

Федеральное агентство по образованию
Российский государственный профессионально-педагогический
университет
Инженерно-педагогический институт
Кафедра электрооборудования и автоматизации промышленных
предприятий

Н.И. Томашевский, Д.Н. Томашевский,
А.А. Емельянов, В.В. Ипполитов

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ

Учебно-методическое пособие к курсовому проектированию

Допущено Учебно-методическим объединением по профессионально-педагогическому образованию в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 050501.19 – Профессиональное обучение (электроэнергетика, электротехника и электротехнологии)

Екатеринбург
2006

Разработка электроприводов производственных механизмов.
Учебно-методическое пособие. Екатеринбург. Росс. гос. проф.-пед. ун-т,
2006. 229 с.

Авторы:

Н.И. Томашевский, Д.Н. Томашевский,
А.А. Емельянов и В.В. Ишполитов.

Под редакцией канд. техн. наук, доцента Н.И. Томашевского.

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. М.Л. Хазин (профессор кафедры
эксплуатации горного оборудования УГГУ);
д-р техн. наук, профессор Г.К. Смолин
(декан электроэнергетического факультета РГППУ);
канд. техн. наук, доцент А.А. Карпов
(зав. кафедрой МТ РГППУ).

Разработано совместно кафедрой ЭП РГППУ и кафедрой ЭЭС
УГТУ-УПИ.

Излагаются отдельные понятия и теоретические положения
дисциплины «Электрический привод», а также практические приемы,
направленные на разработку силовой части электроприводов.
Формулируется с необходимыми комментариями содержание курсового
проекта; предлагаются разнообразные объекты электрификации в
нескольких вариантах исходных технологических данных.

Пособие предназначено студентам заочной формы обучения
специальности 1460465 Электропривод и автоматика промышленных
установок и технологических комплексов, а также может использоваться
студентами всех форм обучения специальности 050501 Профессиональное
обучение (электроэнергетика, электротехника и электротехнологии)
(030500.19) специализации «Электротехника, электротехнологии и
технологический менеджмент» (030503.19).

Библиогр.: 25 назв., Рис. 60, Табл. 18, Приложений 2.

© Российский государственный
профессионально-педагогический
университет, 2006.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
Раздел 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ПОНЯТИЯ	8
1.1. ЭЛЕКТРОПРИВОД И ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫЙ МЕХАНИЗМ	8
1.2. РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА	11
1.2.1. Двигательный режим работы	11
1.2.2. Тормозные режимы работы	12
1.3. РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА	15
1.4. НАГРУЗОЧНЫЕ ДИАГРАММЫ РАБОЧЕЙ МАШИНЫ И ЭЛЕКТРОПРИВОДА	20
1.5. НОМИНАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ НАГРУЗКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ	26
1.6. НОМИНАЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ	33
1.7. ПЕРЕГРУЗОЧНАЯ СПОСОБНОСТЬ ДВИГАТЕЛЕЙ	38
Раздел 2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И ЗАДАНИЯ К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ	41
2.1. ЦЕЛЬ, ЗАДАЧА И ОРГАНИЗАЦИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ	41
2.2. СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА И КОММЕНТАРИИ К НЕМУ	43
2.3. ТИПОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ НА КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ	46
Тема 1. Электрификация механизма перемещения стола продольно-строгального станка	46
Тема 2. Электрификация грузового лифта	50
Тема 3. Электрификация рольганга прокатного стана	54
Тема 4. Электрификация нажимного устройства прокатного стана	63
Тема 5. Электрификация сталкивателя блюмов	72

Тема 6. Электрификация речного толкателя методической печи	77
Тема 7. Электрификация цепного транспортера	82
Тема 8. Электрификация моталки стана холодной прокатки полосы	87
Раздел 3. РАЗРАБОТКА СИЛОВОЙ ЧАСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА	94
3.1. ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ НОМИНАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ НАГРУЗКИ	96
3.1.1. В продолжительных режимах нагрузки S1	97
3.1.2. В режимах кратковременной нагрузки S2	100
3.1.3. В повторно-кратковременных и перемежающихся режимах нагрузки	103
3.2. ПРИВЕДЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК К ВАЛУ ЭД	104
3.2.1. Основные соотношения между параметрами линейного и вращательного движения	105
3.2.2. Приведение неизменных статических сил и моментов со стороны РМ	109
3.2.3. Приведение неизменных инерционных масс и моментов инерции со стороны РМ	112
3.2.4. Приведение статических и динамических нагрузок при изменении угла поворота исполнительного органа РМ	114
3.2.4.1. Приведение статических нагрузок	115
3.2.4.2. Приведение динамических нагрузок	117
3.2.5. К учету нежестких связей в кинематике	120
3.3. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ ВЫБОР ДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ДЛЯ РЕЖИМОВ НАГРУЗКИ S3-S8	127
3.3.1. Приемы определения расчетной мощности двигателя	129
3.3.2. Учет управления скоростью	132
3.3.2.1. Двухзонное управление скоростью	133
3.3.2.2. Однозонное управление скоростью	136

3.4. К ПОСТРОЕНИЮ УПРОЩЕННЫХ НАГРУЗОЧНЫХ ДИАГРАММ ЭЛЕКТРОПРИВОДА	138
3.4.1. Определение временных интервалов нагрузочных диа- грамм	138
3.4.2. Оптимальная величина номинальной скорости двигате- ля	147
3.4.3. Пути повышения производительности РМ	154
3.4.4. Минимизация времени технологического цикла	157
3.4.5. Учет допустимых ускорений движения	159
3.4.6. Оптимальное передаточное отношение редуктора	161
3.5. ПРОВЕРКА ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ВЫБРАННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПО ТЕПЛОВОМУ СОСТОЯНИЮ И КРАТКОВРЕМЕННО ДОПУСТИМОЙ ПЕРЕГРУЗКЕ	164
3.5.1. В перемежающихся режимах нагрузки S6, S7, S8	165
3.5.2. В повторно-кратковременных режимах нагрузки S3, S4, S5	166
3.5.3. Пересчет на отдаленные ПВ	168
3.5.4. Использование понятия фиктивного момента	170
3.5.5. Проверка по кратковременно допустимой перегрузке	172
3.5.6. Проверка теплового состояния через допустимое число циклов в час	172
3.6. ВЫБОР ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА	178
Общие термины и пояснения	178
3.6.1. Электропривод по системе «УТП – ДПТ НВ»	180
3.6.1.1. Выбор УТП для цепи якоря ДПТ НВ	180
3.6.1.2. Выбор способа связи УТП с трехфазной сетью пере- менного напряжения	182
А. Вариант трансформаторной связи УТП с сетью. Расчет параметров и выбор ТС	182
Б. Вариант связи УТП через токоограничивающий реак- тор. Определение индуктивности реактора	185

В. Определение индуктивности и выбор сглаживающего дросселя цепи «УТП-ЭД»	187
Г. Определение индуктивности для ограничения уравнительных токов в двухкомплектном УТП. Выбор токоограничивающих дросселей	190
Д. Уточнение параметров функциональных элементов силовой части реверсивного тиристорного ЭП	191
3.6.1.3. Выбор преобразователя для цепи независимого возбуждения ЭД	194
3.6.2. К разработке электропривода по системе «УПЧ-АД КЗР»	195
3.6.2.1. Историческая информация	195
3.6.2.2. Законы частотного управления	201
1. Законы скалярного частотного управления	202
2. Законы векторного частотного управления	208
3.6.2.3. Выражения электромагнитного момента через обобщенные комплексы электромагнитных переменных	209
3.6.2.4. Классификация УПЧ для трехфазных асинхронных электроприводов	212
А. Общая характеристика преобразователей частоты с автономным инвертором напряжения (АИН)	212
1. УПЧ с амплитудным регулированием напряжения управляемым выпрямителем	213
2. УПЧ с амплитудно-импульсным регулированием напряжения при неуправляемом выпрямителе и широтно-импульсном преобразователе (ШИП)	214
3. УПЧ с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) напряжения в самом инверторе	215
Б. УПЧ с автономным инвертором тока (АИТ)	216
В. УПЧ, построенные на основе непосредственного преобразования частоты (НПЧ)	217
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА	224
Приложение 1. КЛАССЫ НАГРЕВОСТОЙКОСТИ ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН	227
Приложение 2. ЗНАЧЕНИЯ НОМИНАЛЬНЫХ КПД ПЕРЕДАЧ С УЧЕТОМ ПОТЕРЬ В ОПОРАХ	228

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее учебно-методическое пособие содержит три раздела. В первом разделе рассматриваются основополагающие понятия, которые приходится профессионально использовать специалисту в области электропривода. Второй раздел посвящен цели, содержанию курсового проекта и типовым заданиям на разработку электропривода с вариантами исходных технологических данных. Третий раздел непосредственно посвящен практическим приемам разработки силовой части электропривода: определению расчетной мощности двигателя при различных режимах нагрузки с учетом необходимых соотношений в кинематической цепи при передаче движения рабочей машине, а также с приведением статических и динамических нагрузок к валу двигателя при различных законах движения системы. Показываются подходы к определению оптимальной величины номинальной скорости и оптимального передаточного отношения редуктора. Рассматриваются приемы проверки предварительно выбранного двигателя (в соответствии с режимом нагрузки) по допустимому тепловому состоянию и кратковременной перегрузке.

В изложении материала обращается внимание на необходимость аргументации и технико-экономического обоснования варианта, который принимается разработчиком: все начинается с обоснования выбора рода тока и величины номинального напряжения, выбора типа или системы электропривода, что служит основой для разработки его принципиальной схемы.

Пособие содержит много иллюстраций и математических выражений. Иллюстрации не имеют подрисовочных подписей, поскольку их сущность и назначение объясняются в тексте. Для рисунков и формул принята двойная нумерация: по разделам пособия и порядковому номеру следования внутри раздела. Нумерация таблиц сквозная.

При подготовке пособия принимали участие студенты-дипломники группы ЗЭП-602 М.А. Гладкова и А.Ю. Толмачев.

РАЗДЕЛ 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ПОНЯТИЯ

1.1. ЭЛЕКТРОПРИВОД И ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫЙ МЕХАНИЗМ

Электрическим приводом (ЭП) называют часть машинного устройства, включающую в свой состав электрический двигатель (ЭД), возможные преобразователи электрической энергии (ПЭЭ) и механической энергии (ПМЭ), а также систему автоматического управления (САУ). Его назначением является приведение в заданное движение исполнительных органов рабочей машины (ИОРМ) в соответствии с технологическими требованиями конкретного механизированного производства.

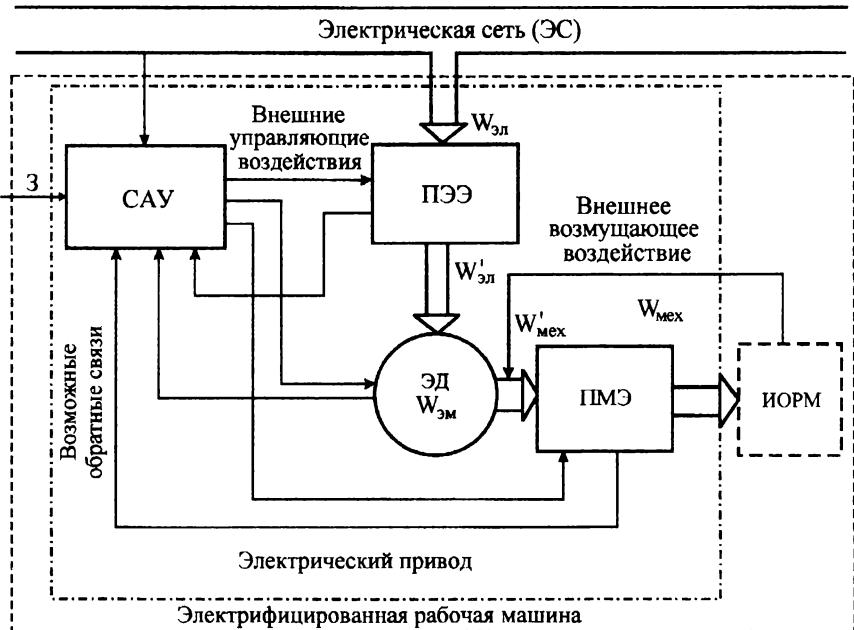


Рис. 1.1

Рабочая машина (производственный механизм), оснащенная электрическим приводом называется **электрифицированной**, а процесс ее оснащения электроприводом – **электрификацией**. На рис. 1.1 представлена мнемоническая структура электрифицированной рабочей машины.

Электрический привод представляет собой **электромеханический комплекс преобразовательных устройств**, который (благодаря САУ) обеспечивает управляемый процесс энергопреобразования в силовой цепи электропривода, включающую электрический канал «ЭС-ПЭЭ-ЭД» и механический канал «ЭД-ПМЭ-ИОРМ» передачи преобразуемой энергии. Направление больших стрелок между функциональными звеньями электропривода на рис. 1.1, которые мнемонически связывают различные формы энергии, указывает на работу электропривода в двигательном режиме.

Охарактеризуем функциональные звенья электрического привода.

1. Основополагающим звеном электропривода является **электрический двигатель** (ЭД), без которого не появилось бы понятие «электропривод». ЭД – осуществляет процесс качественного электро-магнитно-механического преобразования потребляемой электрической энергии $W'_э$ через промежуточную электромагнитную энергию $W'_{эм}$ в механическую форму энергии $W'_{мех}$, которая развивается на его валу и передается исполнительному органу рабочей машины (ИОРМ) для совершения механической работы. Поскольку ЭД подразделяют по роду тока, то и электроприводы называют: постоянного или переменного тока и, соответственно, указывают тип ЭД (независимого, параллельного, последовательного или смешанного возбуждения; асинхронный или синхронный трехфазный); возможно указание формы движения якоря или ротора (вращательное, шаговое, линейное).

2. **Преобразователь электрической энергии** (ПЭЭ) преобразует электрическую энергию одних параметров $W'_{эл}$ в электрическую же других пара-

метров $W'_{эл}$, при этом возможны режимы инвертирования и выпрямления. По принципу работы ПЭЭ могут быть электромашинными, электромагнитными и полупроводниковыми, которые вытеснили ранее применявшиеся, например, ртутные, как экологически опасные. ПЭЭ может отсутствовать в составе электропривода, в таком случае последний называют сетевым, то есть потребляющим электроэнергию непосредственно из сети. А при наличии ПЭЭ – в названии электропривода фигурирует тип преобразователя, например, система «Г-Д»; система «ТП-Д» и др.

3. *Преобразователь механической энергии* (ПМЭ) одних параметров $W'_{мех}$ в механическую же других параметров $W'_{мех}$. ПМЭ представляют собой так называемые передаточные механизмы, которые не только редуцируют момент, скорость, путь (редукторы), но и могут преобразовывать форму механического движения, например, вращательного в поступательное (колесно-и червячно-реечные передачи) или в качательное (кривошипно-шатунные и другие передачи). При отсутствии ПМЭ в составе электропривода последний называют безредукторным.

4. *Система автоматического управления* (САУ) в современном понимании представляет собой командно-информационный преобразователь, формирующий внешнее управляющее воздействие (ВУВ) на функциональные звенья силовой части электропривода в соответствии с заданием со стороны технологического процесса рабочей машины и степенью его отработки электроприводом, информация о которой поступает по цепям обратных связей (ОС). На САУ может возлагаться выполнение определенных функций и интеллектуального плана (логических, расчетных и др.), САУ отдельных электроприводов могут объединяться в системы технологической автоматизации конкретных механизированных производств.

Управление электроприводами подразделяют на: полуавтоматическое и автоматическое, что изучается в дисциплине «Системы автоматического управления электроприводом».

В практике различных механизированных производств еще используются простейшие электроприводы, обычно асинхронные, с так называемым ручным или полуавтоматическим управлением от какого-либо коммутационного аппарата в распоряжении оператора, который использует визуальную обратную связь (ОС) с объектом управления и осуществляет определенное элементарное внешнее управляющее воздействие (ВУВ) с целью его включения в работу или отключения.

1.2. РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

С этим понятием связано замечательное свойство *обратимости электрических машин*, позволяющее работать не только в *двигательном режиме*, но и в *различных тормозных: рекуперативном, динамическом и противовключением*. Все названные режимы работы ЭП могут относиться как к установившимся, так и к переходным режимам движения ЭП, см. гл. 1.3.

Конкретный режим работы определяется условиями своего существования, к которым следует отнести:

- источник подводимой к электрической машине энергии (со стороны электрической цепи или со стороны вала);
- направление и баланс энергопреобразования;
- схемное решение включения электрических цепей машины.

1.2.1 Двигательный режим работы

Это основной режим работы электропривода, в котором потребляется электрическая энергия от соответствующего источника постоянного или пе-

ременного напряжения. Во всех типах машин электрическая энергия $+W_{1(эл)}$ преобразуется электромагнитным путем в механическую $+W_{2(мех)}$, рис. 1.2, которая отдается с вала и направляется к ИОРМ. При этом покрываются все

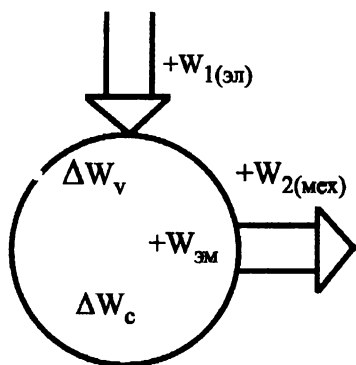


Рис. 1.2

потери ΔW_V - переменные и ΔW_C - постоянные, неизбежные в процессе энергопреобразования. Двигательный режим расположен между так называемыми граничными режимами с координатами по скорости ω , когда напряжение U со стороны источника превышает ЭДС машины $U > E$:

$\omega = \omega_0, \quad M_{эм} = 0$ - режим идеального холостого хода;

$\omega = 0, \quad M_{эм} = M_{кз}$ - режим короткого замыкания.

Схемное решение определяется типом электропривода.

1.2.2 Тормозные режимы работы

При всех тормозных режимах (рекуперативном, противовключением и динамическом) к валу подводится механическая энергия, либо используется ранее запасенная в инерционных массах кинетическая энергия, либо потенциальная энергия поднятого груза при его опускании. За счет этой механической энергии покрываются постоянные потери холостого хода ΔW_C , а остальная ее часть претерпевает электромагнитное преобразование.

1. Рекуперативное торможение (РТ). Это обычный режим работы генератора на электрическую сеть с конкретной величиной напряжения, что

удобно представить мнемоническим изображением, рис. 1.3, через баланс подводимой со стороны вала механической энергии ($-W_{2(мех)}$). Покрываются

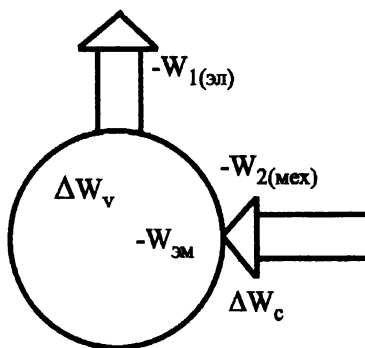


Рис. 1.3

постоянные потери ΔW_c . Преобразованная из механической электромагнитная энергия ($-W_{эм}$) за вычетом переменных потерь ΔW_v в машине отдается в электрическую сеть ($-W_{1эл}$). Режим РТ располагается в области скорости $\omega > \omega_0$, при этом ЭДС машины превышает напряжение сети $E > U$. Режим РТ используется в ЭП для ограничения скорости движения.

2. Торможение противовключением (ТПВ). Это такой генераторный

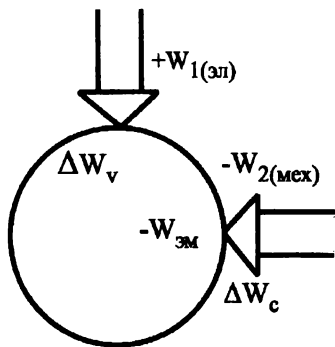


Рис. 1.4

режим работы, когда машина оказывается включенной последовательно с электрической сетью. Для этого в АД изменяется чередование фаз, а в ДПТ – изменяют полярность напряжения обычно в главной цепи машины. В результате такого включения напряжение сети U изменяет свое направление и становится согласно включенным с ЭДС машины. Под действием суммы $U+E$ в главной цепи машины будет протекать

ток. Аналогичный по энергетике результат можно получить, если машину, включенную на одно направление вращения внешним активным моментом со стороны вала раскручивать в обратном направлении. Тот и другой способы получения ТПВ широко используются в промышленных электроприводах:

первый для быстрого изменения направления движения двигателя, второй – при тормозном опускании тяжелых грузов.

При ТПВ к машине подводится энергия: как электрическая со стороны сети, так и механическая со стороны вала. Энергетический баланс ТПВ представлен на рис. 1.4; подводимая со стороны вала ($-W_{2,мех}$) покрывает постоянные потери ΔW_c и преобразуется электромагнитным путем в электрическую, которая вместе с потребляемой из сети $W_{1,эл}$, идет на покрытие переменных потерь в сопротивлениях главной цепи машины.

Схемы включения в ТПВ, как выше отмечено, определяются типом электродвигателя. Заметим, что синхронные машины в режиме ТПВ не используются из-за опасности выхода из строя их пусковой обмотки, которая не рассчитана на протекание больших токов.

3. Режим динамического торможения (ДТ). Он также является генераторным режимом, но на электрическую

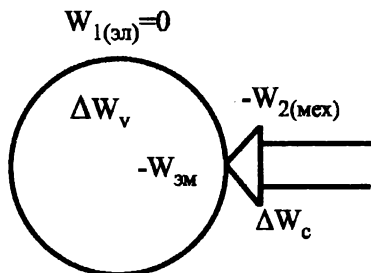


Рис. 1.5

нагрузку, которой является его главная (силовая) цепь, рис. 1.5, отключенная от источника электроэнергии. Здесь подводимая со стороны вала механическая энергия после преобразования электромагнитным путем в электрическую расходуется на покрытие переменных потерь в

сопротивлениях силовой электрической цепи машины ΔW_v . Поскольку машина отключена от сети, то $U = 0$; $\omega_0 = 0$ и ток в цепи якоря протекает под действием ЭДС.

В зависимости от схем включения электрических цепей, различают два варианта этого режима: динамическое торможение с независимым возбуждением и динамическое торможение с самовозбуждением, которые обычно ис-

пользуются в ЭП для ограничения скорости движения и для полной остановки двигателя.

1.3 РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Электродвигатель обеспечивает движение исполнительному органу рабочей машины через определенные элементы кинематики (муфты, валы, шкивы, зубчатые передачи и т.п.). Как известно, механическое движение передается при условии минимально допустимой деформации элементов кинематической связи, которую в практическом плане допустимо назвать достаточно жесткой. Если же потребуется учитывать упругие элементы, возможность проскальзывания и люфты в передаче движения, то их придется учитывать особо, см. § 3.2.5.

Вначале будем полагать кинематическую связь элементов передачи движения абсолютно жесткой и воспользуемся принципом Даламбера, который гласит, что в несвободной системе с жесткими связями в любой момент времени силы движущие, силы реакции на движение (противодействующие движению) и силы инерционные – уравновешены, что можно записать для линейного движения:

$$\sum F_{\text{движ.}}(t) = \sum F_{\text{реакц.}}(t) + \sum F_{\text{инер.}}(t) \quad (1.1)$$

и, соответственно, для вращательного движения, если использовать понятия моментов:

$$\sum M_{\text{движ.}}(t) = \sum M_{\text{сопр. движ.}}(t) + \sum M_{\text{инер.}}(t). \quad (1.2)$$

А теперь распространим это на несвободную механическую систему «ЭД-ИОРМ», в которой первую составляющую $M_{\text{движ.}}$ обозначим $M_{\text{в.эд}}$ и назовем – **развиваемый механический момент на валу двигателя:**

$$M_{\text{в.эд}} = M_{\text{эм.эд}} - \Delta M_{\text{хх.эд}}, \quad (1.3)$$

где $M_{\text{эм.эд}}$ – развиваемый внутри двигателя электромагнитный момент;

$\Delta M_{\text{хх.эд}}$ – механический момент потерь холостого хода, покрываемый в двигательном режиме электромагнитным моментом самого двигателя.

Перейдем ко второй составляющей $M_{\text{сопр.движ.}}$. В реальных рабочих машинах моменты со стороны рабочего органа, которые называют статической нагрузкой на двигатель электропривода, не всегда являются противодействующими движению.

Моменты статической нагрузки M_c , которые на рис. 1.1, а также на рис. 1.6, означают внешнее возмущающее воздействие (ВВВ) на двигатель и отражают реакцию со стороны ИОРМ на движение. Их различают не только по величине, но и по отношению к направлению движения, подразделяя на реактивные $M_{c.p}$ и активные $M_{c.a}$.

Реактивные статические моменты при любом направлении движения противодействуют движению, поэтому при изменении направления движения изменяют знак, что отражается в записи: $M_{c.p} = M_c \cdot \text{sign } \omega$. Их физическая сущность связана с разрушением обрабатываемых материалов (строгание, фрезерование, точение, резание, шлифование) и трением, то есть с разрушением внутримолекулярных связей вещества.

Активные статические моменты возникают в подъемных механизмах: при подъеме груза происходит увеличение запаса потенциальной энергии в системе. $M_{c.a}$ противодействует движению в этом направлении, то есть носит реактивный характер. При опускании груза, когда запас потенциальной энергии снижается за счет преобразования в кинетическую энергию движения, активные моменты становятся движущими; они не меняют знака, но изменяют отношение к направлению движения.

Изложенное можно изобразить в системе координат $n = f(M_c)$; рис. 1.6.

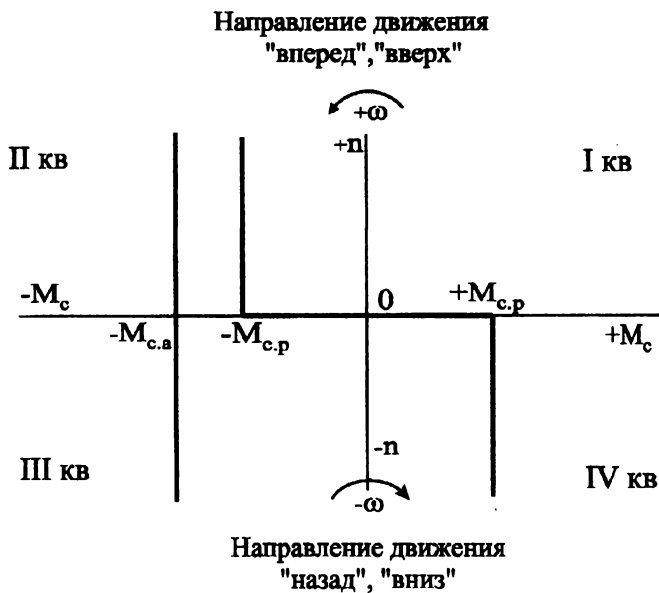


Рис. 1.6

Итак, момент статической нагрузки со стороны рабочей машины запишется:

$$\mp M_c = \mp M_{c,реакт.} - M_{c,акт.}, \quad \text{Н} \cdot \text{м}. \quad (1.4)$$

Определимся с третьей составляющей (1.2). Для этого используем введенные выше понятия $M_{в.эд}$ и M_c и их знаки в (1.2):

$$M_{инер.} = M_{в.эд} - M_c = M_{дин.}, \quad \text{Н} \cdot \text{м}, \quad (1.5)$$

где $M_{дин.} = M_{инер.}$ — в дальнейшем будем называть динамическим моментом, характеризующим динамическую нагрузку на электропривод.

Раскроем энергетическую сущность $M_{дин.} = M_{инер.}$ на приращении углового пути вала двигателя $d\alpha$:

$$M_{инер.} d\alpha = dA_{дин.} = dW_{кин.}, \quad \text{Вт} \cdot \text{с} = \text{Дж}, \quad (1.6)$$

представляет собой *работу инерционных масс* в системе «ЭД-ИОРМ», связанных с валом ЭД *по противодействию изменению скорости движения*; численно равна изменению запаса кинетической энергии в системе «ЭД-ИОРМ». Отсюда определяется динамическая мощность:

$$P_{\text{дин.}} = \frac{dA_{\text{дин.}}}{dt} = \frac{d}{dt} \left(J_{\Sigma} \frac{\omega^2}{2} \right) = J_{\Sigma} \cdot \omega \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \cdot \frac{dJ_{\Sigma}}{dt}, \quad \text{Вт}, \quad (1.7)$$

где $J_{\Sigma} = m\rho^2$ – суммарный момент инерции в системе «ЭД-ИОРМ» масс (m), сосредоточенных на радиусе инерции (ρ) от оси вращения ЭД, кг·м²;

ω – угловая скорость вращения вала ЭД, рад/сек;

$\frac{d\omega}{dt}$ – угловое ускорение вала ЭД, $\frac{d\omega}{dt} = \varepsilon$, рад/сек².

Общее выражение динамического момента как инерционного запишется:

$$M_{\text{дин.}} = \frac{P_{\text{дин.}}}{\omega} = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{2} \cdot \frac{dJ_{\Sigma}}{dt}, \quad \text{Нм}, \quad (1.8)$$

где первая составляющая обусловлена ускорением (ε), то есть изменением угловой скорости, а вторая – изменением момента инерции, что может иметь место, например, в результате изменения инерционных масс (m) и по причине изменения радиуса инерции (ρ) в таких механизмах как моталки и разматыватели полосопрокатных станов, миксеры и конверторы от смещения центра тяжести при сливе металла, механизмах с кривошипно-шатунной кинематикой и др. В таких случаях оказывается более удобным вторую составляющую выражать не через производную по времени, а по углу поворота, что позволяет сделать элементарное преобразование:

$$\frac{\omega}{2} \cdot \frac{dJ_{\Sigma}}{dt} \left(\frac{d\alpha}{d\alpha} \right) = \frac{\omega^2}{2} \cdot \frac{dJ_{\Sigma}}{d\alpha}, \quad \text{где} \quad \frac{d\alpha}{dt} = \omega.$$

На основании (1.5) и (1.8) запишем выражение, адекватное структуре записи (1.2):

$$M_{в.эд} = M_c + M_{дин.} = M_c + J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{2} \cdot \frac{dJ_{\Sigma}}{dt}, \quad \text{Нм}, \quad (1.9)$$

если $J_{\Sigma} = Const$, то есть не изменяется в процессе движения, последнее слагаемое обращается в нуль и выражение значительно упрощается:

$$M_{в.эд} = M_c + M_{дин.} = M_c + J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}, \quad \text{Нм}. \quad (1.10)$$

Охарактеризуем его составляющие:

- $M_{в.эд}$ – развиваемый на валу ЭД движущий механический момент;
- M_c – статический момент сопротивления движению со стороны ИОРМ, характеризует статическую нагрузку на валу ЭД;
- $M_{дин.}$ – динамический момент сопротивления изменению скорости движения системы «ЭД-ИОРМ», характеризует динамическую нагрузку на валу ЭД.

В задачах разработки электропривода вместо $M_{в.эд}$ часто оказывается более удобно использовать выражение электромагнитного момента $M_{эм.эд}$, который развивается внутри ЭД и физически связан как с электромагнитным состоянием среды энергопреобразования, так и с определяющими этот процесс переменными в механических и электрических цепях ЭД. Для этого используем (1.3), из которого $\Delta M_{xx.эд}$, как реактивный по своему характеру, приплюсуем к M_c :

$$M_{эм.эд} = M_c + \Delta M_{xx.эд} + M_{дин.} = M_{c\Sigma} + M_{дин.} = M_{c\Sigma} + J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}, \quad \text{Н} \cdot \text{м}. \quad (1.11)$$

Получены уравнения (1.9), (1.10) и (1.11), каждое из них носит название «уравнение движения электропривода» в системе «ЭД-ИОРМ». Рассмотрим его частные представления.

1. При $M_{эм.эд} = M_c$, то есть $M_{дин} = 0$ и $\frac{d\omega}{dt} = 0$ - это *соответствует*

установившемуся режиму движения электропривода с неизменной скоростью ($\omega = Const$), либо состоянию покоя, когда $\omega = 0$.

2. При $M_{эм.эд} - M_c > 0$, $M_{дин.} > 0$ и $\frac{d\omega}{dt} > 0$ - *соответствует ускорению*

движения электропривода в области $\omega > 0$.

3. При $M_{эм.эд} - M_c < 0$, $M_{дин.} < 0$ и $\frac{d\omega}{dt} < 0$ - *соответствует замедле-*

нию движения электропривода в области $\omega > 0$.

Последние состояния движения (п. 2 и п. 3) характеризуют *переходный (или неустановившийся) режим движения* электропривода.

