно последовательного возбуждения с секционированными обмотками возбуждения. Так, например, у электропогрузчиков серии ЭПВ-1 они взрывозащищенные, последовательного возбуждения, на напряжение 30 В, типа ДКВ-908, один мощностью 2,5 кВт при ПВ = 25%, а у электропогрузчиков серии ЭП каждое ведущее колесо имеет свой двигатель мощностью 1,5 кВт на напряжение 40 В. Применяются также двигатели параллельного возбуждения и ведутся работы по использованию двигателей переменного тока. Кроме того, в последнее время разрабатываются и выпускаются тележки, которые приводятся в движение с помощью линейного двигателя. При движении эти тележки находятся на высоте около 8 мм от пола. Эта высота обеспечивается магнитной подушкой, создаваемой постоянными магнитами. Такие тележки бесшумны, расходуют мало электроэнергии и могут перевозить груз, в несколько раз превышающий их собственную массу.

Электрические схемы управления транспортирующими механизмами элементарно просты — *контроллер*

ные. Регулирование их скорости при использовании двигателей последовательного возбуждения осуществляется как изменением сопротивления в цепи якоря, так и переключением обмоток возбуждения с последовательного соединения на параллельное. Так, например, для уменьшения скорости электропогрузчика ЭПВ-1 увеличивается сопротивление в цепи якоря двигателя (последнее нежелательно), а для увеличения скорости производится переключение секций его обмоток с последовательного соединения на параллельное. На электропогрузчиках ЭП-0601 двухдвигательный электропривод регулируется импульсным регулятором типа РИТ-2-150-40/2492 (24...40 В, ток в одном выходе 150 А).

Управление двигателями этих механизмов осуществляется рукояткой левой руки (рукоятка контроллера), а управление всем механизмом — рукояткой правой руки, с помощью которой производится поворот колес. Ножная педаль используется для освобождения или наложения тормоза.

Для электромобилей, кроме аккумуляторных батарей, создаются дизель-генераторные источники, которые будут питать электродвигатели колес.

ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И ЭЛЕКТРОПРИВОД МЕХАНИЗМОВ НЕПРЕРЫВНОГО ТРАНСПОРТА, КОМПРЕССОРОВ, НАСОСОВ И ВЕНТИЛЯТОРОВ

3.1. ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕХАНИЗМОВ НЕПРЕРЫВНОГО ТРАНСПОРТА И РАСЧЕТ НЕОБХОДИМОЙ МОЩНОСТИ ИХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Общие характеристики. К группе *механизмов непрерывного транспорта* относятся всевозможные конвейеры (ленточные, роликовые, цепные и пр.), канатные дороги, эскалаторы, многокабинные лифты, трубопроводный транспорт и т. д. Эти механизмы используются для перемещения грузов или пассажиров в строго определенном направлении и на ограниченное расстояние. Их рабочие органы приводятся в движение от электродвигателей непосредственно или через механические передачи, а в трубопроводном транспорте для создания повышенного давления используются компрессоры, электроприводы которых рассматриваются в § 3.3

Конвейеры и ПТС. Конвейеры состоят из тягового и несущего органов с поддерживающими и направляющими элементами, ведущего (приводного) и ведомого барабанов либо звездочек, натяжного устройства, загрузочного и разгрузочного устройств и рамы. Они комплектуются из стандартных или нормализованных узлов и деталей. Типы и конструкции конвейеров определяются характером перемещаемых грузов, их массой, требуемыми скоростями и ускорениями и пр. Так, например, сыпучие и кусковые грузы перемещаются ленточными, пластинчатыми, ковшовыми, скрепковыми (с повышенной температурой 250...450° С) и винтовыми конвейерами или элеваторами; штучные и тарные грузы — роликовыми или подвесными либо толкающими конвейерами; для перемещения пассажиров используются пластинчатые и ленточные конвейеры и т. д. При перемещении грузов эти механизмы обычно являются составной частью технологических циклов.

Так, например, конвейеры нашли широкое применение на открытых разработках угля, руды и строительных материалов, в поточных линиях различных технологических производств и пр. О масштабах их использования можно судить хотя бы по предприятиям черной и цветной металлургии, а также угольной промышленности, где в 1976 г. было занято более 45 тыс. ленточных конвейеров, перевозящих около 2 млрд. т груза.

Комплекс механизмов и емкостей в системе единого технологического процесса, предназначенных для хранения, транспортировки и переработки материалов в потоке, образует *поточно-транспортную систему* (ПТС). Основные требования к ПТС регламентированы «Руководящими указаниями по проектированию схем управления механизмами поточно-транспортных систем» (ДС14-79) [14].

ПТС используются в различных отраслях народного хозяйства как применительно к определенной отрасли или производству, так и унифицированно с большим количеством избираемых механизмов, тракторов и значительной протяженности линий управления. Примером ПТС является современный бетонный завод, структурная схема одного из элементов которого изображена на рис. 3.1. Из рисунка следует, что в этом случае в ПТС работают последовательно и параллельно не только конвейеры, но и механизмы, обеспечивая приготовление бетона из его компонентов.

Канатные дороги. Имеют особое значение в горных местностях, так как они менее чувствительны к снежным бурям, гололедам и дождям, чем наземный транспорт, существенно сокращают путь и создают комфорт для местного населения, применяются в спортивных и туристских лагерях, а также в местах отдыха. Поэтому они все больше используются для перевозки как грузов (грузовые дороги), так и пассажиров (пассажирские дороги), а в Грузии имеется специальное управление «Грузканатдор» по проектированию, строительству и эксплуатации канатных дорог.

Различают два вида канатных дорог: *маятниковые* и *кольцевые*. Первые обычно имеют два вагона (кабины) движущиеся навстречу друг другу с одновременной остановкой на конечных станциях и последующим реверсированием для движения в обратном направлении, вто-

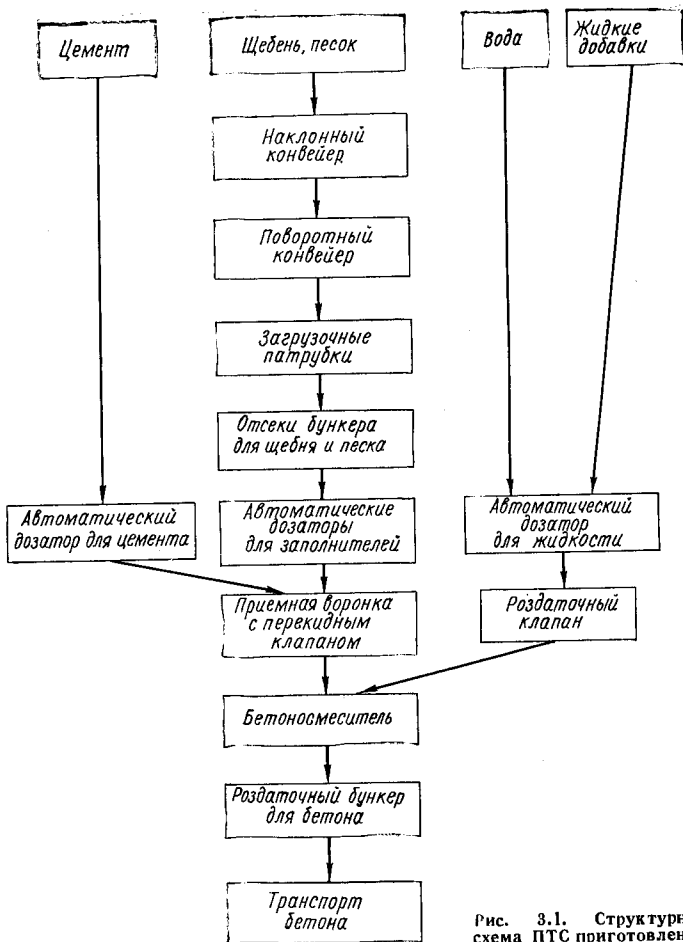


Рис. 3.1. Структурная схема ПТС приготовления бетона

рые — непрерывно движущиеся канаты и автоматическое присоединение подвесных вагонов или пассажирских сидений.

Грузовые канатные дороги используются для транспортировки сыпучих и инертных материалов (известняка, песка, глины и т. п.), а также для транспортировки отходов производства (породы, огарка, фосфогипса и др.) на предприятиях цветной и черной металлургии, в уголь-

ной и химической промышленности, в промышленности стройматериалов и т. д. Поэтому по назначению они разделяются на *транспортные* и *отвальные*. Первые имеют протяженность до 11500 м, производительность до 380 т/ч, вместимость кузовов вагонеток до 1,6 м³ и скорость до 3,15 м/с; вторые — соответственно до 575 м, 130 т/ч, 5 м³, 10 м/с [28].

Пассажирские канатные дороги служат для перевозки людей и разделяются на *буксировочные* (например, типов ВЛ-200 и ВЛ-100-2) и *кресельные*. Первые имеют протяженность до 1500 м, производительность до 900 чел./ч и скорость каната до 2,5 м/с; вторые — соответственно до 2500 м, 600 чел./ч, 2,5 м/с — зимой и до 480 чел./ч и 1,64 м/с — летом [28].

Эскалаторы и многокабинные лифты. Используются, как правило, для перевозки пассажиров в двух направлениях: первые — при массовом потоке пассажиров (станции метро, торговые центры и т. д.), вторые — в административных зданиях при вместимости кабины до двух человек. Так, например, до ноября 1977 г. в московском метрополитене действовало 338 эскалаторов, работавших по 20 ч в сутки.

Трубопроводный транспорт. Используется для перемещения различных тел. При твердых — применяются пневмоконтейнерные системы непрерывного действия, примером чего является кольцо из труб большого диаметра, соединяющее гравийный карьер и фабрику Сычевского горно-обогатительного комбината, где сжатый воздух гонит по трубам вагоны-контейнеры, перевозя за год около 8 млн. т груза и высвобождая таким образом большое количество людей (около 200 чел.) и автомашин (27-тонных около 40). В Ленинграде для перевозки твердых бытовых отходов по трубам диаметром 1,22 м на протяжении 11 км будут курсировать шесть составов из шести вагонов-контейнеров каждый, которые будут двигаться (толкаться) под действием сжатого воздуха (благодаря этому высвобождается около 300 автомашин). Еще одним примером подобной системы является контейнерный трубопровод протяженностью 30 км вблизи Самотлорского месторождения нефти, предназначенный для транспортировки песка к строительным площадкам.

Для перемещения жидких грузов или газа по трубам используется высокое давление, создаваемое компрессорными станциями, электроприводы которых рассматриваются в § 3.3. В настоящее время проводятся работы и уже созданы экспериментальные полигоны по безнапорному трубопроводу для транспортировки грузов, при использовании которого значительно удешевляется как сам трубопровод, так и контейнеры для перемещения груза.

Расчет необходимой мощности. Необходимая мощность приводных электродвигателей механизмов непрерывного транспорта зависит от режимов их работы, конструкций механизма и заданной производительности. Для транспортирующих механизмов, работающих в длительных установившихся режимах, расчет необходимой мощности и выбор электродвигателей производят по статическим нагрузкам, т. е. по необходимому усилию тянущего органа или неуравновешенности и скорости, а для механизмов, работающих в повторно-кратковременном режиме, — методом последовательных приближений. Для конвейеров и канатных дорог с непрерывным тяговым органом расчет необходимой мощности двигателей производят с использованием результатов механических расчетов лент, канатов либо цепей, т. е. статическую нагрузку для них определяют, исходя из диаграмм тяговых усилий, как на рис. 3.2:

$$P_{ст} = \frac{(F - T_0) v \cdot 10^{-3}}{\eta}, \quad (3.1)$$

где F — наибольшее усилие на набегающем участке тягового органа, Н; T_0 — предварительное натяжение, Н; v — скорость перемещения тягового органа, м/с; η — к.п.д. приводного механизма.

При работе протяженных конвейеров вблизи приводной станции создаются значительные усилия на набегающем участке тягового органа, что требует упрочения механической части конвейера, и особенно его тягового органа (ленты или цепи). Чтобы избежать этого упрочения, устанавливают несколько приводных двигателей, рассредоточенных по длине ленты или цепи. В этом случае в тяговом органе создается усилие, пропорциональное статическому сопротивлению одного участка, и тяговый орган не передает усилия для привода всего

конвейера. Места установки двигателей выбирают так, чтобы сумма тяговых усилий всех двигателей приблизительно равнялась усилию одного электродвигателя (если бы использовался только один двигатель).

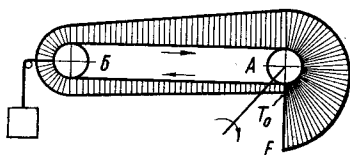


Рис. 3.2. Диаграмма тяговых усилий в ленточном конвейере

Применяя многодвигательный привод, как правило, удается повысить эксплуатационные показатели конвейеров, так как при их недогрузках может работать лишь часть двигателей.

Роликовые конвейеры можно разделить на *транспортные* (для транспортировки штучных изделий) и *рабочие* (у рабочих клетей прокатных станов). Необходимая мощность электродвигателей для привода первых обуславливается только статическими режимами. Такие конвейеры бывают с *групповым* или с *индивидуальным* приводом роликов. Групповой привод применяется обычно при тяжелых режимах работы конвейера, а индивидуальный — при легких. Расчет статической нагрузки двигателей группового привода роликовых конвейеров сводится к расчету необходимого горизонтального усилия

$$F = F_1 + F_2 = \frac{m_p \mu dg}{D} z + mg \frac{\mu d + 2f}{D},$$

где $F_1 = \frac{m_p \mu dg}{D} z_0$ — усилие, которое нужно преодолеть

для вращения негруженных роликов, Н; $F_2 = \frac{mfg}{R} +$

$+(m + m_p) z_r \frac{\mu dg}{D}$ — усилие, которое нужно создать,

преодолевая трение качения груза и трение скольжения груженных роликов, Н; m — масса перемещаемого груза, кг; z , z_0 , z_r , D и R — соответственно общее количество, число негруженных и груженных роликов (шт.), диаметр и радиус роликов, см; m_p — масса ролика, кг; d — диаметр цапф роликов, см; μ — коэффициент трения скольжения в цапфах (при подшипниках скольжения $\mu = 0,03 \dots 0,15$; при подшипниках качения $\mu = 0,001 \dots 0,01$); f — коэффициент трения качения заготовки о ролик ($f = 0,1 \dots 0,15$), см.

Если конвейер имеет наклон с высотой подъема H (м) и производительность Q (т/ч), то выражение для определения необходимой мощности двигателя будет состоять из двух слагаемых:

$$P_{ст} = \frac{Fv_{ном} \cdot 10^{-3}}{\eta} + \frac{gQH \cdot 10^{-3}}{3600} = \frac{Fv_{ном} \cdot 10^{-3}}{\eta} + \frac{QH}{367}, \quad (3.2)$$

где $v_{ном}$ — линейная скорость перемещения груза, м/с; η — к.п.д. механической передачи, а для горизонтальных конвейеров второе слагаемое в (3.2) обращается в нуль.

Расчет необходимой мощности электродвигателя для канатной дороги производится по наибольшему усилию на канате с учетом скорости его движения. Кроме того, необходимо учитывать увеличение моментов при разгонах и торможениях электропривода за счет значительных инерционных масс.

Необходимая мощность двигателя для электропривода лестничного полотна и поручней эскалатора при заданной скорости их движения ($v_{ном}$, м/с), определяется усилиями, которые нужно создать для их движения [17]. Эти усилия находят на основании тяговых расчетов по участкам трассы полотна и поручней, подобных расчетам конвейеров с тяговыми органами. Поэтому, зная из этих расчетов усилия на тяговых звездочках от полотна $F_{л}(H)$ и поручней $F_{п}(H)$, необходимую мощность двигателя можно рассчитать по формуле

$$P'_{ст} = \frac{(F_{л} + F_{п}) v_{ном} \cdot 10^{-3}}{\eta}$$

или, с учетом возможной перегрузки, равной 1,35, — по формуле

$$P_{ст} = 1,35 \frac{(F_{л} + F_{п}) v_{ном} \cdot 10^{-3}}{\eta}, \quad (3.3)$$

где η — к.п.д. передачи от главного вала к валу электродвигателя, который зависит от высоты эскалатора и при $H = 10$ м составляет $\eta \approx 0,6$, а при $H = 65$ м — $\eta \approx 0,8$.

Необходимую мощность на валу тяговых звездочек при работе эскалатора на подъем можно определить и по эмпирическим формулам [17]:

а) для движения лестничного полотна со скоростью $v_{\text{ном}}$ (м/с)

$$P''_{\text{ст}} = g \frac{(2qHv_{\text{ном}}c + qHv_{\text{ном}}) \cdot 10^{-3}}{\eta},$$

где q — нагрузка от пассажиров, кг/м (около 215 кг/м); H — высота эскалатора, м; c — опытный коэффициент сопротивления движению лестничного полотна по трассе, который зависит от производительности и длины эскалатора ($c = 0,1 \dots 0,15$); g — ускорение свободного падения;

б) для движения поручней с той же скоростью $v_{\text{ном}}$ (м/с)

$$P'''_{\text{ст}} = \frac{[4(q' + q_{\text{п}})c_1 + 2q']Hv_{\text{ном}}g \cdot 10^{-3}}{\eta},$$

где q' и $q_{\text{п}}$ — нагрузка от пассажиров (при облакачивании каждый пассажир создает нагрузку 4,2...5 кг/м на один поручень) и поручней (около 2,5 кг/м каждого поручня); c_1 — опытный коэффициент сопротивления движения поручней по трассе, зависящий от высоты эскалатора ($c_1 = 1$ при $H = 10$ м и $c_1 = 0,3$ при $H = 65$ м).

Полная мощность с учетом величины c_1 будет

$$P_{\text{ст}} = 1,22 \frac{qHv_{\text{ном}}g \cdot 10^{-3}}{\eta}. \quad (3.3')$$

Из тяговых расчетов и приведенных формул следует, что необходимая мощность приводного двигателя эскалатора зависит как от назначения (коэффициенты c , c_1 и q , q' , $q_{\text{п}}$), так и от высоты эскалатора. Например, для эскалатора ЭЗ-5 высотой $H = 5$ м установленная мощность короткозамкнутого двигателя составляет 14 кВт, тогда как для эскалатора ЛТ-2 высотой $H = 65$ м мощность двигателя с фазным ротором — 200 кВт [17].

На основании результатов расчета выбирают главный электродвигатель эскалатора, который затем проверяют по условиям максимальной нагрузки. Кроме главного электродвигателя, на эскалаторах устанавливается вспомогательный двигатель небольшой мощности, обеспечивающий медленное движение лестничного полотна (со скоростью около 0,03 м/с) в негруженном состоянии (в период ремонтных работ, осмотров, чистки и смазывания деталей).

В многокабинных лифтах количество кабин обычно равно удвоенному числу этажей плюс два. Необходимую мощность электродвигателей можно определить по формуле

$$P_{ст} = \frac{mgnv_{ном} \cdot 10^{-3}}{\eta}, \quad (3.4)$$

где m — масса пассажиров в кабине, кг; n — число неравновешенных грузеных кабин на поднимающейся ветви; $v_{ном}$ — скорость движения кабины, м/с; η — механический к.п.д.

3.2. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ЭЛЕКТРОПРИВОДАМ МЕХАНИЗМОВ НЕПРЕРЫВНОГО ТРАНСПОРТА, И УПРАВЛЕНИЕ ИМИ

Основные требования, предъявляемые к электроприводам механизмов непрерывного транспорта, зависят от вида или группы механизмов и их роли в технологическом цикле. Для каждого вида они свои, а в пределах данной группы эти требования зависят от назначения механизма.

Конвейеры и ПТС. Конвейеры, в том числе роликовые, как правило, не требуют регулирования скорости. Только некоторые из них для изменения темпа работы должны обеспечивать неглубокое регулирование, однако для того чтобы уменьшить перенапряжения в лентах или цепях протяженных конвейеров, а также снизить вероятность буксования лент на приводных барабанах, в период разгона пуск их должен быть плавным. Поэтому схемы управления ими должны обеспечивать плавный автоматический или ручной разгон электроприводов и, например, для длинных ленточных конвейеров разработано специальное устройство плавного пуска их, существенно снижающее или исключая указанные явления [14]. Конвейеры, как правило, работают в тяжелых условиях (запыленность, застывание смазки, агрессивная среда и т. д.) и пускаются в ход при больших моментах нагрузки (иногда более номинального); поэтому надежность их электроприводов должна быть повышенной.

Требования к ПТС изложены в руководящих указаниях (ДС14—79) по проектированию схем управления механизмами поточно-транспортных систем [14]. Основные положения этих требований можно свести к следующему. Схемы управления ПТС должны составляться так, чтобы пуск и остановка каждого (или группы) из механизмов осуществлялись как дистанционно с диспетчерского пункта, так и имели бы местное управление (для опробования и ремонтных работ). Пуск и остановка ПТС должны, как правило, производиться с заданной временной последовательностью. Во избежание завалов остановка ПТС производится в направлении, совпадающем с движением грузопотока, а пуск — в обратном направлении. Остановка ПТС осуществляется, как правило, после ее полной разгрузки, однако аварийные остановки могут быть и при загруженной системе. В целях безопасности пуск ПТС производится только после оповещения обслуживающего персонала о предстоящем пуске.

Канатные дороги. Для обеспечения плавного разгона и необходимой точности остановки вагонов или кабин маятниковых дорог их электроприводы должны обеспечивать регулирование скорости (для кольцевых дорог это необязательно). Оба вида канатных дорог имеют большие инерционные массы; поэтому, чтобы усилия в канате не превышали допустимых, а мощность приводных двигателей не была бы завышенной, разгон и торможение их должны производиться плавно, с ускорением, обусловленным временем разгона данной дороги, которое оговаривается в техническом задании и в среднем составляет 10...30 с. Электроприводы канатных дорог должны отвечать требованиям «Правил устройств и эксплуатации грузовых (или пассажирских) подвесных канатных дорог» (ГПКД или ППКД) Госгортехнадзора СССР и их техническим условиям.

Эскалаторы и многокабинные лифты. Эти механизмы не требуют регулирования скорости, а их значения ограничены. Оптимальные скорости эскалаторов метрополитенов определяются безопасностью перевозки пассажиров, а также возможностью обеспечения необходимой пропускной способности станций и находятся в пределах 0,5...1,0 м/с. Кроме того, ограничение скорости эскалаторов вызвано еще и тем,

что пассажиры не успевают занимать каждую ступень лестничного полотна. В многокабинных лифтах скорость ограничена 0,3 м/с по условиям безопасности, так как кабины движутся непрерывно. Пуск или остановка эскалаторов может осуществляться при наличии на полотне пассажиров; поэтому для обеспечения безопасности ускорение полотна эскалаторов при пуске не должно превышать 0,6...0,75 м/с², при торможении рабочим тормозом — 0,6...1,0 м/с², а аварийным тормозом — 2 м/с² [17].

Ко всем электроприводам механизмов, предназначенных для перевозки пассажиров, предъявляются повышенные требования по надежности, поскольку авария их может привести к человеческим жертвам.

Управление механизмами непрерывного транспорта. Конвейеры и ПТС. Для управления механизмами непрерывного транспорта, не требующими регулирования скорости, обычно используют магнитные или тиристорные пускатели, а для управления механизмами, требующими регулирования скорости, — различные магнитные станции, ТСУ — Р, системы «генератор — двигатель», «тиристорный преобразователь — двигатель».

В электроприводах конвейеров обычно применяют асинхронные двигатели как с вращающимся ротором, так и линейные (ЛАД). При использовании ЛАД упрощается кинематическая схема привода и обеспечивается равномерное распределение усилия вдоль тягового органа механизма. Приводы с ЛАД либо осуществляют простые циклические движения, либо выполняются замкнутыми с датчиками положения и скорости. Хотя энергетические характеристики ЛАД (к.п.д. и $\cos \varphi$) хуже, чем машин с вращающимся ротором, но отсутствие механических передач повышает надежность механизмов и исключает потери, которые были бы в редукторах, что в достаточной мере компенсирует эти недостатки.

Если используется несколько двигателей в приводах конвейеров, то необходимо обеспечить равномерное распределение нагрузки между ними, для чего требуется максимальное совпадение механических характеристик двигателей, что проще достигается у двигателей с фазным ротором или у двигателей постоянного тока параллельного возбуждения. Иногда для этой цели приме-

няется импульсный способ, регулирования частоты вращения. В многодвигательных конвейерах и в том случае, когда конвейеры работают параллельно или последовательно, требуется согласованное вращение их двигателей, которое обеспечивается различными схемными решениями: использованием синхронного вала, каскадных схем и т. д.

Как уже отмечалось выше, сочетание различных механизмов (в том числе конвейеров) с другими механизмами образует поточно-транспортную систему (ПТС). Порядок реализации требований к ПТС иллюстрирует принципиальная схема управления и сигнализации, показанная на рис. 3.3, а [26]. ПТС включает в себя пять последовательно работающих конвейеров, схема электропривода одного из которых изображена на рис. 3.3, б. Принципиальная схема управления, приведенная на рис. 3.3, а, позволяет осуществить местный и централизованный режимы управления, выбираемые универсальным переключателем *1УП*. При выборе режима местного управления (*1УП* в положении *М*) контакты 2...5 универсального переключателя отключают схему дистанционного управления, а через контакт 1 подается питание на реле местного управления *РМУ*, замыкающими контактами которого подготавливаются пусковые цепи двигателей (рис. 3.3, б). Их пуск и остановка в этом случае производятся кнопками «Пуск» и «Стоп» по месту установки двигателей.

При дистанционном управлении с пульта диспетчера производственного процесса (*1УП* в положении *Д2*) замыкаются контакты 2 и 4 универсального переключателя, а при управлении с пульта линии конвейеров (*1УП* в положении *Д1*) — контакты 3 и 5. Нажимая на кнопку *1КД* или *2КД*, диспетчер подает командный импульс на пуск линии конвейеров. При этом получают питание реле пуска линии *1РПЛ* и *2РПЛ*. Контакты *1РПЛ* шунтируют пусковую кнопку (*1КД* или *2КД*), включают сирены предупредительной сигнализации, предупреждающие обслуживающий персонал о предстоящем пуске, и подают питание на реле времени *РВ*. Последнее с некоторой выдержкой времени своим контактом *РВ1* включает промежуточное реле управления *БРП* конвейера, расположенного последним по направлению грузопотока.