Итак, *режимы движения электропривода подразделяют на установившиеся и переходные (или неустановившиеся).*

Следует понимать, что записанные выше условия состояний движения соответствуют двигательному режиму работы ЭД в положительном направлении его движения. Безусловно, переход ЭД на работу в тормозных режимах и учет изменения направления движения потребуют внесения корректировок в представленные выше условия.

1.4. НАГРУЗОЧНЫЕ ДИАГРАММЫ РАБОЧЕЙ МАШИНЫ И ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Под *нагрузочными диаграммами рабочей машины* понимают статические нагрузки $M_c(t)$ и $F_c(t)$ и тахограмму $n(t)$ движения ее исполнительного органа во времени, которые задаются условиями технологического процесса. В заданной тахограмме РМ может отражаться требование к динамике движения, которое должен обеспечивать электропривод.

Все разнообразие рабочих машин в механизированном производстве сводится к двум видам их функционального назначения:

- **деформации материалов** (**непластическая деформация** - дробление, строгание, точение и т.д.; **пластическая деформация** - ковка, прокатка, и т.д.);

- **перемещения материалов** (по горизонтали, вертикали, под углом, кантование и т.д.).

Основное назначение электропривода состоит в обеспечении исполнительного органа механизма механической энергией $W_{мех.}$, необходимой для совершения полезной работы по деформации или перемещению материалов ($A_{пол.}$) и преодолению трения в его кинематических элементах ($\Delta A_{тр.}$). Эта энергия может быть выражена через интеграл требуемой механической мощности, который можно представить и через соответствующие ее параметры:

- при вращательном движении РМ:

$$\begin{aligned} W_{мех.} &= \int_t P_{мех.} dt = \int_t (M_{пол.} + \Delta M_{тр.}) \cdot \omega_{рм} dt = \\ &= \int_{\phi} (M_{пол.} + \Delta M_{тр.}) d\alpha = A_{пол.} + \Delta A_{тр.}; \end{aligned} \quad (1.12)$$

- при поступательном движении РМ:

$$\begin{aligned} W_{мех.} &= \int_t P_{мех.} dt = \int_t (F_{пол.} + \Delta F_{тр.}) \cdot V_{рм} dt = \\ &= \int_S (F_{пол.} + \Delta F_{тр.}) \cdot dS_{рм} = A_{пол.} + \Delta A_{тр.}, \end{aligned} \quad (1.13)$$

где $(M_{пол.} + \Delta M_{тр.})$ – момент статического сопротивления движению исполнительного органа РМ;

$(F_{пол.} + \Delta F_{тр.})$ – усилие статического сопротивления движению исполнительного органа РМ;

$\omega_{рм}$ и $V_{рм}$ – угловая и линейная скорости его движения.

Перечисленные физические величины, являясь параметрами механической энергии, характеризуют закон механического движения исполнительного органа механизма во времени:

$$\begin{aligned}M_{рм} &= f_1(t) \quad \text{или} \quad F_{рм} = f_2(t); \\ \omega_{рм} &= f_3(t) \quad \text{или} \quad V_{рм} = f_4(t); \\ \alpha_{рм} &= f_5(t) \quad \text{или} \quad S_{рм} = f_6(t).\end{aligned}$$

В графическом изображении их называют *нагрузочными диаграммами рабочей машины*, соответственно: статической нагрузки, скорости (тахограмма), перемещения (положения), а сами функции - координатами механического движения.

По существу нагрузочные диаграммы рабочей машины отражают требования со стороны технологического процесса к электроприводу как в отношении ожидаемых статических нагрузок, так и необходимых режимов движения, предполагающих неизбежность преодоления динамических нагрузок.

Однако динамические нагрузки в явном виде не могут быть представлены в нагрузочной диаграмме рабочей машины, где $M_{рм}(t)$ является статическим моментом. Динамические нагрузки со стороны РМ в приведении к движению ее рабочего органа можно подсчитать через движущиеся инерционные массы $m_{рм}$ и моменты инерции $J_{рм}$ или предположить через заданную технологией тахограмму $V_{рм}$ или $\omega_{рм} = f(t)$. Однако для расчета необходимой номинальной мощности ЭД этого недостаточно, так как ЭД еще не выбран и не известен его собственный момент инерции ротора (якоря) $J_{эд}$.

Кроме того, технологические требования к режимам движения рабочего органа механизма часто далеко не ограничиваются элементарным обеспечением координат механического движения. Повышение качества работы, увеличение производительности, с одной стороны, а с другой - технологическая

специфика разнообразных механизированных установок (например, исключение проскальзывания металла на рольганге, предварительный безударный выбор люфта в кинематике, точная остановка или положение исполнительного органа в определенный момент времени и т.д.) могут задавать конкретные ограничения в отношении, как самих координат, так и их производных.

Подчеркнем, если требования в отношении необходимых скоростей ускорений (замедлений) и пр. определяются условиями технологии (заданной производительностью, ограничениями по физическим свойствам обрабатываемых материалов или физиологическими ограничениями организма человека), то это означает, что электропривод должен развивать избыточные электромагнитные моменты (усилия), либо определенным образом их ограничивать. В этом и заключается требование к динамическим качествам электропривода, двигатель которого должен иметь номинальную мощность, достаточную для преодоления не только статических, но и динамических нагрузок в системе электрифицированного механизма в полном соответствии с требуемыми режимами движения. Таким образом, поскольку в нагрузочных диаграммах рабочей машины фактически отражаются требования к электроприводу, то при разработке электропривода механизма с интенсивными режимами движения необходимо их построение.

В нагрузочных диаграммах двигателя электропривода находят отражение как статические нагрузки со стороны исполнительного органа рабочей машины и требования технологического процесса, так и динамические нагрузки в системе электрифицированного механизма и тип привода, в состав которого входит двигатель. Поэтому их относительное совпадение с нагрузочными диаграммами рабочей машины возможно только на интервалах установившегося движения. Прежде всего, это обусловлено тем, что, обеспечивая заданные законы движения, двигатель, помимо преодоления статической нагрузки, выраженной в нагрузочной диаграмме рабочей маши-

ны, преодолевает и так называемые динамические нагрузки в системе «ЭП-ИОРМ».

Динамические нагрузки обусловлены изменением запаса кинетической энергии инерционных масс при поступательном движении и моментов инерции при вращательном движении, которые сосредоточены в конструктивных элементах механической части всей системы «двигатель - рабочая машина» (в якоре или роторе электродвигателя, движущихся элементах кинематической цепи передач и исполнительного органа механизма), а также в массе (моменте инерции) материала, находящегося в движении совместно с исполнительным органом (деталь на столе строгального станка и т.п.). Пускотормозные и регулировочные включения, изменение направления движения (реверс) двигателя по условиям технологического процесса вызывают проявления динамических нагрузок в виде избыточных усилий или моментов в механической части системы «двигатель - рабочая машина», которые могут значительно превышать статические.

Переходные процессы на интервалах пуска или разгона характеризуются увеличением запаса кинетической энергии, что требует повышенного потребления электроэнергии. Интервалы замедления движения, которые возможны как в двигательном, так и в тормозных режимах работы электропривода, характеризуются снижением запаса кинетической энергии в системе. Последнее, например, при $M_{эм} < M_c$, может снизить потребление электроэнергии, а при использовании тормозных режимов - привести к скачкам тока и момента, превышающим номинальное значение. Таким образом, переходные процессы, особенно при их частом повторении в электроприводах с интенсивными режимами движения, оказывают существенное влияние на энергетику и тепловое состояние двигателя. Эти факторы должны учитываться при определении необходимой номинальной мощности двигателя.

Статические и динамические нагрузки всецело отражаются нагрузочными диаграммами электродвигателя, которые могут быть представле-

ны током в главной цепи $I = f(t)$, электромагнитным моментом $M_{эм} = f(t)$, переменными потерями $\Delta P_V = f(t)$. Как известно, названные переменные процесса энергопреобразования связаны между собой через состояние материальной среды, выражаемое магнитным потоком Φ_m или потокосцеплением Ψ_m .

Статические и динамические нагрузки в системе электрифицированного механизма связывает между собой уравнение движения:

$$M_{эм}(t) = M_c(t) + M_{дин.}(t), \quad (1.14)$$

где кинематические связи полагаются абсолютно жесткими, а нагрузки - приведенными к валу двигателя, и $J_\Sigma = Const$.

Через переменные электромагнитного процесса преобразования энергии в электроприводе однозначно выражаются переменные на его выходе, то есть в механической части:

$$\omega(t) = \frac{1}{J} \int_t [M_{эм}(t) - M_c(t)] \cdot dt = \frac{1}{J} \int_t M_{дин.}(t) \cdot dt; \quad (1.15)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{d\omega}{dt}; \quad (1.16)$$

$$\alpha(t) = \int_t \omega(t) dt. \quad (1.17)$$

Входящие в записанные уравнения различные функции времени также могут использоваться при построении нагрузочных диаграмм электропривода.

Итак, к нагрузочным диаграммам электропривода, кроме $M_{эм}(t)$ и $I(t)$, относят зависимости:

$M_\theta(t)$ – развиваемый момент на валу;

$n(t)$ – частоту вращения;

$P_\theta(t)$ – мощность на валу;

- $M_{эм}(t)$ – электромагнитный момент;
- $P_{эм}(t)$ – электромагнитную мощность;
- $P_1(t)$ – электрическую мощность;
- $\Delta P_v(t)$ – мощность переменных потерь;
- $\tau(t)$ – перегрев обмоток;
- $\eta(t)$ – КПД;
- $\cos \varphi(t)$ – коэффициент мощности,

которые отражают не только статику и динамику электропривода, но и его энергетику.

1.5. НОМИНАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ НАГРУЗКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Под режимами нагрузки понимают все реальное многообразие сочетаний режимов работы (§ 1.2) и режимов движения (§ 1.3) ЭД и ЭП во времени, которое в соответствии с ГОСТ 183-74 (СТ СЭВ 1346-78) сведено к *типовым нагрузочным диаграммам восьми так называемых номинальных режимов нагрузки ЭД и ЭП, обозначенных S1, S2, ... S8.*

С номинальными режимами нагрузки соотносится характер перегрева двигателя $\tau = f(t)$, а значит, и полнота использования заложенных в его конструкцию активных материалов, гарантия надежной и экономичной работы электропривода, а также номинальная механическая мощность двигателя (P_{2N}), и другие номинальные величины, которые указываются в каталогах и паспорте двигателей.

S1. Номинальный режим продолжительной нагрузки характеризуется работой при постоянной нагрузке на валу, достаточно длительной, когда температура всех частей двигателя достигает установившегося значения пере-

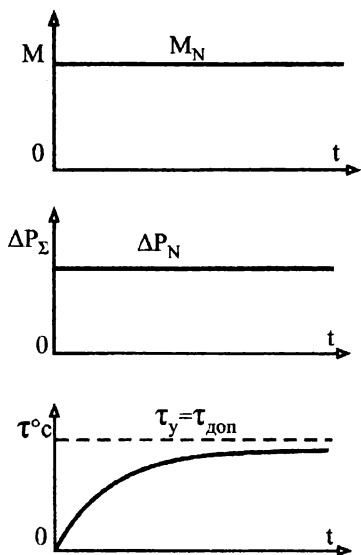


Рис. 1.7

грева $\tau_y = \tau_{доп}$. Здесь время пуска несоизмеримо мало в сравнении с временем работы, динамическая нагрузка преодолевается за счет перегрузочной способности двигателя, а электрическое торможение не применяется. На рис. 1.7 показаны эквивалентные нагрузочные диаграммы привода: момента $M(t)$, суммарных потерь $\Delta P_{\Sigma}(t)$ и перегрева $\tau(t)$ над расчетной температурой окружающей среды, равной $+40^{\circ}\text{C}$.

Электромашиностроительной промышленностью выпускаются специальные двигатели продолжительных режимов нагрузки.

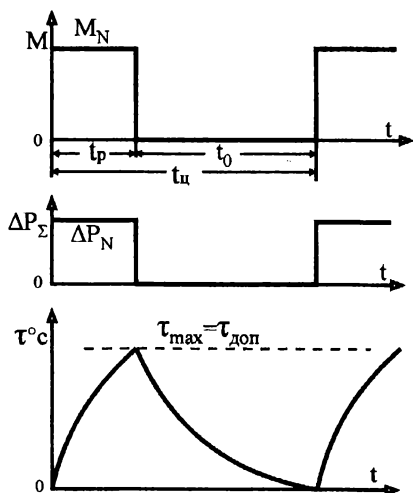


Рис. 1.8

S2. Номинальный режим кратковременной нагрузки характеризуется работой при постоянной нагрузке в течении стандартного времени, недостаточного для наступления теплового равновесия, с последующим отключением двигателя, достаточным для его охлаждения до нормальной температуры, не превышающей температуру окружающей среды более чем на 1°C .

Здесь пуско-тормозные дина-

мические нагрузки преодолеваются за счет повышенной перегрузочной способности двигателей кратковременного режима нагрузки. На рис. 1.8 показаны эквивалентные нагрузочные диаграммы привода, где время работы $t_p \ll 5T_n$, а время паузы $t_0 \gg 5T_{но}$ в сравнении с тепловой постоянной времени T_n при нагреве двигателя и $T_{но}$ - при его охлаждении. Установлены следующие стандартные продолжительности работы двигателей кратковременного режима: 10, 30, 60 и 90 мин, - для которых в каталогах и паспорте указываются номинальная мощность и другие номинальные данные.

С3. Номинальный режим повторно-кратковременной нагрузки

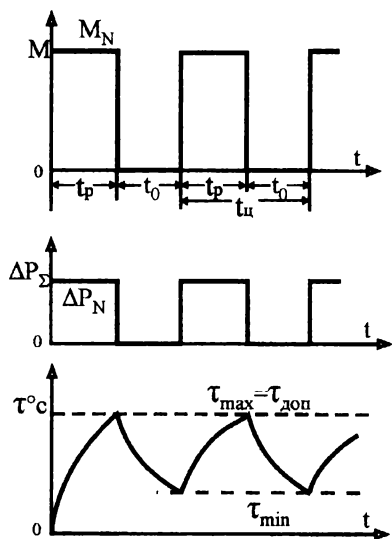


Рис. 1.9

характеризуется последовательным повторением идентичных рабочих циклов, каждый из которых состоит из периодов работы при постоянной нагрузке и отключенного неподвижного состояния двигателя; длительность как времени работы t_p , так и времени паузы t_0 недостаточна для наступления теплового равновесия, а время цикла $t_u = t_p + t_0$ не превышает 10 мин. Здесь динамическая нагрузка при пуске преодолевается за счет повышенной перегрузочной способности

двигателя и не оказывает существенного влияния на поведение нагрева, а быстрая остановка производится специальными тормозными устройствами. Нагрузочные диаграммы привода данного режима показаны на рис. 1.9. Перегрев двигателя непрерывно изменяется, но не превышает допустимого и не

снижается до нормальной температуры окружающей среды $t_p \ll 5T_n$; $t_0 \ll 5T_{но}$. Основной характеристикой режима является продолжительность включения, которая обычно выражается в относительных единицах или в процентах:

$$ПВ = \frac{t_p}{t_p + t_0} = \frac{t_p}{t_{ц}}$$

Установлены стандартные значения продолжительности включения $ПВ=15, 25, 40$ и 60% , для которых в каталоге и паспорте указываются номинальная мощность и другие номинальные данные. Для повторно-кратковременных режимов нагрузки электромашиностроительной промышленностью выпускаются специальные краново-металлургические двигатели.

Рассмотренные режимы нагрузки S1, S2, S3 имеют принципиальные отличия с точки зрения поведения перегрева двигателей, а также динамики их движения, что и ориентирует разработчиков электрических машин на необходимость рационального перераспределения активных материалов и геометрических соотношений в конструктивных исполнениях двигателей, т.е. на выпуск специальных электродвигателей продолжительного, кратковременного и повторно-кратковременного режимов работы. Именно для этих режимов в каталогах электрических машин приводятся номинальные данные двигателей.

Остальные номинальные режимы нагрузки являются модификациями повторно-кратковременного и продолжительного режимов.

S4. Номинальный режим повторно-кратковременной нагрузки с учетом пуска также характеризуется последовательным повторением идентичных рабочих циклов с временем работы $t_p \ll 5T_n$ и пауз $t_0 < 5T_{но}$, когда потери при часто повторяющихся пусках оказывают существенное влияние на поведение перегрева двигателя рис. 1.10, а для остановки применяются тормозные устройства.

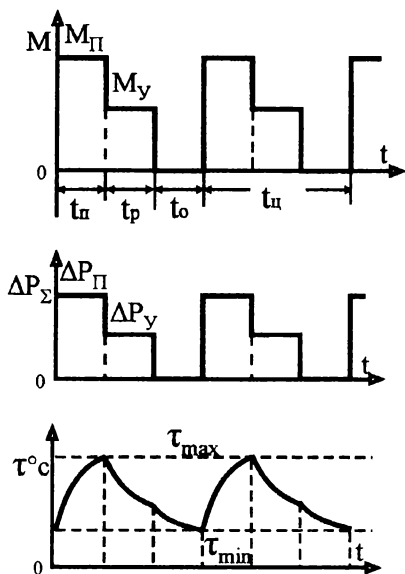


Рис. 1.10

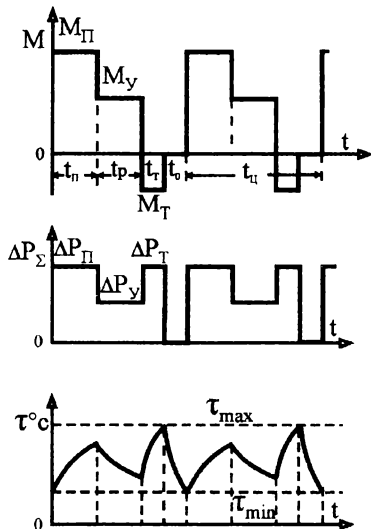


Рис. 1.11

Режим S4 характеризуется:

- продолжительностью включения, которая определяется отношением суммы рабочего времени к времени цикла $t_y \leq 10$ мин:

$$ПВ = \frac{t_n + t_p}{t_n + t_p + t_0} = \frac{\sum t_p}{t_y} = 15, 25, 40 \text{ и } 60 \%$$

- числом циклов в час:

$$Z = 30, 60, 120 \text{ и } 240;$$

- коэффициентом инерции:

$$FI = \frac{J_{\Sigma}}{J_D}$$

$$= 1,2; 1,6; 2,0; 2,5; 4,0; 6,3; 10,0.$$

S5. Номинальный режим повторно-кратковременной нагрузки с использованием пуско-тормозных включений, рис. 1.11, оказывающих существенное влияние при их повторении на поведение перегрева двигателя; характеризуется:

- продолжительностью включения:

$$ПВ = \frac{t_n + t_p + t_m}{t_n + t_p + t_m + t_0} = \frac{\sum t_p}{t_y} = 15, 25, 40, 60 \%$$

- числом циклов в час:

$Z=30, 60, 120$ и 240 ;

- коэффициентом инерции:

$$FI = \frac{J_{\Sigma}}{J_D} = 1,2; 1,6; 2,0; 2,5; 4,0.$$

Остальные режимы нагрузки электроприводов относятся к продолжительной работе без пауз, но с резко изменяющейся нагрузкой на валу двигателя, поэтому их охватывают общим термином – **переменяющиеся режимы**. Двигатели для этих режимов выбирают по каталогам машин продолжительного (длительного) режима работы.

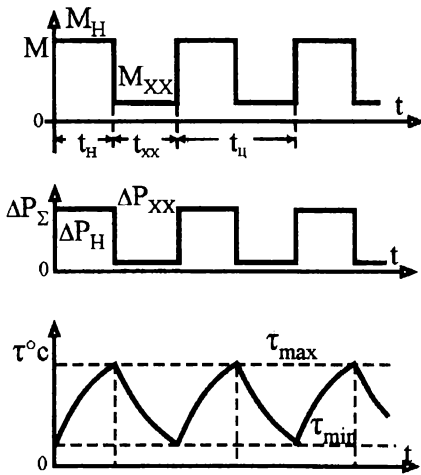


Рис. 1.12

S6. Номинальный режим продолжительной переменной нагрузки характеризуется последовательным повторением идентичных рабочих циклов, каждый из которых состоит из периодов работы при постоянной нагрузке и на холостом ходу; длительность этих периодов недостаточна для достижения теплового равновесия, и перегрев колеблется между τ_{max} и τ_{min} ,

рис. 1.12. Такой режим характерен для нереверсивных электроприводов,

запуск которых производится без нагрузки на валу, а для сглаживания пульсаций нагрузки используется маховик. Режим S6 характеризуется продолжительностью нагрузки:

$$ПН = \frac{t_n}{t_n + t_{xx}} = \frac{t_n}{t_{ц}}$$

которая имеет следующие стандартные значения: 15, 25, 40 и 60%, а время цикла не превышает 10 мин.

S7. Номинальный режим продолжительной нагрузки с пуско-тормозными включениями или реверсами характеризуется последователь-

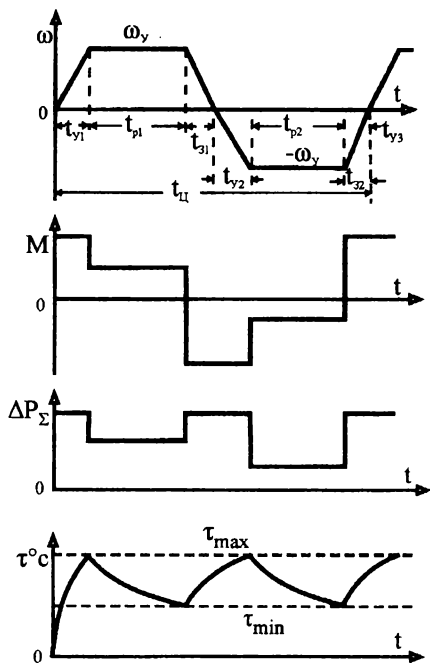


Рис. 1.13

ным повторением идентичных рабочих циклов, каждый из которых состоит из периодов пуска, работы при постоянной нагрузке и электрического торможения; длительность рабочего периода недостаточна для достижения теплового равновесия, и перегрев колеблется между τ_{max} и τ_{min} , рис. 1.13. Характеристиками такого режима являются нормированные значения следующих величин:

- число циклов в час:

$$Z=30, 60, 90, 120, 180, 240 \text{ и } 360;$$

- коэффициент инерции системы:

$$FI = \frac{J_{\Sigma}}{J_{Д}} = 1,2; 1,6; 2,0; 2,5; 6.$$

S8. Номинальный режим продолжительной нагрузки с периодическим изменением скорости вращения и нагрузки на валу двигателя характеризуется последовательным повторением рабочих циклов, каждый из которых состоит из периодов ускорения, работы при постоянной нагрузке, соответствующей заданной скорости вращения, затем одного или нескольких периодов

работы при других постоянных значениях нагрузки, соответствующих другим скоростям вращения; длительность каждого рабочего периода недостаточна для достижения теплового равновесия, и перегрев колеблется между τ_{max} и

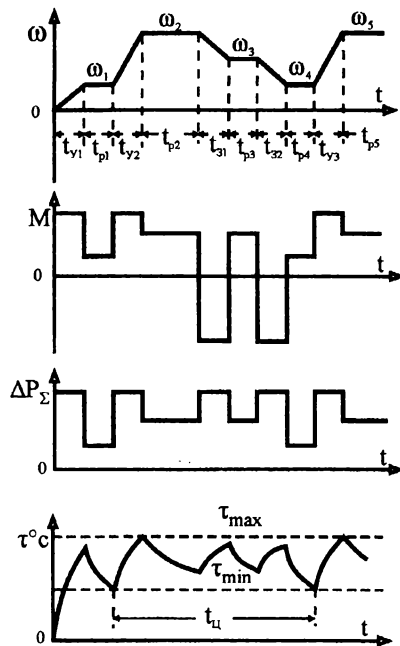


Рис. 1.14

τ_{min} , рис. 1.14. Такой режим нагрузки возможен для реверсивных и нереверсивных электроприводов. Характеристиками режима S8 являются нормированные значения следующих величин:

- относительная продолжительность работы при каждой нагрузке и соответствующей скорости вращения:

$$ПП_i = \frac{t_{yi} + t_{pi} + t_{si}}{t_{ц}} = 15, 25, 40; 60\%;$$

- число циклов в час:

$$Z = 30, 60, 90, 120, 180, 240, 360;$$

- коэффициент инерции:

$$FI = \frac{J_{\Sigma}}{J_{Д}} = 1,2; 1,6; 2,0; 2,5; 4,0.$$

1.6. НОМИНАЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ

Номинальной называют такую мощность, которую двигатель может развивать на валу сколь угодно долго без перегрева его обмоток свыше допустимой температуры, подчеркнем, в соответствии с принятым классом изоляции и номинальным режимом нагрузки, для эксплуатации в котором он изготовлен (см. § 1.5). Номинальная мощность на валу P_{2N} указывается в каталогах и на паспортной табличке, наряду с номинальной частотой

той вращения n_N , номинальным напряжением U_N , номинальным током I_N и номинальным КПД η_N . Через названные параметры легко определить и другие, например, потребляемую из сети электрическую мощность P_{1N} и электромагнитную $P_{эМN}$.

Номинальная мощность двигателя P_{2N} непосредственно отражает затраты и качество заложенных в конструкцию двигателя активных материалов (стали магнитопровода, цветного металла и электроизоляции обмоток), а значит, предопределяется габаритными размерами и скоростью вращения ротора (якоря):

$$P_{2N} = k \cdot D^2 L \cdot \omega_N = M_{BN} \cdot \omega_N, \quad (1.18)$$

где k – конструктивный коэффициент, Вт · $\frac{с}{м^3}$ · рад;

D – диаметр стали ротора (якоря), м;

L – активная длина стали ротора (якоря), м;

ω_N – номинальная угловая скорость вращения, $\frac{\text{рад}}{с}$, обусловлена числом пар полюсов p .

Выражение (1.18) показывает, что при одинаковой номинальной мощности быстроходные двигатели оказываются с меньшими весогабаритными показателями и более дешевыми, так как затраты активных материалов определяются произведением $D^2 L$, которое уменьшается при повышении номинальной скорости. Поэтому электродвигатели обычно изготавливаются на значительные скорости вращения (750-3000 $\frac{\text{об}}{\text{мин}}$).

С другой стороны, произведение $k \cdot D^2 \cdot L$ выражает развиваемый двигателем номинальный момент на валу:

$$M_{BN} = \frac{P_{2N}}{\omega_N} = k \cdot D^2 L = M_{эМN} - \Delta M_{xx}, \quad (1.19)$$

который определяется, в свою очередь, разностью номинального электромагнитного момента и момента потерь холостого хода при номинальной скорости.

Записанные выше выражения связывают номинальные значения физических величин, характеризующих электромеханический процесс энергопреобразования с полнотой использования двигателя по допустимому перегреву изоляции его обмоток. Относительно низкая теплостойкость (см. Приложение 1) электроизоляционных материалов обмоток ограничивает величину номинального тока, а значит, при принятом номинальном напряжении и тех же активных материалах, и номинальную мощность двигателя примерно на половину в сравнении с его электромагнитными возможностями.

Недопустимый перегрев двигателей приводит к нарушению физических и химических свойств электроизоляционного материала его обмоток. Поэтому номинальная мощность современных электродвигателей в заданных габаритах предопределяется прежде всего принятым классом изоляции его обмоток, ограничивающих величину номинального тока, который соответствует конкретному режиму нагрузки двигателя, обозначенному в его паспорте S1, S2, ... S8. Квадрат номинального тока соответствующей цепи характеризует предельно допустимое рассеивание мощности на сопротивлениях обмоток двигателя, которая выражается номинальными переменными потерями внутри двигателя, например:

- в цепях статора и ротора асинхронного двигателя:

$$\Delta P_{VSN} = m \cdot r_S \cdot I_{SN}^2, \quad (1.20)$$

$$\Delta P_{VRN} = m \cdot r_R \cdot I_{RN}^2; \quad (1.21)$$

- в цепях якоря и независимого возбуждения двигателей постоянного тока:

$$\Delta P_{avN} = r_a \cdot I_{aN}^2, \quad (1.22)$$

$$\Delta P_{VBN} = r_B \cdot i_{OHB_N}^2, \quad (1.23)$$

- где m – число фаз в асинхронном двигателе;
- r_S – внутреннее активное сопротивление фазы статора асинхронного двигателя;
- r_R – внутреннее активное сопротивление фазы ротора асинхронного двигателя;
- r_a – суммарное сопротивление обмоток и переходного контакта на коллекторе якоря;
- r_B – сопротивление обмотки независимого возбуждения двигателей постоянного тока.

Полные номинальные потери в главной цепи определяются суммой переменных и постоянных потерь:

- в асинхронном двигателе:

$$\Delta P_{\Sigma N} = \Delta P_{VSN} + \Delta P_{VRN} + \Delta P_C; \quad (1.24)$$

- в двигателях постоянного тока:

$$\Delta P_{\Sigma N} = \Delta P_{VAN} + \Delta P_C, \quad (1.25)$$

где $\Delta P_C = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{мех.}$ – постоянные потери в стали и механические при номинальной скорости вращения ω_N или n_N .

Отметим, что мощность цепи независимого возбуждения в ДПТ НВ при $U_{aN} = U_{BN}$ составляет 3-5% от номинальной мощности главной цепи.

Полагая установившийся перегрев τ_y в главной цепи предельно допустимым, можно записать:

$$\tau_y = \tau_{дон.} = \frac{q_N}{A} = \frac{\Delta P_{\Sigma N}}{A}, \quad (1.26)$$

где q_N – мощность тепловых потерь, рассеиваемая внутри двигателя при

номинальной нагрузке и скорости вала $q_N \left[\frac{\text{Дж}}{\text{с}} \right] = \Delta P_{\Sigma N}$, [Вт];

A – коэффициент теплоотдачи, $\frac{\text{Дж}}{\text{с} \cdot \text{град}}$.

Если учесть, что

$$\Delta P_{\Sigma N} = P_{1N} - P_{2N} = \Delta P_{\nu N} + \Delta P_C, \quad (1.27)$$

где $P_{1N} = 3 \cdot U_{\phi SN} \cdot I_{\phi SN} \cdot \cos \varphi_N$ – активная электрическая мощность АД;

$P_{1N} = U_{AN} \cdot I_{AN}$ – потребляемая электрическая мощность ДПТ;

$\frac{P_{2N}}{P_{1N}} = \eta_N$ – номинальный КПД,

а также ранее записанные с (1.20) по (1.26), то можно получить следующее исчерпывающее проблему выражение:

$$P_{2N} = A \cdot \tau_{\text{доп}} \cdot \frac{\eta_N}{1 - \eta_N}, \quad (1.28)$$

которое достаточно полно указывает, какими факторами регламентируется номинальная мощность и каковы пути ее увеличения в заданном габарите двигателя. Во-первых, это теплостойкость изоляции обмоток, ограничивающая температуру допустимого перегрева $\tau_{\text{доп}}$, а значит, и величину номинального тока I_N . Во-вторых, качество электротехнической стали и конструктивное исполнение магнитопровода (шихтованный набор), влияющие на величину потерь в стали ΔP_{Fe} . В-третьих, тип и качество смазки подшипников, конструктивные решения для обеспечения самовентиляции, влияющие на величину механических потерь $\Delta P_{\text{мех}}$. В-четвертых, условия теплоотвода (ребристое исполнение корпуса для увеличения поверхности теплоотдачи, применение различных способов принудительного охлаждения), обеспечивающие увеличение коэффициента A . Создание в перспективе сверхпроводниковых материалов для обмоток должно резко снизить переменные потери.

Следует еще раз повторить, что электромагнитные возможности современных электродвигателей примерно в два раза оказываются недоиспользованными по мощности и моменту из-за указанных выше ограничений по допустимому тепловому состоянию изоляции обмоток.

1.7. ПЕРЕГРУЗОЧНАЯ СПОСОБНОСТЬ ДВИГАТЕЛЕЙ

Перегрузочная способность определяется электромеханическими и конструктивными особенностями двигателей различных типов и характеризует возможность выдерживать кратковременные превышения тока и момента по сравнению с их номинальными значениями. Из-за инерционности тепловых процессов такая кратковременная перегрузка практически не оказывает влияния на тепловое состояние двигателя.

В асинхронных двигателях перегрузочная способность ограничивается величиной критического момента по статической механической характеристике:

$$\lambda_M = \frac{M_{BK}}{M_{BN}} = 1,7 \div 2,2 \quad (1.29)$$

и может быть несколько большей у двигателей краново-металлургического исполнения. Следует отметить, что при колебаниях напряжения в питающей сети может резко изменяться перегрузочная способность, так как момент пропорционален квадрату напряжения питающей сети. В асинхронных электроприводах с амплитудно-частотным управлением возможно формирование необходимой перегрузочной способности. Величина перегрузочной способности λ_M приводится в каталогах асинхронных двигателей, выражая отношение соответствующих моментов на валу.