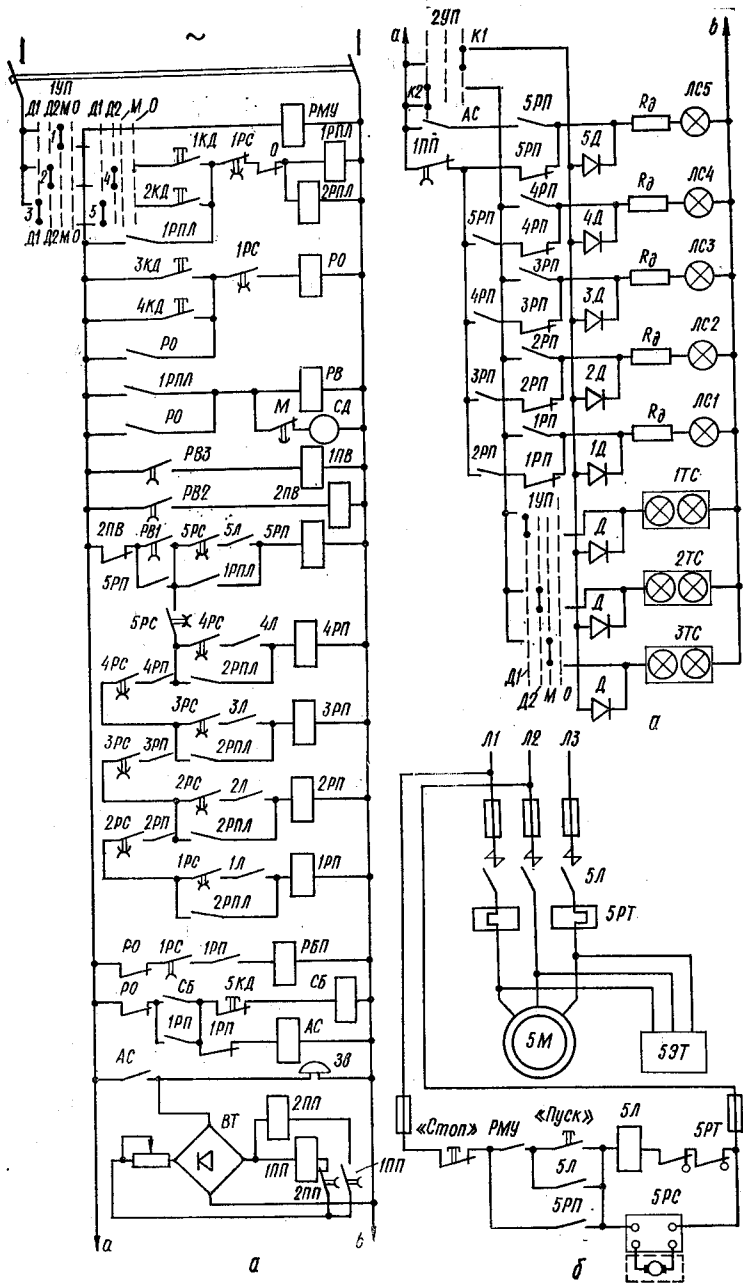


Рис. 3.3. Принципиальная схема управления и сигнализации ПТС (а) и силовая схема электропривода одного конвейера (б)

Реле *5РП* включает контактор *5Л* (рис. 3.3, б), который в свою очередь включает двигатель *5М*. После того как двигатель достигнет номинальной частоты вращения, установленное на конвейере реле скорости *5РС* одним контактом зашунтирует контакт пускового реле *1РПЛ* в цепи *5РП*, а другим включит промежуточное реле *4РП*. Реле *4РП* подаст питание на контактор *4Л*, который включит двигатель *4М* второго механизма. Наличие реле скорости позволяет пустить последующий конвейер только по достижении предыдущим своей полной скорости.

Включение двигателей следующих конвейеров осуществляется аналогично. После пуска последнего конвейера его реле скорости *1РС* отключит пусковые реле *1РПЛ* и *2РПЛ*, которые разомкнут контакты в цепях промежуточных реле *1РП...5РП*, что обеспечивает своевременное отключение промежуточных реле как при отключении соответствующих им контакторов, так и при пробуксовке ленты конвейера, когда снижается скорость ленты и отключаются соответствующие реле скорости. Таким образом, реле скорости позволяет осуществить контроль за пуском механизмов. Остановка ПТС производится в направлении, совпадающем с движением грузопотока. Схема построена таким образом, чтобы избежать остановки конвейера до его полной разгрузки. Это условие реализуется в схеме следующим образом. Диспетчер, нажимая на кнопку остановки *3КД* (или *4КД*), подает питание на реле остановки *РО*, контакты которого шунтируют кнопки остановки, включают реле времени *РВ* и выключают реле блокировки пуска питателя *РБП*. Последнее отключает питатель, подающий материал на головной конвейер, прекращая этим подачу груза.

С выдержкой времени, достаточной для полной разгрузки всех конвейеров, реле времени своим контактом *РВ2* подает питание на реле остановки линии *2ПВ*, которое отключает промежуточные реле *1РП...5РП*, а те, в свою очередь, отключают контакторы *1Л...5Л* соответствующих приводных двигателей.

Схемой предусмотрена также возможность дистанционной аварийной остановки без предварительной разгрузки линии. Для этого необходимо установить универсальный переключатель *1УП* в нейтральное поло-

жение 0. Остановка любого двигателя возможна также с помощью кнопок «Стоп», расположенных вдоль линии.

Эффективность дистанционного управления во многом зависит от полноты информации о состоянии и работе механизмов, которой располагает диспетчер. Эту информацию он получает с помощью схем, обеспечивающих световую и звуковую сигнализацию.

Схема, изображенная на рис. 3.3, а, обеспечивает сигнализацию режимов управления посредством световых табло *1ТС* — управление диспетчером линией конвейеров, *2ТС* — управление диспетчером производственным циклом, *3ТС* — местный режим управления, а также сигнализацию работы конвейеров лампами *ЛС1...ЛС5*. Кроме световой сигнализации, схемой предусмотрена аварийная сигнализация звонком *Зв*. Перед пуском линии диспетчер проверяет исправность сигнальных ламп, включая контактом *К1* универсального переключателя *2УП* табло *1ТС...3ТС* и лампы *ЛС1...ЛС5*. При этом лампы из-за наличия в их цепи диодов горят часто мигающим светом, что необходимо для отличия режима проверки сигнализации от рабочего режима. Затем переключатель *2УП* диспетчер устанавливает в положение «Работа», замыкая контакт *К2*. По мере пуска двигателей загораются и продолжают гореть ровным светом на протяжении всего времени работы конвейеров соответствующие лампы *ЛС5...ЛС1*. Лампы питаются по цепи контакт *К2* переключателя *2УП* — контакт соответствующего промежуточного реле пуска — добавочный резистор *R_д*. Диспетчер может отключить сигнальные лампы, для чего достаточно перевести переключатель *2УП* в нейтральное положение, но аварийная сигнализация при этом сохраняется.

При аварийном выключении какого-либо конвейера, как уже указывалось, отключаются все конвейеры, предшествующие аварийному по движению грузопотока, и, следовательно, отключается конвейер, расположенный в начале линии. При этом промежуточное реле *1РП* включает реле аварийной сигнализации *АС*, которое включает звонок *Зв* и импульсный датчик — пульс-пару, состоящую из двух реле времени *1ПП* и *2ПП*. Реле *1ПП* питается через выпрямительный мост *ВТ* и включает реле *2ПП*. Контакт реле *1ПП* периодически подает напряжение на шину аварийной сигнали-

зации, вследствие чего лампы аварийно-отключенных конвейеров мигают с небольшой частотой.

В случае аварийной остановки, например, третьего конвейера в соответствии со схемой блокировочных связей отключаются предыдущие конвейеры — второй и первый, остальные продолжают работать. При этом лампа ЛСЗ остановившегося конвейера получит прерывистое питание и начнет мигать. Лампы ЛС1 и ЛС2 погаснут, а ЛС4 и ЛС5 будут гореть ровно. Для наглядности сигнальные лампы обычно встраивают в мнемонические знаки, изображающие механизмы на щите диспетчера. Диспетчер может отключить аварийный сигнал с помощью кнопки БКД, контакты которой разрывают цепь катушки сигнального блокировочного реле СБ.

К а н а т н ы е д о р о г и. Управление электроприводами канатных дорог осуществляется с помощью магнитных станций или по системе «генератор — двигатель» либо «тиристорный преобразователь — двигатель». Выбор схем управления в значительной степени определяется режимами работы двигателей, которые могут работать в двигательном или генераторном режимах либо со знакопеременной нагрузкой. Для работы в двух первых режимах чаще всего используются асинхронные двигатели с контактными кольцами и многоступенчатыми пусковыми реостатами (с рабочими и предварительными ступенями), управление которыми осуществляется контроллерами, подобными электроприводам крановых механизмов, а контроль за интенсивностью разгона (для получения допустимого ускорения) — электромагнитным реле времени. Сопротивления ступеней пускового реостата рассчитываются на длительный режим работы, так как имеет место затяжной пуск, а в период опробования, наладки и ремонта дороги необходимо обеспечивать длительное движение ее на низких скоростях. Режимы работы приводных двигателей дорог со знакопеременной нагрузкой не являются строго фиксированными, поэтому возникают трудности настройки аппаратуры электроприводов двигателей с фазным ротором. В этих и других ответственных случаях применяются системы «генератор — двигатель» и «тиристорный преобразователь — двигатель».

Для предотвращения возможных несчастных случаев на канатных дорогах пуск их может быть произведен

только по распоряжению диспетчера, который запрашивает сведения о готовности участков дороги к пуску и, только получив подтверждения готовности, дает сигнал на включение. Остановка канатных дорог с активной нагрузкой производится вначале динамическим торможением, а при скорости около 10% номинальной накладываются тормозные колодки. Интенсивность торможения осуществляется по заданной программе в функции скорости и пути, а во времени — обычно контролируется установками реле времени. Помимо электрического торможения канатных дорог встречаются системы, где торможение осуществляется механическими тормозами, управляемыми с помощью электрогидравлических толкателей или центробежных устройств.

Эскалаторы и многокабинные лифты. В электроприводах эскалаторов применяют двигатели переменного тока напряжением 380 В с короткозамкнутым (при высоте подъема до 15 м) или с фазным ротором. Управление двигателем с фазным ротором осуществляется пусковыми реостатами с соответствующими элементами защиты и блокировки. Нагрузка эскалаторов в течение суток колеблется в широких пределах (от максимума до 15...20% расчетной); поэтому для поддержания более высокого коэффициента мощности в схеме управления предусматривается узел автоматического переключения статорной обмотки двигателя с треугольника (при номинальном режиме) на звезду (при малой нагрузке) и обратно (при переключении на звезду максимальный момент двигателя уменьшается в три раза).

Многокабинные лифты работают в установленном режиме без каких-либо требований к точности остановки. Поэтому для привода их используют электродвигатели переменного тока с короткозамкнутым или с фазным ротором, а управление осуществляют типовыми пускателями или станциями.

Выше уже указывалось, что схемы управления электродвигателями механизмов непрерывного транспорта, как правило, типовые или подобные им. Исключение составляет схема управления электродвигателем эскалатора, которую рассмотрим более подробно. Один из ее вариантов показан на рис. 3.4, где двигатель представлен в развернутом виде обмотками статора и ротора [26].

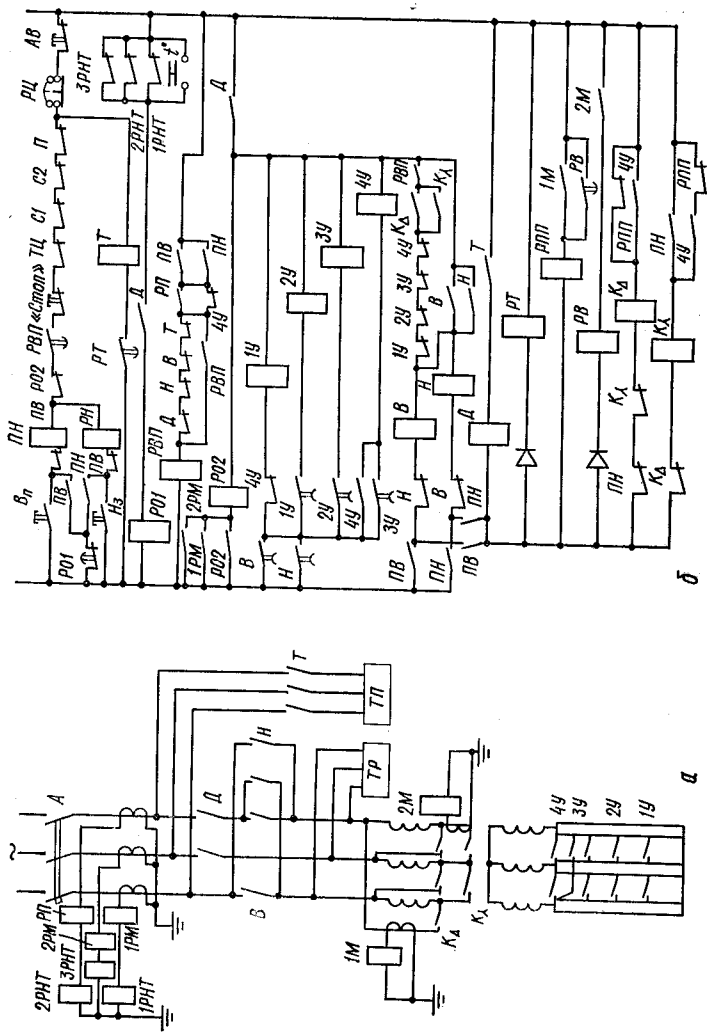


Рис. 3.4. Принципиальная схема управления электроприводом эскалятора

Направление вращения двигателя (подъем или опускание) определяется включением контакторов B или H ; контактор D в цепи статора отключает двигатель при несрабатывании контакторов направления (B или H); включение обмоток статора двигателя в треугольник (Δ) или звезду (λ) при снижении нагрузки производится контакторами K_{Δ} или K_{λ} . Контроль за нагрузкой двигателя осуществляется токовыми реле $1M$ и $2M$, подключаемыми к главной цепи (первое — при соединении обмоток статора в треугольник, второе — при соединении их в звезду). Пуск двигателя производится в четыре ступени контакторами $1У...4У$ с независимыми выдержками времени. К трем первым из них пристроены маятниковые реле времени. Остановка эскалатора при нормальном отключении двигателя происходит под действием тормозов: рабочего $ТР$ и предохранительного $ТП$. Кроме того, имеется механический аварийный тормоз, который срабатывает при нарушении связи между двигателем и валом механизма. Все тормоза снабжаются масляными демпферами, что обеспечивает плавность торможения.

В схеме предусмотрены три вида защиты двигателя (от перегрузки, коротких замыканий и обрыва фаз), которые обеспечиваются соответственно реле $РП$, $1РМ$, $2РМ$ и $1РНТ$, $2РНТ$, $3РНТ$. Контроль за температурой подшипников осуществляется термическим реле t° . Для контроля за состоянием механического и электрического оборудования служат блокировочные и защитные аппараты, контакты которых вводятся в одну из блокировочных цепей (промежуточные реле $PO1$ и $PO2$, реле контроля пуска $РВП$ и центробежное реле $РЦ$; конечные выключатели гребенок ступеней $C1$ и $C2$, поручней $П$, тяговых цепей $ТП$ и т. д.).

Работа схемы на подъем или опускание не имеет принципиальных различий и осуществляется включением промежуточных контакторов $ПВ$ или $ПН$ кнопками $B_{п}$ или $H_{с}$. Контроль за процессом пуска двигателя производится с помощью $РВП$, выдержка времени которого на отключение выбирается несколько больше, чем время разгона двигателя при нормальных условиях. В случае затягивания пуска $РВП$ отключает контакторы $ПВ$ или $ПН$, в результате чего двигатель отключается от сети.

Работу схемы рассмотрим на примере пуска двигателя, например вперед. В предположении, что автомат *A* включен, питание в схему управления подано и замыкающие контакты блокировок включены, порядок работы при этом будет следующий: а) при нажатии кнопки *B_п* срабатывает контактор *ПВ*, замыкая свои контакты в цепях *РВП* и контактора *B*, цепях контактора *Д* и ниже и размыкая контакт в цепи контактора *ПН*; б) срабатывают *РВП* и *РТ*, а также контактор *K_Δ*, который, замыкая свои контакты *K_Δ*, совместно с *РВП* включает обмотки статора в треугольник и контактор *B* (*РВП* блокирует при этом контакты *Д*, *H*, *B* и *T*, а *РТ* подключает цепи контакторов *T* и *K_Δ*, размыкая контакты в цепи *K_Δ*); в) контакторы *B* и *T* срабатывают: первый замыкает контакты в главной цепи, в цепи контакторов ускорений *1У...4У*, блокирует остальные контакты в своей цепи и размыкает цепи контактора *H*; второй замыкает контакты в цепи *ТП* и контактора *Д*; г) *ТП* растормаживается, а контактор *Д*, замыкая контакты в главной цепи, подает питание на обмотки статора, затем растормаживается *ТР*, двигатель начинает разгоняться и срабатывает реле *1М*; д) контакторы *1У...4У* по очереди срабатывают с выдержкой времени каждый, двигатель разгоняется до номинальной частоты вращения, а реле *1М*, сработав, включает *РПП*, которое замыкает свой контакт в цепи контактора *K_Δ*, оставляя его включенным при размыкании контакта *4У*, и размыкает контакт в цепи контактора *K_Δ*.

Если нагрузка невелика (ниже 40% номинальной), то реле *1М* отключит свои замыкающие контакты в цепи *РПП*, которое, в свою очередь, разомкнет цепь *K_Δ* и замкнет цепь *K_Δ*. Обмотки статора двигателя при этом переключаются с треугольника на звезду. При увеличении нагрузки (более 50% номинальной) происходит переключение обмоток статора со звезды на треугольник. Нормальная остановка двигателя осуществляется нажатием кнопки «Стоп», а в аварийных случаях разрывается один из блокировочных контактов в цепи контактора *ПВ*, электродвигатель отключается от сети и накладываются тормоза. При скорости эскалатора 130% номинальной срабатывает центробежное реле. В аварийных ситуациях эскалатор можно выключить нажатием кнопки *АВ*.

3.3. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КОМПРЕССОРАХ, НАСОСАХ И ВЕНТИЛЯТОРАХ И РАСЧЕТ НЕОБХОДИМОЙ МОЩНОСТИ ИХ ПРИВОДНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Общие сведения. К числу механизмов, наиболее распространенных на промышленных предприятиях, электрических станциях, шахтах, гидротехнических сооружениях, в коммунальном хозяйстве городов, относятся компрессоры, насосы и вентиляторы, которые потребляют около 25% электроэнергии, вырабатываемой в стране [13]. Особое место занимают они в связи со строительством и эксплуатацией протяженных газо- и нефтепроводов, со строительством и эксплуатацией больших оросительных систем, так как при перекачке большого количества нефти, газа и воды требуются компрессоры и насосы большой подачи, а следовательно, и большой установленной мощности приводных электродвигателей, которая колеблется от долей единиц до десятков тысяч киловатт, например для турбокомпрессоров — до 18 000 кВт, насосов — до 73 000 кВт и вентиляторов — до 5000 кВт. Давления, развиваемые этими механизмами, и их подача колеблются в широких пределах: например, для гидропрессования используются компрессоры, создающие давление до 1600 МПа, а на Славянской ГРЭС установлены два насоса подачей по 3000 м³/ч при напоре 35 МПа. Другие примеры: в 1979 г. для водоснабжения г. Москвы четыре насосных станции ежедневно подавали по 5500 тыс. м³ воды, для вентиляции московского метро в 1978 г. продувалось до 400 млн. м³ воздуха в сутки.

По принципу работы рассматриваемые механизмы бывают *поршневые*, *центробежные* и *ротационные* (последние из-за их сложности и малой надежности применяются редко). Поршневые механизмы в большей своей части работают на низких скоростях, а центробежные и ротационные — на средних и высоких. Компрессоры бывают обычно поршневого типа одно- и многоступенчатые, а насосы и вентиляторы — центробежного или ротационного типов. В зависимости от назначения эти механизмы используют с постоянной или с переменной подачей.

Мощность на валу механизмов поршневого типа в зависимости от угла поворота кривошипа изменяется для

каждого поршня по синусоидальному закону. Заполнение графика нагрузки при изменении угла поворота $P_{ст} = f(\alpha)$ зависит от конструкции механизма и характеризуется степенью неравномерности, т. е. отношением максимальной мощности к средней. Степень неравномерности равна π/k , где k — число подач (нагнетаний) за полный ход поршня. Так, для компрессоров простого действия $k = 1$, двойного — $k = 2$ и т. д. Статическая мощность на валу механизмов центробежного типа ($P_{ст}$) при отсутствии противодавления и потерь холостого хода связана с частотой вращения n кубической зависимостью, т. е. $P_{ст} \equiv n^3$ (механизмы с вентиляторной характеристикой). Однако в реальных установках показатель степени колеблется в пределах 2,5...6, что необходимо учитывать при соответствующих расчетах.

Расчет необходимой мощности двигателей. Этот расчет для механизмов поршневого типа может быть произведен по индикаторной диаграмме сжатия. Процесс сжатия осуществляется по *адиабатическому* (без отдачи тепла), *изотермическому* (при постоянной температуре) законам или по *политропе* (между указанными законами). Работа при сжатии для политропического процесса выражается так:

$$A = \frac{m}{m-1} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right],$$

где m — показатель политропы, определяемый из уравнения $p v^m = \text{const}$; p_1 и p_2 — начальное и конечное давления, Па; v_1 — начальный удельный объем газа, или объем 1 кг газа при всасывании, м³.

Необходимую мощность приводного электродвигателя можно определить по формуле

$$P = \frac{AQ \cdot 10^{-8}}{\eta_n \eta},$$

где Q — подача компрессора, м³/с; η_n и η — индикаторный к.п.д. компрессора при реальном рабочем процессе и к.п.д. механической передачи.

Теоретические индикаторные диаграммы существенно отличаются от действительных вследствие: наличия мертвого пространства в цилиндрах; наличия сопротивления при открывании клапанов (как следствие, получается пониженное давление при всасывании воздуха);

перетечки воздуха из-за неплотности в клапанах, поршневых кольцах и т. д. При теоретических расчетах этими факторами обычно пренебрегают; получение же истинных индикаторных диаграмм не всегда возможно. Поэтому при определении мощности на валу компрессора пользуются приближенной формулой

$$P = \frac{Q}{\eta_n \eta} \frac{A_n + A_a}{2}, \quad (3.5)$$

где исходными данными являются подача компрессора, работа изотермического (A_n) и адиабатического (A_a) сжатым 1 м^3 атмосферного воздуха (Дж/м^3) до давления p_2 и к.п.д. компрессора. Для механизмов поршневого типа, работающих на постоянный напор, мощность на валу и частота вращения находятся в прямой зависимости, так как поршню при каждом ходе приходится преодолевать постоянное среднее усилие независимо от частоты вращения. Поэтому, если задан график нагрузки $M = f(t)$, можно определить средний момент, пользуясь которым при известной номинальной скорости механизма можно рассчитать необходимую мощность и по ней предварительно выбрать электродвигатель. Выбранный электродвигатель должен быть проверен по методу Савинкова [4].

Необходимая мощность приводного электродвигателя вентилятора центробежного типа определяется по заданной подаче Q и суммарному напору H . Расчетную формулу можно получить, исходя из энергии, которую нужно сообщить движущемуся газу для обеспечения заданных значений Q и H , т. е.

$$W = \frac{mv^2}{2} = \frac{Fv^3\gamma}{2g}. \quad (3.6)$$

Поскольку подача $Q = Fv$ ($\text{м}^3/\text{с}$), а напор $H = \frac{v^2\gamma}{2g}$ (Па), необходимая мощность на валу приводного двигателя будет

$$P = \frac{Fv^3\gamma \cdot 10^{-3}}{2g\eta_n\eta} = \frac{QH \cdot 10^{-3}}{\eta_n\eta}. \quad (3.7)$$

В этих выражениях $m = \frac{Fv\gamma}{g}$ — масса перекачиваемого газа за секунду, кг/с; v — скорость движения

газа, м/с; γ — удельный вес его, Н/м³; $g = 9,81$ — ускорение свободного падения, м/с²; F — площадь сечения трубопровода, м².

Для центробежных насосов выражение (3.7) имеет вид

$$P = \frac{Q(H + \Delta H) \gamma_1 \cdot 10^{-8}}{\eta_n \eta}, \quad (3.8)$$

где $H = H_r + \frac{p_2 - p_1}{\gamma_1}$ — суммарный напор, м; H_r — геодезический напор, равный сумме высот всасывания и нагнетания, м; p_1 и p_2 — соответственно давление в резервуарах, куда и откуда перекачивается жидкость; ΔH — потеря напора в магистрали (м), которая зависит от площади сечения труб, качества их обработки, профиля трубопровода и т. д.; γ_1 — удельный вес жидкости, Н/м³.

Таким образом, основными характеристиками центробежных механизмов являются зависимости развиваемого напора H и его подачи Q . Эти зависимости обычно даются заводами-изготовителями в виде графиков $H = f(Q)$ для различных угловых скоростей вращения механизмов. Подобные кривые изображены на рис. 3.5 (кривые 1...4), где H и Q выражены в относительных единицах, причем $H_{ном}$ и $Q_{ном}$ — напор и подача при номинальной скорости, а H и Q — при текущем значении угловой скорости.

Характеристики магистралей, на которые работают центробежные механизмы, обуславливаются теми же величинами — подачей Q и суммарным напором H , необходимым для подъема жидкости на заданную высоту и преодоления избыточного давления на выходе из нагнетательного трубопровода, а также для преодоления гидравлических сопротивлений, и описываются следующим уравнением (кривая 6 на рис. 3.5):

$$H = H_{ст} + kQ^2. \quad (3.9)$$

При отсутствии противодействия (идеальная магистраль) уравнение (3.9) будет иметь вид

$$H = kQ^2$$

(кривые 5,5' и 5'' на рис. 3.5). В этих уравнениях k — коэффициент, определяемый характером магистрали,

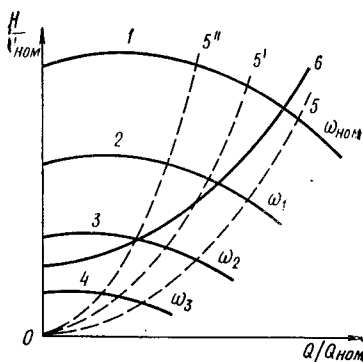


Рис. 3.5. Кривые зависимости напора центробежного насоса от его подачи при различных угловых скоростях вращения механизмов ($\omega_{НОМ} > \omega_1 > \omega_2 > \omega_3$)

а регулирование их частоты вращения осуществлять с помощью тиристорных станций управления (ТСУ — Р), то подобно крановым механизмам габаритная мощность двигателей должна быть больше рассчитанной. Это превышение при длительном режиме работы механизмов можно определить по кривым рис. 3.6 или вычислить по формулам [14]:

а) при постоянном моменте нагрузки

$$\lambda \geq \frac{1,1(D-1+s_{НОМ})}{s_{НОМ}(D\beta_0+1-\beta_0)\varepsilon'}; \quad (3.10)$$

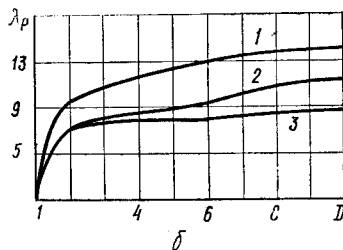
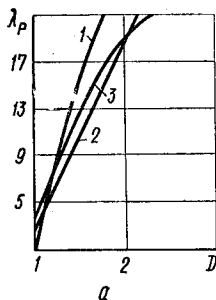


Рис. 3.6. Кривые зависимости необходимого увеличения установленной мощности короткозамкнутых электродвигателей типов АО2 (1), АОГ (2) и МТК (3) от диапазона их регулирования при длительном режиме работы механизмов:

а — постоянный момент нагрузки; б — вентиляторный момент нагрузки

и $H_{ст}$ — статический напор. Таким образом, если построить в одних координатных осях характеристики механизма и магистрالی, то по точкам их пересечения можно определить необходимую мощность приводного электродвигателя механизма при данной скорости его вращения.

Если для привода механизмов предполагается использовать асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором,

б) при вентиляторном моменте нагрузки

$$\lambda \geq \frac{1,1 (0,2 + 0,8/D^2) (D - 1 + s_{\text{ном}})}{s_{\text{ном}} (D\beta_0 + 1 - \beta_0) \varepsilon'} \quad (3.11)$$

Здесь D — диапазон регулирования; $s_{\text{ном}}$ — номинальное скольжение двигателя; β_0 — коэффициент теплопередачи (для двигателей типа АО2 — $\beta_0 = 0,35$; АОГ — $\beta_0 = 0,4$); $\varepsilon' = \frac{\varepsilon}{\varepsilon + \beta_0 (1 - \varepsilon)}$ — приведенная продолжительность включения; $\varepsilon = t_p/T$ — относительная продолжительность включения; t и T — длительность работы и время цикла.

3.4. СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ КОМПРЕССОРОВ, НАСОСОВ И ВЕНТИЛЯТОРОВ

Ряд применяемых компрессоров, насосов и вентиляторов не требует регулирования скорости. К ним относятся вентиляционные установки цеховых помещений, пожарные насосы, насосы некоторых водопроводных магистралей, подавляющее большинство заводских компрессорных установок и др. Поэтому для привода их используют асинхронные или синхронные (обычно при мощностях выше 300 кВт) двигатели переменного тока, управление которыми осуществляют магнитными или бесконтактными пускателями (при малых мощностях), стандартными либо специальными пусковыми станциями.

Для асинхронных и синхронных двигателей такие станции предусматривают следующие способы пуска: *прямой*, *реакторный* и *автотрансформаторный*. В качестве примера прямого пуска синхронного двигателя на рис. 3.7 изображена одна из возможных принципиальных схем управления им. Схема включает разбединитель P ; масляный выключатель B ; синхронный двигатель M с обмоткой возбуждения; тиристорный возбудитель T , выполненный по трехфазной нулевой схеме с согласующим трансформатором Tr и блоками управления, регулирования и защиты $БУРиЗ$; тиристорные ключи $G1$ и $G2$ с их пусковыми цепями $Д1$, $Ст1$ и $Д2$, $Ст2$; пусковой резистор R_n (его сопротивление в несколько раз выше сопротивления обмотки возбуждения, напри-

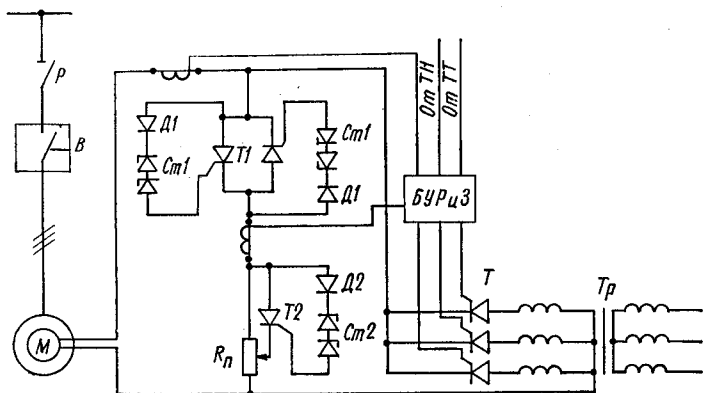


Рис. 3.7. Принципиальная схема управления синхронным двигателем с тиристорным возбудителем

мер в четыре и более раз). Схема обеспечивает автоматическую подачу возбуждения при пуске двигателя в функции тока статора и скольжения, автоматическую форсировку возбуждения при снижении напряжения сети (до заданного значения), автоматическое гашение поля возбуждения двигателя при его отключении, защиту от коротких замыканий системы возбуждения, от затяжного пуска и от перенапряжений на тиристорах возбуждения.

Полагая, что трансформатор T_p подключен к сети (работает в режиме холостого хода), а разъединитель P замкнут, для пуска двигателя достаточно включить выключатель B . Тогда под действием пускового тока $БУРцЗ$ блокируют тиристорный возбудитель T , а на обмотку статора подается напряжение сети, которое индуцирует в обмотке возбуждения напряжение, достаточное для того, чтобы сработали стабилитроны $C_{м1}$ и через диоды $D1$ открыли тиристоры $T1$, подключив обмотку возбуждения к пусковому резистору R_n . Таким образом, разгон двигателя осуществляется при замкнутой обмотке возбуждения на пусковой резистор R_n . Для форсированного разгона двигателя при большем токе в обмотке возбуждения служит второй ключ $T2$, который работает подобно первому, только он шунтирует часть сопротивления резистора R_n (такое включение обмотки возбуждения двигателя снижает перенапряжение на ней и тиристорах возбудителя).

Управление подачей возбуждения синхронному двигателю осуществляется в функции тока статора и скольжения, т. е. при достижении двигателем подсинхронной частоты вращения: ток статора снижается, блокировка возбудителя снимается, ключи $T1$ и $T2$ закрываются. Система автоматики *БУРиЗ* подает команду на подключение возбудителя и подачу повышенного тока возбуждения в обмотку двигателя (все эти операции согласованы во времени). После того как двигатель вошел в синхронизм, ток возбуждения снижается до номинального значения. При отключении масляного выключателя система автоматики *БУРиЗ* переводит тиристоры возбудителя в инверторный режим, обеспечивая тем самым гашение поля двигателя, а затем возвращение схемы в исходное состояние.

При выборе системы возбуждения синхронного двигателя рассматриваемых механизмов нужно иметь в виду, что уже разработаны и выпускаются комплектные тиристорные возбудительные устройства серий *КТУ*, *ТВУ*, *ТВУ2* и *ВУ* для синхронных двигателей мощностью от 100 до 12 500 кВт [14]. Этими устройствами и следует пользоваться при проектировании электроприводов компрессоров, насосов и вентиляторов указанных мощностей.

В ряде случаев требуется существенное либо незначительное регулирование подачи жидкости или газа. Такое регулирование можно осуществить изменением количества параллельно работающих механизмов, изменением сопротивления магистрали (дроселирование), включением промежуточных емкостей, комбинацией перечисленных способов или изменением частоты вращения механизмов. Выбор способа регулирования обуславливается технико-экономическими расчетами, но наибольший интерес представляет регулирование подачи механизмов путем изменения частоты вращения. Для этого применяют регулируемые электроприводы переменного или постоянного тока. Поскольку диапазон изменения скорости механизмов обычно не превышает 2:1, предпочтение чаще отдается приводам переменного тока с асинхронными двигателями, а частота вращения изменяется за счет регулирования их скольжения. Такое регулирование можно осуществить: а) изменением частоты вращения

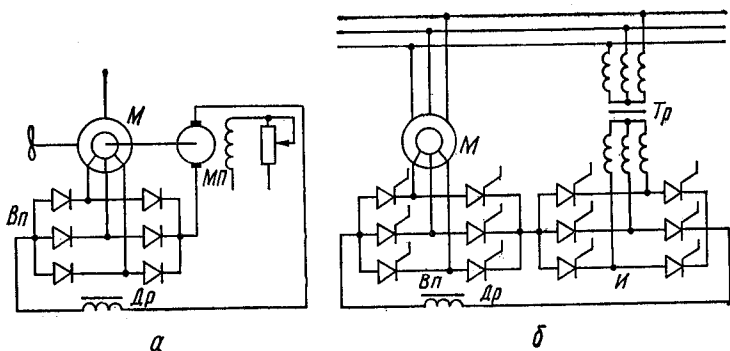


Рис. 3.8. Принципиальные схемы АВК

(вниз от синхронной), которое сопровождалось бы потерями энергии скольжения в роторной цепи; б) таким образом, чтобы энергия скольжения (за исключением потерь в роторной цепи) возвращалась бы в питающую сеть либо передавалась бы на вал асинхронного двигателя.

Из применяемых схем к первому способу регулирования можно отнести схемы с муфтами скольжения (гидромуфтами или асинхронными муфтами), реостатным регулированием и т. д. Можно показать, что в этих случаях наибольшие потери в роторной цепи асинхронного двигателя, работающего на механизм с вентиляторной характеристикой, соответствует частоте вращения на 33% ниже синхронной и составляют 15...17% номинальной мощности на валу механизма. Поэтому такое регулирование можно рекомендовать лишь для установок небольшой мощности.

В установках средней и большой мощности следует использовать регулирование частоты вращения приводных электродвигателей путем полезного расхода энергии скольжения. Этот способ в настоящее время реализуется с помощью схем асинхронно-вентильных каскадов (АВК), когда изменение частоты вращения двигателей производится изменением встречной э. д. с., вводимой в роторную цепь асинхронного электродвигателя от постороннего источника или инвертора, входящего в комплект АВК. На рис. 3.8 показаны две принципиальные схемы АВК: схема на

рис. 3.8, а обеспечивает постоянную мощность, а на рис. 3.8, б — постоянный момент.

В состав первой схемы входят асинхронный двигатель M , неуправляемый выпрямитель Bn и машина постоянного тока $MП$, расположенная на одном валу с M . Более совершенной является вторая схема, где вращающаяся машина заменена статическим преобразователем I , выполненным на тиристорах.

Для понимания физических процессов регулирования частоты вращения электродвигателя рассмотрим эквивалентную схему замещения роторной цепи асинхронного двигателя, показанную на рис. 3.9, а, и векторную диаграмму АВК, изображенную на рис. 3.9, б. Здесь параметры статора имеют индекс 1, ротора — индекс 2; \dot{E}_d — э.д.с., вводимая в ротор от источника постоянного тока, которым являются $MП$ (рис. 3.8, а) или полупроводниковый преобразователь I (рис. 3.8, б). Из векторной диаграммы видно, что ток ротора, участвующий в создании вращающего момента асинхронного двигателя ($M = c\Phi I_2 \cos\varphi_2$), определяется векторной разностью или суммой э.д.с. ротора \dot{E}_2 и добавочной э.д.с. \dot{E}_d . В общем случае эти векторы сдвинуты между собой на угол φ_2 (наличие этого угла определяется коммутационными процессами выпрямителя, а его значение зависит от нагрузки двигателя, т. е. тока ротора I'_2 : при $I'_2 = 0$ угол $\varphi_2 \approx 0$, а при $I'_2 \approx I'_{2\text{ном}}$, когда наибольший угол коммутации для трех-

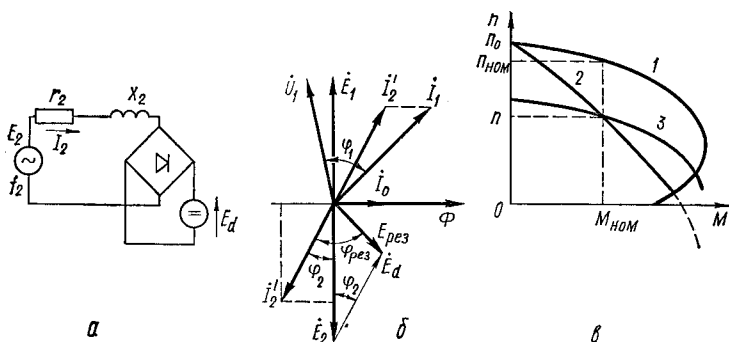


Рис. 3.9. К рассмотрению физических основ регулирования частоты вращения электродвигателя с использованием АВК

фазных мостовых схем $\gamma \leq \pi/3$, $\varphi_2 \approx \gamma/2$. Из векторной диаграммы следует также, что при $E_d > 0$ результирующая э.д.с. в цепи ротора $E_{рез}$ будет меньше э.д.с. ротора, наводимой со стороны статора, а следовательно, и ток I_2' будет меньше (так как $I_2 \equiv \dot{E}_{рез}$). Таким образом, при изменении тока возбуждения МП или угла открывания тиристорov инвертора I изменяется э.д.с., которая направлена встречно с выпрямленным напряжением ротора, т. е. встречно э.д.с. ротора E_2 . Вследствие этого изменяется и ток ротора I_2 , так что равновесие электромагнитного момента двигателя и момента нагрузки наступает при другой частоте вращения двигателя.

В схемах АВК энергия скольжения ротора асинхронного двигателя (за вычетом потерь) потребляется МП или передается в сеть, а механические характеристики, представленные на рис. 3.9, в, приобретают характер кривой 3 вместо естественной кривой 1 или (при реостатном регулировании) кривой 2. Для характеристики 3 режим холостого хода будет определяться равенством э.д.с. $\dot{E}_2 \approx \dot{E}_d$, т. е.

$$kE_{2ном} s = E_d.$$

Заменив в этом уравнении скольжение $s = 1 - n/n_c$, получим следующую зависимость частоты вращения электродвигателя от встречной э.д.с.:

$$n = \frac{kE_{2ном} - E}{kE_{2ном}} n_c, \quad (3.12)$$

где n_c — синхронная частота вращения асинхронного двигателя; k — коэффициент схемы включения роторного выпрямителя.

Уравнение (3.12) математически подтверждает тот факт, что, регулируя добавочную э.д.с. E_d , можно регулировать частоту вращения асинхронного двигателя M .

Если в схеме, подобной рис. 3.8, а, падением напряжения в машине постоянного тока и в выпрямительном блоке пренебречь, то можно получить следующую зависимость между скольжением асинхронного двигателя s и током возбуждения вспомогательной машины по-

стоянного тока $МП$ (последняя предполагается ненасыщенной): $sU_0 = U = E_{МП} = k_B i_B (1 - s)$, откуда

$$s = \frac{k_B i_B}{U_0 + k_B i_B}, \quad (3.13)$$

где U_0 и U — соответственно выпрямленные напряжения при неподвижном роторе ($\alpha = 0$) и при текущем значении скольжения ($\alpha > 0$); k_B — коэффициент пропорциональности между током возбуждения i_B и э.д.с. вспомогательной машины $E_{МП}$.

Из уравнения (3.13) видно, что скольжение пропорционально току возбуждения вспомогательной машины постоянного тока, т. е., изменяя ток возбуждения, можно регулировать частоту вращения асинхронного двигателя.

В схемах с постоянным моментом добавочная встречная э.д.с. E_d генерируется в виде противо-э.д.с. инвертора, которая на стороне выпрямленного тока определяется следующим выражением:

$$E_d = k_2 E_{2TP} \cos \beta, \quad (3.14)$$

где k_2 — коэффициент схемы включения тиристор инвертора (для трехфазной мостовой схемы $k_2 = 2,34$); E_{2TP} — фазное напряжение вторичной обмотки трансформатора инвертора (или сети, если трансформатор отсутствует); β — угол открывания тиристор инвертора.

Если выражение (3.14) подставить в уравнение (3.12), то полученный результат подтвердит ранее сделанное утверждение о том, что при изменении угла открывания тиристор инвертора β будет изменяться частота вращения асинхронного двигателя M . В схемах, подобных рис. 3.8, б, регулирование частоты вращения двигателя принципиально можно осуществлять путем изменения угла открывания тиристор выпрямительной ($Вп$) и инверторной ($И$) групп, поскольку выпрямительный и инверторный мосты выполняются на управляемых вентилях, что позволяет производить двухзонное регулирование частоты вращения — выше и ниже синхронной. При частоте вращения выше синхронной инверторная группа переводится в выпрямительный режим, а выпрямительная — в инверторный. Однако в целях умень-

шения потерь регулирование частоты вращения целесообразнее осуществлять только путем изменения угла открывания тиристорov инвертора, когда углы открывания тиристорov выпрямителя равны нулю ($\alpha = 0$). Последнее обстоятельство позволяет выполнить роторный выпрямитель на диодах, что и делается в большинстве современных каскадных схем. Подобные вентильные каскады могут быть выполнены и с преобразователями без промежуточного звена постоянного тока. Тогда роль выпрямителя и инвертора должен играть преобразователь с непосредственной связью.

Для схем АВК с постоянной мощностью, если представить соотношения мощностей через моменты и соответствующие им угловые скорости, можно получить следующее уравнение:

$$M_{МП} = M_M \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_{\max}} = M_M \left(1 - \frac{1}{D}\right), \quad (3.15)$$

где $D = \omega_{\max}/\omega_{\min}$ — диапазон регулирования угловой скорости каскадной установки.

Из этого уравнения видно, что при увеличении диапазона регулирования должен увеличиваться необходимый номинальный момент вспомогательной машины МП, т. е. габаритная мощность данной машины с увеличением диапазона регулирования приближается к мощности асинхронного двигателя M , что, безусловно, нецелесообразно. Поэтому подобные вентильные каскады целесообразно применять только при ограниченных диапазонах регулирования, не превышающих $D \leq 2 : 1$. С понижением скорости механические характеристики таких каскадов изменяются и становятся более жесткими.

Пуск асинхронного двигателя в рассмотренных каскадных схемах (рис. 3.8) осуществляется с помощью пусковых реостатов (на схемах не показаны), которые после его разгона отключаются и двигатель подключается к выпрямителю в первом случае подключением якоря машины МП, а во втором — включением инвертора I в сеть. В схемах, подобных рис. 3.8, б, асинхронный двигатель можно пустить в ход и без пускового реостата путем постепенного изменения угла открывания тиристорov инвертора.

На основе схемы АВК с постоянным моментом разработана и выпускается единая серия преобразователей типа

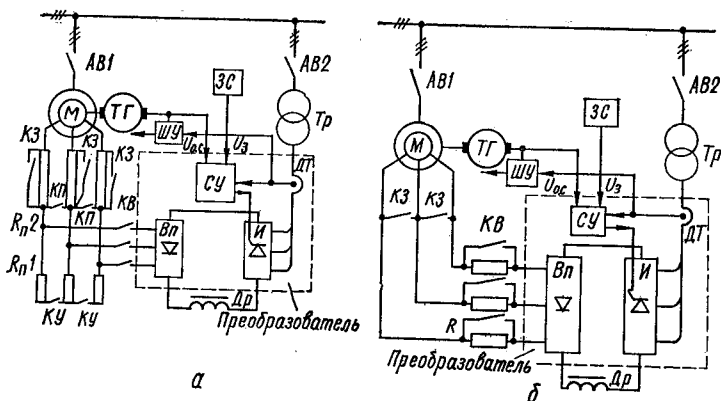


Рис. 3.10. Принципиальные схемы преобразователей типа ПАВК:

ТГ — тахогенератор; ЗС — задатчик угловой скорости; ШУ — станция управления; СУ — система управления; АВ1, АВ2 — автоматические выключатели; М — двигатель; Вп — выпрямитель; И — инвертор; ДТ — датчик тока; Др — дроссель; КЗ, КП, КУ, КВ — контакторы станции управления; $R_{п1}$, $R_{п2}$ — пусковые резисторы

ПАВК и станций управления к ним серии ЩШУ для плавного регулирования частоты вращения двигателей. Серия предусматривает два варианта схем — с частичным и с полным диапазоном регулирования частоты вращения. Она не предусматривает торможения и может быть использована применительно к электродвигателям с фазным ротором единых серий. В качестве примера рассмотрим более подробно принципиальные схемы, представленные на рис. 3.10.

Серия охватывает диапазон мощностей от 250 до 5000 кВт [14]. Преобразователи рассчитаны на номинальные токи фазы ротора 630, 1250 и 2500 А и линейные напряжения инвертора 230, 400 и 400×2 В. При работе в замкнутой системе электропривода эти преобразователи позволяют получить (в зависимости от мощности) диапазон регулирования частоты вращения от 10 : 1 до 1,5 : 1 при жесткости механических характеристик не выше 10%. Используя преобразователи для электроприводов мощностью до 1000 кВт, можно получить любой вышеуказанный диапазон регулирования, а мощностью от 1000 до 3200 кВт — только от 1,5 : 1 до 2 : 1 и мощностью 5000 кВт — до 1,5 : 1. Станции управления в таких электроприводах предназначены для пуска и остановки

асинхронных двигателей приводов длительного режима работы, автоматического подключения их к системе АВК, а также для защиты двигателей от перегрузок и токов короткого замыкания, причем станции выпускаются на низкое (до 500 В) или высокое (до 1300 В) напряжение ротора.

В электроприводах с АВК и частичным диапазоном регулирования частоты вращения (рис. 3.10, а) пуск двигателя до нижней частоты вращения обеспечивается с помощью двух ступеней пусковых резисторов, включенных в роторную цепь (первая — введены резисторы $R_{п1}$, $R_{п2}$ и контакты $KУ$ замкнуты, вторая — введен резистор $R_{п2}$ и контакты $KП$ замкнуты). При разгоне электродвигателя до частоты вращения, при которой напряжение на его кольцах становится равным номинальному напряжению преобразователя, ротор двигателя подключается к преобразователю и отключается от пусковых резисторов (контакты $KЗ$ и $KВ$ замкнуты). Преобразователь при необходимости может обеспечить дальнейший разгон и регулирование частоты вращения двигателя.

В электроприводах с полным диапазоном регулирования частоты вращения (рис. 3.10, б) пуск электродвигателя осуществляется непосредственно преобразовательным устройством. Однако для снятия перенапряжений, которые могут возникнуть в преобразователе в момент подключения статора двигателя к сети, в его роторную цепь последовательно с преобразователем включается резистор R , который после подключения статора шунтируется контактами $KВ$.

Если в инверторе АВК имеется два последовательно включенных моста, то для повышения коэффициента мощности привода используется несимметричное управление ими. Кроме того, необходимо иметь в виду, что максимальная частота вращения двигателя из-за наличия дополнительного сопротивления в его роторной цепи будет меньше той, которую он имел бы, если бы обмотка ротора была замкнута накоротко.

В качестве примера использования АВК можно назвать шахту «Мушкетовская-Вертикальная» в Донбассе, на которой с 1966 г. эксплуатируется электропривод с АВК вентилятора ВЦД-32 с двигателем мощностью 1000 кВт.

В некоторых случаях для глубокого регулирования частоты вращения двигателей рассматриваемых механизмов применяются двигатели постоянного тока, управляемые по системе «генератор — двигатель». Выбор варианта схем управления при прочих равных условиях должен выполняться по результатам их технико-экономического сравнения.

Электроприводы компрессоров, насосов и вентиляторов легко автоматизируются и при обеспечении выполнения основных технологических процессов (подача воды, растворов, воздуха и т. д.) или работу вспомогательных механизмов исполнительных машин (завдвижек, деталей машин, фильтров и т. д.). Управление этими механизмами может быть *дистанционное* (с диспетчерского пункта) или по *запрограммированному автоматическому циклу*. Режим работы может задаваться различными переключателями или часовыми механизмами. Автоматическая работа насосных станций осуществляется посредством поплавковых или струйных реле, а компрессорных — с помощью реле давления. При использовании синхронных двигателей автоматизируется и система возбуждения их.

3.5. РАСЧЕТ НЕОБХОДИМЫХ ПАРАМЕТРОВ И ВЫБОР ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ АВК. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С АВК

Расчет необходимых параметров и выбор основных элементов АВК. Необходимые номинальные параметры источника встречной э. д. с. должны определяться, исходя из следующего: а) номинальная мощность $P_{ист}$ должна быть достаточной для передачи энергии скольжения, которая максимальна при наибольшем скольжении, т. е. $P_{ист} = P_{12} s_{max}$, где P_{12} — передаваемая со статора на ротор электромагнитная мощность асинхронного двигателя при работе в номинальном режиме; б) номинальное напряжение определяется по э. д. с. ротора при максимальном скольжении, т. е. $U = kU_{2 ном} s_{max}$; в) номинальный ток должен соответствовать номинальному току ротора асинхронного двигателя. Так, например, напряжение вспомогательной машины МП (в схеме на рис. 3.8, а) должно выби-

ратся таким образом, чтобы при номинальной частоте вращения ее против-э. д. с. была равна выпрямленному напряжению выпрямителя при минимальной частоте вращения двигателя M , т. е. $E_{МП} = c_e \Phi n = = 1,35 U_{2НОМ} S_{\max}$, а номинальный ток должен соответствовать выпрямленному току ротора асинхронного двигателя, т. е.

$$I_{МП} = I = I_{я} = \frac{I_{2НОМ}}{\sqrt{\frac{2}{3} - \frac{\gamma}{\pi}}}. \quad (3.16)$$

Комплектные АВК выбираются по току и напряжению ротора:

$$\begin{aligned} I_{п. ном} &\geq I_{2НОМ} \text{ и } U_{п. ном} = U_{2НОМ} S_{\max} = \\ &= U_{2НОМ} \left(1 - \frac{1}{D}\right), \end{aligned} \quad (3.17)$$

где $U_{п. ном}$ и $I_{п. ном}$ — соответственно номинальные напряжение и ток преобразователя; $U_{2НОМ}$ и $I_{2НОМ}$ — то же ротора электродвигателя; D — диапазон регулирования частоты вращения электродвигателя.