В синхронных двигателях перегрузочная способность ограничивается величиной максимального момента по статической угловой характеристике

$M = f(\Theta)$ при номинальном возбуждении:

$$\lambda_M = \frac{M_{\max}}{M_N} \cong \frac{\sin 90^\circ}{\sin(20 \div 30)^\circ} \cong 3 \div 2, \quad (1.30)$$

за счет форсирования возбуждения λ_M может быть повышена до четырех.

В двигателях постоянного тока перегрузочная способность ограничивается допустимыми условиями коммутации на коллекторе. Фактором, вызывающим искрение в щеточном контакте с пластиной (ламелью) коллектора, является результирующая ЭДС, индуцируемая в коммутирующей секции. Здесь различают перегрузочную способность по току и по моменту, которые определяются отношением максимально допустимых соответствующих переменных к их номинальным значениям:

$$\lambda_I = \frac{I_{\max \text{ доп.}}}{I_{aN}}; \quad (1.31)$$

$$\lambda_M = \frac{M_{B \max}}{M_{BN}} \cong \frac{c\Phi_m \cdot (I_B) \cdot I_a \text{ доп.}}{M_{эмN}}. \quad (1.32)$$

В диапазоне изменения скорости вниз от естественной (или основной) механической характеристики перегрузочную способность полагают неизменной. Для двигателей серии 2П с номинальным независимым возбуждением $\lambda_M = 2 \div 3$; со смешанным и последовательным - λ_M , как правило, больше, что обусловлено естественным увеличением магнитного потока таких двигателей в области перегрузки. У двигателей специального конструктивного исполнения (высокомомментных) перегрузочная способность достигает десятикратного значения.

Использование магнитного потока как параметра управления скоростью ведет к снижению перегрузочной способности не только по моменту, но и по току. В ДПТ НВ с достаточной для практики точностью считают, что при скорости выше номинальной искрообразование в щеточном контакте остается

неизменным при сохранении постоянства произведения скорости вращения на ток якоря $\omega \cdot I_a$. Этим руководствуются, оценивая степень снижения перегрузочной способности при работе с ослабленным магнитным потоком. Через перегрузочную способность для конкретной скорости вращения выражают кратковременную перегрузочную мощность, например:

- развиваемую на валу:

$$P_{2\partialоп.и} = M_{в.∂оп.} \cdot \omega_i = \lambda_m \cdot M_{вN} \cdot \omega_i; \quad (1.33)$$

- электромагнитную:

$$P_{эм.∂оп.и} = M_{эм.∂оп.} \cdot \omega_i \cong \lambda_m \cdot M_{эмN} \cdot \omega_i; \quad (1.34)$$

- потребляемую из сети:

$$P_{1\partialоп.и} = M_{эм.∂оп.} \cdot \omega_{oi} \cong \lambda_m \cdot M_{эмN} \cdot \omega_{oi}. \quad (1.35)$$

Похожие по структуре выражения можно получить и для асинхронного двигателя.

Раздел 2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И ЗАДАНИЯ К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ

2.1. ЦЕЛЬ, ЗАДАЧА И ОРГАНИЗАЦИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Курсовое проектирование является неотъемлемым этапом инженерной подготовки специалиста. В процессе курсового проектирования по дисциплине «Электрический привод» студент оказывается поставленным в условия самостоятельной творческой учебно-инженерной деятельности:

- работает с технической и методической литературой;
- систематизирует и углубляет теоретические знания по базовым специальным дисциплинам;
- применяет современные инженерные приемы и технические средства, отрабатывает практические навыки решения конкретных технических задач синтеза электропривода;
- активно готовится к восприятию прикладных дисциплин, связанных с автоматическим управлением электроприводами, с отраслевым электрооборудованием и комплексной автоматизацией технологических процессов механизированных производств.

Целью выполнения курсового проекта по электрическому приводу является отработка практических навыков в интегральном использовании знаний и умений, заложенных базовыми дисциплинами общей и специальной подготовки в процессе решения инженерной задачи синтеза силовой части электропривода конкретного механизма в соответствии со специфици-

кой его конструктивного исполнения и требованиями технологического процесса механизированного производства.

Задачей курсового проектирования является разработка силовой части системы электропривода конкретного механизма, в основном удовлетворяющей требованиям технологического процесса по реализации заданных законов движения и допустимому тепловому состоянию электродвигателя.

Организация работы. Каждый студент закрепляется за руководителем от кафедры, работа с которым проходит в форме консультаций. По Учебному плану на это отводится четыре часа, так что фактически студент выполняет курсовой проект самостоятельно.

Студентам и их руководителям в пособии (гл. 2.3) предлагаются восемь рабочих машин из разных отраслей механизированного производства с 5÷7 вариантами технологических данных. Этим не ограничивается число объектов электрификации, студент и его руководитель свободны и в другом выборе объекта. Главным условием является: электрифицируемая рабочая машина должна относиться к объекту с интенсивными включениями, то есть к режимам нагрузки S5÷S8.

Оформление и защита курсового проекта являются важными и ответственными этапами организационного плана. Работа над курсовым проектом завершается оформлением пояснительной записки и чертежей в соответствии с правилами ЕСКД и ГОСТов (см. [25]), для чего материалы проекта проходят нормоконтроль.

Пояснительная записка начинается с титульного листа установленного образца; состоит из текста в количестве 20 - 25 страниц, в котором обосновываются принимаемые решения, указываются источники методов решения, технических данных и расчетных выражений. Результаты расчетов приводятся в таблицах. В тексте или на вкладках из кальки, миллимет-

ровки помещается весь иллюстративный материал. Завершается эта часть заключением, в котором оцениваются результаты работы с точки зрения удовлетворения требований технологического процесса электрифицированным механизмом по статике и динамике, технологическим критериям и пр. В конце приводится список использованной литературы.

Чертежи к курсовому проекту включают 2 листа формата А1 и содержат необходимый материал для защиты проекта, соответствующий иллюстрациям, помещенным в пояснительной записке (кинематическая и принципиальная схемы, упрощенная и уточненная нагрузочные диаграммы, статические и динамические характеристики).

Принимаемые решения должны отвечать современным тенденциям развития науки и техники, базироваться на использовании новейших электрических машин, силовых преобразователей энергии.

Поощряется включение в материал проекта элементов научного исследования (расширенный литературный и патентный поиск, оптимизация конструктивных решений и режимов работы, анализ принимаемых допущений и влияния параметров на решения, лабораторное макетирование, экспериментальные исследования и, разумеется, широкое применение ЭВМ).

Защита проекта проводится в заранее назначенное время. Комиссия утверждается заведующим кафедрой.

2.2. СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА И КОММЕНТАРИИ К НЕМУ

При разработке электропривода рассматриваются следующие вопросы, которые должны составить разделы (или главы) пояснительной записки.

1. Введение. Здесь формулируется задача проекта и в общих чертах раскрывается конкретная его тема.

2. Характеристика электрифицируемой рабочей машины. Описывается ее назначение, особенности технологического процесса и конструктивного исполнения, которые отражают заданную производительность и качество работы, а также возможные технологические ограничения и т.п. Производится анализ конструктивных и технологических данных, расчет ожидаемых статических нагрузок на исполнительном органе с учетом кинематической схемы и выполняется построение нагрузочной диаграммы и тахограммы рабочей машины, которая фактически отражает требования к разрабатываемому электроприводу:

$$M_{pm} = f_1(t) \text{ или } F_{pm} = f_2(t);$$

$$n_{pm} = f_3(t) \text{ или } V_{pm} = f_4(t);$$

$$\alpha_{pm} = f_5(t) \text{ или } S_{pm} = f_6(t),$$

а также определяются временные интервалы движения. Полученные результаты позволяют определить класс (скоростной, моментный, позиционный) и режим нагрузки (S3, S4, S5, S6, S7 или S8) электрифицируемой рабочей машины и сформулировать требования к электроприводу.

3. Выбор типа электропривода и его принципиальной схемы. Обосновывается ориентация на род тока и величины номинального напряжения, а также на исполнение предлагаемого двигателя по соображениям изоляции от влияния окружающей среды. Из описания технологического процесса, требуемых законов движения и подсчитанных нагрузок, а также на основании знаний электромеханических свойств и возможностей двигателей переменного и постоянного тока разработчик электропривода аргументированно обосновывает род тока (переменный или постоянный), тип двигателя и систему электропривода (сетевой или с управляемым преобра-

зователем ЭЭ). Из ожидаемой нагрузки на исполнительном органе ориентируется на величину номинального напряжения двигателя (нормального до 1000 В или высокого – более 1000 В). Далее разрабатывается принципиальная схема с указанием всех входящих функциональных элементов (параметров сети, схемы ПЭЭ и др.).

4. Предварительный выбор электродвигателя и построение нагрузочной диаграммы и тахограммы. Как показано в настоящем пособии (Раздел 3. Разработка силовой части электропривода) далеко не всегда удается просто вычислить величину номинальной мощности двигателя, как, например, показано в (§ 3.1.1) или (§ 3.1.2). В электрифицируемых механизмах с интенсивными пуско-тормозными включениями (§ 3.1.3), которые представляют темы курсовых проектов, определение величины номинальной мощности является серьезной проектной задачей.

Номинальная мощность двигателя электропривода определяется на основании *нагрузочной диаграммы электропривода*, в которой учитываются не только статические, но и динамические нагрузки в системе «двигатель-рабочая машина». В большинстве случаев основную долю динамической нагрузки определяет момент инерции двигателя (J_D), а двигатель еще не выбран. Поэтому приходится как-то (см. гл. 3.3) предварительно выбрать из соответствующего каталога двигатель, узнать его момент инерции и построить упрощенные нагрузочные диаграммы:

$$\Delta P_{\Sigma} = f(t), \text{ или } M_{эм} = f_1(t), \text{ или } I = f_2(t);$$

$$n_{эд} = f_3(t), \text{ или } \omega = f_4(t);$$

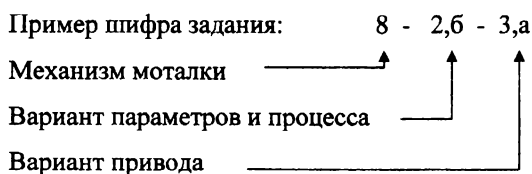
по которым (см. гл. 3.5) производится проверка правильности предварительно выбранного двигателя.

5. Выбор функциональных элементов принципиальной схемы электропривода. Указывается: тип, номинальные и необходимые расчетные параметры комплектующего электрооборудования.

6. Математическое описание силовой части, построение механических или электромеханических характеристик разомкнутой системы электропривода, см. гл. 3.6.

7. Заключение. Формулируются результаты анализа принятых в проекте решений с оценкой полноты удовлетворения требованиям технологии, электромеханических свойств и энергетических показателей.

2.3. ТИПОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ НА КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ



Тема 1. Электрификация механизма перемещения стола продольно-строгального станка

Процесс обработки детали на продольно-строгальном станке поясняет рис. 2.1. Снятие стружки происходит в течение рабочего (прямого) хода, при обратном движении резец поднят, а стол перемещается на повышенной скорости. Подача резца производится периодически от индивидуального привода во время холостого хода стола в прямом направлении. Поскольку при строгании резец испытывает ударную нагрузку, то значения максимальных скоростей строгания не превосходят 75-120 м/мин (в отли-

чие от скоростей точения и шлифования 2000 м/мин и более). Под скоростью строгания (резания) понимают линейную скорость $V_{пр}$ перемещения закрепленной на столе детали относительно неподвижного резца на интервале рабочего хода стола. При этом скорость входа резца в металл и скорость выхода резца из металла в сравнении со скоростью строгания ограничиваются до 40 % и менее в зависимости от обрабатываемого материала, чтобы избежать скалывания кромки. Указанные обстоятельства ограничивают производительность и для ее повышения остается только сократить непроизводительное время движения: обратный ход осуществляется на повышенной скорости $V_{об} > V_{пр}$, а пускотормозные режимы при реверсе принимают допустимо минимальной продолжительности. Хороший эффект в этом дает двухдвигательный привод. Он должен быть управляемым по скорости, поскольку для различных материалов (в соответствии с технологией обработки и свойствами материалов) используются различные оптимальные или максимально допустимые скорости строгания; кроме того, движение характеризуется различными скоростями на разных интервалах

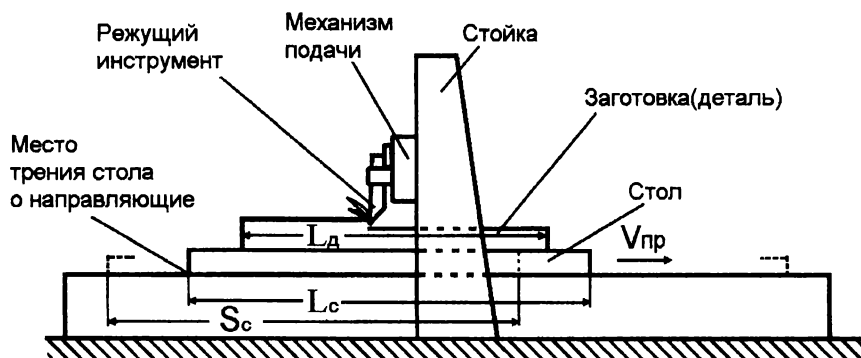


Рис. 2.1.

времени рабочего цикла, высокой частотой реверсирования с большими пускотормозными моментами. Применяют двух- и однозонное управление скоростью.

Расчетные выражения

Тяговое усилие F , Н:

$$F = F_z + (m_c + m_d) \cdot \mu \cdot g, \quad (2.1)$$

где F_z – усилие резания, Н;

m_c – масса стола, кг;

m_d – масса детали, кг;

μ – коэффициент трения стола о направляющие, принимается в пределах 0,05 - 0,08;

$g = 9,8$ м/с – ускорение тяготения.

При обратном ходе $F_z = 0$, а остальная нагрузка остается.

Суммарный момент инерции [кг·м²], приведенный к валу двигателя:

$$J_{\Sigma} = \delta \cdot k_d \cdot J_d + (m_c + m_d) \cdot \frac{V_{pm}^2}{4\pi^2 n^2}, \quad (2.2)$$

где $\delta = 1,05 - 1,2$ – коэффициент, учитывающий через J_d моменты инерции полумуфта на валу двигателя и элементов редуктора, приведенных к валу двигателя;

J_d – момент инерции якоря двигателя (ротора), кг·м²;

k_d – количество двигателей;

V_{pm} – линейная скорость движения стола, м/мин;

n – частота вращения двигателя, об/мин.

Исходные данные.

1. Кинематическая схема (рис. 2.2)

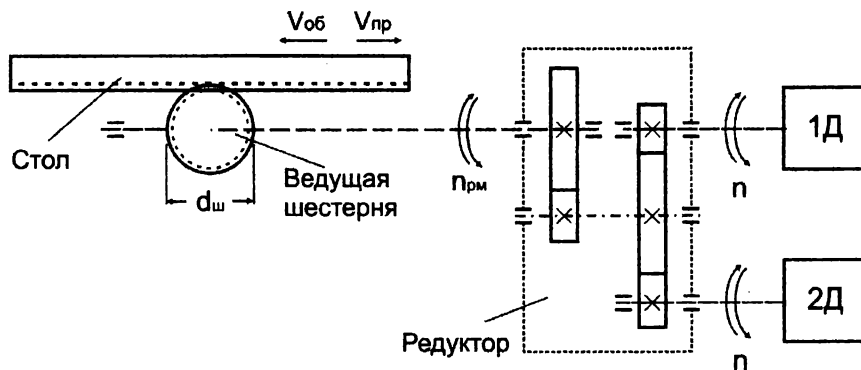


Рис. 2.2.

2. Варианты конструктивно-технологических параметров:

Таблица 1.

Технологические данные	Усл. обозн.	Номер варианта						
		1	2	3	4	5	6	7
Усилие резания, кН	F_z	40	60	80	90	65	75	35
Скорость рабочего хода, м/мин	$V_{пр}$	30	20	12	14	18	24	26
Скорость обратн. хода, м/мин	$V_{об}$	60	40	24	28	36	48	52
Масса стола, т	m_c	3,6	4,7	13,5	8	6,2	7	3,2
Масса детали, т	m_{∂}	6,7	5,6	20	14,8	9,8	11,2	5,2
Диаметр ведущей шестерни, м	$d_{ш}$	0,5	0,5	0,5	0,48	0,48	0,5	0,5
Максимальный ход стола, м	S_c	7	8	8	8	8	9	6
Длина детали, м	L_{∂}	2,8	3,5	5,2	5,3	4,8	3,7	2,5

Путь подхода детали к резцу принять равным 0,2 м; путь после выхода резца из металла - не более 0,15 м.

3. Варианты привода:

- а - однодвигательный с однозонным управлением скоростью;
- б - двухдвигательный с однозонным управлением скоростью;
- в - однодвигательный с двухзонным управлением скоростью;
- г - двухдвигательный с двухзонным управлением скоростью.

Тема 2. Электрификация грузового лифта

Грузовой лифт установлен в многоэтажном производственном здании, служит для опускания готовой продукции в контейнерах, закатываемых в кабину, а также для транспортирования полуфабрикатов в контейнерах между этажами и подачи порожних контейнеров. Использование лифта пассажирами может быть исключено или не исключено, что указывается в техническом задании. Для обеспечения совпадения пола кабины лифта и этажа требуется точная остановка кабины. Полуфабрикаты изделий не допускают чрезмерных динамических нагрузок при транспортировании. Работу лифта и его конструктивное исполнение поясняет рис. 2.3.

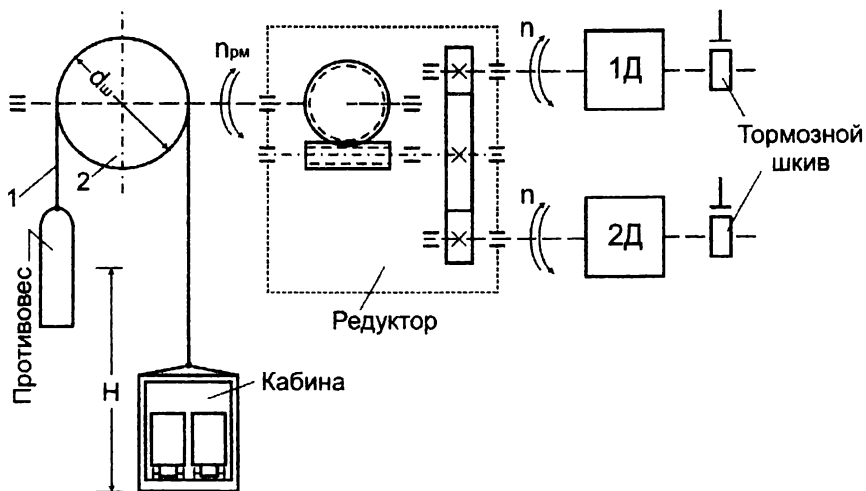


Рис. 2.3.

Кабина лифта уравнивается противовесом через канат 1 на канатоподъемном шкиве трения 2, который приводится в движение через редуктор от одного или двух двигателей. Интенсивность включения определяется производительностью обслуживаемых участков сборки готовой продукции.

Расчетные выражения:

Момент статического сопротивления [Н·м], приведенный к валу двигателя:

$$\text{- активный} \quad M_{ca} = (m_k + m_z - m_n) \frac{d_{ш} \cdot g}{2 \cdot i \cdot \eta_{ш} \cdot \eta_p}, \quad (2.3)$$

$$\text{- реактивный} \quad M_{cp} = (m_k + m_z + m_n) \frac{d_{ш} \cdot g}{2 \cdot i \cdot \eta_{ш} \cdot \eta_p} \cdot \mu, \quad (2.4)$$

где m_k – масса кабины, кг;

m_z – масса полезного груза, кг;

$m_n = m_k + 0,5m_z$ – масса противовеса, кг;

$d_{ш}$ – диаметр шкива трения, м;

$g = 9,81$ м/с – ускорение тяготения;

$\eta_{ш} = 0,75 - 0,8$ – КПД передачи "канат-шкив трения";

η_p – КПД редуктора, имеющего в своем составе самотормозящую червячную пару;

i – передаточное отношение редуктора, имеющего в своем составе самотормозящую червячную пару;

$\mu = 0,003 \div 0,07$ – коэффициент трения.

Здесь следует иметь в виду, что активная составляющая от веса полезного груза полностью не уравнивается.

Динамический момент [Н·м], приведенный к валу двигателя:

$$\begin{aligned}
M_{\text{дин}} &= M_{\text{эм}} \mp M_c = J_{\Sigma} \left(\frac{d\omega}{dt} \right)_{\text{дон}} = J_{\Sigma} \frac{2 \cdot a_{\text{дон}} \cdot i}{d_{\text{ш}}} = \\
&= \left[k_{\delta} \cdot \delta \cdot J_{\delta} + \frac{J_{\text{ш}}}{i^2} + (m_{\kappa} + m_z + m_n) \frac{d_{\text{ш}}^2}{4 \cdot i^2} \right] \frac{2 \cdot a_{\text{дон}} \cdot i}{d_{\text{ш}}} = \\
&= \left(k_{\delta} \cdot \delta \cdot J_{\delta} \cdot i + \frac{J_{\text{ш}}}{i} \right) \frac{2 \cdot a_{\text{дон}}}{d_{\text{ш}}} + (m_{\kappa} + m_z + m_n) \frac{d_{\text{ш}} \cdot a_{\text{дон}}}{2 \cdot i}, \text{ Н} \cdot \text{м}
\end{aligned} \tag{2.5}$$

где $M_{\text{эм}}$ – развиваемый двигателем момент при пуске или торможении, Н · м;

J_{Σ} – суммарный момент инерции системы относительно вала двигателя, кг · м²;

$\frac{d\omega}{dt}$ – допустимое угловое ускорение вала двигателя, рад/с²;

$a_{\text{дон}}$ – допустимое линейное ускорение кабины лифта, м/с²;

k_{δ} – количество двигателей;

$\delta = 1, 1, 1, 2$ – коэффициент, учитывающий моменты инерции на валу двигателя (полушфт, тормозного шкива, деталей редуктора, приведенных к валу двигателя), выраженный через J_{δ} ;

J_{δ} – момент инерции ротора (якоря) двигателя, кг · м²;

$J_{\text{ш}}$ – момент инерции шкива трения, кг · м².

Исходные данные

1. Кинематическая схема (рис. 2.3).

2. Варианты конструктивно - технологических данных:

Таблица 2.

Технологические данные	Усл. обоз.	Номер варианта				
		1	2	3	4	5
Масса кабины, т	m_k	0,5	0,65	0,72	0,96	1,2
Грузоподъемность лифта, т	m_{zn}	2,0	2,5	3,2	4,3	5,0
Средняя скорость движения, м/с	V_{pm}	0,71	0,5	0,4	0,35	0,25
Диаметр канатоведущего шкива, м	$d_{ш}$	0,5	0,64	0,7	0,8	0,95
Момент инерции канатоведущего шкива, кг·м ²	$J_{ш}$	4,32	9,34	13,6	22,7	42,1
Допустимое ускорение, м/с	$a_{дон}$	2,1	2	1,5	1,7	1,2
График движения за цикл по этажам с грузом m_z/m_{zn} : IV - I I - II II - III III - IV						
		1	1	1	1	1
		0,2	0,5	0,2	0,2	0,5
		0,7	0,2	0,5	0,8	0,3
		0,5	0,8	0,7	0,5	0,8
Число циклов в час	z	34	30	28	25	22
Продолж. включения, %	$ПВ$	46	52	42	38	28

Полная высота подъема - 20 метров, число этажей - 4; кабина проходная, несовпадение пола этажа и кабины ± 15 мм допустимо; торможение электрическое, а электромагнитный тормоз удерживает привод во время паузы. Управление скоростью не требуется.

3. Варианты привода:

- а - однодвигательный;
- б - двухдвигательный.

Тема 3. Электрификация рольганга прокатного стана.

Рольганги - это механизмы, предназначенные для транспортирования нагретого металла вращающимися роликами. По технологическому назначению рольганги подразделяют на рабочие, транспортные и др.

Рабочие рольганги служат для подачи металла к прокатным валкам и отвода его от валков, располагаются непосредственно у клетки прокатного стана. На крупных обжимных станах часть роликов этих рольгангов (от 1 до 3) размещают непосредственно в станине клетки (станинные ролики); их назначение - улучшить условия захвата металла валками. К рабочим относятся и вспомогательные рольганги, называемые также удлинительными или раскатными, которые, продолжая линию рабочих рольгангов, используются при длине раската, превышающей длину основных рольгангов.

Транспортные рольганги служат для передачи металла между технологическими установками и механизмами; различают транспортные рольганги по месту, занимаемому в технологической линии прокатного производства, например у печей, приемные, подводящие и отводящие (перед станом и за ним, перед ножницами и за ними).

Рольганги могут иметь групповой или индивидуальный привод. При групповом приводе секция рольганга, включающая от трех до десяти и более роликов, имеет один или два приводных двигателя (рис. 2.4, а). Групповой привод используют для рольгангов, перемещающих короткие заготовки, когда на один ролик может приходиться почти полный вес заготовки; при индивидуальном приводе (рис. 2.4, б) в этом случае потребовалось бы значительно большая установленная мощность. С групповым приводом обычно выполняют рольганги на обжимных станах: у печей, приемные, рабочие и раскатные.

В транспортных рольгангах, перемещающих заготовки большой длины, когда вес распределяется между большим числом роликов, применяют индивидуальный привод. Его более высокая стоимость в сравнении с групповым приводом компенсируется простотой его конструкции, удобством изготовления и надежностью в эксплуатации. Индивидуальный привод применяется и для станинных роликов, поскольку он безредукторный, т.е. исключается механическое звено, подверженное быстрому износу в тяжелых режимах с ударной нагрузкой. На современных обжимных станах индивидуальный привод роликов применяется и для рабочих рольгангов.

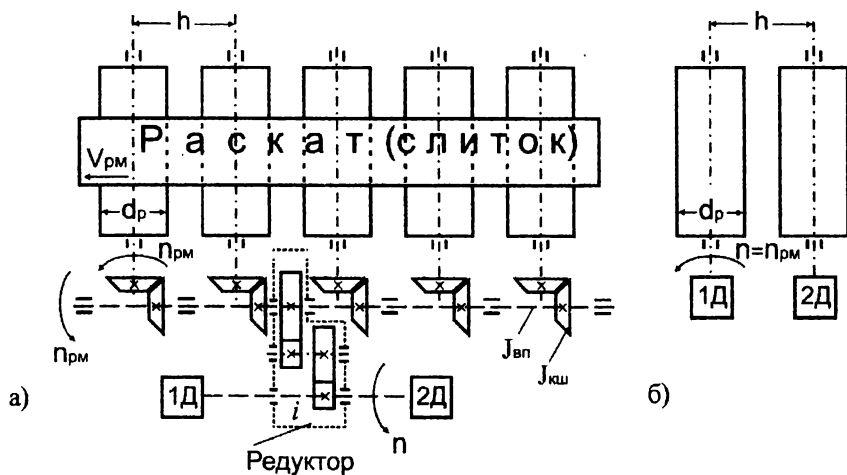


Рис. 2.4.

Интенсивность режимов работы тех или иных рольгангов определяется типом стана и их назначением в технологическом процессе прокатного производства (табл. 3).

Таблица 3.

№ п/п	Назначение рольганга	ПВ,%	Число вкл. в час
1.	Рольганг после методической печи рельсобалочного стана	6-10	100-110
2.	Приёмный рольганг блюминга, слябинга	4-8	90
3.	Рабочий рольганг блюминга	50-60	1000-1200
4.	Рабочий рольганг листовых станов	40	800-900
5.	Отводящие рольганги обжимных станов	15-18	500-550
6.	Рольганг за ножницами блюминга	50-60	500-600

Диаметр роликов рольганга для снижения их момента инерции выбирается минимальным, удовлетворяющим условиям прочности (табл. 4).

Таблица 4.

№ п/п	Назначение рольганга	Диаметр ролика, мм
1.	Рольганг после методической печи, рабочий рольганг малого блюминга и рельсобалочного стана, транспортный рольганг после большого блюминга перед ножницами и после них	400
2.	Рабочий рольганг слябинга	600
3.	Рабочий рольганг крупного блюминга, толстолиствого стана	500
4.	Рабочий рольганг среднего блюминга	450
5.	Транспортный рольганг после среднего и малого блюминга, рельсобалочного стана	350
6.	Рабочие и подводящие рольганги среднелистового стана	300

В групповом приводе обычно применяют двигатели постоянного тока с независимым возбуждением, а в индивидуальном - асинхронные ко-

роткозамкнутые двигатели с большой перегрузочной способностью, питаемые от общего преобразователя с амплитудно-частотным управлением при изменении частоты от 10 до 60 Гц.

Расчетные выражения

Момент статического сопротивления рольганга [Н·м], приведенный к валу двигателя, включает составляющие: момент холостого хода M_{xx} и момент транспортирования металла по роликам M_{mm} , т. е. определяется их суммой:

$$M_c = (M_{xx} + M_{mm})/i \cdot \eta, \quad (2.6)$$

Момент трения при холостом ходе рольганга вычисляют по формуле:

$$M_{xx} = z_p \cdot m_p \cdot g \cdot \mu_{ш} \cdot d_{ш} / 2, \quad (2.7)$$

где z_p – количество роликов рольганга;

m_p – масса одного ролика, кг;

g – ускорение тяготения, $g = 9,81$ м/с²;

$d_{ш}$ – диаметр шейки ролика, м;

$\mu_{ш}$ – коэффициент трения скольжения в подшипниках ролика; для подшипников с бронзовыми вкладышами, если они не подвержены нагреву горячим металлом, он равен 0,06 - 0,08, а при возможном нагреве его увеличивают на 50 %; для подшипников качения принимают $\mu_{ш} = 0,005 - 0,007$.

Момент транспортирования металла по роликам вычисляют по формуле:

$$M_{mm} = m_m \cdot g \cdot \left(\frac{d_{ш}}{2} \cdot \mu_{ш} + f \cdot 10^{-2} \right), \quad (2.8)$$

где m_m – масса металла, приходящаяся на секцию рольганга, кг; при групповом приводе ее обычно принимают равной массе всего слитка, т.е. $m_m = m_{сл}$; при индивидуальном приводе масса m_m , приходящаяся на один ролик, определяется из характеристики проката в соответствии с шагом рольганга h :

f – коэффициент трения качения металла по роликам; учитывает диаметр ролика и его нагрев; меньшие значения относятся к холодному металлу и меньшему диаметру ролика, $f = 0,1-0,15$ см.

Таблица 5.

Характеристика проката	Относительная масса металла на ролик $m_m / m_{сл}$
Раскат сечением более 1000 мм ² и длиной менее трех шагов рольганга	0,75
Полосы сечением более 2000 мм ² и длиной свыше трех шагов рольганга	0,5
Полосы сечением более 2000 мм ² и длиной свыше четырех шагов рольганга	0,3

При выбросе металла из валков на ролики, а также при упоре металла в борты рольганга и в направляющие линейки проводки возможно буксование (проскальзывание) роликов по металлу.

Момент буксования [Н·м], приведенный к валу двигателя, определяется по формуле:

$$M_б = (m_m \cdot g \cdot \frac{d_p}{2} \cdot \mu_б) \cdot \frac{1}{i \cdot \eta}, \quad (2.9)$$

где d_p – диаметр ролика, м;

μ_b – коэффициент трения при буксовании; зависит от условий работы (табл. 6).

Таблица 6.

Характеристика условий работы	μ_b для холодн. стали	μ_b для горяч. стали
Среднее значение для скорости 5-10 м/с	0,1	0,15
Среднее значение для скорости до 5 м/с	0,15	0,2
Предельное значение для трогания	0,15	0,3

Суммарный статический момент при буксовании [Н·м], приведенный к валу двигателя:

$$M_{cb} = [(z_p \cdot m_p + m_m) \cdot d_{ш} \cdot \mu_{ш} \mp m_m \cdot d_p \cdot \mu_b] \cdot \frac{g}{2 \cdot i \cdot \eta}, \quad (2.10)$$

где знак "+" соответствует моменту буксования, направленному по ходу движения, а "-" - против движения роляганга; отсюда следует, что при определенных условиях M_{cb} может выполнять роль активного движущего момента.

В переходных режимах пуска и торможения роляганга с находящимся на нем металлом динамический момент не должен превышать некоторого предельного значения, свыше которого возможно проскальзывание металла на роляганге. Величина предельно допустимого динамического момента [Н·м], приведенного к валу двигателя, в соответствии с кинематической схемой (рис. 2.4, а) определяется:

$$M_{дин} = M_{эм} \mp M_{cb} = J_{\Sigma} \left(\frac{d\omega}{dt} \right)_{дон} = J_{\Sigma} \cdot \frac{2 \cdot a_{дон} \cdot i}{d_p}, \quad (2.11)$$

$$J_{\Sigma} = k_{\delta} \cdot \delta \cdot J_{\delta} + 2 \cdot z_p \cdot J_{куш} + (z_p - 1) \frac{J_{en}}{i^2} + \frac{z_p \cdot J_p}{i^2} + \frac{J_M}{i^2}, \quad (2.12)$$

- где J_{Σ} – суммарный момент инерции системы [кг·м²], приведенный к валу двигателя;
- k_{∂} – количество двигателей;
- δ – коэффициент, учитывающий через J_{∂} моменты инерции на валу двигателя (полумуфт, тормозного шкива и деталей редуктора, приведенных к валу двигателя), $\delta=1,1-1,2$;
- J_{∂} – момент инерции ротора (якоря) двигателя, кг·м²;
- $2 \cdot z_p$ – количество конусных шестерен передачи;
- $J_{кш}$ – момент инерции конусной шестерни, кг·м²;
- $(z_p - 1)$ – количество валов передачи;
- $J_{вп}$ – момент инерции вала передачи, кг·м²;
- J_p – момент инерции ролика, кг·м²;
- $J_m = m_m \cdot (d_p/2)^2$ – момент инерции металла относительно оси ролика, кг·м²;
- $a_{\partial on}$ – предельно допустимое линейное ускорение на бочке ролика, превышение которого может привести к проскальзыванию находящегося на нем металла, м/с²; это ускорение соответствует равенству инерционной силы металла $F_{ин} = m_m \cdot a_{\partial on}$ силе трения между металлом и роликами $F_{тр} = m_m \cdot g \cdot \mu_{\partial}$ и может быть определено как $a_{\partial on} = 9,81 \cdot \mu_{\partial}$, что дает для холодного металла $a_{\partial on} = 0,98 \div 1,47$ м/с², для горячего – $a_{\partial on} = 1,47 \div 2,94$ м/с².

Ускорение и замедление транспортируемого металла не должно превышать величины $a_{\partial on}$, поскольку при больших ускорениях неизбежны

пробуксовка, снижение производительности и повышенный износ роликов, а значит, избыточный перегрев двигателя и неоправданное потребление электроэнергии.

Развиваемый двигателем момент при пуске и торможении $M_{эм}$, представленный в (2.11), не должен превышать предельно допустимого значения с точки зрения допустимых ускорений на рабочем органе:

$$M_{эм} = \frac{(z_p \cdot m_p + m_m) \cdot d_{ш} \cdot \mu_{ш} \pm m_m \cdot d_p \cdot \mu_b}{2 \cdot i \cdot \eta} \pm \left[(k_\delta \cdot \delta \cdot J_\delta + 2z_p \cdot J_{кш}) \cdot i + \frac{(z_p - 1) \cdot J_{вп} + z_p \cdot J_p + J_m}{i} \right] \cdot \frac{2a_{дон}}{d_p}, \quad (2.13)$$

где «+»соответствует ускорению, а «-» замедлению движения; при этом подразумевается, что система управления обеспечивает, соответственно, равноускоренное и равнозамедленное движение. Для учета потерь в передаче при пуске выражения (2.10) и (2.13) делят, а при торможении умножают на КПД передачи $\eta = \eta_{кш} \cdot \eta_p$.

У рабочих рольгангов реверсивных станов $M_{эм}$ больше, чем момент буксования $M_{сб}$, в то время как у станинных роликов $M_{сб}$ может превышать значение $M_{эм}$, так как это определяется не только массой слитка, но и усилием, с которым зажатый в валках слиток упирается в ролик. В связи с этим для привода станинных роликов должна быть предусмотрена система управления, позволяющая получать упорные (экскаваторные) характеристики. Для большинства других видов рольгангов такие характеристики не обязательны, но их предусматривают из соображений унификации САУ. Диапазон управления скоростью рабочих рольгангов и станинных роликов обычно 10:1.

В приведенных выше расчетных выражениях фигурирует КПД ре-

дуктора η_p и его передаточное отношение. Номинальный КПД редукторов рольгангов с подшипниками качения принимают $\eta_p = 0,98 - 0,95$; с подшипниками скольжения $\eta_p = 0,96 - 0,93$, см. Приложение 2. При холостом ходе определяют $\eta_p = 0,5\eta_p$. Величина передаточного отношения редуктора в основном определяется назначением рольганга.

Исходные данные

1. Варианты кинематических схем (рис. 2.4).

2. Назначение рольганга и варианты конструктивно-технологических параметров:

Таблица 7.

Технологические данные	Усл. обоз.	Номер варианта					
		1	2	3	4	5	6
Назначение рольганга (по табл. 1)		1	2	3	4	5	6
Диаметр ролика, мм	d_p	400	400	500	500	350	350
Шаг рольганга, м	h	0,7	0,7	0,8	0,8	0,65	0,65
Число роликов	z_p	4	4	5	6	8	6
Диаметр шейки ролика, мм	$d_{ш}$	290	290	380	380	270	270
Масса ролика, т	m_p	3,2	2,68	5,54	5,92	2,1	1,9
Момент инерции ролика, т·м ²	J_p	0,12	0,1	0,35	0,37	0,06	0,5
Момент инерц. коническ. шестерни передач, кг·м ²	$J_{кш}$	1,54	1,36	3,54	3,6	1,14	1,0
Момент инерц. вала передачи, кг·м ²	$J_{вп}$	0,55	0,47	0,75	0,77	0,22	0,2
Масса слитка раската, т	m_m	17	12	14	22	16	2,8
Длина слитка раската, м	L_m	7	5	6	8	12	6
Скорость перемещения слитка раската, м/с	$V_{рм}$	3,2	2,2	3,9	4,1	2,0	3,6

3. Вариант группового или индивидуального привода требует обоснования.

Тема 4. Электрификация нажимного устройства прокатного стана

Работу нажимного устройства поясняет рис. 2.5. Его назначение - изменять расстояние между валками стана для получения требуемого обжатия прокатываемого металла. Обычно перемещается верхний валок, а нижний остается неподвижным. Двигатели 1 через зубчатую передачу 2, 3, 5 приводят во вращение нажимные винты 6, проходящие через неподвижно закрепленные на станине гайки 7. Соединительная шестерня 4 служит для синхронизации нажимных винтов; при выводе ее из зацепления правый и левый винты могут работать независимо. В соответствии с направлением вращения двигателей нажимные винты опускаются или поднимаются, перемещая верхний валок 9. Подушки 8 валка 9 прижимаются к нажимным винтам 6 при помощи грузового уравнивающего устройства 10. Таким образом устраняют люфт в паре "винт - гайка" и предотвращают удар при захвате металла валками. Работа нажимных устройств обжимных станов (слябингов, блюмингов) в сравнении с толсто- и среднелистовыми, сортовыми и различными тонколистовыми станами горячей и холодной прокатки отличается значительным перемещением валка (до 2000 мм), высокими скоростями перемещения валка V_g , мм/с:

блюминги 1100 - 1300.....	$V_g = 80 - 250$;	Быстроходные приводы с
блюминги 1150	$V_g = 50 - 120$;	зубчатым редуктором,
блюминги 800 - 900.....	$V_g = 40 - 80$.	<i>i</i> порядка 4,5.

средне- и толстолистовые.....	$V_g = 5 - 25$;	Тихоходные приводы с
станы сортовые.....	$V_g = 2 - 5$;	двумя парами червячных
станы тонколистовые горячей		передач,
и холодной прокатки.....	$V_g = 0,01 - 0,2$.	<i>i</i> порядка 1200,

при большом числе включений в час (1600-2000 по сравнению с 150-200 для сортовых), что соответствует поворотнo-кратковременным режимам нагрузки с $PВ = 50 - 60\%$.

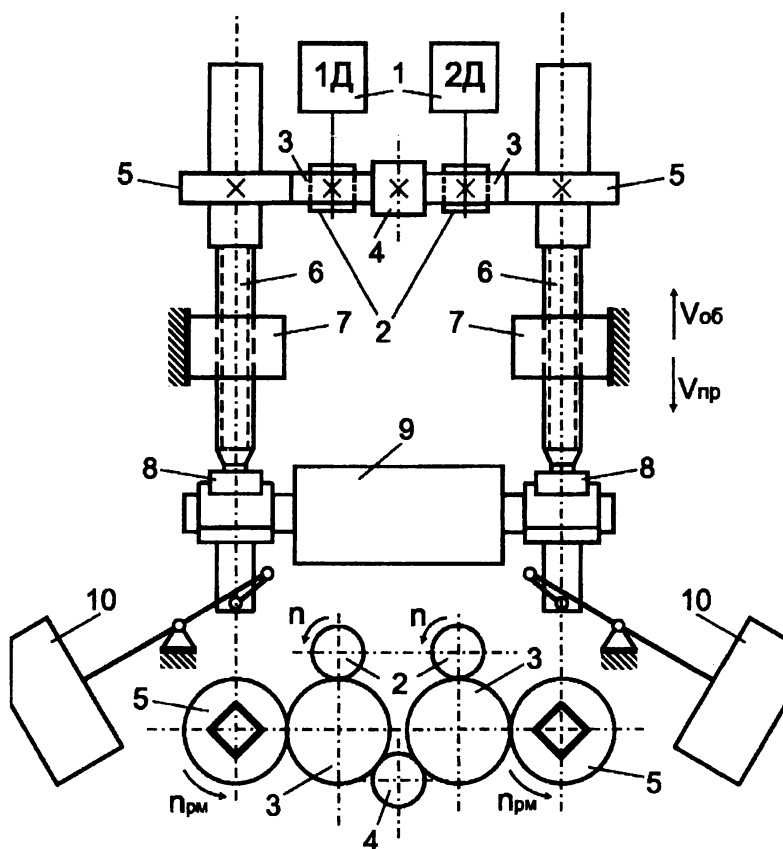


Рис. 2.5

Частота включений нажимного устройства всецело определяется числом пропусков заготовки через валки в соответствии с заданной технологией обжатия. Электропривод нажимного устройства работает между пропусками металла через валки, т.е. во время паузы работы стана, которое

минимально для обеспечения требуемой производительности: при отсутствии кантовки металла для работы нажимного устройства обжимного стана отводится 1,1-2,0 с, в случае кантовки - 3,5-5,0 с. Во время паузы между подачей слитков (заготовок) нажимное устройство должно обеспечить подъем вала в исходное верхнее положение, на что отводится 5 - 6 с. При высоких требованиях к скорости перемещения вала и точности останки для обеспечения заданного технологией раствора валков при обжатии велика вероятность работы на упор.

Расчетные выражения

Момент статического сопротивления при грузовом или гидравлическом уравнивании [Н·м], приведенный к валу двигателя:

$$M_c = 1,1(M_{mv} + M_{mn}) \cdot \frac{1}{i \cdot \eta}, \quad (2.14)$$

где 1,1 – коэффициент, учитывающий трение подушек о направляющие и трение в опорных подшипниках;

η – полный КПД передачи;

i – передаточное отношение редуктора;

M_{mv} – момент трения в винтовой части, Н·м;

M_{mn} – момент трения в опорной части пяты, Н·м.

Момент трения в винтовой части:

$$M_{mv} = [F_y - (m_{вл} - 2m_{эм}) \cdot g] \cdot \frac{d_{эм}}{2} \cdot \operatorname{tg}(\phi \pm \alpha), \quad (2.15)$$

где $F_y = (1,2 \div 1,4)(m_{вл} + 2m_{эм}) \cdot g$ – усилие, действующее на нажимные винты, Н; при грузовом или гидравлическом уравнивании его выбирают на 20 - 40 % больше веса уравниваемых деталей;

$m_{вл}$ – масса валка с подушками, опорными стаканами и другими деталями, кг;

$m_{вт}$ – масса нажимного винта, кг;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение тяготения;

$d_{вт}$ – средний диаметр резьбы нажимного винта, м;

ϕ – угол трения в резьбе винта, характеризующий материалы пары "винт-гайка"; при трении стали по бронзе $\phi = 5^\circ 40''$, что соответствует коэффициенту трения в резьбе винтовой пары названных материалов $\mu_m = \text{tg } \phi = 0,099$;

α – угол наклона линии резьбы нажимного винта; лежит в пределах $0^\circ 50'' - 5^\circ 45''$, что соответствует $\text{tg } \alpha = \frac{h}{\pi \cdot d_{вт}} = 0,015 \div 0,1$; $\alpha = \text{arctg}(h/\pi \cdot d_{вт})$; h – шаг винта, м;

$\text{tg}(\phi \pm \alpha) = \frac{\text{tg}\phi \pm \text{tg}\alpha}{1 \pm \text{tg}\phi \cdot \text{tg}\alpha}$ – результирующий коэффициент, учитывающий трение в резьбовом соединении материалов пары "винт-гайка" и влияние угла наклона резьбовой линии винта на величину усилия статического противодействия движению; знак "+" используют при опускании валка, а знак "-" – при подъеме валка. (2.17)

Момент трения в опорной части пяты:

$$M_{нт} = (F_y - m_{вл} \cdot g) \cdot \frac{d_n}{3} \cdot \mu_n, \quad (2.18)$$

где d_n – диаметр пяты, м;

μ_n – коэффициент поверхностного трения между стальной пятой нажимного винта и чугунной подушкой валка, $\mu_n = 0,12 - 0,18$.

Исходные данные

1. Кинематическая схема (рис. 2.5).
2. Варианты конструктивно-технологических параметров:

Таблица 8.


Технологические данные	Усл. обозн.	Номер варианта						
		1	2	3	4	5	6	7
Нажимное устройство стана		1300	1150	1150	1100	900	900	800
Масса валка, т	$m_{вл}$	146	132	132	128	112	112	104
Масса винта, т	$m_{вт}$	5,4	4,6	4,6	4,2	3,8	3,8	3,6
Средний диаметр резьбы нажимного винта, мм	d_m	612	552	552	528	484	484	456
Диаметр пяты нажимного винта, мм	d_n	646	620	620	600	520	520	480
Шаг винта, мм	h	50	48	48	44	38	38	32

График работы нажимного устройства определяется из конкретной программы технологии обжатия слитка в процессе прокатки.

Варианты программ прокатки:

а) Слиток массой 8 т, размером 920 x 665 x 2200 прокатывается в сляб 140 x 500 x 15038; сталь 45; температура 1200 - 1136°C.

Таблица 9.

Пропуск	Высота, мм	Ширина, мм	Пауза стана, с	Работа стана, с
I	II	III	IV	V
0	920	665	4,94	—
1	780	670	1,41	0,72
2	690	680	3,5	0,83
Кантовка				

Перенос табл. 9.

Продолжение табл. 9.

I	II	III	IV	V
3	560	705	1,34	0,82
4	480	720	1,34	1,12
5	400	735	1,34	1,25
6	330	750	3,5	1,23
Кантовка	✕			
7	675	340	1,31	1,43
8	600	350	1,31	1,86
9	525	365	1,31	1,97
10	450	380	3,5	1,8
Кантовка	✕			
11	310	460	1,14	1,98
12	260	470	1,14	2,35
13	210	480	1,07	2,67
14	170	490	1,0	3,08
15	140	500	-	3,19

Цикл прокатки 55,5 с.

б) Слиток массой 8 т, размером 920 x 665 x 2200 прокатывается в блоом 250 x 250 x 16842; сталь X18H9Г; температура 1180 -1091°С.

Таблица 10.

Пропуск	Высота, мм	Ширина, мм	Пауза стана, с	Работа стана, с
I	II	III	IV	V
0	920	665	5,55	-
1	810	670	1,41	0,72
2	720	680	3,5	0,83
Кантовка	✕			
3	610	725	1,21	0,9
4	550	730	1,21	1,12
5	490	740	1,21	1,25
6	430	750	3,5	1,23
Кантовка	✕			

Перенос табл. 10.

Продолжение табл. 10.

I	II	III	IV	V
7	670	440	1,34	1,68
8	590	450	1,27	1,85
9	520	465	1,27	2,18
10	450	480	3,50	2,31
Кантовка	..... X			
11	410	465	1,27	2,55
12	340	480	3,5	2,62
Кантовка	..... X			
13	360	365	1,58	2,98
14	245	390	3,5	3,39
Кантовка	..... X			
15	300	265	1,27	4,25
16	230	290	3,5	4,63
Кантовка	..... X			
17	250	250	-	4,7

Цикл прокатки 93,9 с.

в) Слиток массой 8 т, размером 920 х 665 х 2200 прокатывается в блюм 250 х 250 х 16842; сталь X18H9Г; температура 1200 -1092°С.

Таблица 11.

Пропуск	Высота, мм	Ширина, мм	Пауза стана, с	Работа стана, с
I	II	III	IV	V
0	920	665	5,84	-
1	860	670	1,14	0,75
2	810	675	1,14	0,92
3	760	680	1,14	0,92
4	710	685	3,50	0,78
Кантовка	..... X			
5	630	720	1,07	0,79
6	590	730	1,07	1,02
7	550	740	1,07	1,06

Перенос табл. 11.




Продолжение табл. 11.

I	II	III	IV	V
8	510	750	1,07	1,11
9	470	755	1,07	1,16
10	430	760	3,5	1,04
Кантовка	..... X			
11	705	440	1,17	1,24
12	650	450	1,14	1,53
13	600	460	1,14	1,58
14	550	470	1,14	1,65
15	500	475	1,14	1,75
16	450	480	3,50	1,63
Кантовка	..... X			
17	410	465	1,27	1,93
18	340	480	3,5	2,12
Кантовка	..... X			
19	410	355	1,27	2,31
20	340	370	3,5	2,55
Кантовка	..... X			
21	300	360	1,21	2,98
	230			
22	240	380	3,5	3,39
Кантовка	..... X			
23	300	260	1,21	4,12
24	240	280	3,5	4,62
25	250	250	-	4,7

Цикл прокатки 154,5 с.

г) Слиток массой 4,5 т, размером 650 х 650 х 2000 прокатывается в блоом 305 х 305 х 6365; сталь 45; температура 1200 -1136°С.


Таблица 12.

Пропуск	Высота, мм	Ширина, мм	Пауза стана, с	Работа стана, с
0	650	650	3,0	-
1	590	655	1,14	0,70
2	540	660	1,14	0,86
3	490	665	1,14	0,86
4	440	675	3,5	0,79
Кантовка	..........		
5	600	450	1,24	0,9
6	535	460	1,24	1,18
7	470	470	1,24	1,27
8	405	480	3,5	1,14
Кантовка	..........		
9	410	420	1,27	1,35
10	340	440	3,5	1,37
Кантовка	..........		
11	360	355	1,31	1,62
12	285	370	3,5	1,69
13	305	305	-	1,61

Цикл прокатки 42 с.

д) Слиток массой 4,5 т, размером 650 х 650 х 2000 прокатывается в блюм 205 х 205 х 14069; сталь ШХ-15; температура 1180 – 1136 °С.

Таблица 13.

Пропуск	Высота, мм	Ширина, мм	Пауза стана, с	Работа стана, с
I	II	III	IV	V
0	650	650	3,0	-
1	590	655	1,14	0,7
2	540	660	1,14	0,86
3	490	655	1,14	0,86
4	440	675	3,5	0,79
Кантовка	..........		
5	600	450	1,14	0,9
6	550	460	1,14	1,13
7	500	470	1,21	1,19

Перенос табл. 13.

Продолжение табл. 13.

I	II	III	IV	V
8	440	4S0	3,50	1,07
Кантовка	✕			
9	410	460	1,27	1,21
10	340	480	3,5	1,5
Кантовка	✕			
11	410	355	1,27	1,68
12	340	370	3,5	1,78
13	300	360	3,5	1,97
14	240	380	3,5	2,17
15	300	260	1,27	2,44
16	230	280	3,5	2,38
Кантовка	✕			
17	230	245	1,11	2,71
18	185	260	3,5	3,27
19	205	205	-	3,27

Цикл прокатки 72,4 с.

3. Вариант привода - двухдвигательный.

Тема 5. Электрификация сталкивателя блюмов

Процесс работы сталкивателя поясняет рис. 2.6. Сталкиватель расположен в хвостовой части технологической линии обжимного стана (блюминга 1500). На блюминге путем обжатия слитков, полученных из сталеплавильного цеха, производят блюмы - заготовки квадратного сечения от 200 x 200 до 300 x 300 мм, представляющие собой полуфабрикат для дальнейшей пластической переработки в сортовой металл. Прокатанная заготовка от блюминга подается рольгангами к ножницам для обрезки концов и порезки на мерные длины. Полученные таким образом блюмы взвешиваются на весах, рольгангами транспортируются в хвостовую часть стана и сталкиваются с рольганга сталкивателем на конвейер, которым далее

транспортируются либо на склад заготовок, либо на линию прокатки заготовочного стана для получения заготовок меньшего сечения.

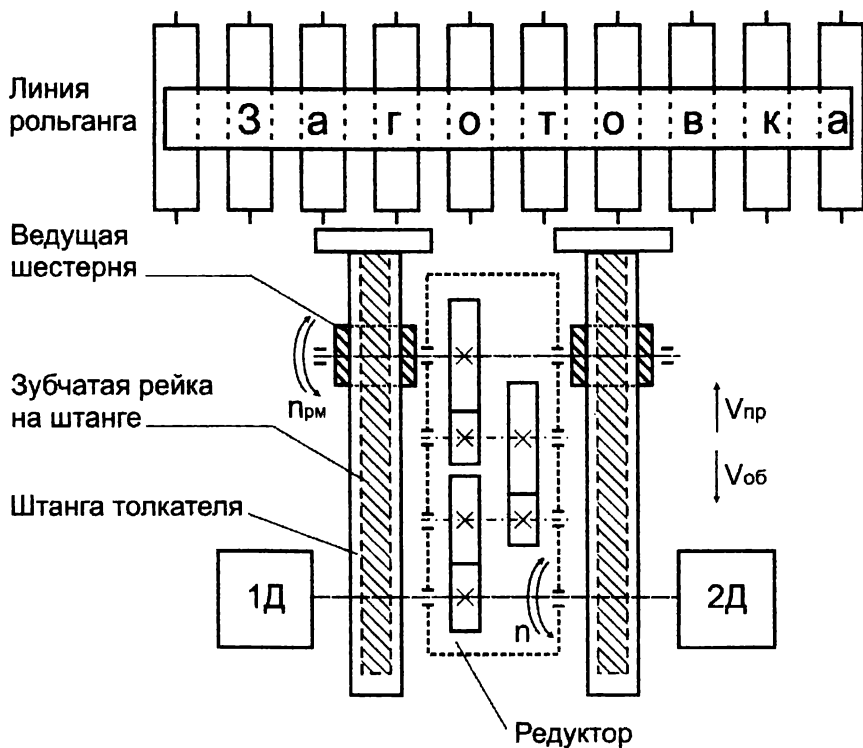


Рис. 2.6

Рабочим органом сталквателя являются штанги, которые перемещаются в направляющих по роликам. Интенсивность работы сталквателя всецело задается производительностью блюминга и работой ножниц при порезе раската на мерные длины блюмов.

Расчетные выражения

Момент статического сопротивления движению сталквателя M_c определяется суммой моментов трения штанг о ролики $M_{ми}$ и металла за-

готовки о рольганг M_{mm} . Величину статического момента при толкании заготовки [Н·м], приведенного к валу двигателя, можно вычислить как произведение тягового усилия F_m на радиус приведения, равный радиусу сцепления ведущих шестерен с рейками штанг толкателя, с учетом передаточного отношения редуктора i и его КПД η ,

$$M_c = M_{mш} + M_{mm} = F_m \cdot \frac{d_{ш}}{2} / i \cdot \eta, \quad (2.19)$$

где F_m – полное тяговое усилие, $F_m = (2 \cdot m_{ш} \cdot \mu_p + m_m \cdot \mu_m) \cdot g$, Н;

$m_{ш}$ – масса штанги сталкивателя, кг;

2 – количество штанг;

m_m – масса сталкиваемой заготовки, кг;

g – ускорение тяготения, $g = 9,81$ м/с²;

μ_p – коэффициент трения штанги о ролики; с учетом трения в подшипниках роликов можно принять $\mu_p = 0,06 \div 0,075$;

μ_m – коэффициент трения заготовки о рольганг, $\mu_m = 0,4 \div 0,7$;

$d_{ш}$ – диаметр сцепления шестерни с рейкой, м.

По существу $M_{mш}$ является статическим моментом при холостом ходе сталкивателя, когда $M_{mш} = 0$.

При заданной линейной скорости движения штанги $V_{рм}$ [м/мин] передаточное отношение редуктора может быть вычислено как

$$i = \frac{\pi \cdot d_{ш} \cdot n}{V_{рм}}, \quad (2.20)$$

где n – частота вращения двигателя, об/мин.

Суммарный момент инерции системы [кг·м²], приведенный к валу двигателя:

$$J_{\Sigma} = k_{\delta} \cdot \delta \cdot J_{\delta} + 2 \frac{J_{ш}}{i^2} + \frac{(2m_{ш} + m_{м}) \cdot V_{рм}^2}{4\pi^2 \cdot n^2}, \quad (2.21)$$

где δ – коэффициент, учитывающий момент инерции деталей на валу двигателя и элементов редуктора, приведенных к валу двигателя, $\delta = 1,1 \div 1,2$;

k_{δ} – количество двигателей;

J_{δ} – момент инерции двигателя сталкивателя, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

$J_{ш}$ – момент инерции приводной шестерни сталкивателя, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

$m_{ш}$ – масса штанги сталкивателя, кг ;

$m_{м}$ – масса заготовки проката, кг .

Исходные данные

1. Кинематическая схема (рис. 2.6 и 2.7).

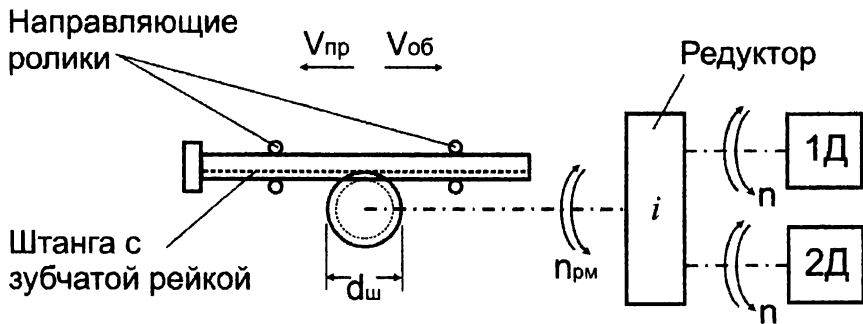


Рис. 2.7

2. Варианты конструктивно-технологических параметров:

Таблица 14.

Технологические данные	Усл. обозн.	Номер варианта						
		1	2	3	4	5	6	7
Масса заготовки, т	m_m	3	2,7	2,4	2,1	1,8	1,6	1,5
Масса штанги, т	$m_{ш}$	1,2	1,2	1,1	1,1	1,0	0,9	0,9
Путь подхода штанги к заготовке, м	S_n	1,5	1,4	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0
Путь толкания, м	S_m	4,5	4,2	4,8	4,2	4,5	4,6	4,3
Скорость прямого хода, м/мин	$V_{пр}$	22	26	24	28	30	32	36
Скорость обратного хода, м/мин	$V_{об}$	48	58	54	52	64	62	72
Диаметр ведущей шестерни, м	$d_{ш}$	0,42	0,48	0,5	0,46	0,52	0,5	0,44
Момент инерции ведущей шестерни, кг·м ²	$J_{ш}$	4,8	5,6	7,2	5,2	7,6	7,2	5,1
Число циклов в час	z	52	56	63	66	68	70	72
Продолжительность включения, %	$ПВ$	48	46	52	38	42	44	34

Скорость подхода штанги к заготовке принимается $0,5 V_{рм}$. В цикл входит поочередное сталкивание трех заготовок и пауза.

3. Варианты привода:

- а - однодвигательный с однозонным управлением;
- б - двухдвигательный с однозонным управлением;
- в - однодвигательный с двухзонным управлением;
- г - двухдвигательный с двухзонным управлением.

Тема 6. Электрификация реечного толкателя методической печи

Печные толкатели предназначены для загрузки заготовок в методическую печь, для дальнейшего проталкивания по поду печи по мере их нагрева до необходимой температуры прокатки и для выдачи на рольганг (после печи), которым они передаются на зачистку от окалины и на приемный рольганг сортопрокатного стана. В соответствии с требуемым временем нагрева заготовок и производительностью стана осуществляется предварительная загрузка (садка) печи. Например, загружают пакет из 10 заготовок и проталкивают его при загрузке следующего пакета и т.д., в результате полная садка печи может содержать 100 заготовок. По достижении необходимой температуры нагрева заготовки по одной штуке выдаются толкателем на стан, который и производит конкретный сортament проката (изделия - рельс, балка определенного профиля и т.п.). Выдача заготовки на стан осуществляется подачей в печь новой заготовки для нагрева и проталкиванием всей садки на ширину заготовки (рис. 2.8). Скорость при толкании небольшая, порядка $0,1 \div 0,3$ м/с, а вывод штанги толкателя из печи необходимо производить возможно быстрее, чтобы избежать ее перегрева и потерь тепла печью при открытом затворе.

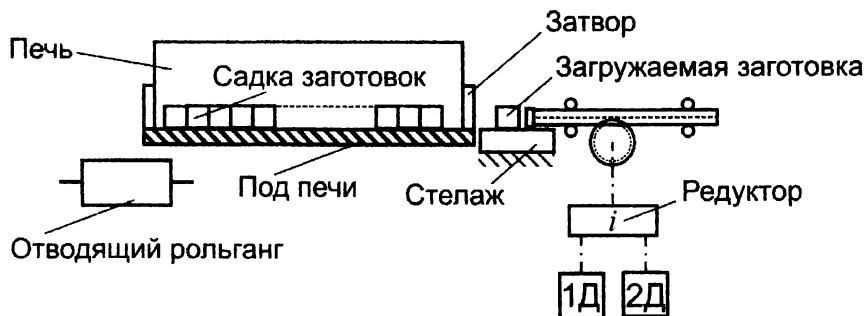


Рис. 2.8

Штанги толкателя с зубчатыми рейками.

Принцип работы сдвоенного реечного толкателя поясняет рис. 2.8 и рис. 2.9. Его рабочим органом являются штанги с зубчатыми рейками, ко-

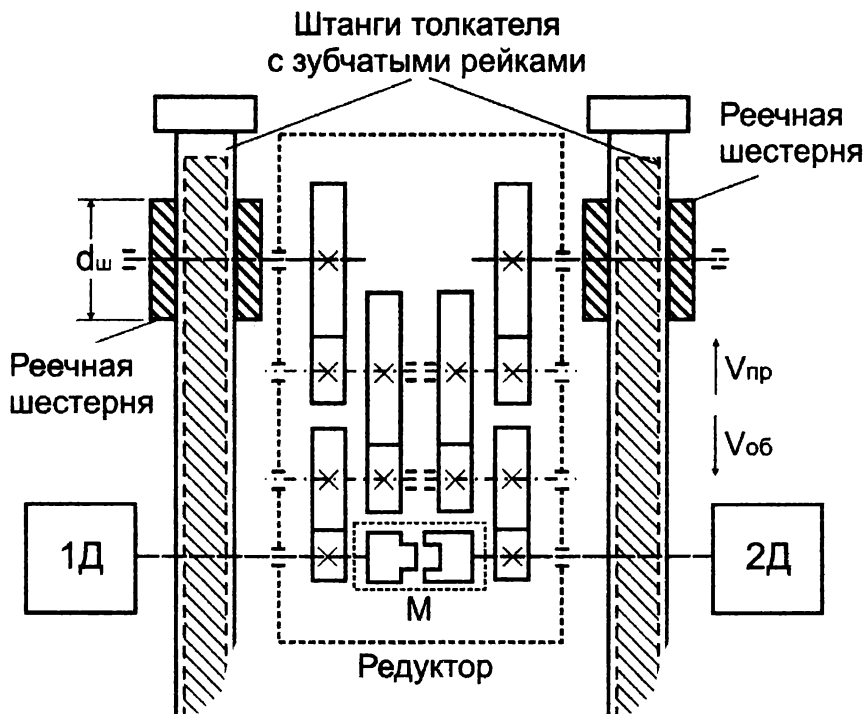


Рис. 2.9

торые приводятся в движение через зубчатые шестерни и редуктор с большим передаточным отношением одним или двумя двигателями. Обычно предусматривают возможность установки двигателя на одну штангу и тем самым каждая штанга толкателя может включаться в работу отдельно, проталкивая свой ряд садки. При работе их в паре толкания длинных заготовок требуется предусматривать в схеме управления автоматическое выравнивание нагрузки. Для механической синхронизации в конструкции предусмотрена муфта с пневмоприводом M , соединяющая валы двигателей; при

ее включении получается единый толкатель с двумя штангами и двухдвигательным приводом. Штанги движутся по направляющим роликам с подшипниками качения.