Выше уже указывалось, что включение АВК осуществляется станциями управления. Выбор станций управления ЦШУ производится по номинальному току ротора двигателя и напряжению на кольцах, соответствующему минимальной частоте вращения (если регулирование частичное), либо номинальному (если регулирование полное).

Электромагнитный момент, развиваемый АВК постоянной мощности (рис. 3.8, а), можно получить, исходя из мощности машин и угловой скорости двигателя. Как известно, мощность каскада определяется суммой мощностей асинхронного (M) и вспомогательного ($МП$) двигателей, т. е.

$$P_{АВК} = M_M \omega + M_{МП} \omega. \quad (3.18)$$

Если эту мощность разделить на угловую скорость двигателей, то получим уравнение момента, из которого будет следовать, что с увеличением встречной э.д.с. не только уменьшается скорость, но и увеличивается суммарный момент каскада при той же жесткости его механической характеристики.

Для АВК постоянного момента (рис. 3.8, б) момент, развиваемый асинхронным двигателем M , можно определить по формуле [30]

$$M = \frac{k_1}{9,81\omega_c} \left(IU_{2\text{ном}} - \frac{\sqrt{2}}{2} I^2 X_p \right), \quad (3.19)$$

где k_1 — коэффициент схемы; ω_c — круговая частота электромагнитного поля статора; X_p — индуктивное сопротивление фазы ротора, приведенное к обмотке статора.

При этом следует иметь в виду, что максимальный момент асинхронного двигателя M , включенного в схему АВК, будет $M_{\text{дв}} = \frac{3}{\pi} M_{\text{max}} = 0,955 M_{\text{max}}$, что на 4,5% ниже момента при обычной схеме включения двигателя.

После того как АВК выбран, становится известным линейное напряжение инвертора, а следовательно, и необходимое линейное напряжение его трансформатора $U_{\text{л2Тр}}$, зная которое, а также момент нагрузки и параметры двигателя, можно определить ток в нагрузке этого трансформатора:

$$I_{2\text{Тр}} = k_i I = k_i \left[\frac{\sqrt{2}U_{2\text{ном}}}{2X_p} - \sqrt{\frac{U_{2\text{ном}}^2}{2X_p} - \frac{\sqrt{2}\omega_c M_{\text{ст}}}{k_U X_p}} \right].$$

Пользуясь этими данными, можно рассчитать необходимую мощность

$$S \geq \sqrt{3}U_{\text{л2Тр}}I_{2\text{Тр}}, \quad (3.20)$$

а затем и выбрать трансформатор инвертора.

Электроэнергетические показатели АВК. Как отмечалось выше, за счет рекуперированной энергии скольжения в сеть к.п.д. электропривода с АВК повышается. Выражение для определения к.п.д. в этом случае имеет вид

$$\eta = \frac{M_{\text{ст}}\omega}{P_{\text{дв}} - P_{\text{рек}}}, \quad (3.21)$$

где $M_{\text{ст}}$ — статический момент нагрузки, Н · м; ω — текущее значение угловой скорости двигателя, рад/с; $P_{\text{дв}}$ — мощность, потребляемая двигателем из сети, Вт;

$P_{\text{рек}}$ — мощность, рекуперлируемая в сеть, Вт. Эти мощности можно рассчитать по формулам:

$$P_{\text{дв}} = M_{\text{ст}}\omega_c + \Delta P_{\text{м}} + \Delta P_{\text{ст}};$$

$$P_{\text{рек}} = M_{\text{ст}}\omega_c \left(1 - \frac{1}{D}\right) - k - v.$$

Здесь $\Delta P_{\text{м}} = 3I_1^2 r_1$ и $\Delta P_{\text{ст}} = 0,5\Delta P_{\text{м}}$ — потери в меди и стали, Вт; ω_c — синхронная угловая скорость электродвигателя, рад/с; D — диапазон регулирования частоты вращения двигателя; k и v — соответственно постоянные и переменные потери в двигателе и трансформаторе, Вт.

Рекуперация энергии скольжения происходит до определенной скорости, т. е. до скорости, когда энергия скольжения P_{12s} уменьшается до суммарных потерь в роторной цепи двигателя. Скольжение, соответствующее этой скорости, определяется выражением [18]

$$s = \frac{3\rho X_p I + \pi \sum \Delta U}{\pi k_1 E_{2\text{ном}} - 3X_p (1+q) I}, \quad (3.22)$$

где $\rho = \frac{X_{\text{тр}}}{X_p} + \frac{2\pi r_2}{3X_p} + \frac{\pi r_{\text{др}}}{3X_p} + \frac{2\pi r_{\text{тр}}}{3X_p}$ — для трехфазной мостовой схемы; $\rho = \frac{X_{\text{тр}}}{X_p} + \frac{2\pi r_2}{3X_p} + \frac{\pi r_{\text{др}}}{3X_p} + \frac{\pi r_{\text{тр}}}{3X_p}$ — для трехфазной нулевой схемы; $r_{\text{тр}}$ и $X_{\text{тр}}$ — соответственно активное и индуктивное сопротивления фазы трансформатора, приведенные к его вторичной обмотке; r_2 — активное сопротивление фазы ротора двигателя; $r_{\text{др}}$ — активное сопротивление сглаживающего дросселя; k_1 — коэффициент, зависящий от схемы соединения вентилялей; $q = \frac{2r_1 \pi}{3X_p}$; r_1 — активное сопротивление статорной обмотки, приведенное к ротору.

АВК с полупроводниковыми преобразователями и естественной коммутацией тиристоров инвертора ухудшают коэффициент мощности электропривода. Снижение коэффициента мощности происходит по двум причинам: из-за увеличения потребления (циркуляции) реактивной мощности и из-за наличия высших гармонических составляющих в кривых тока двигателя и трансформатора (мощность искажения). На рис. 3.11 пока-

зана векторная диаграмма мощностей АВК, из которой видно, что реактивные мощности двигателя и трансформатора складываются, а активные — вычитаются, т. е. коэффициент мощности АВК

$$\cos \varphi_{\text{АВК}} = F \times \frac{P_{\text{дв}} - P_{\text{тр}}}{\sqrt{(P_{\text{дв}} - P_{\text{тр}})^2 + (Q_{\text{дв}} + Q_{\text{тр}})^2}}, \quad (3.23)$$

где $Q_{\text{дв}}$, $Q_{\text{тр}}$ — соответственно реактивные мощности двигателя и трансформатора, квар; $P_{\text{дв}}$, $P_{\text{тр}}$ — активные мощности, кВт;

$$F = \frac{I}{\sqrt{1 - \frac{\sum I_v^2}{I_1^2}}} \text{ — коэффициент}$$

искажения; I_1 и I_v — соответственно токи первой и высших гармоник. Для первого приближения и грубых расчетов гармоник порядка v можно считать, что $I_v = I_1/v$.

Составляющие мощностей, входящие в выражение (3.23), определяются так:

$$\left. \begin{aligned} Q_{\text{дв}} &= P_{\text{дв}} \operatorname{tg} \varphi_{\text{дв}}; \\ P_{\text{тр}} &= P_{\text{дв}} - M_{\text{ст}} \omega / \eta; \\ Q_{\text{тр}} &= \sqrt{S_{\text{тр}}^2 - P_{\text{тр}}^2}. \end{aligned} \right\} \quad (3.24)$$

При этом следует иметь в виду, что коэффициент мощности асинхронного двигателя в схеме АВК несколько изменяется и определяется выражением

$$\cos \varphi_{\text{дв}} = \cos \varphi_{\text{ном}} \cos \frac{\gamma}{2},$$

где $\cos \varphi_{\text{ном}}$ — номинальный коэффициент мощности двигателя; γ — угол коммутации вентилей, который при $\alpha = 0$ можно найти из уравнения

$$\cos \frac{\gamma}{2} = \sqrt{1 - \frac{\sqrt{2} I X_p}{2 U_{2\text{ном}}}}.$$

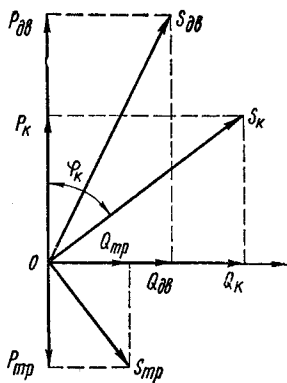


Рис. 3.11. Векторная диаграмма мощностей АВК

Для повышения коэффициента мощности электропривода с АВК могут быть использованы: несимметричное управление анодной и катодной групп вентилей, включенных по трехфазной мостовой схеме; так называемый *сдвоенный инвертор* и компенсационный преобразователь с законом несимметричного управления (АВКн), когда одна группа вентилей моста работает при естественной коммутации тока и $\beta_1 = \beta_{\min} = \text{const}$, а другая — при искусственной коммутации и $\beta_2 = \beta_{\min} \dots (\pi - \beta_{\min})$. Последний вариант управления обеспечивает емкостный характер реактивной составляющей тока инвертора и, следовательно, коэффициент мощности его будет больше. При вентиляторном моменте нагрузки наряду с э.д.с. инвертора целесообразно регулировать напряжение, подводимое к статору асинхронного двигателя, с помощью автотрансформатора, переключаемого под нагрузкой, что также приводит к повышению коэффициента мощности электропривода при работе на пониженных скоростях механизмов.

3.6. ПРИМЕР ВЫБОРА ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ АВК И РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С АВК

Для привода компрессора со статической нагрузкой $P_{\text{ст}} = 900$ кВт или $M_{\text{ст}} = 11\,800$ Н·м используется асинхронный двигатель с фазным ротором, имеющий следующие номинальные данные: $P_{\text{ном}} = 1000$ кВт, $U_1 = 6000$ В; $I_1 = 118$ А; $n_{\text{ном}} = 735$ мин⁻¹ ($\omega_{\text{ном}} = 77$ с⁻¹; $\omega_c = 78,5$ с⁻¹); $s_{\text{ном}} = 0,02$; $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,87$; $\eta = 94,3\%$; $M_{\text{ном}} = 1300$ Н·м; $U_{2\text{ном}} = 1050$ В; $I_{2\text{ном}} = 565$ А; $r_1 = 0,587$ Ом ($r_1' = 0,0181$ Ом); $r_2 = 0,0214$ Ом ($r_2' = 0,695$ Ом); $k_e = 5,71$; $X_p = 0,257$. При эксплуатации компрессора необходимо регулировать частоту вращения электродвигателя в пределах $D = 1,5 : 1$; поэтому система управления им принята с использованием АВК. Необходимо выбрать основные элементы АВК и определить энергетические показатели электропривода при работе компрессора на минимальной частоте вращения.

Решение. АВК выбираем по току и напряжению ротора двигателя:

$$I_{\text{п. ном}} \geq I_{2\text{ном}} = 565 \text{ А}; \quad U_{\text{п. ном}} \geq U_{2\text{ном}} \left(1 - \frac{1}{D}\right) = \\ = 1050 \left(1 - \frac{1}{1,5}\right) \text{ В} = 350 \text{ В},$$

где $I_{\text{п. ном}}$ и $U_{\text{п. ном}}$ — соответственно необходимые ток фазы выпрямителя и его линейное напряжение.

Из имеющейся номенклатуры преобразователей серии ПАВК выбираем преобразователь типа ПАВК-400-630 со следующими номинальными данными (схемы выпрямителя и инвертора — шести-фазные мостовые): $I_{п. ном} = 630$ А; $I_{п. max} = 1000$ А; $U_{п. ном} = 400$ В; линейное напряжение инвертора $U_{и} = 380$ В; параметры дросселя $I_{Др} = 1000$ А; $r_{Др} = 0,002$ Ом; $L_{Др} = 2,5$ мГ. Станцию управления для пуска двигателя выбираем по параметрам его ротора на частичный диапазон регулирования — ЦШУ-6802-89А2 ($I_{с. ном} = 1250$ А; $U_{с. ном} = 1300$ В).

Для передачи энергии скольжения в питающую сеть выбираем согласующий трансформатор инвертора, принимая $U_{и} = U_{л2Тр}$ и пренебрегая изменением скорости из-за дополнительных сопротивлений в роторной цепи двигателя. Для этого вначале рассчитываем необходимый ток во вторичной обмотке трансформатора

$$I_{2Тр} = k_l I = k_l \left[\frac{\sqrt{2} U_{2ном}}{2 X_p} - \sqrt{\frac{U_{2ном}^2}{2X_p^2} - \frac{\sqrt{2} \omega_c M_{ст}}{k_U X_p}} \right] =$$

$$= 0,815 \left[\frac{\sqrt{2} \cdot 1050}{2 \cdot 0,257} - \sqrt{\frac{1050^2}{2 \cdot 0,257^2} - \frac{\sqrt{2} \cdot 78,5 \cdot 11\,800}{1,35 \cdot 0,257}} \right] \text{ А} =$$

$$= 0,815 \cdot 770 \text{ А} = 626 \text{ А},$$

а затем — необходимую мощность трансформатора

$$S \geq \sqrt{3} U_{л2 Тр} I_{2Тр} = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 626 \cdot 10^{-3} \text{ кВ} \cdot \text{А} \approx 400 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

На основании полученных результатов выбираем трансформатор со следующими номинальными данными: $S_{ном} = 400$ кВ · А; $U_{1Тр} = 6000$ В; $U_{2Тр} = 380$ В; $\eta = 98,55\%$; $\Delta P_{х. Тр} = 1,08$ кВт; $\Delta P_{к. Тр} = 7,6$ кВт; $I_x = 3\%$; $U_k = 5\%$; $r_{Тр} = 0,002$ Ом; $X_{Тр} = 0,012$ Ом.

Определяем к. п. д. электропривода при минимальной угловой частоте двигателя:

$$\eta = \frac{M_{ст} \omega_{min}}{P_{дв} - P_{рек}} = \frac{11\,800 \cdot 51,3 \cdot 10^3}{962 - 220} = 0,81.$$

Здесь

$$P_{дв} = \frac{M_{ст} \omega_c}{1000} + \Delta P_m + \Delta P_{ст} = \left(\frac{11\,800 \cdot 78,5}{1000} + 24,5 + 12,3 \right) \text{ кВт} =$$

$$= 962 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_m = \frac{3I_1^2 r_1}{1000} = \frac{3 \cdot 118^2 \cdot 0,587}{1000} \text{ кВт} = 24,5 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_{ст} = 0,5 \Delta P_m = 0,5 \cdot 24,5 \text{ кВт} \approx 12,3 \text{ кВт};$$

$$P_{рек} = \frac{M_{ст} \omega_c}{1000} \left(1 - \frac{1}{D} \right) - k - u = \left[\frac{11\,800 \cdot 78,5}{1000} \left(1 - \frac{1}{1,5} \right) - \right.$$

$$\left. - 57,6 - 52,6 \right] \text{ кВт} = 220 \text{ кВт};$$

$$\omega_M = \frac{\omega_{\text{ном}}}{1,5} = \frac{77}{1,5} \text{ с}^{-1} = 51,3 \text{ с}^{-1};$$

$$k = 1,05 \left[P_{\text{ном}} \frac{1 - \eta_{\text{дв}}}{\eta_{\text{дв}}} - \frac{M_{\text{ном}} \omega_e S_{\text{ном}}}{1000} \left(1 - \frac{r_1}{r_2} \right) \right] +$$

$$+ \Delta P_{\text{х.тр}} = \left\{ 1,05 \left[1000 \frac{1 - 0,943}{0,943} - \frac{13000}{1000} \cdot 78,5 \cdot 0,02 \times \right. \right.$$

$$\left. \times \left(1 - \frac{0,587}{0,695} \right) \right] + 1,03 \left. \right\} \text{ кВт} = 57,6 \text{ кВт};$$

$$v = \frac{I^2 R_{\text{экр}} + I \sum \Delta U}{1000} = \frac{770^2 \cdot 0,085 + 770 \cdot 3}{1000} \text{ кВт} = 52,5 \text{ кВт};$$

$R_{\text{экр}} = 2r_2 + 2r_1 + r_{\text{Др}} + 2r_{\text{Тр}} = 2 \cdot 0,0214 + 2 \cdot 0,0181 + 0,002 + 2 \cdot 0,002 = 0,085$ — эквивалентное сопротивление роторной цепи двигателя; $\sum \Delta U = 4 \cdot 0,75 \text{ В} = 3 \text{ В}$ — падение напряжения в вентилях выпрямителя и инвертора.

Принимая коэффициент искажения $F = 1$, рассчитываем коэффициент мощности электропривода

$$\cos \varphi_{\text{АВК}} = F \frac{P_{\text{дв}} - P_{\text{Тр}}}{\sqrt{(P_{\text{дв}} - P_{\text{Тр}})^2 + (Q_{\text{дв}} + Q_{\text{Тр}})^2}} =$$

$$= 1 \frac{962 - 212}{\sqrt{(962 - 212)^2 + (675 + 340)^2}} = 0,595.$$

$$\text{Здесь } Q_{\text{дв}} = P_{\text{дв}} \operatorname{tg} \varphi_{\text{дв}} = 962 \operatorname{tg} 35^\circ \text{ квар} = 962 \cdot 0,7 \text{ квар} =$$

$$= 675 \text{ квар};$$

$$\cos \varphi_{\text{дв}} = \cos \varphi_{\text{ном}} \cos \frac{\gamma}{2} = \cos \varphi_{\text{ном}} \sqrt{1 - \frac{\sqrt{2} X_p I}{2U_{2\text{ном}}}} =$$

$$= 0,87 \sqrt{1 - \frac{\sqrt{2} \cdot 0,257 \cdot 770}{2 \cdot 1050}} = 0,81 \quad (\varphi_{\text{дв}} = 35^\circ);$$

$$P_{\text{Тр}} = P_{\text{дв}} - \frac{M_{\text{ст}} \omega_{\text{мин}}}{\eta} = \left(962 - \frac{11800 \cdot 51,3}{0,81} \right) \text{ кВт} = 212 \text{ кВт};$$

$$Q_{\text{Тр}} = \sqrt{S_{\text{Тр}}^2 - P_{\text{Тр}}^2} = \sqrt{400^2 - 212^2} \text{ квар} = 340 \text{ квар}.$$

Находим скольжение, при котором прекращается рекуперация энергии скольжения в сеть:

$$s_{\text{рек}} = \frac{3\rho X_p I + \pi \sum \Delta U}{\pi k_1 U_{2\text{ном}} - 3X_p (1+q) I} =$$

$$= \frac{3 \cdot 0,32 \cdot 0,257 \cdot 770 + 3,14 \cdot 3}{3,14 \cdot 1,35 \cdot 1050 - 3 \cdot 0,257 (1 + 0,155) \cdot 770} = 0,0207,$$

где

$$\rho = \frac{3 \cdot 0,012 + 3,14 (2 \cdot 0,0214 + 0,002 + 2 \cdot 0,002)}{3 \cdot 0,257} = 0,32;$$

$$q = \frac{2r_1' \pi}{3X_p} = \frac{2 \cdot 0,0181 \cdot 3,14}{3 \cdot 0,257} = 0,155.$$

Определяем частоту вращения двигателя, соответствующую скольжению $s_{\text{рек}}$:

$$n_{\text{рек}} = n_{\text{ном}} \frac{s_{\text{ном}}}{s_{\text{рек}}} = 735 \frac{0,02}{0,0207} \text{ мин}^{-1} = 710 \text{ мин}^{-1}.$$

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ И ЭЛЕКТРОПРИВОДА МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ, КУЗНЕЧНО-ПРЕССОВЫХ МАШИН И ПРОКАТНЫХ СТАНОВ

В этой главе приводятся только общие сведения, которые должны знать студенты, обучающиеся по специальностям электроснабжения или им подобным. Более полно соответствующий материал можно найти в специальной литературе [7, 10, 15, 23, 24, 27 и др.].

4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКАХ, РАСЧЕТ НЕОБХОДИМОЙ МОЩНОСТИ ИХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ И СПОСОБЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ СТАНОЧНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Общие сведения и расчет необходимой мощности электродвигателей. Эта группа оборудования включает в себя токарные, фрезерные, сверлильные, строгальные, универсальные и другие станки, с помощью которых требуемая форма детали получается путем механического отделения от нее материала режущим инструментом. Отечественные заводы производят все известные виды станков от миниатюрных автоматов для часовой промышленности до многоцелевых агрегатов. В качестве примеров назовем оптические профилирующие станки, токарные станки для обработки прокатных валков длиной до 8 м, диаметром более 1,5 м и массой до 100 т при температуре 900° С, карусельные станки для обработки деталей диаметром до 20 м, уникальные комбинированные продольно-фрезерные станки для выполнения нескольких операций (фрезерование, обтачивание, сверление, строгание, шлифование, обработка лобовых контуров и др.) на деталях массой до 200 т, уникальные агрегаты с программным управлением и с программированием смены до 100 инструментов, универсальные фрезерные станки с числовым программным

управлением для обработки гребных винтов размером от 0,6 до 7,5 м. Наряду с отдельными станками разработаны автоматизированные участки из нескольких станков, управляемые ЭВМ, которые выдают задания каждому станку, вырабатывают команды на подачу транспортных устройств для доставки заготовок и переноса изделий на склад готовой продукции.

Указанное разнообразие станков требует подобного же разнообразия электрооборудования и автоматизации их. Однако для большинства выпускаемых станков и станочных линий это разнообразие можно свести к типовым электроприводам, разделив условно приводы каждого станка на *главные* и *вспомогательные*.

Характерными режимами работы главных приводов являются длительные и повторно-кратковременные, а вспомогательных (зажима поперечины, перемещения узлов и др.) — кратковременный. Применительно к этим режимам производят расчет и выбор электродвигателей для наиболее энергоемких технологических операций, выполняемых тем или иным станком.

Каждый вид обработки деталей на станках характеризуется оптимальными (наивыгоднейшими по производительности) величинами: скоростью v , усилием F_z и мощностью P_z резания, установленными в результате научно-исследовательских и экспериментальных работ. Эмпирические формулы для определения этих величин применительно к некоторым главным электроприводам приведены в табл. 15 [24]. Их можно найти также, пользуясь специальными картами технологических нормативов.

Таблица 15

Вид обработки	Скорость резания, м/мин	Усилие или момент резания, Н (Н · м)	Мощность резания, кВт
Точение и строгание	$v = \frac{C_v}{T m^x v^y}$	$F_z = 9,81 C_F t^x F S^y v^n$	$P_z = \frac{F_z v}{60 \cdot 1000}$
Сверление	$v = \frac{C_v d c^z}{T m S v}$	$M = 9,81 C_M d l, 9 S^y m \cdot 10^3$	$P_z = \frac{M n}{9550}$
Фрезерование	$v = \frac{C_v d^q}{T m^x v^y B k z^n}$	$F_z = 9,81 C_F t^x F S^y F B z d^i$	$P_z = \frac{F_z v}{60 \cdot 1000}$

Зная мощность резания и к.п.д. кинематической передачи η , рассчитывают и выбирают электродвигатель, исходя из условия $P_{дв} \geq P_z/\eta$.

Требуемая мощность электродвигателей для механизмов подачи определяется по необходимому вращающему моменту на валу ходового винта и скорости подачи. Этот момент при известных параметрах ходового винта (средний диаметр винта $d_{ср}$, шаг нарезки t , ее наклон $\operatorname{tg}\alpha = \frac{t}{\pi d_{ср}}$ и угол трения φ), передаточном отношении от двигателя к ходовому винту i и к.п.д. передачи η можно рассчитать по формуле

$$M_{дв} = \frac{F d_{ср} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi)}{2i\eta}, \quad (4.1)$$

где F — усилие, которое необходимо преодолеть при обеспечении подачи механизма винтом. При линейном перемещении движущегося органа станка и известных массах станины $m_{ст}$ и изделия $m_{изд}$ оно содержит следующие составляющие: радиальную F_y , осевую F_x , резания F_z и прилипания $\beta S_{пр}$, т. е.

$$F = k_1 F_x + \mu (F_z + F_y + m_{ст}g + m_{изд}g) + \beta S_{пр}. \quad (4.2)$$

При трогании стола или суппорта с места, как правило, резания не происходит, что следует учитывать при расчете усилия. Радиальная и осевая составляющие усилия определяются следующими эмпирическими выражениями:

$$\left. \begin{aligned} F_y &= 9,81 C_F t^{x_F} S^{y_F} v^n; \\ F_x &= 9,81 C_F t^{x_{F_x}} S^{y_{F_x}} v^n. \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

В формулах табл. 15 и выражениях (4.2), (4.3) T — стойкость резца, сверла или фрезы, мин; t и S — глубина резания или фрезерования (мм) и подача суппорта или сверла (мм/об); B и z — ширина (мм) и число зубьев фрезы; $k_1 = 1,2 \dots 1,5$ — коэффициент запаса, учитывающий перекося ходового винта; μ — коэффициент трения (при движении $\mu = 0,05 \dots 0,15$, при трогании $\mu = 0,2 \dots 0,3$); $B = 0,5$ — удельное усилие прилипания, Н/см²; $S_{пр}$ — площадь прилипания, см²; $C_v, C_F, C_m, m, x_v, x_F, x_{F_x}, x_{F_y}, y_v, y_F, y_m, y_{F_x}, y_{F_y}, n, k, i$ — коэффициенты и степени, характеризующие свойства мате-

риала обрабатываемой детали, материала инструмента и вида обработки (берутся из справочников по режимам резания).

При известном обрабатываемом материале расчет усилия резания начинают с выбора марки инструментального материала, геометрической формы режущей части инструмента и его назначения, а затем находят допустимые глубины резания и величины подачи. Последние определяют по технологическим картам для данного вида обработки детали.

Что касается расчета и выбора электродвигателей вспомогательных станочных механизмов, таких, как приводы зажимных устройств, быстрого перемещения отдельных элементов станков (траверс, шпинделя, суппортов и т. п.), то мощности этих двигателей следует выбирать в большинстве случаев, исходя из их допустимой перегрузки, как для кратковременных режимов работы. Например, при выборе приводного электродвигателя зажима колонны радиально-сверлильного станка можно воспользоваться выражением [24]

$$M_{\text{дв}} = N \frac{d_{\text{ср}}}{2i\eta} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi) \operatorname{tg}(\alpha_1 \pm \varphi_1),$$

где $N \geq \frac{Ql}{R\mu}$ — нормальное давление на колонну, Н; α_1 и φ_1 — углы наклона и трения клина зажимного устройства, град; Q и l — сила, приложенная к центру тяжести системы траверса — суппорт (Н), и расстояние от оси колонны до центра тяжести, м; R — внешний радиус колонны, м; μ — коэффициент трения, а обозначения остальных величин — те же, что и в формуле (4.1).