Расчетные выражения

Для последующего определения мощности двигателя нет необходимости учитывать статические нагрузки при загрузке печи пакетами заготовок, поскольку они явно меньше в сравнении с нагрузкой толкателя в процессе работы стана, характеризующейся значительной частотой включений в час.

Момент статического сопротивления движению при холостом ходе, приведенный к валу двигателя, определяется как

$$M_{xx} = m_{ш} \cdot g \cdot \left(\frac{d_{ш}}{2} \cdot \mu_{ц} + \mu_{р} \right) \cdot \frac{1}{i \cdot \eta_{xx}}, \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (2.22)$$

где $m_{ш}$ – масса одной штанги толкателя, кг;

$d_{ш}$ – диаметр начальной окружности реечной шестерни, м;

$\mu_{ц}$ – коэффициент трения в подшипниках качения осей цапф направляющих роликов, $\mu_{ц} = 0,003 - 0,005$;

$\mu_{р}$ – коэффициент трения качения штанги о направляющие ролики, $\mu_{р} = 0,0015 - 0,002$;

i – передаточное отношение редуктора, $i \approx 130$; может уточняться при выборе двигателя;

η_{xx} – КПД передачи при холостом ходе, определяется как произведение КПД всех пар соединений в кинематической цепи механизма и редуктора, которые принимаются равными половине номинальных значений (см. Приложение 1);

g – ускорение тяготения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Статический момент при толкании заготовок, приведенный к валу двигателя, определяется как

$$M_c = [m_{ш} \cdot \frac{d_{ш}}{2} \cdot (\mu_y + \mu_p) + N_3 \cdot m_m \cdot \mu_m \cdot \frac{d_{ш}}{2}] \cdot \frac{g}{i \cdot \eta_N}, \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.23)$$

где N_3 – число проталкиваемых заготовок;

η_N – номинальный КПД передачи, также определяется как произведение КПД всех пар соединений в кинематической цепи системы;

m_m – масса одной заготовки, кг; рассчитывается через объем заготовки $[\text{м}^3]$ и плотность стали $7,86 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$:

$$m_m = 7,86 \cdot 10^3 \cdot h \cdot s \cdot L,$$

(h – высота, м, s – ширина, м; L – длина, м);

μ_m – коэффициент трения при проталкивании заготовки по поверхности:

- стеллажа 0,2 - 0,5 - при чугунных направляющих;
- 0,4 - 0,7 - при стальных направляющих;
- по керамике кладки пода печи 0,6 - 1,0;
- глиссажных труб пода печи 0,3.

Суммарный момент инерции при работе одной штанги $[\text{кг} \cdot \text{м}^2]$, приведенный к валу двигателя:

$$\begin{aligned} J_{\Sigma} &= \delta \cdot J_{\partial} + \frac{J_{ш}}{i^2} + (m_{ш} + N_3 \cdot m_m) \cdot \frac{V_{np}^2}{\omega^2} = \\ &= \delta \cdot J_{\partial} + \frac{J_{ш}}{i^2} + (m_{ш} + N_3 \cdot m_m) \cdot \frac{d_{ш}^2}{4 \cdot i^2} \end{aligned} \quad (2.24)$$

где δ – коэффициент, учитывающий через J_{∂} моменты инерции де-

талей на валу двигателя и элементов редуктора, приведенные к валу двигателя, $\delta = 1,1 \div 1,2$;

J_d – момент инерции якоря двигателя, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

$J_{ш}$ – момент инерции реечной шестерни, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

$V_{пр}$ – линейная скорость при толкании, м/с ;

ω – угловая скорость вращения двигателя, рад/с .

Исходные данные

1. Кинематическая схема (рис. 2.8 и 2.9).
2. Варианты конструктивно-технологических параметров.

Таблица 15.

Технологические данные	Усл. обозн	Номер варианта				
		1	2	3	4	5
I	II	III	IV	V	VI	VII
Масса одной штанги толкателя, т	$m_{ш}$	7,2	7,6	7,9	8,6	9,4
Диаметр реечной шестеренки толкателя, м	$d_{ш}$	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6
Момент инерции реечной шестерни относительно ее оси $\text{кг} \cdot \text{м}^2$	$J_{ш}$	4,72	5,3	7,46	9,22	10,8
Диаметр цапф направляющих роликов, м	$d_{ц}$	0,15	0,17	0,19	0,2	0,22
Размер заготовки, мм:						
высота h		182	200	240	260	300
ширина s		182	200	240	260	300
длина l		2500	2200	3600	5000	4000
Путь подхода штанги к заготовке, м	S_n	1,4	1,45	1,5	1,55	1,6
Путь толкания заготовки до садки печи, м	S_m	1,2	1,25	1,35	1,4	1,4

Перенос табл. 15.

Продолжение табл. 15.

I	II	III	IV	V	VI	VII
Количество штук в одном ряду садки печи	N_3	50	40	35	25	30
Скорость толкания одной заготовки, м/с	V_3	0,67	0,6	0,5	0,54	0,5
Скорость проталкивания садки, м/с	$V_{пр}$	0,3	0,25	0,2	0,15	0,1
Скорость обратного хода штанги, м/с	$V_{об}$	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8
Число включений в час	z	40	38	35	34	32
Продолжительность включения, %	$ПВ$	18	16	13	12	10

3. Варианты привода с одним двигателем на штангу:

- а - с однозонным управлением скоростью;
- б - с двухзонным управлением скоростью.

Тема 7. Электрификация цепного транспортера (шлеппера)

Цепной транспортер (шлеппер) предназначен для перемещения готового сортового проката (рельсы, балки и т.п.) с рольганга на стеллаж охлаждения, откуда изделия переносят краном на склад готовой продукции. Работу шлеппера поясняет рис. 2.10.

Шлеппер состоит из параллельных цепей 1 между ведущими 2 и ведомыми 3 валами со звездочками колес сцепления. На цепях закреплены опрокидывающиеся упоры 4 для захвата транспортируемого металла 5. Между ведущим валом и двигателем имеется понижающий редуктор.

Исходное положение шлеппера соответствует установке упоров между линией рольганга и ведомого вала 3. При наличии металла 5 на остановленном рольганге транспортер приводится в движение и, захватив упо-

рами 4 изделие, перемещает его по направляющим (на рис. 2.10 не показаны) на стеллаж, затем реверсируется и возвращается в исходное положение)

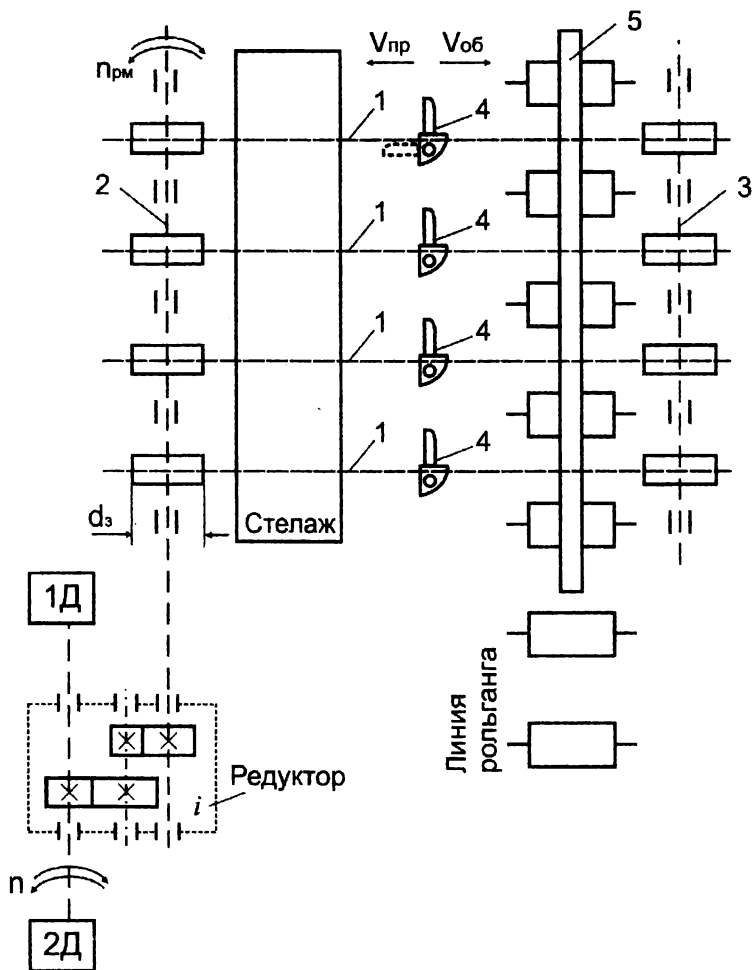


Рис. 2.10

ние. Если при этом на рольганге появилось новое изделие, то упоры при соприкосновении с ним опрокидываются и проходят под изделием, затем пружинным приводом возвращаются в рабочее положение. Интенсивность

включений шлеппера определяется производительностью сортового прокатного стана, характеризуется числом циклов в час $z = 56 \div 72$ и продолжительностью включения $ПВ = 32 \div 50\%$. Рабочая скорость цепного транспортера $V_{np} = 0,9 + 1,5$ м/с зависит от сортамента изделий.

Расчетные выражения

Момент статического сопротивления движению шлеппера определяется суммой моментов трения в подшипниках ведущего и ведомого валов M_{xx} и перемещаемого изделия о направляющие $M_{тм}$. Будучи приведенным к валу двигателя, M_c запишется:

$$M_c = (M_{xx} + M_{тм}) \cdot \frac{1}{\eta_{цп} \cdot \eta_p \cdot i}, \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (2.25)$$

где $\eta_{цп}$ – КПД цепной передачи;

η_p – КПД редуктора;

$i = \frac{\pi \cdot d_3 \cdot n}{V_{рм}}$ – передаточное отношение редуктора, (n – частота вращения двигателя, об/мин, $V_{рм}$ – линейная скорость, м/мин).

Момент трения в подшипниках ведущего и ведомого валов (назовем его моментом холостого хода шлеппера) относительно оси ведущего вала определяется:

$$M_{xx} = m_{ш} \cdot g \cdot \mu_y \cdot \frac{d_y}{2}, \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (2.26)$$

где $m_{ш}$ – масса всех деталей и узлов конструкции шлеппера, опирающихся на подшипники, кг;

d_y – диаметр цапф валов, м;

μ_y – коэффициент трения (в подшипниках скольжения с бронзовыми вкладышами $\mu_y = 0,06 \div 0,08$; в подшипниках качения

$$\mu_y = 0,005 \div 0,007);$$

g – ускорение тяготения, $g = 9,81$ м/с.

Момент трения перемещаемого изделия о направляющие [Н·м] относительно оси ведущего вала шлеппера:

$$M_{mm} = m_m \cdot g \cdot \mu_m \cdot \frac{d_3}{2}, \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (2.27)$$

где m_m – масса всех деталей и узлов конструкции шлеппера, опирающихся на подшипники, кг;

d_3 – диаметр цапф валов, м;

μ_m – коэффициент трения металла о направляющие (по чугунным 0,2 ÷ 0,5; по стальным 0,4 ÷ 0,7);

g – ускорение тяготения, $g = 9,81$ м/с.

В соответствии с технологией обратное движение происходит на холостом ходу, т.е. $M_{mm} = 0$. Для увеличения производительности скорость обратного движения принимают повышенной в сравнении с рабочим ходом.

Суммарный момент инерции, приведенный к валу двигателя определяется:

$$J_{\Sigma} = k_{\delta} \cdot \delta \cdot J_{\delta} + \frac{J_{ш}}{i^2} + \frac{m_m \cdot V_{np}^2}{\omega^2} = k_{\delta} \cdot \delta \cdot J_{\delta} + \frac{J_{ш}}{i^2} + \frac{m_m \cdot d_3^2}{4 \cdot i^2}, \text{ кг}\cdot\text{м}^2, \quad (2.28)$$

где δ – коэффициент, учитывающий через J_{δ} моменты инерции деталей на валу двигателя и элементов редуктора, приведенные к валу ЭД, $\delta = 1,1 \div 1,2$;

k_{δ} – количество двигателей электропривода;

J_{δ} – момент инерции якоря ЭД, кг·м²;

$J_{ш}$ – момент инерции шлепера относительно оси ведущего вала, кг · м²;

$V_{рм}$ – линейная скорость движения шлепера, м/с;

ω – угловая скорость вращения ЭД, рад/с.

Исходные данные

1. Кинематическая схема (рис. 2.10).

2. Варианты конструктивно-технологических параметров:

Таблица 16.

Технологические данные	Усл. обозн.	Номер варианта					
		1	2	3	4	5	6
Масса деталей и узлов подвижной конструкции шлепера, т	$m_{ш}$	2	2,4	2,7	3	3,2	3,6
Диаметр цапф, м	$d_{ц}$	0,1	0,12	0,14	0,16	0,16	0,18
Диаметр зацеплений звездочек, м	$d_з$	0,4	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6
Момент инерции шлепера относительно оси ведущего вала, кг · м ²	$J_{ш}$	2,2	2,5	2,6	2,8	2,8	3
Рабочий путь шлепера, м	S	6,4	7	6,2	7,6	6,8	10,5
Рабочая скорость, м/с	$V_{рм}$	1,2	1,0	1,4	1,5	1,1	0,95
Масса проката, т	$m_{м}$	0,3	0,45	0,6	0,68	0,8	1,1

3. Вариант привода:

а - однодвигательный с однозонным управлением;

б - двухдвигательный с однозонным управлением;

в - однодвигательный с двухзонным управлением;

г - двухдвигательный с двухзонным управлением.

Тема 8. Электрификация моталки стана холодной прокатки полосы

Для сматывания холодной полосы применяют барабанные моталки, которые не только наматывают (или сматывают) длинную полосу или ленту, но и одновременно сообщают ей натяжение, необходимое для устойчивого процесса прокатки, получения плотного бунта (рулона) и правильного направления полосы при выходе ее из валков и при входе ее в валки. Барабанные моталки используются на реверсивных и неревверсивных станах холодной прокатки полосы.

На реверсивных одноклетевых станах моталки устанавливают по обеим сторонам рабочей клетки стана (рис. 2.11, а). Прокатка на этих станах ведется в следующей последовательности: горячекатаная полоса (лента) в виде рулона подается к стану, рулон устанавливается на разматыватель, и с него полоса подается в валки. Заправка переднего конца полосы в валки и затем в моталку за станом производится без обжатия этих участков полосы. После зажатия конца полосы в барабане моталки за станом начинается прокатка полосы то в одну, то в другую сторону. Роль моталок при этом меняется: из ведущей (передней) моталка за станом становится ведомой, а ведомая (задняя) перед станом становится ведущей и т.д. В соответствии с технологией осуществляется необходимое число проходов в зависимости от толщины ленты, ее обжатия и степени наклепа. После этого рулон направляется на отжиг для снятия наклепа. Недостатком реверсивного процесса холодной прокатки рулонов является то, что концы полосы оказываются непрокатанными: они идут в отход, либо их отдельно докатывают.

На неревверсивных, обычно многоклетевых, непрерывных станах имеется только одна передняя моталка, а на входной стороне станов уста-

новлены разматыватели и проводковые столы, создающие небольшое заднее натяжение (рис. 2.11, б)

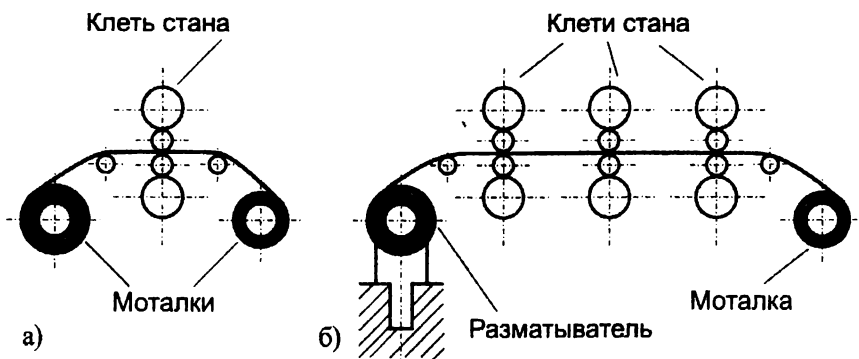


Рис. 2.11

Так как рулон полосы после прокатки снимается с моталки, то ее конструкция, как правило, консольная. На широкополосных станах моталки выполняются со второй отводной опорой, чтобы избежать ненужных деформаций конструкции.

Холодная прокатка полосы в рулонах осуществляется при постоянной скорости движения металла в валках от 8 до 20 м/с на реверсивных станах и до 45 м/с - на многоклетевых в зависимости от числа клетей, при неизменном натяжении полосы при входе ее в валки и выходе из валков. Поскольку окружные скорости сматывания полосы с одной моталки и наматывания на другую постоянны, а диаметр рулона на одной моталке непрерывно уменьшается, а на другой увеличивается, то скорости вращения двигателей должны непрерывно изменяться: на подающей - увеличиваться, а на приемной - уменьшаться. Вместе с тем натяжение полосы на входе и на выходе должно оставаться постоянным.

Электропривод должен обеспечить плавное управление скоростью вращения барабана моталки в диапазоне порядка 1:35. Каждая моталка

приводится в движение индивидуальным, обычно безредукторным, электроприводом. В процессе прокатки полосы задняя моталка создает тормозящее действие при входе полосы в валки, чем обеспечивается заднее натяжение.

Периоды разгона и остановки стана, а значит, и моталок должны быть минимальными с сохранением постоянства натяжения полосы (ленты) как между отдельными клетями стана, так и между станом и моталками. Отклонение натяжения не должно превышать 3 - 4 % во всех режимах работы стана и для всего диапазона скоростей прокатки. Должна быть обеспечена возможность толчка двигателя клетки стана совместно с двигателями моталок в направлении прокатки, а также толчка моталки при неподвижном стане независимо от направления прокатки, что необходимо при заправке полосы. При обрыве полосы скорость двигателя моталки (а в непрерывных станах и скорость двигателей клетей) должна ограничиваться определенным пределом.

Расчетные выражения

Для получения качественной полосы, т.е. равномерной толщины, процесс холодной прокатки и сматывания полосы в рулон должен быть устойчивым. Для этого требуется обеспечивать достаточное постоянное натяжение, т.е. $F_{нат} = Const$ при постоянной линейной скорости движения полосы $V_{рм}$, [м/с]. Отсюда следует, что мощность на барабане моталки при сматывании полосы в рулон также должна быть постоянной:

$$P_{нат} = F_{нат} \cdot V_{рм} = Const . \quad (2.29)$$

С другой стороны, стремятся работать с большими удельными натяжениями полосы $\sigma_{нат}$, [Н/мм²], но из опасения возможного обрыва полосы (при наличии мелких трещин-концентраторов на ее боковых кромках) это удельное натяжение не приближают к пределу текучести материала

ла σ_s , [Н/мм²]. Это лимитирует относительную деформацию материала полосы при прокатке и сматывании (Δ):

$$\Delta = \frac{\sigma_s}{E}, \quad (2.30)$$

где E – модуль упругости, практически одинаковый для всех марок сталей, $E = 2,1 \cdot 10^5$, Н/мм²;

σ_s – предел текучести стали, $\sigma_s = 320$, Н/мм².

Поэтому сила натяжения $F_{нат}$ лимитируется в зависимости от сечения полосы:

$$F_{нат} = \sigma_{нат} \cdot b \cdot h, \quad (2.31)$$

где b – ширина полосы, мм;

h – толщина полосы, мм;

$\sigma_{нат}$ – удельное натяжение, Н/мм²; принимают:

$$\text{при } h < 1 \text{ мм} \quad \sigma_{нат} = (0,3 \div 0,8)\sigma_s;$$

$$\text{при } h > 1 \text{ мм} \quad \sigma_{нат} = (0,2 \div 0,4)\sigma_s.$$

Поскольку в процессе наматывания полосы на барабан радиус рулона увеличивается, то для обеспечения условия (2.29) момент натяжения полосы $M_{нат}$ [Н·м] должен изменяться в полном соответствии с изменением радиуса намотки R [м], а значит, и требуемым технологией изменением угловой скорости вращения барабана моталки $n_{рм}$:

$$M_{нат} = F_{нат} \cdot R = F_{нат} \cdot \frac{V_{рм}}{\omega_{рм}} = \frac{60}{2\pi} \cdot F \cdot \frac{V_{рм}}{n_{рм}}, \quad (2.32)$$

Сказанное выражает требование со стороны технологии намотки к закону управления выходными координатами электропривода.

Вместе с тем с точки зрения требуемой мощности необходимо учитывать статический момент упругопластического изгиба полосы

$M_{изг}$ [Н·м] при намотке по текущему наружному радиусу рулона. Эта нагрузка связана с деформацией изгиба полосы, когда относительно нейтральной линии ее поперечного сечения внутренний слой металла сжимается, а наружный - растягивается; это существенно при относительно большой толщине полосы. С достаточной для практики точностью этот момент определяют с запасом, учитывая предел текучести металла:

$$M_{изг} = \sigma_s \cdot W_n \cdot 10^{-3}, \quad (2.33)$$

где $W_n = \frac{b \cdot h^2}{4}$ – момент сопротивления сечения полосы пластической деформации изгиба, мм³.

Выражение суммарного статического момента приобретает следующий вид:

$$M_c = M_{нат} + M_{изг}. \quad (2.34)$$

Следует также учитывать, что в процессе сматывания полосы в рулон непрерывно изменяется запас кинетической энергии из-за непрерывного изменения массы и радиуса рулона на барабане моталки, следовательно, момент инерции на валу моталки также непрерывно изменяется:

$$J_{\Sigma} = J_{\partial} + J_{б} + m_m \cdot \frac{r_б^2 + R^2}{2}, \quad (2.35)$$

где J_{∂} – момент инерции якоря двигателя, кг·м²;

$J_{б}$ – момент инерции барабана моталки, кг·м²;

m_m – масса рулона, $m_m = \pi(R^2 - r_б^2) \cdot b \cdot \gamma$, кг;

γ – плотность стали, $\gamma = 7,86 \cdot 10^3$, кг/м³;

b – ширина полосы, м;

$r_б$ – радиус барабана, м;

R – радиус намотки полосы, м;

ρ^2 – квадрат радиуса инерции рулона, $\rho^2 = \frac{r_6^2 + R^2}{2}$, м.

Для разматывателя расчетные выражения аналогичны, а процесс протекает в обратном порядке. Как выше было отмечено, разматыватель требует от электропривода тормозной момент, обеспечивающий необходимое натяжение при разматывании рулона в полосу.

Исходные данные

1. Кинематическая схема в редукторном исполнении (рис. 2.12) с малым значением $i = 1,3 \div 2,8$ и в безредукторном (рис. 2.13).

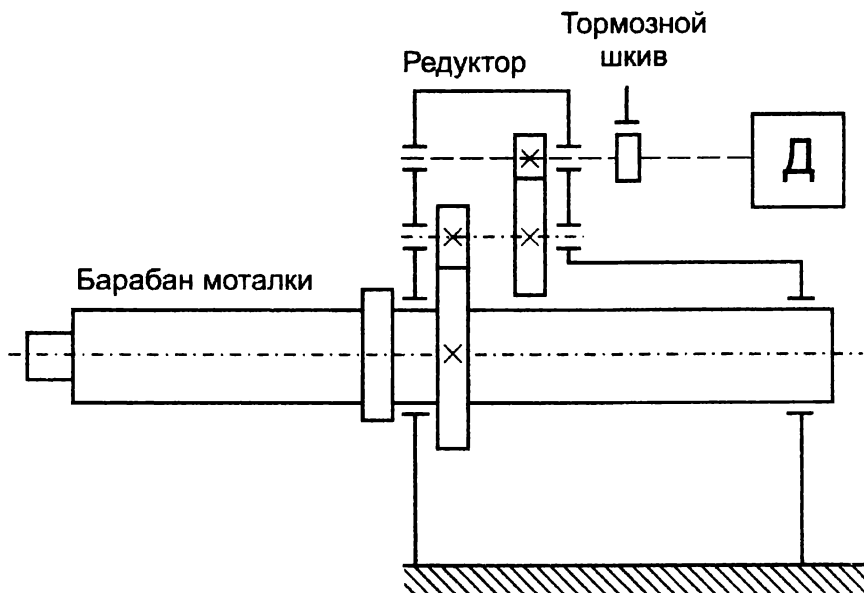


Рис. 2.12

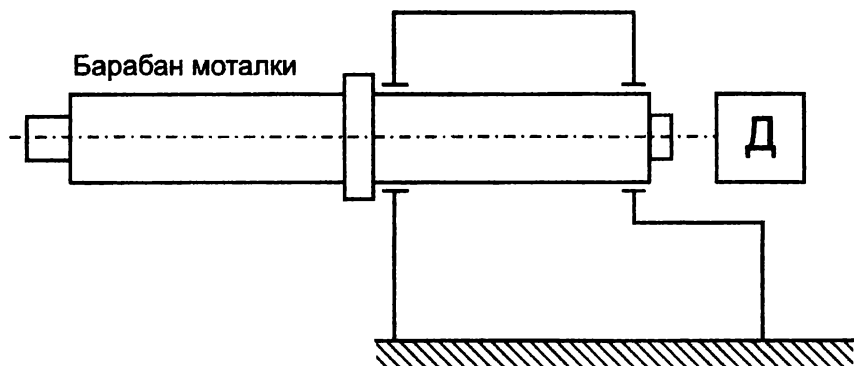


Рис. 2.13

2. Варианты конструктивно-технологических параметров:

Таблица 17.

Технологические данные	Усл. обоз.	Номер варианта					
		1	2	3	4	5	6
Диаметр барабана моталки, м	d_b	0,4	0,4	0,5	0,5	0,75	0,75
Момент инерции барабана, $\text{т}\cdot\text{м}^2$	J_b	0,9	0,9	1,2	1,2	1,8	1,8
Максимальный диаметр рулона, м	D	1,6	1,75	1,85	2,0	2,5	2,7
Толщина полосы, мм	h	0,8	0,5	2,0	1,5	1,8	3,0
Ширина полосы, мм	b	2350	1100	1850	1200	1350	1550
Скорость движения полосы, м/с	V_{pm}	21	32	25	36	45	15

Вариант процесса:

- а – сматывание рулона;
- б – разматывание рулона.

3. Вариант привода:

- а – безредукторный, (см. рис. 2.13);
- б – редукторный ($i=1,3-2,8$, см. рис. 2.12).

Раздел 3. РАЗРАБОТКА СИЛОВОЙ ЧАСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Современное высокопроизводительное оборудование механизированного производства создаётся совместными усилиями технологов, машиностроителей, специалистов по электрическим машинам, электроприводу и средствам автоматизации. Одновременно с разработкой технологии и конструктивного состава механического оборудования разрабатывается его электрическое оборудование. Тенденция таких разработок выражается в органичном совмещении исполнительного органа и его привода, что отчётливо представляет промышленная робототехника, двигатель-колесо и др.

Конструктивные и кинематические особенности исполнительного органа РМ во многом представляются типом привода, на который ориентируются при разработке механической части. Имеет место и обратное влияние: в зависимости от конструктивных решений механической части значительные изменения претерпевает электропривод. Конструктивные решения отражаются на параметрах механической и электрической цепей единой электромеханической системы. Соотношения последних сказываются не только на статических и динамических качествах, но и на потреблении электроэнергии, экономичности работы электрифицированного механизма.

Вариант наиболее подходящего типа (системы) электропривода может оказаться в значительной мере связанным с величиной требуемой мощности двигателя. При большой мощности ($10^2 \div 10^3$ и более кВт) рационально использовать электроприводы с высоковольтными ЭД; при отсутствии жестких требований к управлению скоростью естественным яв-

ляется отдавать предпочтения ЭП с двигателями переменного тока, поскольку передача электроэнергии осуществляется на трехфазном переменном токе. Это обеспечивает экономию не только на силовых элементах (трансформаторах и др.) систем электроснабжения, но и затратах на двигатели. Например, стоимость и эксплуатация при одинаковой мощности АД КЗР на порядок ниже в сравнении с ЭД постоянного тока.

Конкретные рабочие машины нуждаются в конечных значениях механической мощности, а прочностные и энергетические возможности электродвигателей ограничены определёнными габаритами, типоразмерами и номинальными данными. Например, установка двигателя завышенной мощности по сравнению с требуемой ведёт к увеличению весогабаритных показателей, капитальных затрат (в том числе на фундаменты и т.п.) и снижению энергетических показателей – КПД, коэффициента мощности установки. Последнее ухудшает эксплуатационные характеристики цеховых сетей. А установка двигателя заниженной мощности влечет недопустимое повышение потерь энергии, перегрев изоляции обмоток, что снижает срок службы электродвигателя, а значит, и надёжность электропривода. Если учесть широкое распространение электроприводов в производственных установках и на транспорте, потребляющих 2/3 всей вырабатываемой электрической энергии, становится очевидным, что правильное определение необходимой мощности двигателей электроприводов имеет огромное экономическое значение.

Практикой различных отраслевых проектных организаций механизированных производств разработаны методы подсчета статических и учета динамических нагрузок, определения необходимой величины номинальной мощности двигателя. Но, прежде всего, предварительно обосновывается ориентация на род тока, величину номинального напряжения и тип электрического привода, что позволяет подойти к разработке принци-

пиальной схемы разрабатываемого электропривода. Как известно, принципиальная схема представляет собой электрическую схему главных (силовых) цепей электропривода, а в двигателях постоянного тока и цепей возбуждения. Таким образом, в задачу разработчика ЭП входит следующее:

- определение номинальной мощности ЭД;
- выбор всех функциональных элементов главного канала в зависимости от типа ЭП: УТП, согласующего трансформатора или реактора, ПЭЭ, дросселей и резисторов;
- для ДПТ НВ - элементов цепи возбуждения, см. гл. 3.6.

3.1. ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ НОМИНАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ НАГРУЗКИ

Реальные нагрузочные диаграммы электроприводов производственных механизмов могут значительно отличаться от нагрузочных диаграмм номинальных режимов нагрузки, показанных в гл. 1.5. Поэтому задача выбора электродвигателя по мощности заключается в том, чтобы правильно сопоставить реальный рабочий режим с номинальным, которому должно соответствовать конкретное значение номинальной мощности. Таким путем будут удовлетворены требования со стороны технологии и обеспечено максимальное использование выбранного двигателя как по заложенным в его конструкцию активным материалам, так и по условиям допустимого перегрева.

В практике разработки силовой части электропривода для различных режимов нагрузки подход к определению номинальной мощности двигателей неодинаков.

3.1.1. В продолжительных режимах нагрузки S1

Это режим с неизменной или мало меняющейся нагрузкой и при отсутствии требований к управлению скоростью вращения определение номинальной мощности двигателя не представляет труда. Практически здесь вся номинальная мощность двигателя расходуется на преодоление статической нагрузки, а динамическая нагрузка на редких интервалах пуска преодолевается за счет перегрузочной способности двигателя. В таких режимах работают электроприводы вентиляторов и воздуходувок, насосов, компрессоров и т.п. Как правило, при малой и средней мощности это безредукторные электроприводы с асинхронными короткозамкнутыми двигателями, а при большой - с синхронными. Необходимая статическая мощность определяется через технологические параметры, выражающие специфику функционирования механизма; по расчетной мощности и скорости из каталога двигателей режима S1 выбирается ближайший больший двигатель, $P_{расч.} \leq P_{2N}$. Покажем это на примерах.

Для определения расчетной мощности двигателя *центробежного вентилятора* (воздуходувки) необходимо иметь следующие исходные данные:

Q_m – производительность, определяемую массой перекачиваемого газа за секунду, $\frac{кг}{с}$;

V – скорость движения газа, $\frac{м}{с}$;

S – сечение газопровода, $м^2$.

Производительность можно вычислить:

$$Q_m = \frac{m_{г}}{t} = \frac{S \cdot V \cdot \gamma_{г}}{g}, \quad (3.1)$$

где m_r – масса газа, кг;

γ_r – удельный вес газа, $\frac{\text{Н}}{\text{м}^3}$;

g – ускорение тяготения, $g = 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.