При расчете необходимой мощности электродвигателей механизмов металлорежущих станков следует иметь в виду, что потери в этих механизмах зависят от нагрузки. Поэтому их к.п.д., подобно крановым механизмам, зависят от степени нагрузки и могут быть найдены по формуле

$$\eta \approx \frac{1}{1 + a/\gamma + b}, \quad (4.4)$$

где a и b — соответственно коэффициенты постоянных и переменных потерь; γ — степень нагрузки механизма

по отношению к номинальной. На основании опыта эксплуатации станков среднее значение отношения коэффициентов постоянных и переменных потерь можно считать равным $a/b \approx 1,5$.

В некоторых случаях для определения мощности приводного электродвигателя станочного механизма приходится пользоваться не расчетной мощностью резания и потерями, а максимальными усилиями и скоростями, которые могут быть приняты для обработки деталей по условиям прочности, т. е. по наиболее слабому звену кинематической схемы, а также исходя из требований точности выполняемых на станке операций.

Большинство факторов, влияющих на определение мощности электродвигателя, колеблется в широких пределах и, следовательно, точно рассчитать ее, как правило, не представляется возможным. Поэтому на головных образцах станков следует уточнить фактическую и установленную мощности.

Применяемые электродвигатели. Скорость обработки деталей на металлорежущих станках не должна зависеть от случайных кратковременных изменений нагрузки. Поэтому электродвигатели станков должны иметь жесткую механическую характеристику. Этот фактор и предопределил широкое использование для нерегулируемых электроприводов односкоростных двигателей переменного тока с короткозамкнутым ротором, а для регулируемых с малым диапазоном регулирования — асинхронных многоскоростных двигателей общепромышленного исполнения. В том случае, когда необходим широкий диапазон регулирования скорости, применяются двигатели постоянного тока параллельного возбуждения общепромышленных или специальных серий для металлообрабатывающих станков, таких, например, как серия ПБСТ или ПСТ и высокомоментная серия ПБВ для механизмов подач. Специальные серии двигателей имеют меньшую (в сравнении с общепромышленными) электромеханическую постоянную времени якоря, что позволяет полнее использовать возможности безынерционных тиристорных преобразователей при создании высокоточных малоинерционных систем регулирования; они содержат встроенные тахогенераторы, а некоторые имеют высокомоментные встроенные тормоза и датчики положения (сельсины).

Чтобы судить о располагаемых возможностях специальных двигателей, рассмотрим некоторые из них. Так, двигатели ПБСТ по конструкции закрытые, не обдуваемые, позволяют получить диапазон регулирования частоты вращения 200 : 1 (регулируемым подводимого к якорю напряжения и потоком возбуждения); в зависимости от времени действия допускают перегрузки по току: 4-кратную в течение 10 с, при ослабленном магнитном потоке — 2-кратную (при $U_{\text{ном}} = 110$ В) и 1,5-кратную (при $U_{\text{ном}} = 220$ В), перегрузки по напряжению в течение 5 мин (при полном потоке); они допускают длительную работу при малых частотах вращения (до 10 мин⁻¹) при номинальных токах возбуждения и якоря, обеспечивающих номинальный вращающий момент. Что касается высокомоментных двигателей серии ПБВ, то их особенности состоят еще и в том, что у них малые электромеханические и электромагнитные постоянные времени: соответственно 7,6...14,4 и 5,3...11,1 мс при вращающих моментах 7...170 Н · м; кроме того, они обеспечивают высокие угловые ускорения, достигающие 6800...1900 рад/с².

Способы регулирования скорости электроприводов станочных механизмов. Условия работы станочных механизмов по характеру нагрузки, режиму работы и регулированию скорости весьма разнообразны. Этим и объясняется то многообразие схем управления, которое используется в приводах станков для обеспечения различных требований по обработке металлов, причем для многих механизмов требуется регулирование их скорости. Необходимость регулирования скорости вызывается требованиями поддержания заданной линейной скорости резания и необходимостью изменения этой скорости в зависимости от материала заготовки и вида обработки. При этом для главных приводов вращательного движения диапазон регулирования скорости достигает 100 : 1, а для механизма подачи — 1000 : 1 и выше.

Регулирование скорости рабочих органов металлорежущих станков осуществляется как *механически* — путем изменения передаточных отношений редукторов, так и *электрически* — путем регулирования частоты вращения приводных электродвигателей. В ряде случаев применяется комбинированное регулирование — *электромеханическое*, когда в пределах одной электрической

ступени осуществляется регулирование скорости механическим путем (многоскоростные двигатели) или в пределах одной механической ступени ступенчатое либо плавное регулирование скорости электрическим путем.

При механическом регулировании диапазон изменения скорости ($D_{\text{мех}}$) связан с числом ступеней z и коэффициентом плавности регулирования $\varphi_{\text{мех}}$ следующей зависимостью:

$$D_{\text{мех}} = \frac{n_1 n_2 \dots n_{z-1}}{n_2 n_3 \dots n_z} = \varphi_{\text{мех}}^{z-1}, \quad (4.5)$$

где n_1, n_2, \dots, n_z — соответственно частоты вращения двигателя, промежуточных валов и шпинделя от наибольшей n_1 до наименьшей n_z . В этом случае при переходе от одной частоты вращения к другой скорости рабочего органа изменяются скачком на коэффициент плавности регулирования $\varphi_{\text{мех}}$, который легко определяется из соотношения (4.5):

$$\varphi_{\text{мех}} = \sqrt[z-1]{D_{\text{мех}}}.$$

Для того чтобы иметь минимальное число механических ступеней (при заданном диапазоне регулирования), необходимо полностью использовать возможности электрического регулирования. Поэтому скачок механического регулирования $\varphi_{\text{мех}}$ должен быть не меньше диапазона электрического регулирования двигателя $D_э$, т. е. $\varphi_{\text{мех}} \geq D_э$. Тогда полный диапазон регулирования будет $D = D_{\text{мех}} D_э$.

Возможности регулирования частоты вращения приводных электродвигателей зависят от типа двигателя и схемы управления им. Регулирование частоты вращения асинхронных короткозамкнутых двигателей производится следующими способами: многоскоростных — изменением числа пар полюсов; односкоростных — изменением частоты питающего тока, вырабатываемого машинными или полупроводниковыми преобразователями частоты, либо изменением напряжения, подводимого к двигателю от тиристорных станций управления (ТСУ — Р), или путем дроссельного регулирования с помощью магнитных усилителей. Частота вращения двигателей постоянного тока регулируется изменением напряжения, подводимого к зажимам якоря или изменением потока

возбуждения либо комбинацией этих способов (двухзонное регулирование).

При проектировании схем управления и выборе способа регулирования частоты вращения электродвигателей станочных механизмов необходимо учитывать характер их нагрузки. Обычно все главные (шпиндельные) приводы, кроме приводов строгальных, шлифовальных и тяжелых карусельных станков, по условию наилучшего (максимального) использования двигателей требуют регулирования скорости с постоянной располагаемой мощностью, так как с ростом скорости необходимо уменьшать усилие резания. Этому условию, как известно, отвечает регулирование частоты вращения путем изменения потока возбуждения приводного электродвигателя. В данном случае при $\Phi = \text{var}$, пренебрегая ухудшением охлаждения, для двигателей постоянного тока напряжение и ток остаются постоянными, т. е. $U = \text{const}$, $I = \text{const}$, следовательно, и мощность будет постоянной ($P = \text{const}$); для двигателей переменного тока, пренебрегая изменениями $\cos \varphi$ и к.п.д., должно быть $Ua = \text{const}$, где U и a — фазные напряжения и число параллельных ветвей обмотки.

Для приводов перемещения суппортов, столов и поперечин нагрузка определяется целиком или в большей части силами трения, а не усилиями резания. Тогда, считая эти силы в известных пределах изменения скорости механизмов постоянными, требуемая мощность двигателя будет пропорциональна его частоте вращения, т. е. эти механизмы требуют регулирования частоты вращения двигателя при постоянном располагаемом моменте. Аналогичные требования по условию максимального использования двигателей предъявляются и при регулировании скорости подачи фрезерных и шлифовальных станков, а также для вращения обрабатываемого изделия на круглошлифовальных станках. Кроме того, для главных приводов продольно-строгальных и крупных карусельных станков также требуется регулирование скорости при постоянном располагаемом моменте, что объясняется хорошими пусковыми и тормозными качествами этих приводов при преодолении больших сил трения.

Регулирование скорости механизмов при постоянном располагаемом моменте производится изменением

напряжения, подводимого к зажимам исполнительного двигателя постоянного тока, так как в этом случае (пренебрегая ухудшением охлаждения) при $U = \text{var}$, неизменных токе и потоке ($I = \text{const}$ и $\Phi = \text{const}$) неизменным будет и момент $M = c_m I \Phi = \text{const}$.

Независимо от того, как осуществляется регулирование скорости механизмов металлорежущих станков, одним из основных требований, предъявляемых к системам управления их электроприводами, является требование жесткости механических характеристик двигателей, которые обеспечивали бы заданный технологический процесс во всем диапазоне регулирования частоты вращения электродвигателей при строгой ее стабильности во время изменения нагрузки (в определенных пределах). Чтобы выполнить это требование, в схемах управления вводятся обратные связи.

4.2. ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ СХЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ МЕХАНИЗМОВ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ И ИХ РЕАЛИЗАЦИЯ

Принцип построения схем управления. Снижение частоты вращения двигателя при изменении нагрузки от нуля до номинальной для металлорежущих станков не должно превышать 5...10% синхронной частоты вращения (идеального холостого хода) во всем диапазоне регулирования. Такую и большую точность поддержания частоты вращения можно получить только в электроприводах с обратными связями. Одной из наиболее общих принципиальных схем стабилизированной системы управления электроприводами является схема, показанная на рис. 4.1, а. В этом случае регулирование скорости станочного механизма осуществляется изменением частоты вращения его электродвигателя M путем изменения подводимого к нему напряжения от преобразователя Π (генератора, тиристорного преобразователя и т. д.). Управляет преобразователем результирующий сигнал U_y , который вырабатывается при совместном действии задающего напряжения независимого источника U_z , напряжения обратной связи αU (снимается с потенциометра R), напряжения обратной связи по частоте вращения $\gamma \omega$ (снимается с тахогенератора $TГ$) и напряжения обратной связи по току $\beta I R_{ш}$

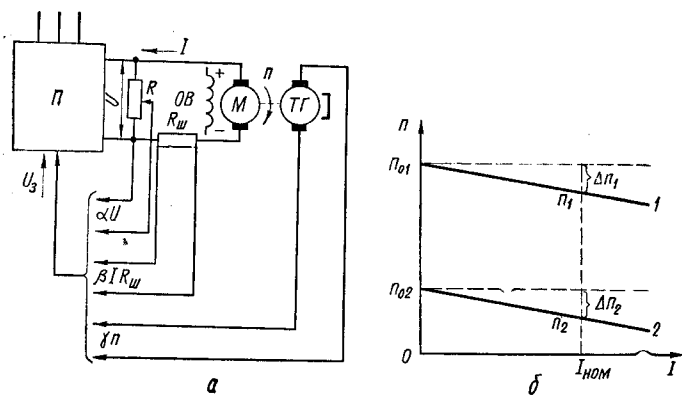


Рис. 4.1. Принципиальная схема стабилизированной системы управления электроприводами (а) и электромеханические характеристики привода (б)

(снимается с шунта $R_{ш}$). При реализации этой схемы для конкретного электропривода обратных связей (одной или двух) может не быть или же в схему могут быть введены дополнительно гибкие обратные связи. Чтобы понять принцип получения необходимой жесткости и стабильности механической или электромеханической характеристик привода, достаточно рассмотреть действие каждой из названных обратных связей.

Как известно, стабильность работы электропривода определяется стабильностью его скорости при изменении нагрузки в ограниченных пределах и зависит от жесткости механической характеристики двигателя. Изменение скорости, в свою очередь, определяется диапазоном регулирования и коэффициентом усиления системы. При разработке схемы управления задача сводится к тому, чтобы при заданном диапазоне регулирования D и допустимом относительном изменении частоты вращения (ошибки) электродвигателя δ найти такой коэффициент усиления преобразователя $K_{п}$, при котором ошибка не превышала бы заданного значения. Физически это осуществляется путем компенсации возможного изменения частоты вращения (при изменении нагрузки) системой автоматического регулирования, вырабатывающей сигналы под воздействием той или другой либо одновременно нескольких обратных связей. За относи-

тельное изменение частоты вращения электродвигателя принимается параметр

$$\delta = \frac{n_c - n_{\text{ном}}}{n_c} = \frac{\Delta n}{n_c}, \quad (4.6)$$

где n_c — синхронная частота вращения или идеального холостого хода; $n_{\text{ном}}$ — номинальная частота вращения при номинальной нагрузке; Δn — изменение частоты вращения при номинальной нагрузке.

Применительно к электромеханическим характеристикам, изображенным на рис. 4.1, б, система должна компенсировать снижение частоты вращения во всем заданном диапазоне регулирования D , в том числе и при значении Δn_2 . Поэтому, если исходить из работы привода на характеристике 1 (при номинальной частоте вращения двигателя) и характеристике 2 (при минимальной частоте вращения), с учетом выражения (4.6) можно записать:

$$\Delta n_2 = \delta n_{c2} = \delta \frac{n_{c1}}{D} = \frac{n_{\text{ном}}}{D} \frac{\delta}{1 - \delta}. \quad (4.7)$$

Коэффициент усиления преобразователя K_n зависит от того, сколько и какие обратные связи приняты для компенсации снижения частоты вращения. Формулу для определения коэффициента усиления можно вывести, исходя из уравнений равновесия напряжений. Рассмотрим, как это делается на примере отдельных систем.

Система автоматического управления (САУ) с отрицательной обратной связью по напряжению. В этом случае уравнения равновесия напряжений можно записать так:

$$\left. \begin{aligned} U_3 - \alpha(E - IR_n) &= U_y; \\ U_y K_n &= E; \\ n/K_{\text{дв}} + IR &= E. \end{aligned} \right\} \quad (4.8)$$

Решив эту систему уравнений относительно частоты вращения n и имея в виду, что $R_n = R - R_{\text{дв}}$, получим уравнение электромеханической характеристики двигателя:

$$n = n_c - \Delta n = \frac{U_3 K_{\text{дв}} K_n}{1 + \alpha K_n} - \frac{IR K_{\text{дв}} (1 + \alpha K_n R_{\text{дв}}/R)}{1 + \alpha K_n}. \quad (4.9)$$

Здесь U_a — задающее напряжение автоматического управления; α — коэффициент обратной связи по напряжению; E — э. д. с. преобразователя; I — ток якоря двигателя; R_n — сопротивление преобразователя; U_y — суммарный сигнал управления; n — частота вращения электродвигателя; $K_{дв}$ — коэффициент передачи двигателя ($K_{дв} = 1/c_e\Phi$); R — сопротивление якорной цепи системы «преобразователь — двигатель»; $R_{дв}$ — сопротивление якорной цепи двигателя.

Приравняв падение частоты вращения в уравнении (4.9) его значению

$$\Delta n = \frac{IRK_{дв}(1 + \alpha K_n R_{дв}/R)}{1 + \alpha K_n}$$

с учетом выражения (4.7) и равенства $\Delta n_2 = \Delta n$, получим формулу для определения коэффициента усиления преобразователя:

$$K_n = \frac{1}{\alpha} \frac{\frac{\Delta n_{раз}}{\Delta n_{треб}} - 1}{1 - \frac{\Delta n_e}{\Delta n_{треб}}}, \quad (4.10)$$

де $\Delta n_{раз}$ — падение частоты вращения двигателя при номинальной нагрузке в разомкнутой САУ; $\Delta n_{треб} = \Delta n_2$ — допустимое снижение частоты вращения при номинальной нагрузке на минимальной частоте вращения; Δn_e — падение частоты вращения на естественной характеристике двигателя при номинальной нагрузке.

САУ с отрицательной обратной связью по частоте вращения. Подобно предыдущему, систему уравнений равновесия напряжений и электромеханическую характеристику, полученную из этой системы, можно записать следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} U_a - \gamma n &= U_y; \\ U_y K_n &= E; \\ n/K_{дв} + IR &= E; \end{aligned} \right\} \quad (4.11)$$

$$n = n_c - \Delta n = \frac{U_a K_{дв} K_n}{1 + \gamma K_{дв} K_n} - \frac{IRK_{дв}}{1 + \gamma K_{дв} K_n}, \quad (4.12)$$

где γ — коэффициент обратной связи по частоте вращения.

Формула для определения коэффициента усиления преобразователя имеет вид

$$K_{\Pi} = \frac{1}{\gamma K_{\text{дв}}} \left(\frac{\Delta n_{\text{раз}}}{\Delta n_{\text{треб}}} - 1 \right). \quad (4.13)$$

САУ с положительной обратной связью по току. Система уравнений равновесия напряжений и электромеханическая характеристика, полученная из этой системы, имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} U_s + \beta IR k_{\omega} / k_r &= U_y; \\ U_y K_{\Pi} &= E; \\ n / K_{\text{дв}} + IR &= E; \end{aligned} \right\} \quad (4.14)$$

$n = n_c - \Delta n = U_s K_{\text{дв}} K_{\Pi} - IR K_{\text{дв}} (1 - K_{\Pi} \beta k_{\omega} / k_r)$, (4.15)
где $\beta = R_{\text{ш}} / R$ — коэффициент обратной связи по току; k_{ω} и k_r — коэффициенты приведения по виткам и сопротивлениям; $R_{\text{ш}}$ — сопротивление шунта в цепи двигателя.

Из выражений (4.7) и (4.15) можно получить формулу для определения коэффициента усиления преобразователя

$$K_{\Pi} = \frac{1}{\beta k_{\omega} / k_r} \left(1 - \frac{\Delta n_{\text{треб}}}{\Delta n_{\text{раз}}} \right). \quad (4.16)$$

Пример использования обратных связей по частоте вращения и току иллюстрирует рис. 4.2, на котором изображена функциональная схема современного электропривода механизма подачи металлорежущего станка. Схема обеспечивает большой диапазон регулирования частоты вращения двигателя путем изменения напряжения, подводимого к его якорю.

Схема включает в себя следующие основные функциональные элементы и блоки: электродвигатель постоянного тока параллельного возбуждения M ; жесткосвязанный с электродвигателем тахогенератор $TГ$; силовой блок тиристоров BT с защитными RC -цепочками; блок управления $БУ$ (источник питания цепей управления не показан); блокировочный блок $ББ$; релейно-контактный блок PK (на схеме показаны только кнопка управления Kn и задатчик частоты вращения двигателя $ЗЧ$); синхронизирующий трансформатор Tr .

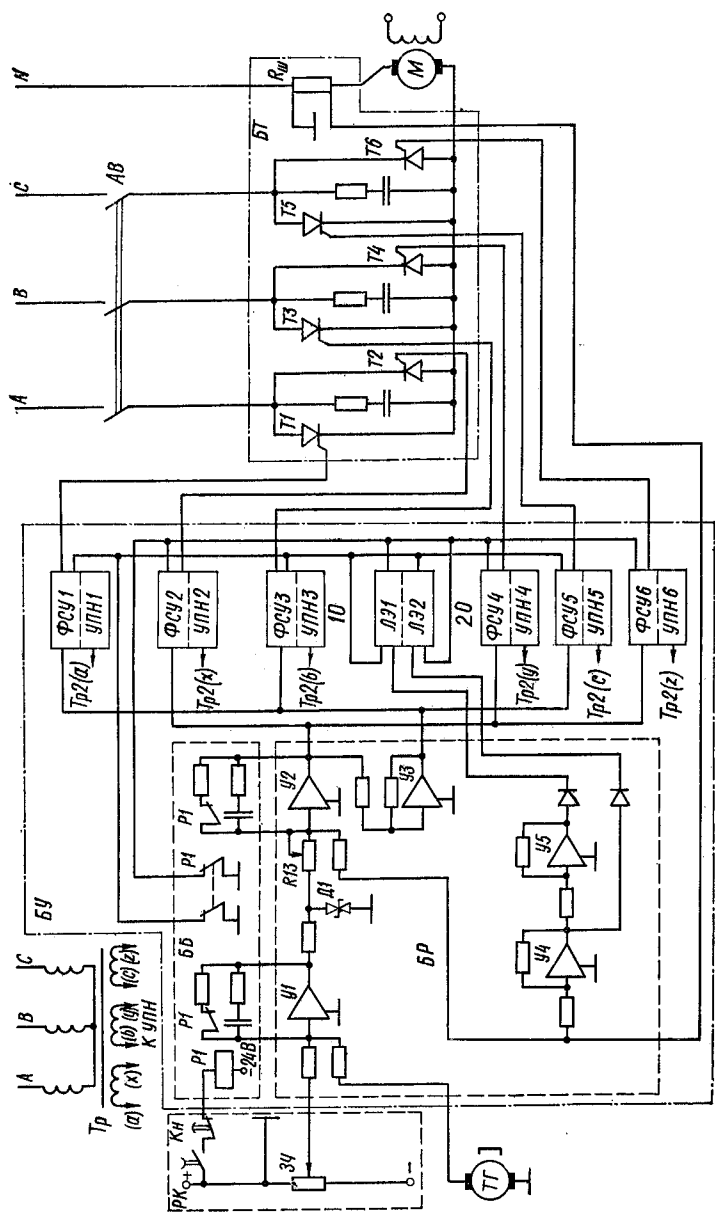


Рис. 4.2. Функциональная схема управления электроприводом механизма подачи металлорежущего станка

Силовой блок выполнен по трехфазной нулевой реверсивной схеме с отдельным управлением тиристорами. Шесть тиристоров блока разделены на две группы: нечетную (T_1 , T_3 и T_5) для регулирования и подачи напряжения на зажимы якоря электродвигателя при вращении его в одну сторону и четную (T_2 , T_4 и T_6) — в другую сторону.

В состав БУ входят следующие основные функциональные элементы: фазосдвигающие устройства с генераторами импульсов ($\PhiСУ1... \PhiСУ6$) со встроенными источниками пилообразного напряжения ($УПН1... УПН6$); блоки логики ($ЛЭ1$ и $ЛЭ2$); блок регулятора ($БР$), включающий в себя: пропорционально интегральные регуляторы частоты вращения электродвигателя ($У1$) и регулятор тока ($У2$) с его инвертором ($У3$), усилитель тока ($У4$) с его инвертором ($У5$); ограничитель уровня сигнала управления ($Д1$), поступающего на $\PhiСУ$ и $ББ$.

$ББ$ включает в себя: реле подготовки схемы к работе ($Р1$), обратные связи усилителей $У1$ и $У2$ ($У3$) и цепи блокировки этих связей, $\PhiСУ$ и блоков логики.

Релейно-контактный блок обеспечивает пуск схемы ($Кн$) и регулирование задающего сигнала, соответствующего выбранной частоте вращения двигателя.

Синхронизирующий трансформатор обеспечивает синхронизацию напряжения питания $БТ$ с напряжением $УПН$.

При подготовке схемы к работе необходимо подать напряжение на силовой блок ($АВ$) и на блок управления, затем включить кнопку $Кн$, чтобы сработало реле и разомкнуло свои контакты, шунтирующие обратные связи усилителей $У1$, $У2$ и $У3$, выходы $\PhiСУ$ и блоков логики.

Работа схемы происходит следующим образом. Оператором или с помощью программного устройства управления задатчиком частоты вращения $ЗЧ$ устанавливается напряжение задающего сигнала, соответствующее выбранной либо заданной частоте вращения электродвигателя $М$. Это напряжение подается на вход усилителя $У1$, где оно сравнивается с напряжением обратной связи по частоте вращения, поступающим от $ТГ$. Усиленная разность напряжений подается на вход усилителя $У2$ (или $У3$), где она сравнивается с сигналом отрицательной обратной связи по току, снимаемым с шунта $R_{ш}$, включенного в якорную цепь электродви-

гателя. Усиленная разность сигналов (при заданном или выбранном направлении) поступает на вход ФСУ, где она сравнивается с напряжением УПН. После сравнения этих напряжений сигнал, а затем и импульс с ФСУ подаются на управляющий электрод соответствующего тиристора, который открывается с заданной фазой, обеспечивая таким образом заданное или выбранное среднее выпрямленное напряжение, а следовательно, и заданную или выбранную частоту вращения электродвигателя.

Одновременная работа четной и нечетной групп тиристорov исключается блоками логики ЭЛ1 и ЭЛ2. Эти блоки предотвращают возможность открывания тиристорov неработающей группы до полного закрывания тиристорov работающей группы, так как ФСУ и блоки логики сблокированы запирающими связями, т. е. когда работает одна группа ФСУ, то с ее выхода подаются запирающие импульсы (10 или 20) на блок логики неработающей группы, который исключает возможность включения неработающей группы ФСУ. Только после снятия управляющего сигнала с работающей группы и снижения тока до нуля блоки логики через определенный промежуток времени снимают запрет с ФСУ той группы, которая должна вступить в работу. Для того чтобы продолжительность этого промежутка была связана с током якоря, блоки логики соединены с усилителями У4 и У5, на вход которых поступает напряжение обратной связи по току, пропорциональное току якоря.

Подобно рассмотренной схеме разработано, находится в эксплуатации и выпускается промышленностью несколько вариантов электроприводов металлорежущих станков с различными тиристорными преобразователями. К их числу относятся:

1. Комплектные тиристорные электроприводы с двухзонным регулированием частоты вращения подводимым напряжением в диапазоне 5 : 1 и потоком возбуждения в диапазоне 4 : 1. Нестабильность частоты вращения двигателя при изменении нагрузки от $0,15M_{ном}$ до $M_{ном}$ не превышает 7%. Показатели их надежности при средней точной работе 14 ч следующие: срок службы не менее 12 лет, вероятность безотказной работы составляет 0,95 при двух годах эксплуатации и 0,9 при пяти годах эксплуатации.

2. Тиристорные трехфазные реверсивные или неререверсивные приводы, предназначенные для механизмов подачи металлорежущих станков с широким диапазоном регулирования (до 200 : 1) и точностью 5...10%. Показатели их надежности такие же, как и электроприводов предыдущей серии, кроме вероятности безотказной работы, которая составляет 0,8 за 16 000 ч работы.

3. Следящие тиристорные регулируемые электроприводы с диапазоном изменения частоты вращения в режиме регулирования 1000 : 1.

4. Комплектные реверсивные электроприводы постоянного тока с тиристорными широтно-импульсными преобразователями, предназначенные для механизмов подачи прецизионных автоматизированных координатно-расточных и резьбошлифовальных станков, а также для механизмов, где требуется широкий диапазон регулирования частоты вращения. Нестабильность частоты вращения не превышает 5% при диапазоне регулирования $D < 100 : 1$, 10% — при $100 : 1 < D < 400 : 1$ и 15% при $D > 2000$; к.п.д. преобразователя $\eta = 0,8$ и гарантийный срок службы 2 года.

5. Быстродействующие тиристорные электроприводы с питанием от высокочастотного источника, обеспечивающие диапазон регулирования не менее 1000 : 1.

6. Приводы для станков, оснащенных системой позиционного или контурного программного управления, обеспечивающие диапазон регулирования не менее 10 000 : 1.

7. Электроприводы с замкнутой двухканальной системой частотного регулирования частоты вращения двигателей переменного тока в диапазоне 30...35 : 1 при постоянном статическом моменте на валу двигателя.

8. Электроприводы с асинхронными короткозамкнутыми двигателями и преобразователями повышенной частоты 200...1600 Гц, предназначенные для координатно-шлифовальных станков и т. д.

4.3. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И ЭЛЕКТРОПРИВОД КУЗНЕЧНО-ПРЕССОВЫХ МАШИН

Кузнечные и особенно прессовые машины используются на машиностроительных, приборостроительных и других предприятиях, где приходится изготавливать

сложные детали, производить предварительные заготовки и раскрой материала, а также штамповать детали сложной конфигурации. Так, например, мощные прессы применяются дляковки деталей турбин, обработки несущих конструкций кораблей, изготовления

корпусов реакторов, штамповки элементов конструкций самолетов и других крупных изделий. Усилия прессов колеблются в широких пределах, и, например, в СССР работает пресс, развивающий усилие до 750 кН, имеющий стол размерами $3,5 \times 16$ м, а пресс, поставленный СССР во Францию, имеет стол $3,5 \times 6$ м и развивает усилие до 650 кН.

Характерной особенностью большинства приводов кузнечно-прессовых машин, обеспечивающих формирование деталей (главные приводы), является резко выраженный одно- или двухпиковый график нагрузки, подобный рис. 4.3. Эти пики при малой их продолжительности могут превышать эквивалентное значение момента нагрузки и максимальный момент двигателя в несколько раз. Поэтому для выравнивания нагрузки и повышения энергетических показателей электроприводов (cosφ, к.п.д.) обычно устанавливают маховики.

При номинальной частоте вращения главных приводов кузнечно-прессовых машин инерционные массы имеют значительный запас кинетической энергии, вследствие чего при появлении пика нагрузки частота вращения электропривода существенно не снижается, так как эту нагрузку преодолевают инерционная масса и электромагнитный момент электродвигателя. Таким образом, инерционные массы маховика в периоды пика нагрузки совершают полезную работу, позволяя тем самым снизить установленную мощность приводных двигателей. В то же время мощность двигателя должна быть достаточной для того, чтобы между пиками нагрузки частота вращения электропривода достигала номинального значения, т. е. обеспечивалось бы ее колебание в допустимых пределах. Как известно, установив-

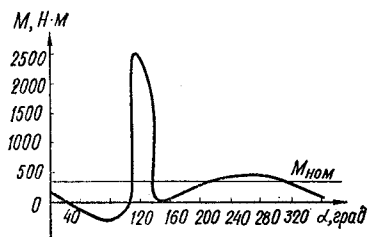


Рис. 4.3. График нагрузки эксцентрикового прессы

шаяся частота вращения электропривода достигается через 4...5 электромеханических постоянных времени; поэтому промежуток времени между пиками нагрузки должен отвечать следующему условию:

$$t \geq 4...5 \frac{GD^2 n_c s_{\text{НОМ}}}{38,3 M_{\text{НОМ}}} = 4...5 \frac{4J n_c s_{\text{НОМ}}}{38,3 M_{\text{НОМ}}}, \quad (4.17)$$

где GD^2 и J — приведенный маховой момент и момент инерции системы, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; n_c , $s_{\text{НОМ}}$, $M_{\text{НОМ}}$ — соответственно синхронная частота вращения (мин^{-1}), номинальное скольжение и номинальный момент двигателя ($\text{Н} \cdot \text{м}$).

Это уравнение при соответствующем сочетании махового момента или момента инерции системы (GD^2 или J) и номинального момента двигателя ($M_{\text{НОМ}}$) определяет наибольшее допустимое число циклов в единицу времени, а следовательно, и производительность машины. Если производительность задана, то при расчете и выборе приводного электродвигателя пользуются методом последовательных приближений. Для кузнечно-прессовых машин обычно задают или рассчитывают зависимости момента на валу приводного двигателя от угла поворота $M = f(\alpha)$, подобно рис. 4.3, или от времени $M = f(t)$ за цикл работы механизма. Пользуясь этими зависимостями, кинематической схемой и скоростью рабочего органа механизма, находят средний момент за цикл работы механизма $M_{\text{ср}}$, требуемую частоту вращения n и, с учетом переходных процессов в двигателе (учитываются коэффициентом $k = 1,1... \dots 1,3$), необходимую мощность приводного электродвигателя

$$P_{\text{НОМ}} \geq \frac{k M_{\text{ср}} n}{9550}. \quad (4.18)$$

Выбрав двигатель, затем проверяют его по допустимой перегрузке и тепловому режиму, пользуясь методом Савинкова [4].

Необходимые момент инерции или маховой момент маховика определяют по тем же зависимостям $M = f(\alpha)$ или $M = f(t)$, исходя из полного момента инерции маховых масс электропривода и допустимого снижения частоты вращения двигателя при максимальной

пиковой нагрузке. Если графически задана зависимость $M = f(\alpha)$, то на графике проводят линию номинального момента двигателя. Площадь фигуры, заключенная между этой линией и кривой $M = f(\alpha)$, выражает работу ΔA , которую должны совершить инерционные массы электропривода, отдавая запасенную ими кинетическую энергию при снижении частоты вращения от номинальной $n_{\text{ном}}$ до минимально допустимой $n_{\text{мин}}$, т. е.

$$\Delta A = J \left(\frac{\pi}{30} \right)^2 \frac{n_{\text{ном}}^2 - n_{\text{мин}}^2}{2} = J \left(\frac{\pi}{30} \right)^2 n_{\text{ср}}^2 j.$$

Отсюда

$$J = \frac{\Delta A}{n_{\text{ср}}^2 j} \left(\frac{30}{\pi} \right)^2 \text{ или } GD^2 = \frac{\Delta A \cdot 4}{n_{\text{ср}}^2 j} \left(\frac{30}{\pi} \right)^2. \quad (4.19)$$

Здесь $n_{\text{ср}} = \frac{n_{\text{ном}} + n_{\text{мин}}}{2}$ — средняя частота вращения электродвигателя, мин^{-1} ; $j = \frac{n_{\text{ном}} - n_{\text{мин}}}{n_{\text{ср}}} = \frac{\omega_{\text{ном}} - \omega_{\text{мин}}}{\omega_{\text{ср}}}$ — коэффициент неравномерности; J и GD^2 — суммарные моменты инерции и маховой момент маховых масс электропривода, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

Если же задана зависимость $M = f(t)$ и, подобно предыдущему, провести на графике линию номинального момента двигателя, то площадь фигуры, заключенная между этой линией и кривой $M = f(t)$, будет выражать импульс момента, т. е.

$$\Delta Q = J (\omega_{\text{ном}} - \omega_{\text{мин}}) = J n_{\text{ср}} j \pi / 30.$$

Отсюда

$$J = \frac{\Delta Q}{n_{\text{ср}} j} \frac{30}{\pi} \text{ или } GD^2 = \frac{\Delta Q \cdot 4}{n_{\text{ср}} j} \frac{30}{\pi}. \quad (4.20)$$

Необходимые момент инерции или маховой момент маховика в том и другом случаях определяются как разность между полученными значениями моментов инерции или маховых моментов и соответствующими их значениями, которые имеют другие части электропривода, включая якорь или ротор электродвигателя (J_2 или GD_2^2), т. е.

$$J_{\text{max}} = J - J_2; \quad (4.21)$$

$$GD_{\text{max}}^2 = GD^2 - GD_2^2. \quad (4.21')$$

Кроме рассмотренного метода расчета мощности электродвигателя и маховых масс маховика кузнечно-прессовых машин, известны также метод проф. Голована А. Т., метод Центрального бюро кузнечно-прессовых машин, метод последовательных импульсов и др. Однако рассмотренный метод наиболее простой и наглядный.

Высокие требования к диапазону регулирования частоты вращения главных электроприводов кузнечно-прессовых машин и точности работы их механизмов, как правило, не предъявляются. Поэтому в большинстве случаев используются электродвигатели с короткозамкнутым или с фазным ротором, а иногда синхронные двигатели либо двигатели постоянного тока. Для прессов перспективными являются дугостаторные асинхронные двигатели, применение которых упрощает конструкцию пресса. Такие двигатели устанавливаются в новых винтовых прессах, где маховик винта использован в качестве ротора двигателя, что позволяет исключить мало надежную фрикционную передачу. Разработана серия таких прессов усилием от 0,4 до 10 МН, а двигатели для них выпускаются и осваиваются серийно на мощности до 150 кВт. Для управления двигателями используются наиболее простые схемы, содержащие магнитные или тиристорные пускатели, различные контроллеры и элементы блокировок, исключающих возможные травмы при эксплуатации механизмов; иногда применяется программное управление.

Для улучшения условий труда и повышения производительности в кузнечно-прессовых цехах в последнее время стали устанавливать роботы. Например, на «Кировском заводе» установлен робот, обслуживающий 250-тонный пресс, в Ленинградском оптико-механическом объединении (ЛОМО) используется робот, который выполняет 17 команд по заданной программе.

Вспомогательные механизмы кузнечно-прессовых машин (установки предела хода ползуна пресса, подачи поворотного стола и каретки, охлаждающих насосов и др.) работают в кратковременных, повторно-кратковременных или длительных режимах; поэтому двигатели для них выбирают, как обычно, по статической или максимальной нагрузкам. Неотъемлемым элементом этих машин при горячей обработке металлов являются нагревательные устройства, в качестве которых в современных куз-

нечно-прессовых цехах используются полупроводниковые преобразователи повышенной частоты (1000, 2500, 8000 Гц); их параметры выбираются, исходя из размеров и материала обрабатываемых изделий, а также с учетом технологического цикла работы кузнечно-прессовых машин. На Горьковском автомобильном заводе, например, эксплуатируется установка ИПЧ-750 мощностью 12 тыс. кВт.

Пример. Момент на валу двигателя эксцентрикового пресса за один оборот изменяется в соответствии с данными, приведенными в табл. 16.

Таблица 16

Угол поворота, град	0	15	20	40	60	80	100
Момент, Н·м	78,5	0	-37,3	-117	-175	-191	-182
Угол поворота, град	106,5	108	110	118	129	135	136,5
Момент, Н·м	0	196	243	2450	2160	1765	196
Угол поворота, град	150	160	180	200	220	240	260
Момент, Н·м	0	20,6	78,5	180	277	351	405
Угол поворота, град	280	300	320	340	350	360	15
Момент, Н·м	422	383	310	202	140	78,5	0

Эксцентрик приводится во вращение посредством 3-ступенчатого редуктора с передаточными отношениями $u_1 = 3,22$; $u_2 = 3,84$; $u_3 = 5,5$ и клиноременной передачи на шкив-маховик с передаточным отношением $u_4 = 2,77$. Ползун пресса должен совершать $n_1 = 7,4$ хода в минуту, а разгон двигателя с маховиком до номинальной частоты вращения происходит при статическом моменте $M_{ст} = 147 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Определить необходимую мощность и выбрать приводной электродвигатель переменного тока напряжением $U = 380 \text{ В}$, а также рассчитать необходимый маховой момент маховика,

если маховые моменты механизма $GD_M^2 = 6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ и муфты $GD_{\text{муф}}^2 = 0,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Решение. 1. *Выбор двигателя.* На основании табл. 16 строим кривую (рис. 4.3) и определяем по ней средний момент нагрузки $M_{\text{ср}} = 304 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Находим необходимые частоту вращения и мощность приводного электродвигателя:

$$n = n_1 u_1 u_2 u_3 u_4 = 7,4 \cdot 3,22 \cdot 3,84 \cdot 5,5 \cdot 2,77 \text{ мин}^{-1} = 1380 \text{ мин}^{-1};$$

$$P = \frac{M_{\text{ср}} n}{9550} = \frac{304 \cdot 1380}{9550} \text{ кВт} = 44 \text{ кВт}.$$

Предварительно выбираем электродвигатель с повышенным скольжением, имеющий следующие номинальные данные: $P_{\text{ном}} = 46,2 \text{ кВт}$; $U_{\text{ном}} = 380 \text{ В}$; $n_{\text{ном}} = 1380 \text{ мин}^{-1}$; $\eta_{\text{ном}} = 0,86$; $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,88$; $GD_{\text{дв}}^2 = 2,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $I_{\text{к}}/I_{\text{ном}} = 5$; $\lambda = M_{\text{мах}}/M_{\text{ном}} = 2,4$; $m = M_{\text{к}}/M_{\text{ном}} = 2,2$; $M_{\text{ном}} = \frac{46,2}{1380} \cdot 9550 \text{ Н} \cdot \text{м} = 320 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $M_{\text{дв мах}} = M_{\text{ном}} \lambda = 320 \cdot 2,4 \text{ Н} \cdot \text{м} = 770 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $s_{\text{ном}} = \frac{1500 - 1380}{1500} = 0,08$.

Выбранный двигатель проверяем методом Савинкова по тепловому режиму ($M_{\text{экв}}$) и механической перегрузке ($M_{\text{мах}}$),

$$M_{\text{экв}} = 319 \text{ Н} \cdot \text{м} \approx M_{\text{ном}} \text{ и } M_{\text{мах}} \approx 560 \text{ Н} \cdot \text{м} < M_{\text{дв мах}},$$

т. е. электродвигатель выбран правильно.

2. *Расчет махового момента маховика.* Определяем время цикла

$$T = \frac{60}{n_1} = \frac{60}{7,4} \text{ с} = 8,12 \text{ с}.$$

Пользуясь табл. 16 или рис. 4.3, а также принимая пик нагрузки прямоугольным и равным $M = 2450 \text{ Н} \cdot \text{м}$, находим угол поворота маховика $\alpha \approx 28^\circ$ и время

$$t = \frac{T\alpha}{2\pi} = \frac{8,12 \cdot 28}{360} \text{ с} = 0,632 \text{ с}.$$

Пренебрегая изменением частоты вращения электродвигателя в период преодоления пика нагрузки, а также принимая запас по максимальному моменту двигателя 15%, т. е. считая, что в период преодоления пика двигатель будет развивать момент $M'_{\text{дв мах}} = 0,85 \cdot 770 \text{ Н} \cdot \text{м} = 655 \text{ Н} \cdot \text{м}$, рассчитываем маховой момент всей системы

$$GD^2 = \frac{38,3 M_{\text{ном}} t}{n_{\text{с}} s_{\text{ном}} \ln \frac{M - M_{\text{ст}}}{M - M'_{\text{дв мах}}}} = \frac{38,3 \cdot 320 \cdot 0,632}{1500 \cdot 0,08 \ln \frac{2450 - 147}{2450 - 655}} \text{ кг} \cdot \text{м}^2 = 253 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Определяем маховой момент маховика, приведенный к валу двигателя, а затем и по отношению к собственному валу:

$$GD_{\text{махов. пр}}^2 = GD^2 - GD_{\text{м}}^2 - GD_{\text{муф}}^2 - GD_{\text{дв}}^2 = \\ = 253 - 6 - 0,5 - 2,5 = 244 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$GD_{\text{махов}}^2 = GD_{\text{махов. пр}}^2 u_4^2 = 244 \cdot 2,77^2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 = 1870 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

4.4. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И ЭЛЕКТРОПРИВОД ГЛАВНЫХ МЕХАНИЗМОВ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ

Общая характеристика. Все механизмы прокатных станов, а следовательно, и их электроприводы условно разделяют на *главные*, обеспечивающие процесс прокатки и формирования профилей, и *вспомогательные*, обслуживающие технологический цикл прокатки. Процесс получения готового проката осуществляется в рабочих клетях и обычно разбивается на несколько этапов. Вначале слиток прокатывают на крупных обжимных и заготовочных станах, а затем полученные заготовки подают для окончательной прокатки на специализированные станы. Рабочие клетки бывают *неревверсивные двухвалковые* (дуо); *неревверсивные трехвалковые* (трио), где один пропуск металла осуществляется между нижним и средним, а другой между средним и верхним валками; *с четырьмя, шестью, двенадцатью и двадцатью валками*; *универсальные*, которые кроме горизонтальных имеют по два вертикальных валка и используются для прокатки слябов, широких полос и толстого листа; *реверсивные двухвалковые* для прокатки мегалла крупного сечения, в которых направление вращения валков изменяется после каждого пропуска мегалла; *многовалковые* для горячей и холодной прокатки тонких листов и т. д. Обычно прокатные станы имеют несколько рабочих клеток. Только наиболее крупные обжимные и толстолистовые станы, а также некоторые специальные станы имеют одну рабочую клетку. В зависимости от расположения рабочих клеток различают *периодические* и *непрерывные* станы. В станах периодической прокатки клетки располагаются в одну или несколько линий и прокатываемая полоса пропускается поочередно по клетям. У непрерывных станов клетки расположены одна за другой в направлении прокатки на таком расстоянии, чтобы металл при прокатке находился одновременно в нескольких

клетях. Существуют также *полунепрерывные* станы, являющиеся сочетанием периодических и непрерывных станов [7].

Независимо от исполнения и назначения по системам управления прокатные станы можно разделить на два основных вида: *нереверсивные* и *реверсивные*, а каждый из них — на *нерегулируемые* и *регулируемые*. По характеру нагрузки *нереверсивные нерегулируемые* станы можно разбить на две группы: *станы с пиковой нагрузкой* и *станы с равномерной нагрузкой*. *Нереверсивные регулируемые* станы делятся на две группы: *с часто регулируемой скоростью* (захват металла осуществляется на небольшой скорости, затем скорость увеличивается до максимальной, а перед выходом металла из валков скорость снижается) и *с регулированием скорости только при настройке* для того, чтобы прокатка определенных профилей производилась с наиболее приемлемыми постоянными скоростями (*непрерывные, полунепрерывные и другие станы*). Поскольку необходимый диапазон регулирования скорости в таких станах не превышает 3 : 1, в качестве их приводных двигателей используются, как правило, двигатели постоянного тока, регулируемые потоком возбуждения.

В непрерывных станах прокатка одной полосы производится одновременно в нескольких клетях. Поэтому соотношения скоростей клетей должны быть строго определенными, так как через клетки за одинаковое время должен проходить один и тот же объем металла. Эти соотношения можно получить, исходя из следующих рассуждений: если количество клетей k , а площади сечения полосы после каждой клетки $S_1, S_2, S_3, \dots, S_k$ (пропорциональны линейным частотам вращения валков $n_1, n_2, n_3, \dots, n_k$), то объем металла, проходящий через каждую клеть в единицу времени,

$$S_1 n_1 = S_2 n_2 = S_3 n_3 = \dots = S_k n_k. \quad (4.22)$$

После пропуска металла через каждую клеть он удлиняется соответственно на величину опережения $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_k$; поэтому скорости клетей должны нарастать, т. е. частота вращения валков должна изменяться по закону

$$n_k = \frac{n_{k-1}}{1 - \lambda_k}. \quad (4.23)$$

Из выражений (4.22) и (4.23) получаем следующие соотношения частот вращения валков между клетями: второй и первой

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{S_1}{S_2} \frac{1 - \lambda_2}{1 - \lambda_1}; \quad (4.24')$$

третьей и второй

$$\frac{n_3}{n_2} = \frac{S_2}{S_3} \frac{1 - \lambda_3}{1 - \lambda_2} \quad (4.24'')$$

(4.24)

и т. д.

Таким образом, по мере уменьшения площади сечения полосы частота вращения валков клетей должна возрастать в строгом соответствии с (4.24). Если этого соблюдено не будет, то между клетями образуются петли или металл будет подвергаться растяжению. Непрерывные станы прокатывают узкий или широкий сортамент проката. При узком сортаменте проката может использоваться групповой электропривод с одним синхронным или асинхронным двигателем для нескольких клетей, а строгое соотношение скоростей по клетям обеспечивается передаточными отношениями редукторов. При широком сортаменте проката применяется индивидуальный электропривод для каждой клетки с электродвигателями постоянного тока, позволяющими регулировать частоту вращения валков в широких пределах и обеспечивать строгое соотношение скоростей клетей.

Реверсивные станы обычно используются для прокатки наиболее тяжелых профилей. К числу таких станов относятся крупные обжимные станы (блюминги и слябинги), двухвалковые толстолистовые и рельсобалочные станы, а также станы для прокатки широкой ленты. Цикл работы их электроприводов включает в себя обычно следующие этапы: перед пропуском заготовки двигатель ускоряется до скорости захвата около 10...30% максимальной скорости в данном пропуске; затем в валки подается заготовка (это исключает срыв захвата заготовки и снижает ее удар о валки); после захвата заготовки частота вращения двигателя увеличивается до максимальной (наиболее выгодной) в данном пропуске; по достижении максимальной частоты вращения двигатель некоторое время работает в установившемся режиме, затем перед выходом заготовки из валков скорость прокатки постепенно снижается таким образом, чтобы она составляла 70...90% максимальной

скорости в данном пропуске (это снижает отброс заготовки при ее выходе из валков); после выхода заготовки из валков двигатель тормозится вхолостую, затем он реверсируется и цикл повторяется, причем максимальная скорость от пропуска к пропуску (по мере удлинения заготовки) повышается. Такой порядок прокатки требует частых пусков (число включений может достигать 1000 в час) и регулирования скорости в широких пределах (до 8 : 1). В связи с этим в приводах реверсивных станов применяются только тихоходные двигатели постоянного тока с минимально возможным маховым моментом якоря и двухзонным регулированием частоты вращения (напряжением и потоком), в наиболее крупных реверсивных станах устанавливается индивидуальный привод каждого валка.

Для получения тонкого стального листа широко используется холодная прокатка. Среди станов такой прокатки наиболее распространены *непрерывные* и *многовалковые* станы, состоящие из нескольких клетей с одновременной прокаткой полосы во всех клетях стана. Требования в части соотношения скоростей клетей таких станов аналогичны рассмотренным выше непрерывным станам горячей прокатки. Их применение наиболее целесообразно для производства большого количества одинакового по сортаменту листа. В тех случаях, когда сортамент изменяется в широких пределах, используют реверсивные одноклетевые станы. При заправке полосы и перед окончанием ее прокатки линейные скорости прокатных валков должны быть ниже скорости прокатки, что приводит к утолщению полосы по сравнению с заданной. Чтобы длины полос с такими отклонениями были минимальны, время ускорения и замедления двигателя должно быть сведено до минимума. С этой целью в приводе каждой клетки устанавливается индивидуальный двигатель постоянного тока с уменьшенным маховым моментом якоря. Кроме того, двигатели постоянного тока при соответствующих схемах управления позволяют автоматически поддерживать необходимые натяжения полос, осуществлять согласованный пуск, установившуюся работу и замедление привода различных клетей. Двигатели станов, работающих с относительно невысокими скоростями, имеют общий питающий преобразователь, а в станах с высокими скоро-

стями обычно устанавливаются преобразователи, отдельные для каждого электродвигателя.

Для привода главных механизмов прокатных станков используются двигатели специального исполнения (металлургических серий) повышенной прочности: а) постоянного тока с параллельным возбуждением на напряжения 220, 440, 630, 750, 860 В и выше с допустимой перегрузкой по моменту около $1,8...2,5 M_{ном}$ при номинальном потоке (при пониженном потоке эти пределы должны быть снижены), причем в каталогах приводятся две частоты вращения этих двигателей: при номинальных напряжениях и потоке и при минимально допустимом потоке возбуждения двигателя; б) переменного тока с короткозамкнутым ротором на напряжения 380/220, 500, 660, 3000, 6000 и 10000 В с максимальными моментами около $1,8...3,0 M_{ном}$. Двигатели реверсивных обжимных прокатных станков связаны со станами непосредственно — без зубчатых передач, поэтому они имеют небольшие номинальные скорости и искусственное охлаждение.

Расчет необходимой мощности приводных электродвигателей. Несмотря на многообразие прокатных станков, отличающихся конструкцией и технологией прокатки, мощность приводных электродвигателей их главных механизмов в период прокатки расходуется на одно и то же: 1) на деформацию металла; 2) на преодоление добавочных сил трения в подшипниках, передачах и других частях стана; 3) на преодоление потерь холостого хода стана; 4) на преодоление динамических усилий в периоды ускорений и замедлений (особенно в реверсивных станах) [7]. Учет этих факторов (независимо от методов расчета) и определяет необходимую мощность электродвигателя, причем учитываться они должны для наиболее тяжелых условий работы стана. В то же время относительно точно учесть каждый из них, как правило, не предоставляется возможным. Поэтому необходимую мощность электродвигателей рассчитывают с различными допущениями, пользуясь теоретическими методами вытяжки, акад. Целикова А. И. и экспериментальными данными.