Выражение кинетической энергии [Дж] движущейся массы газа через сечение газопровода S со скоростью V :

$$W_k = \frac{m_r \cdot V^2}{2} = \frac{S \cdot V^3 \cdot \gamma_r \cdot t}{2 \cdot g}, \quad (3.2)$$

позволяет определить необходимую мощность двигателя, Вт:

$$P_d = \frac{W_k}{t \cdot \eta_g} = \frac{S \cdot V^3 \cdot \gamma_r}{2 \cdot g \cdot \eta_g} = \frac{p \cdot Q_g}{\eta_g}, \quad (3.3)$$

где η_B – КПД вентилятора (воздуходувки);

$$p = \frac{V^2 \cdot \gamma_r}{2 \cdot g} \text{ – давление, } \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}; \quad (3.4)$$

$$Q_g = S \cdot V \text{ – подача, производительность, } \frac{\text{м}^3}{\text{с}}. \quad (3.5)$$

В справочной литературе на вентиляторы, насосы и компрессоры даются рабочие характеристики, которые представляют собой зависимости напора от производительности $H = f(Q)$, где напор измеряется в метрах. Их также используют для определения мощности двигателей. Рассмотрим это на примере насоса.

В лопастных центробежных насосах при определении необходимой мощности двигателя учитывают наличие так называемого статического (геодезического) напора, конструктивные особенности магистрали и самого насоса, в результате расчетное выражение мощности получает следующий вид:

$$P_{\partial} = Q \cdot \left(H_{\Gamma} + \Delta H_{\Gamma} + \frac{P_2 - P_1}{\gamma_{жс}} \right) \cdot \frac{\gamma_{жс}}{\eta_n}, \text{ Вт}, \quad (3.6)$$

где Q – производительность насоса, $\text{м}^3/\text{с}$;

H_{Γ} – величина геодезического напора, равная сумме высот всасывания и нагнетания, м, водяного столба;

ΔH_{Γ} – потеря напора в магистрали, [м]; зависит от сечения труб, качества их обработки, кривизны участков трубопровода и т.п.; приводится в справочной литературе;

P_2 – давление в резервуаре, куда перекачивается жидкость, $\frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$;

P_1 – давление в резервуаре, откуда перекачивается жидкость, $\frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$;

$\gamma_{жс}$ – удельный вес перекачиваемой жидкости, $\frac{\text{Н}}{\text{м}^3}$;

η_n – КПД насоса.

По расчетной мощности вентилятора (3.3), насоса (3.6) для заданной скорости и принятого номинального напряжения из соответствующего каталога двигателей продолжительного режима нагрузки выбирается ближайший больший, т.е. номинальная мощность которого $P_{2N} \geq P_{\partial}$. Заметим, что при наличии какой-либо передачи между двигателем и вентилятором (насосом) в знаменатель выражений (3.3), (3.6) вводится КПД передачи.

Известно, что мощность центробежного механизма пропорциональна кубу угловой скорости $P_2 \equiv \omega^3$, а момент на валу – квадрату угловой скорости $M \equiv \omega^2$, хотя показатель степени может изменяться в зависимости от реальных конструкций и условий работы. В этой связи при определении

мощности двигателя насоса, регулируемого по скорости, необходимо учитывать значительное изменение нагрузки на валу двигателя. Технологическое требование управления скоростью насоса относит его электропривод к перемежающемуся режиму нагрузки, эквивалентному S8, то есть электропривод управляемого по скорости насоса не может быть отнесен к режиму нагрузки S1. Рационально использовать частотно-управляемый электропривод переменного тока.

3.1.2. В режимах кратковременной нагрузки S2

Здесь период работы на установившейся скорости и пускотормозных включениях несоизмеримо меньше времени паузы, за которое двигатель успевает охладиться до температуры окружающей среды; мощность двигателя расходуется на преодоление как статических, так и динамических нагрузок в системе электрифицированного механизма. В таких режимах нагрузки работают электроприводы механизмов задвижек на трубопроводах, железнодорожных поворотных кругов, ворот шлюзов, разводных мостов и т.п. Статическая нагрузка F_{PM} или M_{PM} определяется через технологические параметры, отражающие специфику функционирования механизма. Через инерционные массы m_{PM} и моменты инерции J_{PM} , сосредоточенные в конструкции и на исполнительном органе механизма, и заданное линейное a_{PM} или угловое ускорение ε_{PM} , либо задав его, определяют динамические нагрузки. Рассчитывается механическая мощность, полагая нагрузки приведенными к валу ЭД; необходимая механизму мощность, с учетом покрытия потерь в передаче, запишется следующими выражениями:

- при линейном движении:

$$P_{расч.} = k_{\partial} \cdot (F_{PM} + m_{PM} \cdot a_{PM}) \cdot \frac{V_{PM}}{\eta_{PM} \cdot \eta_{пер.}}; \quad (3.7)$$

- при вращательном движении:

$$P_{расч.} = k_{\partial} \cdot (M_{PM} + J_{PM} \cdot \varepsilon_{PM}) \cdot \frac{\omega_{PM}}{\eta_{PM} \cdot \eta_{пер.}}, \quad (3.8)$$

где V_{PM} – линейная скорость движения, м/с ;

ω_{PM} – угловая скорость движения, рад/с ;

a_{PM} – линейное ускорение, м/с^2 ;

ε_{PM} – угловое ускорение, рад/с^2 ;

η_{PM} – КПД механизма;

$\eta_{пер.}$ – КПД передачи;

k_{∂} – коэффициент запаса на динамические нагрузки в системе электропривода, $k_{\partial} = 1,1 \div 1,3$.

Частота вращения двигателя n_{∂} , об/мин , определяется через заданную скорость движения исполнительного органа и передаточное отношение редуктора $i = \frac{\omega_{Д}}{\omega_{PM}} = \frac{n_{Д}}{n_{PM}}$:

$$n_{Д} = \frac{60}{2 \cdot \pi} \cdot \omega_{Д} = \frac{60}{2 \cdot \pi} \cdot i \cdot \omega_{PM} = \frac{V_{PM} \cdot i}{2 \cdot \pi \cdot k_n},$$

где k_n – коэффициент приведения линейного движения к вращательному (см. § 3.2.1).

Для принятого рода тока, номинального напряжения и необходимой частоты вращения выбирается двигатель по каталогу кратковременного режима нагрузки. Критериями выбора являются:

$$t_p = t_n + t_y + t_m \leq t_{cm} = 15, 30, 60 \text{ или } 90 \text{ мин и } P_{расч. раб.} \leq P_{2N}.$$

Вполне возможно, что заданное время работы t_p окажется значительно отличающимся от стандартных значений, для которых в каталоге даются значения номинальной мощности. В таком случае, полагая полученную по (3.7) или (3.8) расчетную мощность $P_{расч.}$ эквивалентной $P_{эkv.}$ при нестандартном времени работы, t_p , ее пересчитывают на другое эквивалентное значение $P_{эkv. см.}$ при ближайшем стандартном времени $t_{см.}$:

$$P_{эkv. см.} = P_{расч.} \cdot \sqrt{\frac{t_p}{t_{см.}}} \quad (3.9)$$

Это выражение предполагает перегрев в конце времени работы предельно допустимым. По $P_{эkv. см.}$, $t_{см.}$ и n_d выбирают ближайший больший двигатель.

В силу специфического соотношения переменных и постоянных потерь двигателя кратковременного режима, будучи включенными длительно даже без нагрузки, могут перегреться за счет постоянных потерь и выйти из строя, поэтому их выпуск имеет конкретное целевое назначение. При отсутствии возможности выбора такого двигателя для электроприводов кратковременного режима используют двигатели повторно-кратковременного режима нагрузки (краново-металлургические). В таком случае приближенно считают, что длительности работы в 30 мин соответствует коэффициент продолжительности включения равный 15 %, в 60 мин

– 25 %, в 90 мин – 40 %. Здесь также возможен пересчет по выражению (3.9).

В кратковременном режиме нецелесообразно использовать двигатели длительного (продолжительного) режима, так как не будет обеспечен оптимум для использования заложенных активных материалов, а по энергетическим соображениям упадет КПД из-за работы в области перегрузки, где переменные потери значительно превысят постоянные потери в двигателе.

3.1.3. В повторно-кратковременных и перемежающихся режимах нагрузки

Здесь определение необходимой мощности двигателя возможно только при наличии сведений об инерционных массах и моментах инерции в системе электрифицированного механизма. Не последнее значение имеет и собственный момент инерции ротора (якоря) двигателя, особенно при понижающем редукторе в системе электропривода. Обусловлено такое положение спецификой нагрузки двигателей в рассматриваемых режимах, когда динамические нагрузки в интенсивно повторяющихся от цикла к циклу режимах движения превалируют над статическими и оказывают значительное влияние на тепловое состояние двигателя. В таких режимах нагрузки работают электроприводы подъемно-транспортных механизмов, подавляющее большинство электроприводов главных и вспомогательных механизмов металлургического производства, металлообработки в машиностроении, обработки других материалов в различных отраслях промышленного, горнодобывающего и сельскохозяйственного производства.

Повторно-кратковременные и перемежающиеся режимы нагрузки электроприводов весьма разнообразны и эквивалентны соответствующим

номинальным режимам нагрузки: S3, S4, S5 – повторно-кратковременным; S6, S7, S8 – перемежающимся. Не всегда просто отнести разрабатываемый электропривод к тому или иному режиму нагрузки. Объясняется это тем, что реальные законы движения исполнительных органов механизмов различных производств, требуемые условиями конкретных технологий, могут сопровождаться не только значительными изменениями статических и динамических нагрузок, но и определенной частотой включений двигателя. Кратковременные паузы не всегда учитывают, в таких случаях режим относят к перемежающемуся. В этой связи *необходимо выполнять построение нагрузочных диаграмм рабочей машины, пусть приближенных, но отражающих основные технологические требования к электроприводу за цикл работы.* Это прежде всего зависимости $M_{PM} = f_1(t)$ и $\omega_{PM} = f_2(t)$ или $F_{PM}(t)$ и $V_{PM}(t)$, по которым следует определить предполагаемую продолжительность включения двигателя $PВ_{зр.}$:

$$PВ_{зр.} = \frac{\sum t_{i \text{ раб.}}}{\sum t_{i \text{ раб.}} + \sum t_{i \text{ пауз}}} = \frac{\sum t_{i \text{ раб.}}}{t_{\text{ц}}}. \quad (3.10)$$

Если $PВ_{зр.}$ больше 60 %, а время цикла $t_{\text{ц}}$ не превышает 10 мин, то режим электропривода следует отнести к повторно-кратковременному; при $PВ_{зр.}$ болес 70 % и времени цикла, превышающем 10 мин, - к одному из перемежающихся.

3.2. ПРИВЕДЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК К ВАЛУ ЭД

Кинематическая схема РМ может быть весьма разнообразной, что обусловлено не только необходимостью редуцирования момента и скоро-

сти движения, но и преобразованием формы механического движения. В таких системах статические и динамические нагрузки (инерционные массы и моменты инерции) оказываются рассредоточенными между элементами кинематической цепи, движущимися с различными скоростями. Передаваемая к РМ механическая энергия расходуется на покрытие неизбежных потерь на трение, отчасти на преодоление сил упругости. Не безразличным при передаче механического движения оказываются проскальзывание или фрикционность, наличие люфтов в элементах кинематической цепи.

Однако при рассмотрении сложных кинематических систем применение уравнения движения к каждому звену, движущемуся со своей скоростью является практически нецелесообразным. Поэтому реальную механическую систему с развитой кинематикой представляют упрощенной, но эквивалентной по сохранению статических и динамических свойств.

*Процедуру эквивалентного упрощения реальной механической системы и называют приведением статических и динамических нагрузок к какому-либо одному валу, в электроприводе – к валу двигателя. Если механическая система может считаться абсолютно жесткой, то в ее эквивалентном представлении получают *одномассовую* систему, имеющую скорость вращения вала двигателя. При учете же упругости, фрикционности, люфтов не удастся представить систему как *одномассовую*; в лучшем случае ее можно эквивалентировать как *двух-* или *трехмассовую*.*

3.2.1. Основные соотношения между параметрами линейного и вращательного движения

Построение нагрузочных диаграмм электропривода связано с приведением статических и динамических нагрузок со стороны рабочей машины

к валу двигателя. При этом необходимо располагать параметрами кинематической схемы электрифицируемого механизма.

Оговоренная выше жесткая кинематическая связь рассматриваемых систем однозначно определяет соотношения между однородными физическими величинами, характеризующими движение вала двигателя и исполнительного органа РМ, между которыми осуществляется редукция и преобразование вида механического движения. Рассмотрим это на примерах таких передач, как «рейка – шестерня с редуктором» рис. 3.1 и «гайка – винт с редуктором» рис. 3.2.

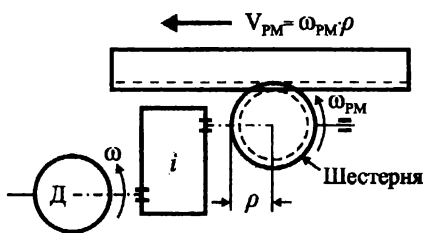


Рис. 3.1

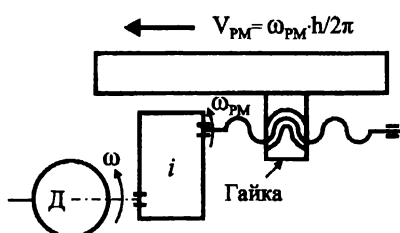


Рис. 3.2

1. В передаче «*рейка – шестерня с редуктором*» элементами привода являются физические величины, характеризующие механическое движение исполнительного органа РМ:

L_{PM} – проходимый путь ИОРМ, м;

V_{PM} – линейная скорость ИОРМ, м/с;

a_{PM} – линейное ускорение ИОРМ, м/с².

Физические величины, характеризующие движение вала ЭД:

$\alpha_{ЭД}$ – угловой путь вала ЭД, рад;

$\omega_{ЭД}$ – угловая скорость вала ЭД, рад/с;

$\varepsilon_{ЭД}$ – угловое ускорение вала ЭД, рад/с².

Параметрами преобразования формы движения являются:

$$\rho = \frac{L_{PM}}{\alpha_{PM}} = \frac{V_{PM}}{\omega_{PM}} = \frac{a_{PM}}{\varepsilon_{PM}} \text{ – радиус приведения, м/рад, численно}$$

равный радиусу зацепления шестерни; (3.11)

$$i = \frac{\alpha_{ЭД}}{\alpha_{PM}} = \frac{\omega_{ЭД}}{\omega_{PM}} = \frac{a_{ЭД}}{a_{PM}} \text{ – передаточное отношение редуктора;}$$

(3.12)

откуда физические величины, характеризующие движение вала двигателя, определяются:

$$\alpha_{ЭД} = L_{PM} \cdot \frac{i}{\rho}; \quad (3.13)$$

$$\omega_{ЭД} = V_{PM} \cdot \frac{i}{\rho}; \quad (3.14)$$

$$\varepsilon_{ЭД} = a_{PM} \cdot \frac{i}{\rho}. \quad (3.15)$$

2. В передаче «гайка – винт с редуктором» параметрами преобразования формы движения являются:

i – передаточное отношение редуктора (3.12);

h – шаг винта, м/об:

$$h = \frac{2 \cdot \pi \cdot S_{PM}}{\alpha_{PM}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot V_{PM}}{\omega_{PM}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot a_{PM}}{\varepsilon_{PM}}, \quad (3.16)$$

откуда

$$\alpha_{\text{ЭД}} = S_{\text{PM}} \frac{2 \cdot \pi \cdot i}{h}; \quad (3.17)$$

$$\omega_{\text{ЭД}} = V_{\text{PM}} \frac{2 \cdot \pi \cdot i}{h}; \quad (3.18)$$

$$\varepsilon_{\text{ЭД}} = a_{\text{PM}} \frac{2 \cdot \pi \cdot i}{h}. \quad (3.19)$$

3. При необходимости выразить **угловой путь поворота вала двигателя через число его оборотов** используют соотношение:

$$\frac{\alpha_{\text{ЭД}}}{N_{\text{ЭД}}} = \frac{\omega_{\text{ЭД}}}{n'_{\text{ЭД}}} = \frac{\varepsilon_{\text{ЭД}}}{v_{\text{ЭД}}} = 2\pi, \quad (3.20)$$

откуда путь вала двигателя в оборотах:

$$N_{\text{ЭД}} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \alpha_{\text{ЭД}} = \frac{S_{\text{PM}} \cdot i}{2 \cdot \pi \cdot k_{\text{mn}}}, \quad (3.21)$$

частота вращения, $\text{об}/\text{с}$:

$$n'_{\text{ЭД}} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \omega_{\text{ЭД}} = \frac{V_{\text{PM}} \cdot i}{2 \cdot \pi \cdot k_{\text{mn}}}, \quad (3.22)$$

ускорение, $\text{об}/\text{с}^2$:

$$v_{\text{ЭД}} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \varepsilon_{\text{ЭД}} = \frac{a_{\text{PM}} \cdot i}{2 \cdot \pi \cdot k_{\text{mn}}}, \quad (3.23)$$

где k_{mn} – **коэффициент приведения**, учитывает преобразование формы движения, равен: ρ , или $\frac{h}{2\pi}$, h – в зависимости от типа передачи и единиц измерения параметров движения.

3.2.2. Приведение неизменных статических сил и моментов со стороны РМ

В качестве примера используем подъемный механизм, см. рис. 3.3.

Статические нагрузки проявляют себя действующими силами F_{PM} и моментами M_{PM} , характеризующими линейное и вращательное движение. Связь между ними осуществляется через коэффициент приведения $\rho = R_{\delta}$, равный в настоящем примере радиусу барабана R_{δ} .

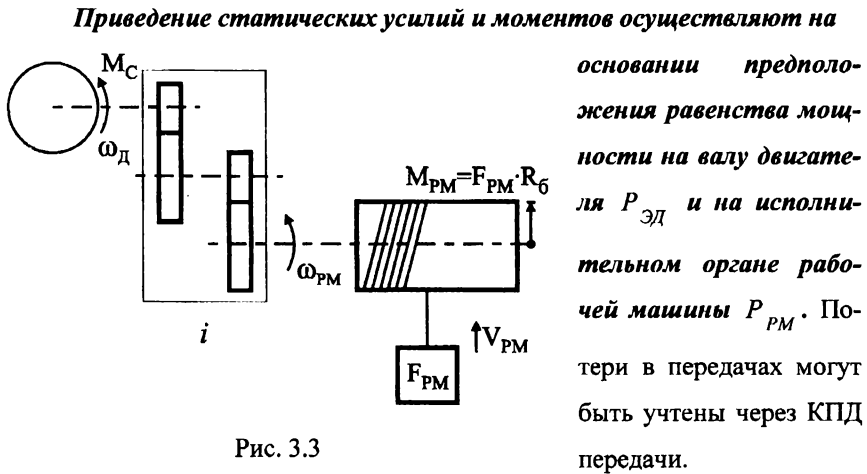


Рис. 3.3

При поступательном движении исполнительного органа РМ:

$$P_{ЭД} = M_C \cdot \omega_D = F_{PM} \cdot V_{PM} = P_{PM}, \quad (3.24)$$

откуда приведенная к валу ЭД статическая нагрузка F_{PM} преобразуется в M_{Cl} :

$$M_{Cl} = F_{PM} \frac{V_{PM}}{\omega_D} = F_{PM} \frac{\omega_{PM} \cdot R_{\delta}}{\omega_D} = \frac{F_{PM} \cdot R_{\delta}}{\frac{\omega_D}{\omega_{PM}}} = \frac{F_{PM} \cdot R_{\delta}}{i \cdot \eta}, \quad (3.25)$$

где $V_{PM} = \omega_{PM} R_G$.

Для представления статического усилия F_{PM} к виду статического момента M_{C1} на валу двигателя необходимо приводимое усилие F_{PM} умножить на радиус приведения $\rho = R_G$ и разделить на передаточное отношение редуктора i . Для учета потерь в передаче при двигательном режиме работы электропривода необходимо разделить на КПД передачи η_p , а для тормозных режимов следует умножить на η_p .

При вращательном движении исполнительного органа РМ:

$$P_{ЭД} = M_{C2} \cdot \omega_D = M_{PM} \cdot \omega_{PM} = P_{PM}, \quad (3.26)$$

откуда приведенный к валу ЭД M_{PM} преобразуется в M_{C2} :

$$M_{C2} = \frac{M_{PM} \omega_{PM}}{\omega_D} = \frac{M_{PM}}{i \cdot \eta_p}. \quad (3.27)$$

При приведении статического момента M_{PM} к валу двигателя необходимо его разделить на передаточное отношение редуктора i и на КПД η для учета потерь в передаче при двигательном режиме работы электропривода, а в тормозных режимах – умножить на КПД η_p .

Величины η_N берутся из каталога на передаточные механизмы, в которых они указываются для номинальной нагрузки, см. Приложение 2.

В условиях технологического процесса РМ не всегда оказывается загруженной полностью, чаще всего нагрузка не номинальная, следовательно не номинальным будет и КПД передачи. Это учитывается следующим образом: передаваемая мощность может быть представлена суммой полезной мощности P_n , расходуемой на совершение определенной работы на определенном интервале времени, постоянных потерь, не зависящих от на-

грузки (Δp_c), которые изменяются с изменением скорости движения, и переменных потерь (Δp_v), которые пропорциональны передаваемой нагрузке:

$$P_{\Sigma} = P_n + \Delta P_c + \Delta P_v,$$

где $\Delta p_v = \epsilon \cdot P_n$.

$$\Delta p_c = a \cdot P_{ном};$$

Выражение для КПД $\eta = \frac{P_n}{P_{\Sigma}}$ передачи можно расписать:

$$\eta = \frac{P_n}{P_n + aP_n + \epsilon P_n} = \frac{1}{1 + \frac{a}{\frac{P_n}{P_n}} + \epsilon} = \frac{1}{1 + \frac{a}{k_3} + \epsilon}, \quad (3.28)$$

где $k_3 = \frac{P_n}{P_N}$ – коэффициент загрузки передачи.

При передаче номинальной нагрузки $k_3 = 1$ и

$$\eta_N = \frac{1}{1 + a + \epsilon}, \quad (3.29)$$

откуда

$$(1 + a + \epsilon) \cdot \eta_N = 1 \text{ или } a + \epsilon = \frac{1}{\eta_N} - 1.$$

Где взять значения (a) и (ϵ)?

Опытным путем установлено, что для различных передач:

$$\frac{a}{\epsilon} = 0,5 + 4,0;$$

так, например, для цилиндрических зубчатых передач в масле $\frac{a}{\epsilon} \cong 1,0$;

для клиноременных $\frac{a}{\epsilon} \approx 1,5$;

для червячных $\frac{a}{\epsilon} \approx 2,0 \div 2,5$, примерно такие же значения и для кривошипных передач.

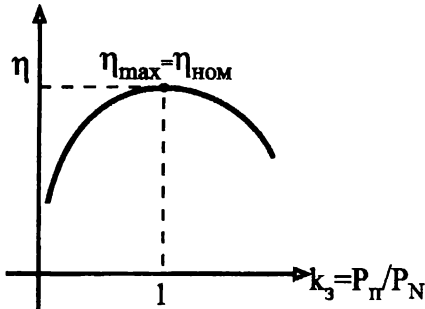


Рис. 3.4

Совместное решение выражений с двумя неизвестными дает возможность определить их для используемого типа передачи:

$$\left. \begin{aligned} (a + \epsilon) &= \frac{1}{\eta_N} - 1 \\ \frac{a}{\epsilon} &= (0,5 \div 4,0) \end{aligned} \right\}$$

Затем определяется КПД для соответствующей загрузки: 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,25; 1,5 и строится $\eta = f(k_3)$, см. рис. 3.4.

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{a}{k_3} + \epsilon}. \quad (3.30)$$

3.2.3. Приведение неизменных инерционных масс и моментов инерции со стороны РМ

Рассмотрим это на примере того же подъемного механизма, рис. 3.5.

Динамические нагрузки проявляют себя в связи с изменением запаса кинетической энергии, сосредоточенной в инерционных массах m_{PM} , которые участвуют в поступательном движении, а при вращательном движении - определяют величины моментов инерции $J_{PM} = m \cdot \rho^2$.

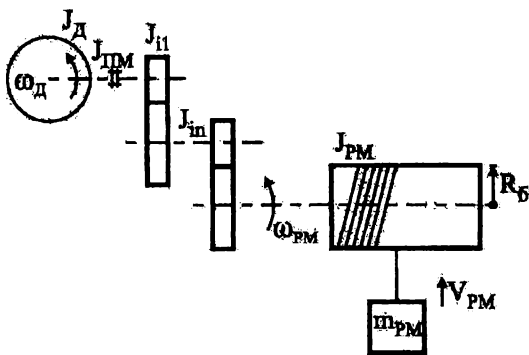


Рис. 3.5

Приведение инерционных масс m_{PM} и моментов инерции J_{PM} осуществляют на основании предположения равенства кинетической энергии на валу двигателя и на рабочем органе механизма.

При поступательном движении рабочего органа:

$$W_k = J_{ВД} \frac{\omega_D^2}{2} = m_{PM} \frac{V_{PM}^2}{2}, \quad (3.31)$$

откуда

$$J_{ВД} = m_{PM} \frac{V_{PM}^2}{\omega_D^2} = \frac{m_{PM} \omega_{PM}^2 R_Б^2}{\omega_D^2} = \frac{m_{PM} R_Б^2}{i^2}. \quad (3.32)$$

При вращательном движении рабочего органа:

$$W_k = J_{ВД} \frac{\omega_D^2}{2} = J_{PM} \frac{\omega_{PM}^2}{2}, \quad (3.33)$$

откуда

$$J_{ВД} = J_{PM} \frac{1}{\frac{\omega_{PM}^2}{\omega_D^2}} = \frac{J_{PM}}{i^2}. \quad (3.34)$$

Для приведения динамических масс от линейного движения к вращательному приведенный момент инерции $J_{ВД}$ на валу двигателя получают умножением массы m_{PM} на квадрат радиуса приведения $\rho^2 = R_Б^2$ и

делением на квадрат передаточного отношения редуктора i^2 . Приведение момента инерции со стороны РМ при ее вращательном движении к валу ЭД момент инерции $J_{ВД}$ получают путем деления $J_{РМ}$ на квадрат передаточного отношения редуктора i^2 .

Динамическая нагрузка на валу ЭД должна учитывать и моменты инерции, сосредоточенные на валу, к ним относятся $J_{Д}$ ротора (якоря) – берется из каталога предварительно выбранного двигателя; $J_{ПМ}$ – момент инерции полумуфта; $J_{ТШ}$ – момент инерции тормозного шкива; $J_{ШР}$ – момент инерции первой шестерни редуктора, остальные приводятся к валу двигателя по (3.35), которые суммируются с приведенными со стороны РМ:

$$J_{\SigmaВД} = J_{Д} + J_{ПМ} + J_{ТШ} + \sum_1^n \frac{J_{i,шр}}{i_i^2} + \frac{J_{РМ}}{i^2} + \frac{m_{РМ} \cdot R_6^2}{i^2}, \quad (3.35)$$

обычно первые четыре слагаемых выражают через собственный момент инерции ЭД, и выражение упрощается:

$$J_{\SigmaВД} \cong (1,05 \div 1,2) \cdot J_{Д} + \frac{J_{РМ}}{i^2} + \frac{m_{РМ} R_6^2}{i^2}. \quad (3.36)$$

При приведении динамических нагрузок учет потерь в передачах не производится из-за громоздкости получаемых выражений, которые не дают ощутимого эффекта.

3.2.4. Приведение статических и динамических нагрузок при изменении угла поворота исполнительного органа РМ

К этой категории относятся рабочие машины, в которых статические и динамические нагрузки изменяются в функции угла поворота. Это РМ с

кривошипно-шатунной передачей движения (гильотинные ножницы, прессы, поршневые компрессоры) и РМ с перемещающимся центром тяжести при повороте (металлургические миксеры, конверторы).

В качестве примера рассмотрим кривошипный механизм ножниц горячей резки металла после блюминга.

3.2.4.1. Приведение статических нагрузок

Кинематическая схема представлена на рис. 3.6,

где OA – кривошип, R_k ;

AB – шатун, $l_{ш}$;

B – ползун с ножом.

Полагая заданным по условиям технологии усилие резания F_{PM} , необходимо разложить F_{PM} на составляющие $F_{PMш}$ и F_{PMN} , таким образом определить усилие вдоль оси шатуна:

$$F_{PMш} = \frac{F_{PM}}{\cos \beta}. \quad (3.37)$$

Перенесем $F_{PMш}$ вдоль оси шатуна в точку A и разложим на нормальную F_N и тангенциальную F_T составляющие.

Тангенциальная составляющая приложена к концу кривошипа:

$$F_m = F_{PMш} \sin(\alpha + \beta) = F_{PM} \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos \beta}. \quad (3.38)$$

Момент статического сопротивления движению на валу кривошипа определяется:

$$M_{PM} = F_m \cdot R_k = F_{PM} \cdot R_k \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos \beta}, \quad (3.39)$$

где $R_k = OA = \rho$ – параметр приведения.

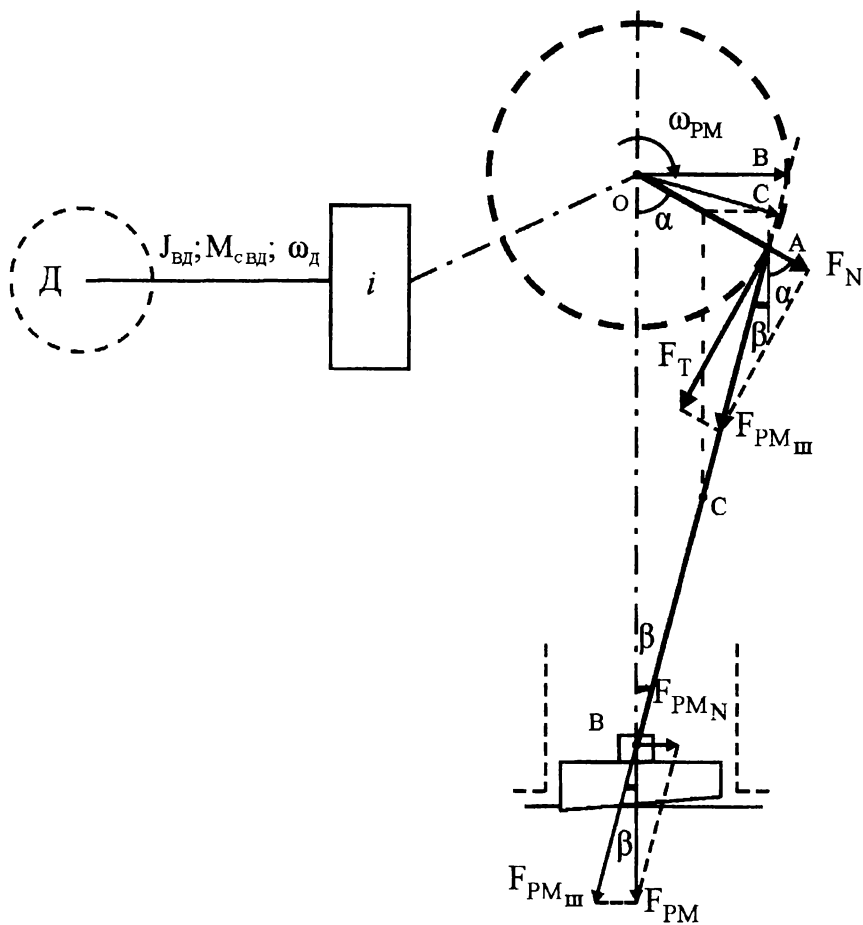


Рис. 3.6

Вал кривошипа связан с валом ЭД через редуктор. Приведенный к валу ЭД статический момент $M_{вд}$ определяется:

$$M_{вд} = \frac{M_{PM}}{i \cdot \eta} = \frac{F_{PM} \cdot R_k}{i \cdot \eta} \cdot \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos \beta}. \quad (3.40)$$

Полученное выражение может быть упрощено при значительной длине шатуна. Например, при $l_{ш}/R_k > 5$, $\beta \approx 0$ и $\cos\beta \approx 1$, что позволяет записать:

$$M_{ВД} = M_C \approx \frac{F_{PM} \cdot R_k \sin \alpha}{i \cdot \eta}. \quad (3.41)$$

На графике $M_C = f(\alpha)$ будет выглядеть следующим образом, см. рис. 3.7.