Работа, необходимая для деформации металла, называется *теоретической работой прокатки*; суммарная работа, затрачиваемая на деформацию металла и преодо-

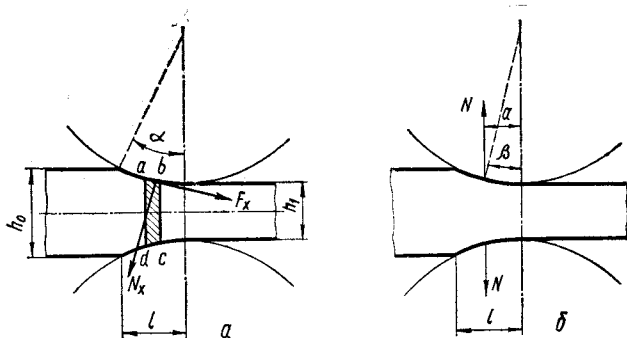


Рис. 4.4. Обжим металла в валках (а) и распределение сил по дуге захвата (б)

ление добавочных сил трения, — *чистой работой прокатки*; отношение этих работ — *к. п. д. прокатки* ($\eta_{пр}$). Если к чистой работе прокатки прибавить потери холостого хода стана, то получится *полная работа прокатки*. Отношение теоретической работы прокатки к полной работе определяет *к. п. д. стана* ($\eta_{ст}$), который в зависимости от назначения стана колеблется в широких пределах: для обжимных станов он составляет $\eta_{ст} = 0,6 \dots 0,7$, для рельсобалочных — $\eta_{ст} \approx 0,4$, а для проволочных — $\eta_{ст} \approx 0,1$ [13]. При расчете необходимой мощности электродвигателей теоретическими методами находят теоретическую работу, необходимую для деформации единицы объема металла при прокатке или волочении, а затем с учетом к. п. д. стана рассчитывают необходимую мощность электродвигателя.

При деформации металла его объем практически не меняется; поэтому произведение площади сечения металла, подвергающегося деформации, на его длину есть величина постоянная. Расчет теоретической работы методом выгяджки базируется на следующих положениях и рассуждениях: силу давления истечения металла при прокатке можно выразить через давление истечения σ (Н/мм^2) и площадь сечения металла S (мм^2):

$$F = \sigma S.$$

Теоретическая работа этой силы по смещению элемента металла на длине ab (рис. 4.4, а) будет

$$\Delta A_{\text{теор}} = F dl = \sigma S dl.$$

Если деформация (прокатка) осуществляется от начальной длины l_1 до конечной l_2 , то работа, затраченная на деформацию металла за пропуск, составит

$$A_{\text{теор}} = \int_{l_1}^{l_2} \sigma S dl = \int_{l_1}^{l_2} \sigma S dl/l. \quad (4.25)$$

Полагая, что температура прокатки постоянная, т. е. считая, что объем прокатываемого металла (V) и давление истечения практически постоянны ($Sl = \text{const}$ и $\sigma = \text{const}$), после интегрирования уравнения (4.25) получаем

$$A_{\text{теор}} = \int_{l_1}^{l_2} \sigma S dl/l = \sigma V \ln(l_2 - l_1) = \sigma V \ln \lambda_k, \quad (4.26)$$

где $\lambda_k = l_k/l_{k-1}$ — частичная вытяжка за один (k -й) пропуск металла; l_{k-1} и l_k — длины заготовки до и после прокатки.

Если давление истечения выразить в Н/мм², а объем — в мм³ и принять, что прокатывается сталь (плотность $\gamma = 7,8$ г/см³) при температуре 900...950° С, чему соответствует $\sigma = 98,1$ Н/мм², то для того, чтобы теоретическую работу выразить в джоулях на килограмм металла, нужно правую часть уравнения (4.26) разделить на 1000 (перевод в ньютон) и умножить на $\frac{100^3}{7,8}$ (перевод в килограммы), т. е.

$$A_{\text{теор}} = 12\,600 \ln \lambda_k. \quad (4.27)$$

Зная теоретическую работу и к. п. д. стана, необходимую работу, которую должен совершить двигатель при прокатке металла, можно определить по формуле

$$A_{\text{полн}} = \frac{A_{\text{теор}}}{\eta} = 12\,600 \frac{\ln \lambda_k}{\eta_{\text{ст}}}, \quad (4.28)$$

а зная скорость прокатки, легко найти время одного пропуска t , следовательно, и необходимую мощность приводного электродвигателя P (кВт), т. е. $P = \frac{A}{t} \times 10^{-3}$. Расчетная формула (4.28) дает более правильные результаты для крупных заготовок, температура

которых в период прокатки изменяется мало, и удовлетворительные для мелких профилей.

Расчет необходимой мощности приводного двигателя методом акад. Целикова А. И. схематически сводится к расчету мощности, необходимой для деформации металла, по моменту прокатки. Известно, что металл, пропускаемый между валками, испытывает деформацию, и его толщина уменьшается от h_0 до h_1 (рис. 4.4, а). На элемент металла $abcd$ со стороны валков будут действовать две силы: N_x — перпендикулярная к окружности валка и F_x — касательная к этой окружности. Равнодействующая этих сил N (рис. 4.4, б) параллельна линии, соединяющей центры валков, и расположена от нее на расстоянии a . Следовательно, момент прокатки

$$M_{\text{пр}} = 2Na, \quad (4.29)$$

где $N = N_{\text{ср}}bl$ — давление металла на валки, Н; $a = \Psi \sqrt{r\Delta h}$ — плечо равнодействующей силы N , м; b — ширина прокатываемого металла, мм; l — длина дуги захвата заготовки, мм; $N_{\text{ср}} = \frac{\sigma}{m} (e^m - 1)$ — среднее удельное давление металла на валки при отсутствии переднего и заднего натяжений, Н/мм²; $\sigma = 1,15 \times \frac{\sigma_0 + \sigma_1}{2}$ — средний предел текучести металла (до прокатки σ_0 и после прокатки σ_1), Н/мм²; $m = \frac{2\mu l}{h_0 + h_1}$ — коэффициент, зависящий от толщины металла до и после прокатки (h_0, h_1), дуги захвата l и коэффициента трения между металлом и валком μ ; Ψ — коэффициент, зависящий от вида проката ($\Psi = 0,35 \dots 0,7$); r и Δh — радиус валков (мм) и абсолютное обжатие (мм).

Зная скорость прокатки, а следовательно, и частоту вращения двигателя, мощность, необходимую для деформации металла, можно определить по формуле

$$P_{\text{пр}} = \frac{M_{\text{пр}} n}{9550}.$$

Если воспользоваться к. п. д. стана или к полученной мощности прибавить мощности дополнительных потерь на трения в подшипниках и в редукторе, а также потери холостого хода и на преодоление динамических

усилий, то можно найти необходимую полную мощность приводного двигателя.

При выборе двигателей для станов холодной прокатки, работающих с передним и задним натяжениями, следует учитывать дополнительные мощности, затрачиваемые на эти натяжения, т. е. к полученной мощности двигателя нужно прибавить или отнять разность мощностей натяжений.

При расчете необходимой мощности приводного двигателя по экспериментальным данным используют зависимость расхода энергии на тонну прокатываемой продукции от удлинения, а для станов холодной прокатки — от уменьшения толщины прокатываемой ленты [7]. В этом случае определяют расход электроэнергии отдельно для каждого пропуска ленты, причем удельный расход электроэнергии за один пропуск равняется разности расходов электроэнергии до и после пропуска металла, а полный расход электроэнергии за этот пропуск — произведению этой разности на массу слитка. При выборе двигателей для вновь проектируемых станов значение расчетной мощности принимают на 20...30% больше.

В расчетную мощность, полученную тем или иным способом, необходимо ввести соответствующие поправки, учитывающие влияние маховиков (если они используются в прокатных станах) и переходных процессов (в реверсивных станах). Выбранные двигатели должны быть проверены по нагреву и допустимой перегрузке, для чего используются реальные диаграммы нагрузки за цикл работы механизма.

Пример. Методами вытяжки и акад. Целикова А. И. рассчитать мощность прокатки 3-го пропуска металла на блюминге с диаметрами чугунных валков $D = 1150$ мм и их цапф $d = 650$ мм при следующих данных: размеры заготовки до и после прокатки $b_1 \times h_0 = 1610 \times 665$ мм и $b_2 \times h_1 = 625 \times 585$ мм; длины заготовки $l_{k-1} = 2203$ мм и $l_k = 2443$ мм; масса заготовки $m_3 = 7$ т; температура прокатываемого металла $T = 1050^\circ$ С; предел текучести $\sigma = 66,7$ Н/мм²; время пропуска $t = 0,87$ с; установившаяся частота вращения прокатки $n = 40$ мин⁻¹; к.п.д. стана $\eta = 0,65$.

1. Решение методом вытяжки. Определяем частичную вытяжку за пропуск

$$\lambda_k = \frac{l_k}{l_{k-1}} = \frac{2443}{2203} = 1,1.$$

Рассчитываем теоретическую работу прокатки:

$$A_1 = 12\,600 \ln \lambda_k = 12\,600 \ln 1,1 \text{ Дж/кг} = 1215 \text{ Дж/кг};$$

$$A_{\text{теор}} = m_3 A_1 = 7 \cdot 10^3 \cdot 1215 \text{ Дж} = 8500 \cdot 10^3 \text{ Дж}.$$

Находим полную работу прокатки

$$A_{\text{полн}} = \frac{A_{\text{теор}}}{\eta} = \frac{8500 \cdot 10^3}{0,65} \text{ Дж} = 13\,050 \cdot 10^3 \text{ Дж}.$$

Определяем необходимую мощность прокатки

$$P_{\text{полн}} = \frac{A_{\text{полн}}}{t} = \frac{13\,050 \cdot 10^3}{0,87 \cdot 10^3} \text{ кВт} = 15\,000 \text{ кВт}.$$

2. Решение методом акад. Целикова А. И.
Для чугуна слегка шероховатых валков находим коэффициент трения между прокатываемым металлом и валками

$$\mu = 1,05 - 0,0005T = 1,05 - 0,0005 \cdot 1050 = 0,525.$$

Рассчитываем длину дуги захвата

$$l = \sqrt{r(h_0 - h_1)} = \sqrt{\frac{1150}{2} (665 - 585)} \text{ мм} = 214 \text{ мм}.$$

Для определения среднего удельного давления металла на валки находим сначала коэффициент

$$m = \frac{2\mu l}{h_0 + h_1} = \frac{2 \cdot 0,525 \cdot 214}{665 + 585} = 0,18,$$

после чего

$$N_{\text{ср}} = \frac{\sigma}{m} (e^m - 1) = \frac{66,7}{0,18} (2,72^{0,18} - 1) \text{ Н/мм}^2 = 70,2 \text{ Н/мм}^2.$$

Рассчитываем давление металла на валок и плечо равнодействующей силы при прокате горячей заготовки квадратного сечения ($\Psi = 0,5$):

$$N = b_2 l N_{\text{ср}} = 625 \cdot 214 \cdot 70,2 \text{ Н} = 9420 \cdot 10^3 \text{ Н};$$

$$a = \Psi \sqrt{r \Delta h} = 0,5 \sqrt{\frac{1150}{2} (665 - 585)} \text{ м} = 0,107 \text{ м}.$$

Определяем момент прокатки и мощность, необходимую для деформации металла:

$$M_{\text{пр}} = 2Na = 2 \cdot 9420 \cdot 10^3 \cdot 0,107 \text{ Н} \cdot \text{м} = 2020 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$P_{\text{пр}} = \frac{M_{\text{пр}} n}{9550} = \frac{2020 \cdot 10^3 \cdot 40}{9550} \text{ кВт} = 8500 \text{ кВт}.$$

Считая, что в блюминге установлены подшипники скольжения с металлическими вкладышами ($\mu_1 = 0,09$), находим мо-

мент и мощность, необходимую для преодоления добавочных сил трения в подшипниках валков:

$$M_{\text{тр1}} = Nd\mu_1 = 9420 \cdot 10^3 \cdot 0,65 \cdot 0,09 \text{ Н} \cdot \text{м} = 550 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$P_{\text{тр1}} = \frac{M_{\text{тр1}}n}{9550} = \frac{550 \cdot 10^3 \cdot 40}{9550} \text{ кВт} = 2320 \text{ кВт}.$$

Принимая к.п.д. шестеренной клетки $\eta_{\text{кл}} = 0,96$, определяем мощность, необходимую для преодоления добавочных потерь в клетях:

$$P_{\text{тр2}} = \left(\frac{1}{\eta_{\text{кл}}} - 1 \right) (P_{\text{пр}} + P_{\text{тр1}}) = \left(\frac{1}{0,96} - 1 \right) (8500 + 2320) \text{ кВт} = 460 \text{ кВт}.$$

На основании опыта эксплуатации подобных станов считаем, что момент холостого хода блюминга $M_x = 19\,620 \text{ Н} \cdot \text{м}$; тогда мощность холостого хода

$$P_x = \frac{M_x n}{9550} = \frac{19\,620 \cdot 40}{9550} \text{ кВт} = 82 \text{ кВт}.$$

Рассчитываем полную мощность прокатки как сумму мощностей:

$$P_{\text{полн}} = P_{\text{пр}} + P_{\text{тр1}} + P_{\text{тр2}} + P_x = (8500 + 2320 + 460 + 82) \text{ кВт} = 11\,362 \text{ кВт}.$$

4.5. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И ЭЛЕКТРОПРИВОД ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ

К вспомогательным механизмам прокатных станов относятся механизмы, обеспечивающие технологический цикл прокатки: слитковозы, роликовые конвейеры, нажимные устройства, манипуляторы, ножницы, правильные машины, моталки и др. Общими требованиями, предъявляемыми к этим механизмам, являются обеспечение максимальной производительности обслуживаемого агрегата и максимальное удовлетворение технологического цикла. В качестве примера рассмотрим некоторые вспомогательные механизмы реверсивных обжимных станов.

Слитковозы. Предназначены для доставки слитков от нагревательных колодцев к роликовому конвейеру; для увеличения количества перевозимых слитков их электроприводы передвижения должны обеспечивать максимальные безбуксовочные (колес о рельсы) ускорения и

замедления, а также иметь устройства, исключаяющие значительные удары о конвейеры. Руководствуясь этим, расчет необходимой мощности приводных электродвигателей слитковозов производят по предельно оправданному моменту [25], т. е.

$$M_{п.о} = \frac{FD}{2\eta i} + M_{ст}, \quad (4.30)$$

где $F = 1000\varphi P_k$ — тяговое усилие на ободу ходового колеса, Н; φ — коэффициент сцепления колес с рельсами ($\varphi = 0,2 \dots 0,22$); P_k — сцепное усилие $\left(\frac{\text{суммарная сила тяжести}}{\text{число ведущих осей}} \right)$, Н; D — диаметр ходовых колес, м; η — к. п. д. передачи механизма; i — передаточное число редуктора; $M_{ст}$ — статический момент (Н · м), определяемый по формуле

$$M_{ст} = gk \frac{m + m_0}{i\eta} (f + \mu r) \cdot 10^{-2},$$

где $m + m_0$ — масса слитковоза со слитком, кг; f — коэффициент трения качения ходовых колес о рельсы ($f = 0,05 \dots 0,08$ см); μ — коэффициент трения скольжения в подшипниках (для подшипников скольжения $\mu = 0,08 \dots 0,15$, качения $\mu = 0,008 \dots 0,01$); r — радиус цапфы или средний радиус подшипников ходовых колес, см; k — коэффициент, учитывающий дополнительное трение ($k = 1,5 \dots 2$). В приводах слитковозов устанавливаются один или два электродвигателя мощностью до 300...400 кВт, которые обеспечивают ускорения до 1,1...1,3 м/с² и скорости передвижения до 7 м/с.

Роликовые конвейеры. Выполняются с групповым или индивидуальным приводом от двигателей мощностью до 300...400 кВт. В станинных роликах-конвейерах устанавливается индивидуальный безредукторный привод. Системы управления двигателями роликовых конвейеров в части обеспечения скорости прокатки должны быть согласованы с системами управления главными приводами прокатных станов. Кроме того, они должны обеспечивать равноускоренный разгон без пробуксовки заготовки о ролики, для чего линейные ускорения или замедления слитков не должны превышать допустимых значений $a_{пр}$, соответствующих силе трения скольжения по конвейеру F [7, 25], т. е.

$$F = mg\mu_0 \geq ma_{пр}.$$

Отсюда

$$a_{\text{пр}} \leq \mu_6 g, \quad (4.31)$$

где μ_6 — коэффициент трения при буксовании металла о ролики ($\mu_6 = 0,12 \dots 0,3$); g — ускорение свободного падения.

Для получения минимального времени замедления заготовки и тем самым пройденного расстояния после выброса ее из валков конвейер в момент выброса должен вращаться с меньшей линейной скоростью по сравнению с заготовкой и в том же направлении или должен быть неподвижным, а сразу же после выброса заготовки должен получать команду на реверс с тем, чтобы остановить заготовку и вернуть ее снова к валкам.

Тормоза в приводах роликовых конвейеров не применяются; поэтому выбор двигателей для них нужно производить по моменту, исходя из допустимого безбуксового ускорения заготовки, т. е.

$$M_{\text{дв. ном}} \leq M_6 = \frac{m_p g z d \mu}{2i \eta_{\text{ном}}} + \frac{mg(\mu d/2 + f) \cdot 10^{-2}}{i \eta_{\text{ном}}}. \quad (4.32)$$

В то же время предельно оправданный момент роликовых конвейеров при разгоне будет больше момента буксовки поскольку

$$M_{\text{п. о}} = M_{\text{тр}} + M_{\text{изб}} = \frac{m_p g d \mu z}{2i \eta_x} + \frac{mg(\mu d/2 + f) \cdot 10^{-2}}{i \eta_{\text{ном}}} + \frac{\mu G D^2}{2D}. \quad (4.33)$$

Здесь $M_{\text{дв. ном}}$ — номинальный момент двигателя, Н · м; $M_{\text{тр}}$ — момент транспортирования металла Н · м; $M_{\text{изб}} = J \frac{d\omega}{dt} = \frac{\mu G D^2}{2D}$ — динамический момент, Н · м; D — диаметр роликов конвейера, м; m_p и m — массы ролика и металла, приходящиеся на данную секцию конвейера или ролика, кг; z — число роликов; d — диаметр цапф роликов, см; μ — коэффициент трения в цапфах (для подшипников качения $\mu = 0,008 \dots 0,01$, скольжения $\mu = 0,1 \dots 0,15$); i — передаточное число редуктора; η_x — механический к. п. д. при холостом ходе ($\eta_x \approx 0,5\eta$); $\eta_{\text{ном}}$ — то же при номинальной нагрузке; f — коэффициент трения качения (для горячего металла $f = 0,15$ см); $G D^2$ — суммарный маховой момент.

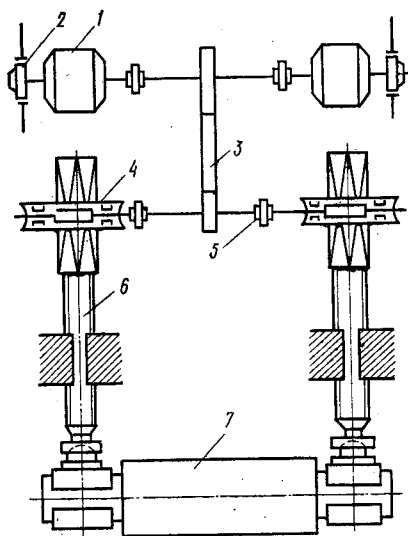


Рис. 4.5. Кинематическая схема нажимного устройства;

1 — электродвигатель; 2 — тормоз; 3 — цилиндрический редуктор; 4 — червячный редуктор; 5 — муфта сцепления; 6 — нажимной винт; 7 — прокатный валок

Предельно оправданный момент обычно больше допустимого безбуксового момента; поэтому схема управления двигателями роликовых конвейеров должна обеспечивать возможность получения упорных характеристик.

Нажимные устройства. Кинематическая схема нажимного устройства изображена на рис. 4.5. Оно служит для перестановки верхнего валка стана перед каждым новым проходом слитка и приводится в движение от электродвигателей мощностью до 750 кВт. Высокая интенсивность прокатки на со-

временных реверсивных станах и стремление сократить паузы привели к необходимости высоких скоростей (до 0,2 м/с) и ускорений (около 0,15 м/с²) перемещения верхнего валка. А так как нажимные устройства при таких скоростях и ускорениях требуют уточняющих включений двигателей, широко практикуется прокатка с так называемой *штамповкой*, когда нажимное устройство обжимает входящий в валки и выходящий из них конец слитка, что улучшает условия захвата и сокращает продолжительность паузы. Число включений нажимного устройства современных станов превышает 1000...1500 в час, продолжительность включения достигает 50...60% при возможности работы на упор. Схемы управления электродвигателями этих механизмов должны обеспечивать наилучшее использование двигателей и получение характеристик при работе на упор. Нагрузка приводного двигателя нажимного устройства определяется в основном моментами сил

трения винта при подъеме или опускании валка и трения в пяте. За расчетный момент, по которому выбирается приводной двигатель, принимается сумма моментов сил трения при подъеме (M_1) или опускании (M_2) и момента сил трения в пяте ($M_{\text{п}}$). В том случае, когда валок перемещается во время прокатки, к усилию уравновешивания верхнего валка (P_y) необходимо прибавить и давление на шейку, обусловленное деформацией металла. Момент M_1 определяют по формуле

$$M_1 = (P_y - m_{\text{в}}g - 0,5m_{\text{в}}g) \cdot 0,5d_{\text{ср}} \operatorname{tg}(\varphi - \alpha),$$

момент M_2 — по формуле

$$M_2 = (P_y - m_{\text{в}}g - 0,5m_{\text{в}}g) \cdot 0,5d_{\text{ср}} \operatorname{tg}(\varphi + \alpha),$$

а момент $M_{\text{п}}$ рассчитывают так:

$$M_{\text{п}} = \left(P_y - \frac{m_{\text{в}}g}{2} \right) \frac{d_{\text{п}}}{3} \mu.$$

Тогда суммарные статические моменты, приведенные к валу двигателя при подъеме ($M_{\text{ср1}}$) и опускании ($M_{\text{ср2}}$) валка, будут [25]:

$$M_{\text{ср1}} = \frac{M_1 + M_{\text{п}}}{i\eta}; \quad M_{\text{ср2}} = \frac{M_2 + M_{\text{п}}}{i\eta}. \quad (4.34)$$

В этих выражениях P_y — усилие уравновешивания верхнего валка, Н; $m_{\text{в}}$ — масса нажимного винта, кг; $m_{\text{в}}$ — масса валка с кассетами и хомутом, кг; $d_{\text{ср}}$ — средний диаметр нарезки нажимного винта, м; φ — угол трения в нарезке (обычно $\varphi = 5^\circ 43''$, так что $\operatorname{tg}\varphi = 0,1$); α — угол подъема нарезки, град; μ — коэффициент трения между нажимным винтом и пятой (для бронзы и сверхпрочного чугуна $\mu = 0,1$; для закаленной стали $\mu = 0,12 \dots 0,15$); $d_{\text{п}}$ — диаметр опорной пяты, м; i — передаточное число редуктора (от двигателя к нажимному винту); η — к. п. д. редуктора.

Манипуляторы. Передают заготовку от калибра к калибру, уточняя ее положение при подаче в калибр и подправляя металл при появлении изгиба. Скорости перемещения линеек манипуляторов достигают 1,5 м/с, а ускорения — 1 м/с² при большом числе включений в час и продолжительности включения до 40%. Кроме того, желательно, чтобы перемещения линеек были без рывков. Поэтому схемы управления манипуляторами

должны позволять полностью использовать возможности приводных электродвигателей при работе их на упор. Суммарные мощности двигателей достигают 400...600 кВт, их механические характеристики — достаточно мягкие.

Ножницы обжимных реверсивных прокатных станов. Работают в режиме пуска на каждый рез с числом включений 350...600 в час и более. Для лучшего использования запаса кинетической энергии вращающихся частей ножниц механическая характеристика их привода должна быть достаточно мягкой.

4.6. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНИЗМАМИ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ

Большое разнообразие прокатных станов и их механизмов, начиная от простейших до адаптивных (самонастраивающихся) систем с изменением условий прокатки (например, трубопрокатные станы 160, 400 и др.), а также разнообразие технологических требований, предъявляемых к каждому из них, затрудняют возможность исчерпывающе рассмотреть все вопросы, относящиеся к их управлению. Однако общие требования для подавляющего большинства систем управления таковы: а) схемы управления электроприводами должны быть весьма быстродействующими; б) механические характеристики электродвигателей механизмов в системах должны быть стабильными; в) для обеспечения этих требований схемы управления должны содержать обратные связи, т. е. должны быть замкнутыми; г) схемы управления должны быть надежными.

Исходя из этого, управление электродвигателями механизмов станов осуществляется, как правило, по системе «преобразователь — датчик (П — Д)»: «генератор — двигатель», «инвертный преобразователь — двигатель» или «полупроводниковый преобразователь — двигатель», причем регулирование частоты вращения двигателя постоянного тока производится по определенно выбранному закону изменением подводимого к якорию напряжения или изменением потока возбуждения двигателя. В том случае, когда приводными двигателями механизмов являются асинхронные (с фазным ротором) или синхронные двигатели роль схемы управления сводится

только к пуску первых непосредственно от сети и с форсировкой возбуждения вторых. Для таких вспомогательных механизмов, как раскатные роликовые конвейеры (следуют за рабочими), разработаны схемы с короткозамкнутыми асинхронными двигателями переменного тока, управляемые полупроводниковыми преобразователями частоты без звена постоянного тока.

В современных электроприводах главных и вспомогательных механизмов прокатных станов широко применяется управление по системе «вентильный (тиристорный) преобразователь — двигатель», подробно рассмотренное выше. Такое управление осуществляется, например, в широкополосных станах 1700 и 2000 с мощностью преобразователей 10 500 кВт. Кроме того, разработан ряд серий преобразователей переменного тока напряжением 380, 3000, 6000 и 10 000 В в постоянный ток напряжением 230, 345, 460 В и выше мощностью до 12 000 кВт, предназначенных для питания якорных цепей и обмоток возбуждения машин постоянного тока и обеспечивающих широкий диапазон регулирования их частоты вращения при статическом падении ее не более 0,2% и времени восстановления при толчке нагрузки не более 0,1 с. Так, например, комплектные тиристорные устройства (КТУ) и тиристорные агрегаты неререверсивные (АТ) и реверсивные (АТР) позволяют регулировать частоту вращения в диапазоне 200 : 1 со статизмом не более 10% при номинальной нагрузке и допускают длительную перегрузку 25% и циклическую 100% (по 15 с в течение 10 мин, когда $I_{\text{экв}} \leq I_{\text{ном}}$). При этом в большинстве реверсивных приводов будут использоваться преобразователи, работающие без уравнивающих токов благодаря разделному или несогласованному управлению вентильными группами, а также схемы с регулятором уравнивающего тока.