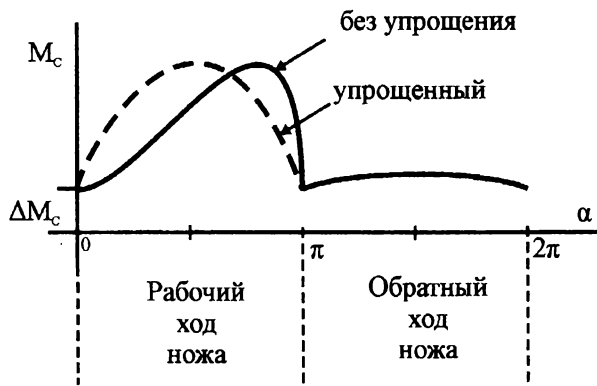


Рис. 3.7

3.2.4.2. Приведение динамических нагрузок

Запас кинетической энергии в различных элементах кинематической цепи РМ можно записать для данного момента времени как сумму:

$$W_{PM} = W_{II} + W_{Ш} + W_K,$$

где $W_{II} = m_n \frac{v^2}{2}$ – кинетическая энергия, связанная с поступательным

движением ползуна;

$$W_{Ш} = m_{Ш} \frac{V_C^2}{2} + J_{Ш} \frac{\omega_{c/\epsilon}^2}{2} - \text{кинетическая энергия, связанная со}$$

сложным движением шатуна: его центр тяжести в точке «С» совершает поступательное движение с линейной скоростью V_C и поворачивается относительно точки «В» с угловой скоростью $\omega_{c/\epsilon}$;

$$W_K = J_K \frac{\omega_{PM}^2}{2} - \text{кинетическая энергия, связанная с вращательным}$$

движением кривошипа с угловой скоростью ω_{PM} .

Суммарный момент инерции J_{PM} на валу РМ определяется из предположения равенства кинетической энергии в едином движении всех элементов кинетической цепи:

$$J_{PM} \frac{\omega_{PM}^2}{2} = m_{П} \frac{V_{PM}^2}{2} + m_{Ш} \frac{V_C^2}{2} + J_{Ш} \frac{\omega_{c/\epsilon}^2}{2} + J_K \frac{\omega_{PM}^2}{2}, \quad (3.42)$$

откуда

$$J_{PM} = m_{П} \frac{V_{PM}^2}{\omega_{PM}^2} + m_{Ш} \frac{V_C^2}{\omega_{PM}^2} + J_{Ш} \frac{\omega_{c/\epsilon}^2}{\omega_{PM}^2} + J_K. \quad (3.43)$$

Для определения $J_{PM} = f(\alpha)$ необходимо знать все линейные и угловые скорости элементов системы в зависимости от положения кривошипа. По известным из курса механики методам, необходимо строить **план скоростей**.

Например, если все элементы кинематики механизма изображены в масштабе, то можно использовать графические построения. Продолжив

ось шатуна вправо см. рис. 3.6 и спроектировав на нее через кривошпы точку центра тяжести шатуна получим:

\overline{OB} – линейная скорость *ползуна*, $\overline{OB} \equiv V_{PM}$;

\overline{OC} – линейная скорость центра тяжести *шатуна*, $\overline{OC} \equiv V_C$;

\overline{AB} – скорость качания шатуна относительно точки «В»,
 $\overline{AB} \equiv V_{A/B} = \omega_{CB} \cdot l$;

\overline{OA} – дает возможность определить угловую скорость вращения *кривошпы*, которая будучи выраженной через угловую скорость вращения двигателя $\omega_{PM} = \frac{\omega}{i}$ может служить *масштабом* для определения скорости других элементов системы, $\overline{OA} \equiv V_A = \omega_{PM} \cdot R_K$.

Теперь выражение J_{PM} можно переписать:

$$J_{PM} = m_{II} \left(\frac{\overline{OB}}{\overline{OA}} \right)^2 \cdot R_K^2 + m_{III} \left(\frac{\overline{OC}}{\overline{OA}} \right)^2 \cdot R_K^2 + J_{III} \left(\frac{\overline{AB}}{\overline{OA}} \right)^2 \cdot \frac{R_K^2}{l^2} + J_K, \quad (3.44)$$

(1)
(2)
(3)
(4)

Не трудно видеть, что все отрезки, выражающие мгновенные значения соответствующих скоростей, являются $f(\alpha)$.

Составляющие записанного выражения можно показать на графике в функции угла поворота кривошпы см. рис. 3.8.

Наконец, приведение динамических нагрузок к валу двигателя не представляет трудности:

$$J(\alpha) = \frac{J_{PM}(\alpha)}{\left(\frac{\omega}{\omega_{PM}} \right)^2} = \frac{J_{PM}(\alpha)}{i^2}. \quad (3.45)$$

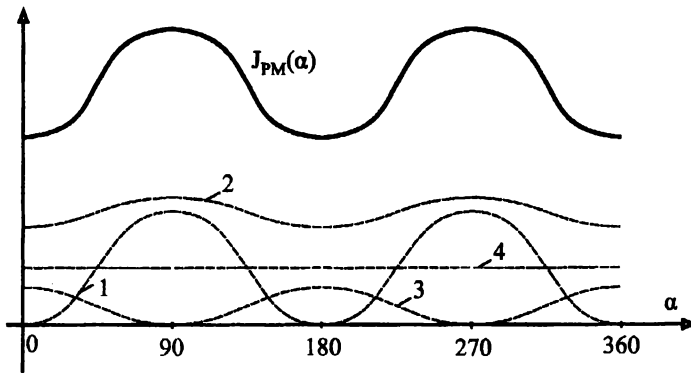


Рис. 3.8

Окончательно динамический момент системы «ЭП-ИОРМ» относительно вала ЭД можно записать:

$$\begin{aligned}
 M_{\text{дин.}} &= \left[(1,05 \div 1,2) \cdot J_{\text{Д}} + \frac{J_{\text{РМ}}(\alpha)}{i^2} \right] \frac{d\omega_{\text{Д}}}{dt} = \\
 &= \left[(1,05 \div 1,2) \cdot J_{\text{Д}} \cdot \frac{d\omega_{\text{Д}}}{dt} + \frac{\omega_{\text{Д}}^2}{2} \cdot \frac{dJ_{\text{РМ}}(\alpha)}{d\alpha} \right].
 \end{aligned} \tag{3.46}$$

3.2.5. К учету нежестких связей в кинематике

В электрифицированной рабочей машине не всегда кинематические связи могут считаться достаточно жесткими. К таким следует отнести следующие:

- наличие длинных валов и тросов, клиноременных и подобных им передач указывает на необходимость учета *упругих элементов*;
- наличие фрикционных связей в механизмах некоторых передач, между металлом и роликами роликангов, между рельсом и колесом электри-

фицированного транспорта, в которых приходится учитывать возможность *проскальзывания* при передаче движения;

- при использовании цепных передач, а также в обычных редукторах с цилиндрическими и коническими шестернями при передаче движения возможны *зазоры или люфты*, которые приходится выбирать с *последующим*, например, *упругим ударом*.

Перечисленные элементы связи приходится учитывать в математическом описании передачи движения. В такой системе нежесткие элементы связи по оси движения разделяют статические и динамические нагрузки, которые приходится приводить к различным значениям скоростей, развиваемых до и после элемента связи. В таком случае приходится эквивалентировать операцию приведения нагрузок, например, при одном элементе нежесткой связи реальной многомассовой системы ее представлением, эквивалентной двухмассовой.

Рассмотрим учет элементов нежестких связей (ЭНЖС) на примере эквивалентной двухмассовой системы, где движение каждого, приведенного к своему валу инерционного элемента происходит в переходном процессе движения с различной угловой скоростью ω_1 и ω_2 рис. 3.9.

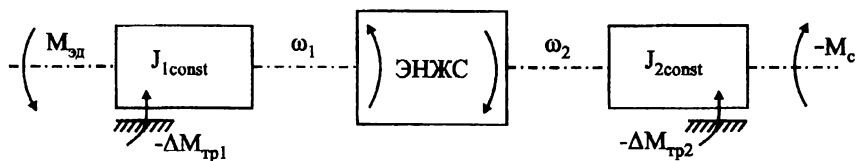


Рис. 3.9

Движение каждого инерционного элемента (m или J) описывается своим уравнением движения, представляющим дифференциальное уравнение первого порядка:

$$M_{эд} - \Delta M_{тр.1} - M_{ЭНЖС} = J_1 \frac{d\omega_1}{dt}; \quad (3.47)$$

$$M_{ЭНЖС} - \Delta M_{тр.2} - M_c = J_2 \frac{d\omega_2}{dt}. \quad (3.48)$$

Реальная механическая система относится к динамическим диссипативным системам, в которых имеет место рассеяние запасенной и передаваемой кинетической энергии. В рассматриваемой системе находятся два инерционных элемента J_1 и J_2 , которые являются накопителями кинетической энергии. Математическое описание такой системы имеет второй порядок, поэтому при соответствующих параметрах системы с ЭНЖС ее решение может характеризовать колебательный процесс обмена кинетической энергии между ее накопителями. Наличие диссипативных элементов $\Delta M_{тр.1}$ и $\Delta M_{тр.2}$ обусловит затухающий процесс энергообмена во времени, возможно, сопровождаемый динамическими упругими или неупругими ударами, но в итоге завершающийся выравниванием скоростей движения $\omega_1 = \omega_2$.

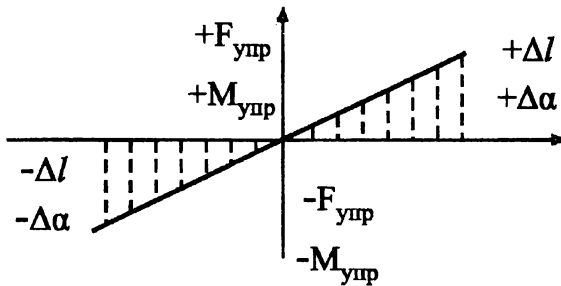


Рис. 3.10

Взаимосвязь законов движения инерционных элементов J_1 и J_2 всецело определяется спецификой физических характеристик ЭНЖС, математические выражения которых

станут уравнениями связи в системе уравнений движения. Покажем это на конкретных примерах.

1. ЭНЖС выражает упругую связь

Согласно закону Гука, *возникающие в упругом элементе усилия $F_{упр}$ или моменты $M_{упр}$ пропорциональны, соответственно, линейным Δl или угловым $\Delta\alpha$ деформациям*, где коэффициентом пропорциональности является C - коэффициент жесткости. В пределах линейной деформации, рис. 3.10:

$$F_{упр} = C_{рас.} \cdot \Delta l, \text{ Н} \quad ; \quad (3.49)$$

$$M_{упр.} = C_{скр.} \cdot \Delta\alpha, \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (3.50)$$

где $C_{рас.}$ - жесткость при растяжении или сжатии стержня, каната,

$$C_{рас.} = \frac{S \cdot E}{l}, \frac{\text{Н}}{\text{м}}; \text{ здесь } S - \text{площадь поперечного сечения; } E$$

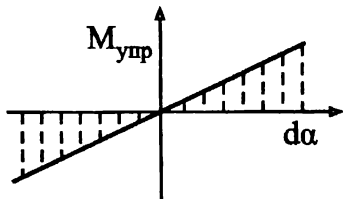
- модуль упругости растяжению, сжатию; l - длина стержня, каната;

$C_{скр.}$ - жесткость при скручивании вала, $C_{скр.} = \frac{\pi \cdot R^4}{2l} \cdot G$, здесь

$$\frac{\pi \cdot R^4}{2} - \text{момент инерции поперечного сечения вала; } G - \text{модуль упругости кручению; } l - \text{длина вала.}$$

Рассмотрим решение задачи на примере передачи движения через упругий вал. Для этого необходимо знать все функции переменных, которые входят в уравнения. Допустим, все функции известны:

$$\begin{aligned} M_{упр.} &= C_{скр.} \cdot \int (\omega_1 - \omega_2) \cdot dt = \\ &= C_{скр.} \cdot \int \Delta\omega \cdot dt = C_{скр.} \cdot \int d\alpha, \end{aligned}$$

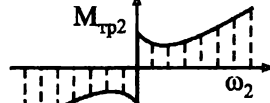


или $\frac{dM_{yup.}}{dt} = C_{скр.} \cdot \Delta\omega$; $\frac{d\alpha_1}{dt} = \omega_1$; $\frac{d\alpha_2}{dt} = \omega_2$.

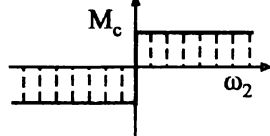
$M_{mp.1} = f_1(\omega_1) \Rightarrow$



$M_{mp.2} = f_2(\omega_2) \Rightarrow$



$M_c = f_3(\omega_3) \Rightarrow$



Чтобы обеспечить наглядность процедуры решения уравнений (3.47) и (3.48), будем полагать, что выполнено используемое в дисциплине ТОЭ преобразование Лапласа переменных от оригиналов к их изображениям. В результате дифференциальные уравнения становятся преобразованными к операторной форме записи, где операция интегрирования оригиналов заменяется операцией умножения, а дифференцирования - делением их изображений на оператор преобразования $p = \frac{d}{dt}$. Чтобы не переходить к новым обозначениям изображений переменных, оставим их в прежних обозначениях. Сказанное представлено на структурной схеме, рис. 3.11.

При переменных или повторяющихся деформациях возможно проявление упругого гистерезиса. При этом нарушается определяемая законом Гука однозначная зависимость $M_{yup} = f(\Delta\alpha)$ или $F_{yup} = f(\Delta l)$; упругая связь оказывается нелинейной.

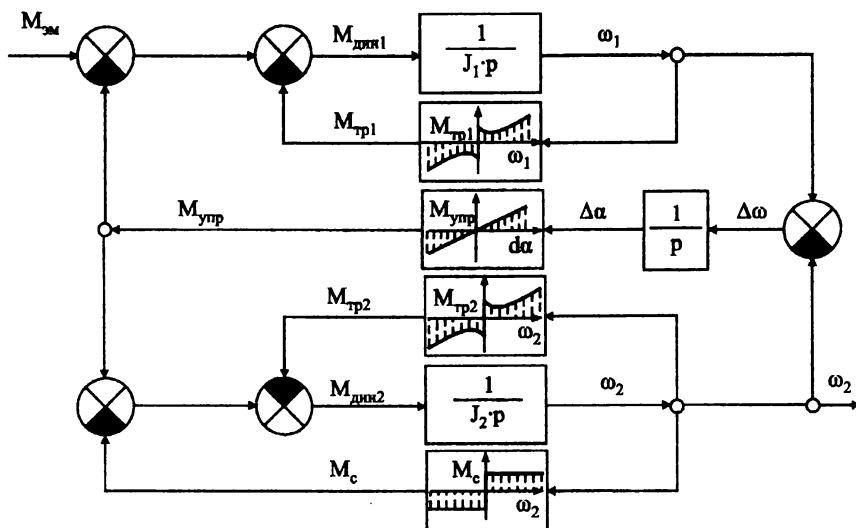


Рис. 3.11

2. ЭНЖС выражает фрикционную связь (от лат. *frictio* – трение)

Это указывает на возможность проскальзывания или пробуксовывания при передаче движения, что возникает от превышения передаваемого

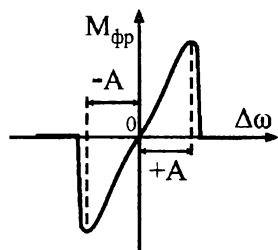


Рис. 3.12

динамического момента $M_{дин.} > M_{фр.}$ в сравнении с предельным фрикционной связи; от превышений допустимых ускорений. Функционально предельный $M_{фр.} = f(\omega_1 - \omega_2) = f(\Delta\omega)$ определяется разностью скоростей между элементами связи передающим движение и принимающим это движение; состоянием их поверх-

ностей, определяемое коэффициентом трения. Характеристика $M_{фр.}(\Delta\omega)$ представлена на рис. 3.12, ее описание имеет вид:

$$M_{\text{фр.}} = \begin{cases} 0; & \Delta\omega > +A; \\ k \cdot \Delta\omega; & -A > \Delta\omega > -A; \\ 0; & \Delta\omega < -A \end{cases} \quad (3.51)$$

где k – коэффициент пропорциональности;
 A – передаваемый момент до наступления проскальзывания (пробуксовки).

3. ЭНЖС выражает люфт

Пока люфт не выбран движение к РМ не передается, после выборки

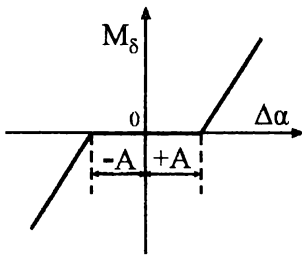


Рис. 3.13

воздушного зазора в кинематической цепи происходит наброс динамического момента со стороны, обеспечивающей движение, с возможным упругим ударом, рис. 3.13, или повторяющимися затухающими ударами. Исключение люфта определяется характеристикой $M_{\delta} = f(\Delta\alpha)$ в функции разности углов

поворота ведущего и ведомого валов, что можно описать:

$$M_{\delta} = \begin{cases} M_0 + k \cdot \Delta\alpha; & \Delta\alpha > A; \\ 0; & -A < \Delta\alpha < +A; \\ -(M_0 + k \cdot \Delta\alpha); & \Delta\alpha < -A, \end{cases} \quad (3.52)$$

где M_0 – некоторый передаваемый момент;
 k – коэффициент пропорциональности;
 A – величина люфта (зазора).

3.3. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ ВЫБОР ДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ДЛЯ РЕЖИМОВ НАГРУЗКИ S3-S8

Динамические нагрузки на двигатель возникают в интервалах изменения скорости как на холостом ходу, так и при совершении полезной работы. Они всецело связаны с процессом изменения запаса кинетической энергии движущихся масс в системе «ЭП-ИОРМ».

Выше было сказано, гл. 1.4, что *статические и динамические нагрузки полностью отражаются в нагрузочных диаграммах электропривода, поэтому и определение необходимой номинальной мощности двигателя логично производить по ним*. Однако здесь сталкиваются с парадоксом: чтобы построить нагрузочные диаграммы электропривода, его двигатель должен быть выбран, а значит известен его момент инерции $J_{д}$.

подавляющее число производственных механизмов требует по условиям технологии рабочую частоту вращения порядка $100-300 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$, а наиболее приемлемыми по весогабаритным показателям оказываются двигатели с частотой вращения $1000-3000 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$. Поэтому в современных ограниченно параметрически управляемых ЭП еще широко используются понижающие редукторы. В таких системах, когда кинематические связи могут быть приняты абсолютно жесткими, приведенный к валу двигателя динамический момент записывается следующим образом:

$$M_{дин.} = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \cdot \frac{dJ_{\Sigma}}{dt}. \quad (3.53)$$

Здесь J_{Σ} – полный приведенный к валу двигателя момент инерции системы; представляет собой сумму, в которой приведенные со

стороны рабочей машины моменты инерции и инерционные массы уменьшаются пропорционально квадрату передаточного отношения редуктора:

$$J_{\Sigma} = \delta \cdot k_{\text{Д}} \cdot J_{\text{Д}} + \frac{J_{\text{РМ}}}{i^2} + \frac{m_{\text{РМ}} \cdot \rho^2}{i^2}, \quad (3.54)$$

где $k_{\text{Д}}$ – количество двигателей в составе ЭП;

δ – коэффициент, учитывающий моменты инерции полумуфта, тормозного шкива и других возможных элементов на валу двигателя через $J_{\text{Д}}$, $\delta > 1$;

ρ – радиус приведения, (см. § 3.2.1).

В результате динамические нагрузки со стороны рабочей машины, будучи приведенными к валу двигателя, могут быть не только соизмеримы с собственным моментом инерции двигателя $J_{\text{Д}}$, но и оказаться меньше его. Отсюда возникает необходимость как-то (см. § 3.3.1) предварительно определить расчетную мощность двигателя, по ее значению $P_{\text{расч}}$ и частоте вращения $n_{\text{Д}}$ выбрать из соответствующего каталога ближайший больший двигатель и узнать его момент инерции $J_{\text{Д}}$.

Далее, используя нагрузочные диаграммы рабочей машины, выполняются построение упрощенных (т.е. без учета электромагнитных переходных процессов) нагрузочных диаграмм двигателя электропривода, например $M(t)$ или $I(t)$ и $\omega(t)$, и производят проверку предварительно выбранного двигателя по нагреву и допустимой кратковременной перегрузке. *Если проверка покажет перегрев или значительное недоиспользование по тепловому состоянию, то из каталога следует выбрать, соответственно, больший или меньший двигатель и повторить для него по-*

строение нагрузочных диаграмм и проверку. Таким образом, обеспечивается постепенное приближение в определении необходимой номинальной мощности двигателя разрабатываемого электропривода.

Чтобы такие повторения свести к минимуму, проектная практика выработала различные приемы определения расчетных величин. Предварительный выбор двигателя можно сделать по имеющемуся уже работающему аналогу электрифицируемого объекта.

3.3.1. Приемы определения расчетной мощности двигателя

1. При отсутствии же такого аналога приходится использовать нагрузочные диаграммы рабочей машины, то есть рассчитанные статические нагрузки, а динамические - *учитывать соответствующими коэффициентами*. Здесь следует иметь в виду, что в рабочем цикле реального технологического процесса механизма возможны паузы той или иной длительности. Не всегда наличие пауз позволяет относить режим нагрузки двигателя к повторно-кратковременному, все зависит от величины продолжительности включения ПВ. Если $PВ_{зр.} > 70\%$ и $t_{ц} > 10$ мин, то график нагрузочной диаграммы рабочей машины относят к продолжительному перемежающемуся режиму с $PВ_{ст.} = 100\%$. Если же по нагрузочной диаграмме рабочей машины ожидается повторно-кратковременный режим нагрузки двигателя электропривода, то здесь удобно предусмотреть пересчет $M_{расч.рм}$ с $PВ_{зр.}$ (которое, вероятнее всего, будет отличаться от стандартного значения) на ближайшее стандартное $PВ_{ст.} = 15, 25, 40$ или 60% . С учетом сказанного расчетное выражение для момента на валу рабочей машины запишется:

$$M_{расч.рМ} = (1,1 + 1,6)M_{с.ср.} \sqrt{\frac{ПВ_{зр.}}{ПВ_{ст.}}}, \quad (3.55)$$

где $M_{с.ср.} = \frac{\sum_{i=1}^n M_{ci} \cdot t_i}{\sum t_i}$ – среднее значение статического момента за рабочий цикл;

$ПВ_{зр.}$ – продолжительность включения по графику нагрузочной диаграммы РМ;

$ПВ_{ст.}$ – ближайшая стандартная продолжительность включения.

Если $ПВ_{зр.} \cong 100\%$, то умножение на $\sqrt{\frac{ПВ_{зр.}}{ПВ_{ст.}}}$ исключается. Числовой коэффициент в (3.55) берется тем больше, чем резче изменяется статическая нагрузка и чем больше число включений в час должен иметь двигатель.

2. Возможно использование и среднеквадратичного значения статического момента:

$$M_{с.кв.} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n M_{ci}^2 \cdot t_i}{t_{ц}}},$$

которое оказывается выше среднего значения, и через $M_{с.ср.}$ и $M_{с.кв.}$ определяется расчетный момент для предварительного выбора двигателя по следующим, полученным в проектной практике формулам:

$$M_{расч.рМ} = \frac{M_{с.ср.} + M_{с.кв.}}{2} \sqrt{\frac{ПВ_{зр.}}{ПВ_{ст.}}} \quad (3.56)$$

или

$$M_{расч.рм} = \sqrt{M_{с.ср.} \cdot M_{с.кв.}} \cdot \sqrt{\frac{ПВ_{зр.}}{ПВ_{ст.}}} \quad (3.57)$$

3. В электроприводах многих позиционных механизмов статическая нагрузка ничтожна и фактически может быть учтена через КПД РМ, а вся мощность двигателя практически расходуется на преодоление динамической нагрузки при пуско-тормозных включениях. Здесь не представляется возможным использовать расчетные выражения (3.56)-(3.57); **в таких случаях расчетный момент определяется через максимально допустимый момент (или усилие)** по условиям технологии, прочности механизма или нагрузке в аварийной ситуации с учетом перегрузочной способности λ и кратковременного допустимого перегрузочного момента M_{max} выбранного типа двигателя, см. гл. 1.7:

$$M_{расч.рм} = (1,2 \div 1,4) \frac{M_{max}}{\lambda} \sqrt{\frac{ПВ_{зр.}}{ПВ_{ст.}}} \quad (3.58)$$

Расчетная мощность определяется выражением:

$$P_{расч.рм} = M_{расч.рм} \cdot \omega_{рм} = \frac{2\pi}{60} M_{расч.рм} \cdot n_{рм} \quad (3.59)$$

Подчеркнем, что формулы (3.58) - (3.59) дают расчетные значения моментов и мощности на валу исполнительного органа; в таком виде они используются для определения расчетной мощности предварительно выбранного двигателя повторно-кратковременного или перемежающегося режима нагрузки электропривода, как нереверсивного, так и реверсивного, но не управляемого по скорости.

При заданном редукторе, передаточное отношение i и КПД η_p которого известны, определяют скорость вращения двигателя $n = i_p n_{рм}$ и мощность на его валу $P_{расч.д} = \frac{P_{расч.рм}}{\eta_p}$; по этим значениям и выби-

рается ближайший больший двигатель в соответствии со стандартным ПВ из каталога машин повторно-кратковременного режима или продолжительного (перемежающегося) режима, для которого принято $PB=100\%$. Для выбранного двигателя строятся нагрузочные диаграммы с учетом принятого типа электропривода и выполняется его проверка. Не исключено, например, в позиционных механизмах, потребуются уточнение заданного передаточного отношения редуктора или определение его оптимального значения по тем или иным критериям.

3.3.2. Учет управления скоростью

Когда по условиям технологического процесса требуется электропривод, управляемый по скорости, что обычно соответствует режимам нагрузки двигателя S8 или S5, необходимо сосредоточить внимание на следующем:

- двух- или однозонное управление рационально использовать;
- изменением каких параметров управления следует это реализовать.

От этого зависит тип и система принимаемого электропривода, а значит, капитальные и эксплуатационные затраты. Технологические требования к качеству управления ориентируют либо на простейший резисторный электропривод с двигателем постоянного или переменного тока, потребляющим энергию непосредственно от электрической сети, либо на электропривод той или иной степени сложности с различными управляемыми преобразователями электрической энергии. На выбор типа привода существенное влияние может оказать и величина необходимой мощности двигателя.

3.3.2.1. Двухзонное управление скоростью

Как правило, принимают двухзонное управление скоростью для удовлетворения технологических требований к выходным координатам электропривода, а также при стремлении к наиболее полному использованию двигателя по допустимому нагреву в реверсивном ЭП.

Прежде всего, требуется определить рациональную величину номинальной скорости двигателя, которая будет соответствовать его естественной (или основной) механической характеристике. Из анализа условий технологического процесса, с учетом требований к качеству работы (обеспечение необходимых законов изменения или поддержания неизменными тех или иных параметров механической энергии на исполнительном органе механизма) выявляют рациональный закон поведения выходных координат электропривода, а также наиболее значимые для технологического процесса выходные координаты электропривода.

Например, к электроприводам механизмов моталок в прокатном производстве, в бумагоделательной и текстильной промышленности предъявляется требование обеспечения качества укладки слоев материала в рулоне, диаметр которого непрерывно меняется. Или другой пример: к электроприводам механизмов подач токарных, карусельных, расточных станков предъявляется требование обеспечения высокой чистоты обработки деталей независимо от изменения диаметра обработки. Названные требования удовлетворяются управляемым по скорости электроприводом при условии обеспечения постоянства мощности на валу, а значит, при изменении развиваемого момента.

Для электропривода с двигателем независимого возбуждения постоянство мощности обеспечивается выбором в качестве параметра управле-

ния магнитного потока Φ_m (рабочий процесс протекает при его изменении). В таком случае в качестве номинальной выбирается скорость вращения двигателя, соответствующая наименьшей технологической скорости исполнительного органа механизма. Это будет соответствовать номинальному магнитному потоку двигателя, а рабочий диапазон изменения скорости будет располагаться выше естественной (или основной) характеристики. Диапазон изменения скорости от нуля до номинальной при Φ_{mN} , соответствующий изменяющейся мощности, используется в названных электрифицированных механизмах для пуска, а также толчковых наладочных включений и т.п. Электроприводы таких механизмов обычно безредукторные либо редукторные с небольшим передаточным отношением редуктора, а двигатель – с минимально возможной номинальной скоростью, см. § 3.4.2.

В качестве другого примера использования двухзонного управления скоростью можно привести механизмы, в основном требующие постоянства момента (или усилия) на исполнительном органе. Это механизмы передвижения продольно-строгольного станка, перемещения материала толканием (всевозможные сталкиватели, толкатели), а также позиционные механизмы (нажимное устройство прокатного стана и т.п.). Здесь, как правило, зона ослабления магнитного потока используется для управления скоростью обратного хода без нагрузки на валу, чтобы сократить непроизводительное время движения исполнительного органа. Поэтому номинальная скорость двигателя принимается соответствующей рабочей скорости движения исполнительного органа механизма в диапазоне обеспечения постоянства момента (или усилия). В большинстве это редукторные приводы, двигатели которых имеют значительные номинальные скорости, поэтому

может оказаться актуальной задача определения оптимального передаточного отношения редуктора, см. § 3.4.6.

В электроприводах переменного тока двухзонное управление скоростью реализуется применением асинхронных многоскоростных двигателей (с переключением числа пар полюсов) или использованием возможностей амплитудно-частотного управления.

Предварительный выбор двигателя для электропривода с двухзонным управлением скоростью выполняют следующим образом:

- по выражению (3.60) рассчитывается мощность на валу рабочей машины, где n_{PM} (или ω_{PM}) берется минимальной из всех рабочих значений, требуемых технологией при обеспечении постоянства мощности на исполнительном органе; если же по условиям технологии требуется обеспечить постоянство момента, то берется максимальное значение рабочей скорости;

- определяется расчетная мощность:

$$P_{расч.д} = \frac{P_{расч.рм}}{\eta_p}; \quad (3.60)$$

- по $P_{расч.д}$ и n (а для повторно-кратковременного режима с учетом $PВ$) из соответствующего каталога двигателей продолжительного или повторно-кратковременного режима, в котором указывается, помимо n_N , и величина предельно допустимой максимальной скорости n_{max} (по существу отражающей для двигателей независимого возбуждения допустимую степень ослабления магнитного потока), выбирается ближайший больший двигатель, строятся его упрощенные нагрузочные диаграммы и производится проверка в соответствии с гл. 3.5.

3.3.2.2. Однозонное управление скоростью

1. Используют для изменения скорости вниз от естественной (основной) статической характеристики реверсивного или нереверсивного электропривода. С точки зрения полноты использования двигателя по тепловому состоянию это управление осуществляется при постоянстве момента на валу. В резисторных электроприводах это реализуется изменением сопротивлений (в цепи якоря двигателей постоянного тока, в цепи ротора асинхронных двигателей с кольцами), а в электроприводах с управляемыми преобразователями энергии - за счет изменения подводимого к якорю напряжения в электроприводах с двигателями независимого возбуждения или амплитудно-частотным управлением в асинхронных и синхронных электроприводах.

С увеличением диапазона управления скоростью вниз развиваемая мощность уменьшается, поэтому в качестве номинальной должна быть принята скорость двигателя, соответствующая наибольшей рабочей скорости исполнительного органа. Для определения расчетной мощности используют выражение (3.61); из соответствующего каталога выбирают ближайший больший двигатель (при выборе двигателя независимого возбуждения берется двигатель, предназначенный для однозонного управления, для которого не указывается максимально допустимая скорость, а дается только n_N). Далее строятся нагрузочные диаграммы и производится проверка в соответствии с гл. 3.5.

2. Возможно использование однозонного управления в реверсивных электроприводах, когда в рабочем режиме требуется обеспечить постоянство момента на валу, а для обратного холостого хода необходимо повышенная скорость движения. В таком случае ориентируются на реализацию

обратного движения при работе электропривода на естественной (или осевой) механической характеристике, а рабочего (прямого) хода – на искусственной (или регулировочной в замкнутой системе электропривода).

Выбор двигателя производится следующим образом:

- по формуле (3.59) рассчитывается мощность на валу рабочей машины при рабочем ходе с наибольшей скоростью $n_{PM.PP \max}$;
- определяется расчетная мощность:

$$P_{расч.д} = \frac{P_{расч.рм}}{\eta_p} \cdot \frac{n_{рм.об}}{n_{рм.пп \min}} ; \quad (3.61)$$

- по $P_{расч.д}$, $n = i \cdot n_{рм.об}$ и $ПВ$ из соответствующего каталога выбирается ближайший больший двигатель, строятся упрощенные нагрузочные диаграммы, и выполняется проверка см. гл. 3.5.