Ввиду того что электроприводы прокатных станов потребляют значительные мощности, при их работе от тиристорных преобразователей будет генерация высших гармоник, которые отрицательно влияют на питающие системы электроснабжения. Поэтому помимо общих требований к тиристорным силовым схемам преобразователей предъявляются дополнительные требования по минимальному содержанию высших гармоник. Примером выполнения этих требований является силовая

12-фазная схема стана 2000, в которой предусмотрено поочередное управление вентиляльными группами каждого из последовательно включенных преобразователей и которая позволяет работать в промежуточном режиме (между 12- и 24-фазным), что снижает содержание высших гармоник и несколько повышает коэффициент мощности.

4.7. ПОНЯТИЕ О ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ В СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ

Для выполнения требований, предъявляемых к системам управления металлообрабатывающими станками, механизмами прокатных станов и другими сложными электроприводами, их схемы, как правило, должны быть многоконтурными и настроенными на оптимальные режимы при переходных процессах. Объектами регулирования в этих случаях, как известно, являются электродвигатель и преобразователь. Сами по себе они не могут самостоятельно поддерживать заданные параметры на желаемом уровне при возмущающих воздействиях (изменении нагрузки, колебании напряжения сети и т. д.) и обеспечивать необходимые законы изменения параметров в переходных режимах, а потому для компенсации влияния этих возмущений и обеспечения управления электроприводами по заданному закону требуют специального воздействия. Такое воздействие называется *управляющим* и вырабатывается оно автоматическим устройством — регулятором.

Система автоматического управления механизмами сложных электроприводов, состоящая из объекта регулирования и регулятора, должна удовлетворять следующим основным требованиям: а) она должна быть устойчивой; б) погрешность (ошибка регулирования заданного параметра) в установившемся режиме не должна превышать заданной; в) система должна обеспечивать необходимое качество переходных процессов (быстродействие, перерегулирование, число колебаний и т. д.). Для выполнения этих требований в нее вводят обратные связи, а для увеличения быстродействия используют промежуточные усилители (регуляторы частоты вращения), которые делают систему неустойчивой уже при сравнительно небольших коэффициентах усиления. По-

вышение коэффициента усиления до значения, обеспечивающего заданную статическую точность системы при приемлемом качестве регулирования, достигается с помощью специальных корректирующих звеньев, изменяющих динамику системы в нужном направлении, что осуществляется путем введения дополнительных управляющих воздействий в виде производных от регулируемой величины. Таким образом удается учитывать не только ошибку регулирования, но и тенденцию ее изменения, благодаря чему уменьшается максимальное значение ошибки, уменьшается и даже устраняется перерегулирование и увеличивается быстродействие системы. Регулирование с введением производных часто называют *регулированием с упреждением* (форсировкой, предварением). Упреждающие звенья могут быть включены как в канал обратной связи, так и в прямой канал системы управления.

В прямой канал зачастую вводится также интегрирующее звено, позволяющее устранить статическую ошибку регулирования. Однако нужно иметь в виду, что включение интегрирующего звена, как правило, уменьшает запас устойчивости системы, но в сочетании с введением упреждающих звеньев позволяет получить систему с высокими качественными показателями регулирования. Корректирующие звенья, кроме того, ограничивают регулируемые параметры и их производные на заданном уровне.

Корректирующие звенья могут быть включены в местные (внутренние) обратные связи, охватывающие часть функционально необходимых элементов системы (*параллельная коррекция*), или в прямой канал последовательно с функционально необходимыми элементами (*последовательная коррекция*). Возможно также совместное применение этих способов коррекции (*смешанная коррекция*). Системы с параллельной, последовательной и смешанной коррекциями обычно представляют собой многоконтурные системы регулирования. В качестве примера системы с параллельной коррекцией на рис. 4.6, а изображена структурная схема, включающая в себя преобразователь 1, датчик частоты вращения 2, регулятор частоты вращения 3, корректирующие звенья 4, 5 и датчик тока 6; звено 5 (жесткая обратная связь) может отсутствовать.

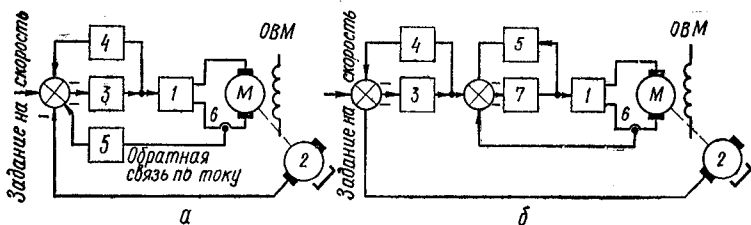


Рис. 4.6. Структурные схемы систем автоматического управления сложными электроприводами

Ток якоря электродвигателя состоит из динамической и статической составляющих. Динамическая составляющая тока, подаваемая на вход регулятора 3, в переходных режимах оказывает корректирующее действие, в то время как статическая составляющая — компаундирующее действие, смягчая механическую характеристику электропривода. В одних случаях такое смягчение характеристики соответствует требованиям технологии; в других — желательно иметь более жесткую механическую характеристику, которая может быть получена соответствующим выбором звена 5. Передаточная функция этого звена должна стремиться к нулю при стремлении к нулю частоты (гибкая обратная связь), при этом обратная связь по току в установившемся режиме не действует.

На рис. 4.6, б показана структурная схема с последовательной коррекцией системы управления электроприводом постоянного тока, включающая в себя, кроме элементов схемы рис. 4.6, а, еще и регулятор тока 7. Автоматическое управляющее устройство состоит в этом случае из двух регуляторов — регулятора частоты вращения 3 и регулятора тока 7, включенных в прямой канал системы управления. Выход регулятора 3 служит заданием для регулятора 7. Несмотря на отрицательную обратную связь по току, механическая характеристика электропривода смягчается незначительно и остается сравнительно жесткой даже при отсутствии корректирующего звена 4. При введении же 4, придающего регулятору частоты вращения характеристику пропорционально-интегрального звена, механическая характеристика привода становится горизонтальной, т. е. частота вращения электродвигателя в установившемся режиме не зависит от нагрузки.

Параллельная и последовательная коррекции имеют свои достоинства и недостатки. При использовании параллельной коррекции стабильность характеристик системы повышается за счет звеньев, охваченных обратной связью. Влияние помех на корректирующее устройство, включенное в цепь обратной связи, значительно меньше, чем при включении его в прямой канал системы, поскольку сигнал снимается с выхода системы, представляющей собой фильтр низких частот. Основными недостатками параллельной коррекции являются относительная сложность расчета системы и большая трудоемкость настройки по следующим причинам: контур, образованный местной обратной связью, может сам по себе оказаться неустойчивым; возникают трудности в суммировании сигналов; систему управления с параллельной коррекцией следует всегда рассматривать как единое целое, поэтому в большинстве случаев изменение одного из параметров требует перерасчета и перестройки всей системы.

Системы с последовательной коррекцией выгодно отличаются от систем с параллельной коррекцией, особенно при сложных структурах объекта регулирования, большом числе регулируемых параметров и высоких требованиях к качеству регулирования. Простые и удобные для практики методы расчета и настройки контуров систем с последовательной коррекцией позволяют даже при значительных погрешностях в определении динамических параметров объекта регулирования получить вполне работоспособную систему управления электроприводом. Такие системы вводят в эксплуатацию методом последовательной настройки их отдельных контуров (в отличие от систем с параллельной коррекцией). Большим достоинством систем с последовательной коррекцией является возможность удобного ограничения любого из регулируемых параметров на заданном уровне. Для настройки система автоматического управления с последовательной коррекцией разбивается на ряд контуров, количество которых равно числу регулируемых параметров системы. В электроприводах постоянного тока может быть до четырех-пяти контуров со следующими параметрами регулирования: напряжение преобразователя, ток в главной цепи, частота вращения электродвигателя, угловое или линейное положение ра-

бочего механизма и др. При этом главным параметром является тот, который определяет основную цель автоматического регулирования. Остальные параметры — вспомогательные, они подчинены главному параметру и, кроме того, связаны между собой. Например, напряжение преобразователя подчинено току в главной цепи, а последний подчинен частоте вращения электродвигателя. Поэтому системы с последовательной коррекцией называют также *системами подчиненного управления (регулирования)*.

Система с последовательной коррекцией подчиненного регулирования параметров может состоять из n контуров. Для настройки ее разбивают на n частей, каждая из которых имеет соответствующий регулируемый параметр. Как правило, такая часть объекта регулирования характеризуется одной (реже двумя) «большой» постоянной времени, компенсируемой действием соответствующего регулятора. Поэтому автоматическое управляющее устройство также состоит из n регуляторов, включенных последовательно (каскадно). Каждый из регуляторов контролирует тот или иной параметр. Любой из контуров системы (например, i -й) является внешним (управляющим) по отношению к одному из контуров $[(i - 1)$ -му] и внутренним (подчиненным) по отношению к другому $[(i + 1)$ -му]. Исключение составляют крайние — внешний (n) и внутренний (первый) контуры системы управления.

В системах автоматического управления с последовательной коррекцией в качестве контурных регуляторов применяют операционные усилители, по схеме подобные изображенной на рис. 4.7. *Операционным усилителем*

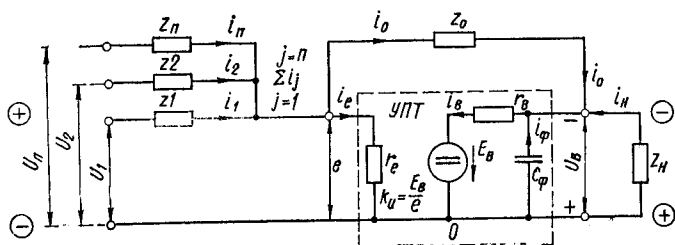


Рис. 4.7. Принципиальная схема операционного усилителя с n входами

(ОУ) называется усилитель постоянного тока (УПТ), обладающий высоким коэффициентом усиления по напряжению (K_U), малой собственной постоянной времени ($T_{\mu y}$) и снабженный внешними решающими цепями, к которым относятся входные цепи и цепи обратной связи. В зависимости от вида сопротивлений, входящих в решающие цепи, и способа их соединения ОУ могут выполнять операции сложения, вычитания, пропорционального усиления, интегрирования и дифференцирования, а также любую комбинацию этих операций. Приведенная схема ОУ имеет n входов с сопротивлениями $Z_1 \dots Z_n$, которые могут быть активными, реактивными или активно-реактивными. Реактивными сопротивлениями обычно являются емкости. Цепь с сопротивлением Z_0 является отрицательной обратной связью между входом и выходом УПТ; потенциал их общей точки 0 условно принимают за нулевой; потенциалы остальных измеряют относительно нулевой точки. Коэффициент усиления по напряжению K_U , равный отношению э.д.с. на выходе E_v к напряжению на входе e , обычно составляет 1000, а напряжение $e = 10 \dots 40$ мВ.

Настройка многоконтурной системы с подчиненным регулированием параметров достигается последовательной оптимизацией контуров системы, начиная с внутреннего и кончая внешним. Под *оптимизацией контура* обычно понимают такую его настройку, которая наилучшим образом отвечает поставленным требованиям. Эти требования можно разбить на две основные группы: требования к динамике (поведению системы в переходных режимах) и требования к поведению системы при изменении внешних условий ее работы (напряжения, частоты питающей сети, температуры и др.). Что касается требований к динамике, то их смысл сводится к тому, чтобы сделать систему управления как можно более гибкой, т. е. чтобы регулируемая величина как можно быстрее и точнее следовала за изменением задания, а также возможно меньше отклонялась от заданного значения при воздействии различных возмущений. Отклонения регулируемой величины от заданного значения должны устраняться регулятором за кратчайшее время и с минимальным перерегулированием. В реальных системах эти два требования — минимальное время отработки и отсутствие (или минимальное значение) перерегули-

рования — обычно вступают в противоречие. Время регулирования можно сократить, повысив значение перерегулирования (в известных пределах) и наоборот. В этой связи можно сформулировать общие правила для выбора регулятора и оптимальной настройки контура: а) каждому звену с большой постоянной времени в объекте регулирования должно соответствовать звено с обратной передаточной функцией и с той же постоянной времени в составе регулятора; б) значение коэффициента при операторе в знаменателе передаточной функции должно быть около двух сумм малых постоянных времени.

Наиболее распространенными критериями оптимальной настройки контуров являются *модульный* (или, как его иногда называют, *амплитудный*, либо *технический*) и *симметричный* оптимумы.

В первом случае быстродействие оптимизированного контура ограничивается малыми постоянными времени. Эти постоянные времени можно разделить на две группы: а) реально существующие малые постоянные времени, которые в принципе можно скомпенсировать, однако этого не делают из соображений сохранения помехоустойчивости системы или недопустимости ее слишком высокого быстродействия, которое может привести, например, к появлению больших динамических уравнительных токов в реверсивном вентильном преобразователе с согласованным управлением либо недопустимой по условиям коммутации скорости изменения тока якоря электродвигателя. В подобных случаях быстродействие системы иногда даже намеренно снижают, вводя дополнительные постоянные времени в виде фильтров, например на входе системы фазового управления; б) эквивалентные малые постоянные времени, действие которых принципиально не может быть скомпенсировано вследствие их физической природы, например эквивалентные постоянные времени оптимизированного подчиненного контура. Эта группа малых постоянных времени определяет принципиально достижимый предел быстродействия оптимизированного контура.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Материалы XXV съезда КПСС. М. Политиздат, 1976, 210 с.
2. Александров М. П. Подъемно-транспортные машины. М., Высшая школа, 1972, 504 с.
3. Алексеев Ю. В. и др. Крановое электрооборудование. Справочник. М., Энергия, 1979, 238 с.
4. Андреев В. П., Сабинин Ю. А. Основы электропривода. М — Л., Госэнергоиздат, 1963, 772 с.
5. Бенерман Б. И., Ловцкий Н. Н. Проектирование силового электрооборудования промышленных предприятий. М — Л., Госэнергоиздат, 1960, 304 с.
6. Богословский А. П. и др. Системы тиристорного управления судовыми электромеханизмами. Л., Судостроение, 1978, 232 с.
7. Бычков В. П. Электропривод и автоматизация металлургического производства. М., Высшая школа, 1977, 392 с.
8. Волков Д. П., Каминская Д. А. Динамика электромеханических систем экскаваторов. М., Машиностроение, 1971, 384 с.
9. Герасимьяк Р. П. Тиристорные электроприводы для кранов. М., Энергия, 1978, 112 с.
10. Глаголев Г. И. Электрооборудование кузнечно-прессовых цехов. М., ГНТИЛЧИЦМ, 1962, 312 с.
11. Демидов С. В., Полищук Б. Б. Быстродействующий тиристорный электропривод с питанием от высокочастотных источников. М., Энергия, 1977, 152 с.
12. Егоров К. А. Системы управления пассажирскими лифтами. М., Стройиздат, 1977, 236 с.
13. Есаков В. П. Электрооборудование и электропривод промышленных установок. Л., СЗПИ, 1973, 128 с.
14. Инструктивные указания по проектированию электрических промышленных установок. М., Энергия, 1972, № 8, с. 22—28 и 33—38, № 12, с. 28—31; 1973, № 2, 3, с. 55—57 и № 4, с. 29; 1974, № 3, с. 31—33, № 11, с. 18—21, № 12, с. 11—15 и 18—21; 1975, № 3, с. 19—20 и № 12, с. 28—29; 1977, № 6, с. 27—28 и № 12, с. 19—22; 1979, № 8, с. 19—25.
15. Капунцов Ю. Д., Елисеев В. А., Ильяшенко Л. А. Электрооборудование и электропривод промышленных установок. М., Высшая школа, 1979, 359 с.
16. Марон Ф. Л., Кузьмин А. В. Справочник по расчетам механизмов подъемно-транспортных машин. Минск, Высшая школа, 1977, 272 с.

17. Олейник А. М., Поминов И. Н. Эскалаторы. М., Машиностроение, 1973, 256 с.
18. Онищенко Г. Б., Локтева И. Л. Асинхронные вентиляционные каскады и двигатели двойного питания. М., Энергия, 1979, 200 с.
19. Петров И. И. и др. Электропривод и автоматизация управления строительными башенными кранами. М., Машиностроение, 1979, 216 с.
20. Подъемно-транспортное оборудование. Номенклатурный справочник. М., НИИинформтяжмаш, 1972, 136 с.
21. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов М., Metallургия, 1974, 192 с.
22. Рапутов Б. М. Электрооборудование металлургических кранов. М., Metallургияиздат, 1967, 224 с.
23. Сандлер А. С., Тарасенко Л. М. Динамика каскадных асинхронных электроприводов. М., Энергия, 1977, 200 с.
24. Сандлер А. С. Электропривод и автоматизация металлорежущих станков. М., Высшая школа, 1972, 440 с.
25. Слежановский О. В. Реверсивный электропривод постоянного тока. М., Metallургия, 1967, 424 с.
26. Соколов М. М. Автоматизированный электропривод общепромышленных механизмов. М., Энергия, 1976, 488 с.
27. Соколов Н. Г., Елисеев В. А. Расчеты по автоматизированному электроприводу металлорежущих станков. М., Высшая школа, 1970, 294 с.
28. Справочник монтажника. Монтаж лифтов и канатных дорог. М., Стройиздат, 1977, 240 с.
29. Ушаков П. Н., Бродский М. Г. Краны и лифты промышленных предприятий. Справочник. М., Metallургияиздат, 1974, 352 с.
30. Чиликин М. Г., Ключев В. И., Сандлер А. С. Теория автоматизированного электропривода. М., Энергия, 1979, 616 с.
31. Шабашев А. П., Лысяков А. Г. Мостовые краны общего назначения. М., Машиностроение, 1980, 400 с.
32. Электрическое оборудование кранов/Под ред. А. А. Рабиновича и М. М. Синайского. М., Энергия, 1963, 400 с.

- Автономные механизмы 146
 — —, основные характеристики 146
 — —, электрооборудование и электропривод 148
- Асинхронно-вентильный каскад 73, 112, 178, 184
 — —, расчет параметров и выбор основных элементов 185
 — —, электроэнергетические показатели 187
- Диаграмма векторная мощностей АВК 189
 — нагрузки кранового механизма 31
 — неуравновешенности подвижных частей лифта 106
 — тяговых усилий ленточного конвейера 155
- Диапазон регулирования угловой скорости каскадной установки 182
 — — частоты вращения электродвигателя 186, 188
- Динамическая постоянная электродвигателя 10
- Канатные дороги 151
 — —, расчет необходимой мощности приводных электродвигателей 154
 — —, требования к электроприводам 159
 — —, управление электроприводами 165
- Компрессоры, насосы и вентиляторы 170
 — — —, общие сведения 170
 — — —, расчет необходимой мощности приводных электродвигателей 171
 — — —, схемы управления электроприводами 175
- Конвейеры 150
 — роликовые 228
 —, расчет необходимой мощности приводных электродвигателей 154
 —, требования к электроприводам 158
 —, управление электроприводами 160
- Контроллеры 45
 —, принципиальные схемы 46, 48, 51
 —, типы 45, 50
- Коэффициент грузовой 14
 — запаса торможения 39
 — искажения 189
 — мощности двигателей 92
 — — — АВК 189
 — нагрузки крана 13, 30
 — несимметрии 64
 — переменных потерь 13, 197
 — плавного регулирования 200
 — полезного действия передачи 12
 — — — эквивалентный 24
 — постоянных потерь 13, 197
 — пульсации 34
 — сцепления ходовых колес с рельсами 37, 228
 — тепловой 27
 — уравнивания 104
 — усиления преобразователя 204, 206
- Краны 5
 —, деление на группы 5
 —, основные механизмы 9
 —, применяемые электродвигатели 10
 —, расчет и выбор мощности

- приводных электродвигателей 12, 32
- , режимы работ 7, 11
- , схемы управления электроприводами 69
- , телеуправление 85
- , требования к электроприводам 35
- , управление электроприводами с помощью контактных электроаппаратов 43, 54
- , характеристики 7
- , электроснабжение 89
- Кузнечно-прессовые машины 210
- , расчет необходимой мощности приводных электродвигателей 212
- Лифты 102**
- , деление на группы 112
- , — — категории 103
- , краткие характеристики 102
- , определение режима работы 104
- , расчет и выбор мощности приводного электродвигателя 106
- , требования к электроприводам 108
- , схемы управления электроприводами 112
- Манипуляторы 231**
- Металлорежущие станки 194**
- , общие сведения 194
- , применяемые электродвигатели 198
- , расчет необходимой мощности приводных электродвигателей 195
- , способы регулирования скорости электроприводов 199
- , схемы управления электроприводами 202
- Метод вытяжки 222**
- нагрузочных рядов 18, 30
- последовательных приближений 18
- Савинкова 172, 212
- Целикова 224
- эквивалентного к. п. д. 18, 24
- Момент базовый 68**
- грузовой 14
- пусковой двигателя лифта 108
- эквивалентный двигателя крана 23
- Нажимные устройства 230**
- Ножницы 232**
- Перегрузочные способности двигателей по моменту 11**
- Переходные процессы в сложных электроприводах 234**
- Позиционно согласующие устройства 113**
- Поточно-транспортная система 151**
- , требования к электроприводам 159
- , управление электроприводами 161
- Прокатные станы 217**
- , общая характеристика 217
- , общие сведения о системах управления 232
- , расчет необходимой мощности приводных электродвигателей 221
- , электрооборудование и электропривод вспомогательных механизмов 227
- Пусковые регулирующие бесконтактные устройства 72**
- Пускорегулировочные резисторы 59**
- , выбор 67
- , расчет сопротивлений 61
- , — — невыключаемых 64
- , — — несимметричных 62
- , — — при тормозных режимах 65
- , — — симметричных 61
- Статическая мощность механизма 15**
- Слитковозы 227**
- Тиристорные станции управления 34, 69, 112, 160, 174, 200**
- , —, схемы 70
- Тормоза 38**
- , деление на группы 40

- Трубопроводный транспорт 153
- Эквивалентное число включений двигателя 25
- Экскаваторы 129
 - , деление на группы 130
 - , расчет и выбор мощности приводных электродвигателей 131
 - , — электромеханических характеристик основных механизмов 142
 - , схемы управления электроприводами 137
 - , требования к электроприводам 135
 - , характеристики 130
- Электрогидравлические толкатели 40
- Электромагниты 40
 - , деление на группы 41
 - , характеристики 42
- Эскалаторы и многокабинные лифты 153, 166
 - — — —, расчет необходимой мощности электродвигателя 156, 158
 - — — —, требования к электроприводам 159
 - — — —, управление электроприводами 166

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. Электрооборудование и электропривод крановых механизмов	
1.1. Краткие характеристики кранов, их электродвигателей и режимов работы	5
1.2. Расчет и выбор мощности приводных электродвигателей для крановых механизмов	12
1.3. Основные требования, предъявляемые к электроприводам крановых механизмов, и электрооборудование их тормозных устройств	35
1.4. Управление электроприводами крановых механизмов с помощью контактных электроаппаратов	43
1.5. Расчет сопротивлений и выбор пускорегулировочных резисторов при контроллерном управлении крановыми электроприводами	59
1.6. Мало- и бесконтактные схемы управления крановыми электроприводами	69 85
1.7. Понятие о телеуправлении кранами	
1.8. Электроснабжение кранов и других подъемно-транспортных механизмов	89
1.9. Пример расчета и выбора основных элементов кранового электропривода	95
Глава 2. Электрооборудование и электропривод лифтов, экскаваторов и автономных механизмов	
2.1. Краткие характеристики лифтов, выбор электродвигателей и основные требования, предъявляемые к электроприводам лифтов	102
2.2. Схемы управления электроприводами лифтов	112
2.3. Пример расчета и выбора силового оборудования электропривода пассажирского лифта	122
2.4. Краткие характеристики экскаваторов, выбор электродвигателей и основные требования, предъявляемые к электроприводам экскаваторов	129
2.5. Схемы управления электроприводами экскаваторов	137
2.6. Расчет электромеханических характеристик основных механизмов экскаваторов	142
2.7. Электрооборудование и электропривод автономных механизмов	146

Глава 3. Электрооборудование и электропривод механизмов непрерывного транспорта, компрессоров, насосов и вентиляторов

3.1. Общие характеристики механизмов непрерывного транспорта и расчет необходимой мощности их электродвигателей	150
3.2. Основные требования, предъявляемые к электроприводам механизмов непрерывного транспорта, и управление ими	158
3.3. Общие сведения о компрессорах, насосах и вентиляторах и расчет необходимой мощности их приводных электродвигателей	170
3.4. Схемы управления электроприводами компрессоров, насосов и вентиляторов	175
3.5. Расчет необходимых параметров и выбор основных элементов АВК. Расчет электроэнергетических показателей электроприводов с АВК	185
3.6. Пример выбора основных элементов АВК и расчета электроэнергетических показателей электропривода с АВК	190

Глава 4. Основы электрооборудования и электропривода металлорежущих станков, кузнечно-прессовых машин и прокатных станов

4.1. Общие сведения о металлорежущих станках, расчет необходимой мощности их электродвигателей и способы регулирования скорости электроприводов станочных механизмов	194
4.2. Принцип построения схем управления электроприводами механизмов металлорежущих станков и их реализация	202
4.3. Электрооборудование и электропривод кузнечно-прессовых машин	210
4.4. Электрооборудование и электропривод главных механизмов прокатных станов	217
4.5. Электрооборудование и электропривод вспомогательных механизмов прокатных станов	227
4.6. Общие сведения о системах управления механизмами прокатных станов	232
4.7. Понятие о переходных процессах в сложных электроприводах	234
Список литературы	241
Предметный указатель	243

Василий Петрович Есаков

**ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ
И ЭЛЕКТРОПРИВОД
ПРОМЫШЛЕННЫХ
УСТАНОВОК**

Научный редактор **В. Ф. Хмель**
Переплет художника **Г. М. Балюна**
Художественный редактор
С. П. Духленко
Технический редактор
Т. И. Трофимова
Корректоры **Н. Н. Шевченко,**
Л. М. Хейна

Информ. бланк № 5904

Сдано в набор 29.08.80. Подп. в печать
30.10.81. БФ 10188. Формат 84×108¹/₃₂.
Бумага типогр. № 1. Лит. гарн. Выс. печать.
13,92 усл. печ. л. 13,28 усл. кр.—отт. 12,44
уч.-изд. л. Тираж 15 000 экз.

Изд. № 4597. Зак. № 438. Цена 60 к.

Головное издательство издательского
объединения «Вища школа»,
252054, Киев-54, Гоголевская, 7

Книжная фабрика им. М. В. Фрунзе,
310057, Харьков-57, Донец-Захаржевская,
6/8.