Необходимо отметить, что принятое однозонное управление в рассмотренном случае (в сравнении с двухзонным) ведет к повышению весогабаритных показателей и недоиспользованию заложенных в двигатель активных материалов.

При разработке электропривода с однозонным управлением также может оказаться актуальной задача определения оптимального передаточного отношения редуктора, (см. § 3.4.6).

Перечисленные практические приемы дают общий подход к определению расчетной мощности двигателя и не исчерпывают все огромное разнообразие методов, используемых в проектной практике, которые изложены в технической литературе относящейся к электрооборудованию конкретных производственных механизмов. Например, имеется большое число рабочих машин, работа которых характеризуется резко переменной ударной нагрузкой и не требует реверсирования движения. К ним могут быть отнесены дробилки, нереверсивные прокатные станы, ковочные ма-

шины, прессы, поршневые насосы и компрессоры. Режимы нагрузки электроприводов таких механизмов эквивалентны режиму S6, а для сглаживания пульсаций нагрузки устанавливают маховики. Здесь определение необходимой мощности двигателя непосредственно связано с оптимальным по стоимости выбором двигателя и маховика.

3.4. К ПОСТРОЕНИЮ УПРОЩЕННЫХ НАГРУЗОЧНЫХ ДИАГРАММ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

3.4.1. Определение временных интервалов нагрузочных диаграмм

Расчет и построение нагрузочных диаграмм двигателя обычно начинают с определения временных интервалов в пределах одного рабочего цикла для его идеализированной тахограммы $\omega = f(t)$ или $n = f(t)$. *Идеализация тахограммы заключается в том, что на интервалах переходных режимов полагают закон изменения скорости линейным, т.е. ускорение постоянно, а значит, динамический момент неизменный.* Кроме того, не учитывают влияние инерционностей электромагнитной цепи.

При заданной производительности механизма можно определить число рабочих циклов в час Z , по которому (при известной продолжительности включения $PВ$, выраженной в относительных единицах) вычисляют время основных интервалов рабочего цикла:

- длительность цикла, с:

$$t_{ц} = \frac{3600}{Z}; \quad (3.62)$$

- длительность включения двигателя в каждом цикле, с:

$$t_p = \frac{3600}{Z} ПВ; \quad (3.63)$$

- длительность паузы, с:

$$t_0 = \frac{3600}{Z}(1 - ПВ); \quad (3.64)$$

- длительность работы с установившейся скоростью, с:

$$t_y = \frac{3600}{Z} ПВ - \sum t_{mn}, \quad (3.65)$$

где $ПВ$ – продолжительность включения, для перемежающихся режимов нагрузки $ПВ = 1$;

$\sum t_{mn}$ – сумма отрезков времени переходных процессов в пределах рабочего цикла; включает время пуска t_n , торможения t_m , разгона $t_{раз}$, замедления $t_{зам}$.

Для определения времени переходных процессов, необходимо знать момент инерции системы и задаться величиной динамического момента либо ускорения, которое может быть ограничено. Суммарный момент инерции системы электрифицированного механизма, сосредоточенный на валу двигателя:

$$J_{\Sigma} = J_{д} \cdot k_{д} \cdot \delta + J', \quad (3.66)$$

где $J_{д}$ – момент инерции ротора (якоря) двигателя, $кг \cdot м^2$;

$k_{д}$ – количество двигателей, например, 2 при двухдвигательном приводе;

δ – коэффициент, учитывающий через $J_{эд}$ моменты инерции элементов (полумуфта, тормозного шкива и др.) на валу двигателя, а также моменты инерции элементов редуктора, приведенные к валу двигателя, $\delta = 1,05 \div 1,2$;

J' – приведенный к валу двигателя момент инерции со стороны РМ $\left[\text{кг} \cdot \text{м}^2 \right]$; определяется суммой, вычисленной по (3.35) или (3.36).

Для обеспечения необходимого динамического момента в переходном режиме $M_{\text{дин.}} = M_{\text{эм}} + M'_c$, имея приведенной к валу двигателя статическую нагрузку M'_c , задаются пусковым и тормозным моментами двигателя. Конкретная величина этого момента определяется в зависимости от типа выбранного двигателя и разрабатываемого электропривода:

- в резисторном электроприводе с ДПТ или АДФР со ступенчатым изменением сопротивлений главной цепи руководствуются предварительно построенной пуско-тормозной диаграммой в координатах механической характеристики $\omega = f(M_{\text{эм}})$, из которой вычисляют средние значения пусковых и тормозных моментов $M_{n.\text{ср.}}$ и $M_{m.\text{ср.}}$ между максимальным $M_1 \leq \lambda \cdot M_N$ и переключающим $M_2 > M_c$:

$$M_{\text{эм.ср.}} = \frac{M_1 + M_2}{2};$$

- в приводах постоянного тока по системе «Г-Д» принимают:

$$M_n = (1,6 \div 1,8)M_N; \quad M_m = (1,2 \div 1,4)M_N;$$

- в приводах постоянного тока по системе «ТП-Д» принимают:

$$M_n = M_m = (1,7 \div 2,0)M_N,$$

где развиваемый пусковой или тормозной моменты обеспечиваются уставкой задатчика интенсивности; при одинаковой уставке на пуск и торможение ускорение и замедление, а также динамические моменты будут одинаковыми, что в силу $M_c = f(\text{sign } \omega)$ при реверсе приведет к различным значениям $M_{\text{ЭМП}}$ и $M_{\text{ЭМТ}}$ и потребует проверки на допустимую перегрузку.

Расчет времени переходных процессов t_{mn} в секундах осуществля-
ют по заданной скорости установившегося движения исполнительного ор-
гана механизма, например V_{PM_i} $\left[\frac{\text{м}}{\text{мин}} \right]$, либо по соответствующей
скорости вала двигателя ω_i $\left[\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right]$, либо по частоте вращения
 n_i $\left[\frac{\text{об}}{\text{мин}} \right]$.

Ориентируясь на уравнение движения, когда J'_Σ , $M_{эм}$ и M_c приня-
ты неизменными на интервале времени переходного движения, получаем:

- при пуске и торможении:

$$t_{mn} = \frac{J'_\Sigma \cdot \omega}{M_{эм} - M_c} = \frac{2\pi \cdot J'_\Sigma \cdot n}{60 \cdot (M_{эм} - M_c)} = \frac{J'_\Sigma \cdot V_{PM} \cdot i}{60 \cdot (M_{эм} - M_c) \cdot k_n}, \quad (3.67)$$

- при разгоне и замедлении для электроприводов, управляемых по
скорости:

$$t_{mn} = \frac{J'_\Sigma \cdot (\omega_1 - \omega_2)}{M_{эм} - M_c} = \frac{2\pi \cdot J'_\Sigma \cdot (n_1 - n_2)}{60 \cdot (M_{эм} - M_c)} = \frac{J'_\Sigma \cdot (V_{PM1} - V_{PM2}) \cdot i}{60 \cdot (M_{эм} - M_c) \cdot k_n}, \quad (3.68)$$

где i – передаточное отношение редуктора;

k_n – коэффициент приведения, равный ρ или $\frac{h}{2\pi}$ в зависимости
от типа передачи (см. § 3.2.1).

Используя (3.67) и (3.68), не следует упускать из внимания возмож-
ные изменения знака $M_c = \text{sign } \omega$ в соответствии с технологией на разных
интервалах движения, что при принятом постоянстве пусковых и тормоз-
ных моментов $M_{эм}$ приведет к изменению динамических моментов, а зна-
чит, и ускорений или замедлений движения.

**Если не известно число циклов в час, а прямо или косвенно задан
путь движения**, то этот путь и заданную скорость установившегося дви-

жения принимают в качестве исходных для построения нагрузочных диаграмм. Например, при известном ходе стола продольно строгального станка и длине обрабатываемой детали, а также заданных расстояниях подхода детали к резцу и отхода детали от резца выясняется количество деталей, устанавливаемых на стол станка. Сумму названных размеров с учетом допуска на расстояние между устанавливаемыми деталями принимают за рабочее перемещение стола $\Sigma L \leq L_{\max}$, где L_{\max} - максимальный ход стола. Для реверсивного механизма в рабочий цикл должно входить время прямого хода $t_{np.}$ и время обратного хода $t_{об.}$:

$$t_y = t_{np.} + t_{об.}$$

Чтобы вычислить это время, необходимо определить в пределах одного цикла все отрезки времени пуска-тормозных и регулировочных включений двигателя в соответствии с технологическим процессом.

Конкретный интервал времени переходного процесса при заданных значениях пути (или задавшись ими): при пуске $L_{PM.П}$ (или $\alpha_{PM.П}$), при торможении $L_{PM.Т}$ (или $\alpha_{PM.Т}$) - и известной скорости установившегося движения V_{PM} (или ω_{PM}) определяется решением геометрической задачи.

На рис. 3.14 представлены нагрузочные диаграммы ЭП и РМ, где время пуска t_n больше времени торможения t_m , время движения вперед $t_{np} = t_n + t_y + t_m$. На участках переходных режимов движения t_n и t_m нагрузочные диаграммы $V_{PM}(t)$ и $\omega_{ЭЦ}(t)$ различаются по площади; им соответствуют различные углы наклона к оси абсцисс, что свидетельствуют о различных значениях ускорений и замедлений:

$$tg\gamma_{PM.П} = \frac{V_{PM.У}}{t_n} = a_{PM.П} < tg\gamma_{PM.Т} = \frac{V_{PM.Т}}{t_m} = a_{PM.Т};$$

$$\operatorname{tg} \gamma_{\text{ЭД.П}} = \frac{\omega_{\text{ЭД.У}}}{t_n} = \varepsilon_{\text{ЭД.П}} < \operatorname{tg} \gamma_{\text{ЭД.Т}} = \frac{\omega_{\text{ЭД.Т}}}{t_m} = \varepsilon_{\text{ЭД.Т}},$$

где $V_{\text{РМ.У}} = V_{\text{РМ.Т}} = \omega_{\text{РМ}} k_n,$

$$\omega_{\text{ЭД.У}} = \omega_{\text{ЭД.Т}} = \omega_{\text{РМ}} i.$$

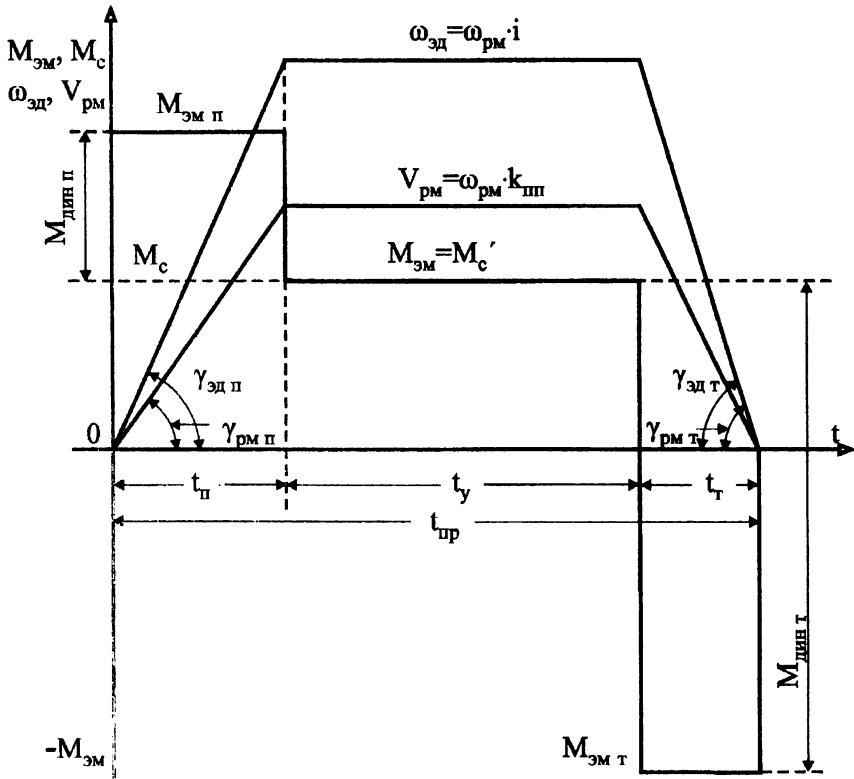


Рис. 3.14

Поскольку площади треугольников рис. 3.14, ограниченные идеализированными тахограммами пуска и торможения, выражают соответствующий путь:

$$L_{PM.П} = \frac{V_{PM.Y}}{2} \cdot t_n; \quad L_{PM.T} = \frac{V_{PM.T}}{2} \cdot t_m;$$

$$\alpha_{ЭД.П} = \frac{\omega_{ЭД.Y}}{2} t_n; \quad \alpha_{ЭД.T} = \frac{\omega_{ЭД.T}}{2} t_m,$$

то время пуска и торможения вычисляется следующим образом:

$$t_{nn} = 2 \frac{L_{PM}}{V_{PM}} = 2 \frac{\alpha_{PM}}{\omega_{PM}} = 2 \frac{\alpha_{ЭД}}{\omega_{ЭД}}. \quad (3.69)$$

Желательно при этом определить развиваемые двигателем ускорения:

$$\varepsilon_{ЭД} = \frac{\omega_{ЭД}}{t_{nn}} \quad (3.70)$$

и убедиться в допустимости развиваемых двигателем моментов.

Если электропривод реверсивный, то нагрузочная диаграмма строится для прямого (рабочего) хода и обратного (холостого) хода, который обычно выполняется на повышенной скорости. Временем цикла считается $t_{ц} = t_{np.} + t_0 + t_{об.}$, где t_0 – время возможной паузы.

Наиболее распространенные ошибки в построении нагрузочных диаграмм. Частые ошибки при расчете и построении нагрузочных диаграмм возникают из-за того, что не учитываются знаки развиваемых двигателем моментов в двигательном и тормозных режимах, а также динамических моментов, которые должны правильно соотноситься с направлением движения системы.

Причиной ошибок оказывается и невнимательное отношение к размерности заданных величин, которая часто отличается от системы СИ, а также неумение переводить величины из одной системы единиц в другую. Для исключения таких ошибок необходимо использовать справочную ли-

температуру, в которой проводятся соотношения между различными единицами измерения. Рассмотрим некоторые примеры:

1. Если линейная скорость V движения исполнительного органа задана в $\frac{\text{м}}{\text{мин}}$, а требуется вычислить угловую скорость вращения двигателя ω в $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$, то V необходимо уменьшить в 60 раз:

$$\omega \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right] = \frac{V \cdot \left[\frac{\text{м}}{\text{мин}} \right]}{60 \cdot \left[\frac{\text{с}}{\text{мин}} \right]} \cdot \frac{i}{\rho \left[\frac{\text{м}}{\text{рад}} \right]} \quad (3.71)$$

Если линейная скорость V задана в $\frac{\text{м}}{\text{с}}$, то

$$\omega \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right] = V \left[\frac{\text{м}}{\text{с}} \right] \cdot \frac{i}{\rho \left[\frac{\text{м}}{\text{рад}} \right]} \quad (3.72)$$

Если же определяется частота вращения двигателя n в $\frac{\text{об}}{\text{мин}}$:

$$\omega \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right] = \frac{2 \cdot \pi \left[\frac{\text{рад}}{\text{об}} \right] \cdot n \left[\frac{\text{об}}{\text{мин}} \right]}{60 \left[\frac{\text{с}}{\text{мин}} \right]} \quad (3.73)$$

то из равенства выражений (3.72) и (3.73) определяют n при $V \left[\frac{\text{м}}{\text{мин}} \right]$:

$$n \left[\frac{\text{об}}{\text{мин}} \right] = \frac{V \left[\frac{\text{м}}{\text{мин}} \right] \cdot i}{2 \cdot \pi \left[\frac{\text{рад}}{\text{об}} \right] \cdot \rho \left[\frac{\text{м}}{\text{рад}} \right]} \quad (3.74)$$

а при V в $\frac{\text{м}}{\text{с}}$ из равенства выражений (3.72) и (3.73) следует:

$$n \left[\frac{\text{об}}{\text{мин}} \right] = \frac{60 \left[\frac{\text{с}}{\text{мин}} \right] \cdot V \left[\frac{\text{м}}{\text{с}} \right] \cdot i}{2 \cdot \pi \left[\frac{\text{рад}}{\text{об}} \right] \cdot \rho \left[\frac{\text{м}}{\text{рад}} \right]}. \quad (3.75)$$

2. При использовании литературы старых изданий можно встретить такие единицы измерения моментов, как тонно-метры, килограммо-метры; в таких случаях требуется перевод в ньютон-метры, который выполняется с использованием следующего соотношения:

$$F_{[T]} = 10^3 F_{[кг]} = 9,81 \left[\frac{\text{м}}{\text{с}^2} \right] 10^3 F_{[кг]} = 9,81 \cdot 10^3 [\text{Н}]. \quad (3.76)$$

Представив момент M в виде произведения силы F на плечо ρ или радиус преобразования линейного движения во вращательное, получим следующую запись:

$$M_{[T \cdot м]} = 10^3 \cdot F \cdot \rho_{[кг \cdot м]} = 9,81 \cdot 10^3 \cdot F \cdot \rho_{[Н \cdot м]}. \quad (3.77)$$

3. В старых изданиях вместо момента инерции J часто использовали понятие махового момента GD^2 , которые в системе СИ связаны следующим образом:

$$J \left[\text{кг} \cdot \text{м}^2 \right] = m_{[кг]} \cdot \rho^2 \left[\text{м}^2 \right] = \frac{G_{[Н]}}{9,81 \left[\frac{\text{м}}{\text{с}^2} \right]} \cdot \frac{D^2 \left[\text{м}^2 \right]}{4}. \quad (3.78)$$

Если требуется через маховый момент GD^2 , заданный в старой системе единиц $\left[\text{кг} \cdot \text{м}^2 \right]$ выразить момент инерции J в системе СИ, необходимо

вес G $[\text{кг}]$ умножить на ускорение тяготения $g = 9,81 \left[\frac{\text{м}}{\text{с}^2} \right]$, предста-

вив тем самым G в ньютонах:

$$J \left[\text{кг} \cdot \text{м}^2 \right] = \frac{G [\text{кг}] \cdot 9,81 \left[\frac{\text{м}}{\text{с}^2} \right] \cdot D^2 \left[\text{м}^2 \right]}{9,81 \left[\frac{\text{м}}{\text{с}^2} \right]} = \frac{GD^2 \left[\text{кг} \cdot \text{м}^2 \right]}{4}. \quad (3.79)$$

3.4.2. Оптимальная величина номинальной скорости двигателя

Заданы конкретные конструктивные и технологические параметры РМ, известны статические нагрузки F_{PM} или M_{PM} , инерционные массы РМ и обрабатываемого материала $m_{ин}$, то необходимые производительность и качество движения такой системы «ЭП-ИОРМ» будут реализованы только при определенных динамических показателях электропривода, прежде всего – динамических параметрах выбираемого электродвигателя.

Если для сохранения величины номинальной мощности требуется увеличение номинального момента, то решение вопроса имеет два варианта:

- либо выбирают тихоходный двигатель с увеличенным числом пар полюсов p и, соответственно, с увеличением $k \cdot D^2 \cdot L$; в таком случае следует стремиться к безредукторному приводу;

- либо выбирается быстроходный двигатель с $p \approx 1 \div 3$ и используется привод с понижающим редуктором; для обеспечения максимально возможного быстродействия определяется оптимальное значение передаточного отношения редуктора i_{opt} , (см. § 3.4.6).

Окончательное решение принимают на основе технико-экономического сравнения вариантов с учетом динамических качеств электропривода, минимальной стоимостью двигателя и редуктора.

Заметим, что в понижающих скорость редукторных электроприводах после приведения к валу двигателя статические нагрузки уменьшаются в i раз, а динамические уменьшаются в i^2 раз, где i – передаточное отношение понижающего редуктора.

Таким образом, *в распоряжении разработчика электропривода остаются: определение рационального момента инерции якоря (ротора) двигателя J_{δ} из каталога электрических машин и проверка наиболее удовлетворяющего поставленной задаче передаточного отношения редуктора i по определенным критериям.*

Полагая систему с абсолютно жесткими кинематическими связями, в которой будем считать неизменными моменты двигателя $M_{\text{эм}}$ и нагрузки $M_{\text{рм}}$, моменты инерции J_{δ} и $J_{\text{рм}}$, а также передаточное отношение редуктора i . Из уравнения движения системы выразим время пуска (торможения):

$$t_{nn} = \frac{\left[\delta \cdot J_{\text{д}} + J_{\text{рм}} \cdot \left(\frac{1}{i} \right)^2 \right] \cdot \omega_N}{M_{\text{эм}} - M_{\text{рм}} \cdot \frac{1}{i}} = \frac{\left[\delta \cdot J_{\text{д}} \cdot i^2 + J_{\text{рм}} \right] \cdot \omega_{\text{рм.н}}}{M_{\text{эм}} - M_{\text{рм}}}, \quad (3.80)$$

где δ – коэффициент, учитывающий моменты инерции элементов на валу двигателя.

Развиваемый двигателем электромагнитный момент $M_{\text{эм}}$ можно представить через номинальное значение $M_{\text{бн}}$ и его кратность номинальному λ ,

полагая $M_{\text{эм}} \cong \lambda M_{\text{бн}}$, раскрыть $i = \frac{\omega_N}{\omega_{\text{рм.н}}}$, и преобразовать:

$$t_{nn} = \frac{\left[\delta \cdot J_D + J_{PM} \cdot \left(\frac{\omega_{PM,N}}{\omega_N} \right)^2 \right] \cdot \omega_N}{M_{эм} - M_{PM} \cdot \frac{\omega_{PM,N}}{\omega_N}} = \frac{\delta \cdot J_D \cdot \omega_N^2 + J_{PM} \cdot \omega_{PM,N}^2}{M_{эм} \omega_N - M_{PM} \cdot \omega_{PM,N}} =$$

$$= 2 \frac{\delta \cdot W_{K,D} + W_{K,PM}}{\lambda \cdot P_{2N} + P_{PM}} = 2 \frac{\delta \cdot W_{K,D} + W_{K,PM}}{P_{дин}}, \quad (3.81)$$

где $W_{K,D}$ – запасы кинетической энергии, сосредоточенной на валу двигателя при номинальной скорости вращения;

$W_{K,PM}$ – запасы кинетической энергии, сосредоточенной на валу рабочей машины при номинальной скорости вращения;

$P_{дин}$ – средняя динамическая мощность за пуск (торможение).

Полученное выражение (3.81) показывает, что время переходного процесса определяется отношением удвоенного запаса кинетической энергии в системе электрифицированного механизма к средней динамической мощности. Когда механизм задан, то есть условиями технологии заданы его рабочая скорость и его массогабаритные показатели, через которые определяется запас кинетической энергии на рабочем органе, то минимально возможное время переходного процесса всецело оказывается связанным с наименьшим запасом кинетической энергии ротора (якоря) двигателя, который пропорционален произведению $J_D \cdot \omega_N^2$. Весогабаритные показатели двигателя при заданной мощности зависят от его номинальной скорости, см. гл. 1.6; качественная картина влияния номинальной скорости на запас кинетической энергии $W_K(n_N)$, вес $G(n_N)$ и момент инерции $J_D(n_N)$ в различных конструктивных исполнениях двигателей одинаковой мощности показана на рис. 3.15. В $W_K(n_N)$ заметен минимум

запаса кинетической энергии. Очевидно, используя данные каталога, можно построить такие зависимости для двигателей на различные мощности, что позволит при заданной мощности находить значения номинальных скоростей, близких к оптимальному значению.

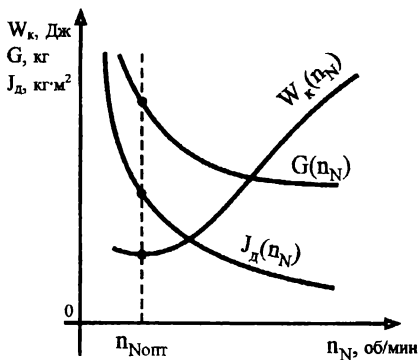


Рис. 3.15

Анализ весогабаритных и энергетических характеристик в функции широкого диапазона изменения номинальной частоты вращения n_N прежде всего указывает на то, что n_N соответствует машинам одной серии с различным числом пар полюсов p .

Высокоскоростные двигатели (с малым p) при неизменной мощности имеют снижение веса G_D и момента инерции J_D , но при высокой n_N обладают большим запасом кинетической энергии

$W_K = J_D \cdot \frac{\omega_{dN}^2}{2} = J_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{2\pi}{60} \cdot n_{dN} \right)^2$, что противоречит условию быстрейшего действия (3.81). Снижение весогабаритных показателей связано здесь с уменьшением произведения $k \cdot D^2 \cdot L$ (см. гл. 1.6), а значит и $J_{ЭД}$. Соответственно уменьшается и номинальный электромагнитный момент $M_{эмN}$ из-за сокращения активных габаритных размеров якоря.

Низкоскоростные двигатели (с большим p) обладают повышенными весогабаритными параметрами, но при неизменной номинальной мощности, повышенном весе G и увеличенном моменте инерции J_D , развивают

повышенный электромагнитный момент $M_{эм}$ и обладают малым запасом кинетической энергии $W_{кин}$, что определяет их быстродействие.

Связь энергетических показателей с геометрическими соотношениями и электромеханическими свойствами при конструировании ротора (якоря) учитывается разработчиками проектных и производственных организаций при создании двигателей, предназначенных для частых пускотормозных и регулировочных включений. Это специальные двигатели краново-металлургических исполнений, одно- двух- трехякорные двигатели большой мощности для электроприводов металлургических производств [19, 20].

При разработке быстродействующего электропривода для конкретных условий работы большое значение имеет правильный выбор типа двигателя соответствующего режима нагрузки и системы ЭП. Прежде всего, необходимо ориентироваться на современные двигатели, в том числе и специальных исполнений, которые отличаются лучшими динамическими показателями. Шкала величин номинальной мощности и моментов инерции дискретна. Поэтому желаемый результат в быстродействии и энергетических показателях можно получить, используя многодвигательный электропривод. Например, в двухдвигательном приводе номинальная мощность обеспечивается двумя двигателями половинной мощности при той же номинальной скорости, а их суммарный момент инерции снижается примерно на 20%, что обеспечивает не только снижение запаса кинетической энергии и экономичность при эксплуатации, но и 50% резерв.

Рассмотрим технологию изменения соотношений в геометрических размерах ротора (якоря) при условии сохранения массы и поверхности активных материалов.

Исходя из выражения (1.19):

$$M_N = \frac{P_N}{\omega_N} = k \cdot D^2 \cdot L,$$

будем полагать, что при сохранении P_N и ω_N неизменными, M_N также останется величиной постоянной, если для снижения величины $J_{ЭД}$ уменьшать диаметр D и увеличивать L ротора (якоря).

1. Масса m активной части ротора (якоря):

$$m = \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} \cdot L_1 \cdot \gamma = \frac{\pi \cdot D_2^2}{4} \cdot L_2 \cdot \gamma = Const, \quad \text{кг},$$

откуда

$$L_2 = \frac{D_1^2}{D_2^2} \cdot L_1, \quad (3.82)$$

где D_1 – исходный диаметр;

L_1 – исходная длина;

D_2 – диаметр после изменения, $D_1 > D_2$;

L_2 – длина после изменения, $L_1 < L_2$;

γ – плотность материала, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

2. Площадь S активной поверхности ротора (якоря) равна $Const$:

$$S = \pi \cdot D_1 \cdot L_1 = \pi \cdot D_2 \cdot L_2,$$

откуда

$$L_2 = \frac{D_1}{D_2} \cdot L_1. \quad (3.83)$$

3. Момент инерции $J_{Д1}$ ротора (якоря) исходный:

$$J_{Д1} = m \cdot \rho_1^2 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L_1 \cdot \gamma \cdot \frac{D^2}{4} = \frac{\pi \cdot D^4}{16} \cdot L_1 \cdot \gamma,$$

где $\rho_1^2 = \frac{D_1^2}{4}$ – квадрат исходного радиуса инерции ротора (якоря).

Момент инерции J_{D2} ротора (якоря) после изменения геометрических соотношений и $m - Const$:

$$J_{D2} = m \cdot \rho_2^2 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L_2 \cdot \gamma \cdot \frac{D^2}{4} = \frac{\pi \cdot D^4}{16} \cdot L_2 \cdot \gamma,$$

где $\rho^2 = \frac{D^2}{4}$ – квадрат соответствующего радиуса инерции.

Соотношения между моментами инерции:

$$\frac{J_{D2}}{J_{D1}} = \frac{D^4 \cdot L_2}{D^4 \cdot L_1}. \quad (3.84)$$

Выбор рационального решения не может быть связан с неограниченным увеличением длины L_2 из-за несоизмеримости ее с уменьшением диаметра D_2 . Сокращение диаметра и увеличение длины ротора (якоря) сопряжено с конструктивными сложностями выполнения обмотки, особенно закладки проводников и их закрепления в пазах якоря ДПТ. В этом заключается первый и основной критерий ограничения D_2 и увеличения I_2 .

С другой стороны, разработчики электрических машин учитывают, что объем и масса активной части ротора (якоря) определяют магнитную среду энергопреобразования и развиваемый электромагнитный момент, которые пропорциональны произведению $D_2 \cdot L$. Кроме того, известно, что каждый квадратный сантиметр активной поверхности статора (якоря) обеспечивает электромагнитное усилие порядка пяти ньютонов.

Используя соотношения (3.83) и (3.84) можно записать критерии в соотношениях моментов инерции и диаметров ротора (якоря):

- при сохранении активной массы $m = Const$:

$$\frac{J_2}{J_1} = \frac{D_2^4}{D_1^4} \cdot \frac{D_1^2}{D_2^2} = \frac{D_2^2}{D_1^2};$$

- при сохранении активной поверхности $S = Const$:

$$\frac{J_2}{J_1} = \frac{D_2^4}{D_1^4} \cdot \frac{D_1}{D_2} = \frac{D_2^3}{D_1^3},$$

которые позволяют разработчикам электрических машин найти оптимальное конструктивное решение с учетом удобства исполнения обмоток ротора (якоря).

3.4.3. Пути повышения производительности РМ

Такая задача обычно связана с необходимостью увеличения интенсификации технологических процессов механизированных производств, когда лимитирующими остаются прочностные параметры РМ и обрабатываемых материалов, а ЭД, если потребуется, выбирается другой. Требуется повышение производительности системы «ЭД-ИОРМ». В таком случае повышение производительности может быть достигнуто не только путем сокращения времени переходных режимов t_n , t_m , t_p и t_o , но и сокращением времени установившегося движения $t_{пр.в}$ и $t_{об.н}$, то есть увеличением $V_{РМ.пр}$ и $V_{РМ.об}$. В общем случае путь перемещения $L_{РМ}$ задан технологией или габаритами РМ и численно равен площади, ограниченной тахограммой $V_{РМ}(t)$:

- при линейном движении ИОРМ:

$$L_{PM} = \int_0^{t_y} V_{PM} dt;$$

- для вращательного движения вала ЭД:

$$\alpha_{PM} = \int_0^{t_y} \omega_{ЭД} dt.$$

Ориентируясь на рассмотренный выше пример, рис. 3.14, время рабочего хода t_{np} определяется решением геометрической задачи через вычисление площади, ограниченной тахограммами, которое характеризует соответствующий путь:

$$\text{- по } V_{PM}(t) \quad L_{PM} = \frac{t_y + t_y}{2} V_{PM,y}; \quad (3.85)$$

$$\text{- по } \omega(t) \quad \alpha_{ЭД} = \frac{t_y + t_y}{2} \omega_{ЭД,y}. \quad (3.86)$$

При одинаковом основании t_y тахограмм РМ и ЭД можно расписать равные и идентичные выражения для t_n и t_m рабочей машины и двигателя:

- при установившемся движении:

$$t_y = t_y - t_n - t_m; \quad (3.87)$$

- при пуске:

$$t_n = \frac{V_{PM,y}}{a_{PM,п}} = \frac{\omega_{ЭД,y}}{\varepsilon_{ЭД,п}}; \quad (3.88)$$

- при торможении:

$$t_m = \frac{V_{PM,y}}{a_{PM,т}} = \frac{\omega_{ЭД,y}}{\varepsilon_{ЭД,т}}, \quad (3.89)$$

где $V_{PM,y}$ и $\omega_{ЭД,y}$ – установившиеся скорости исполнительного органа

PM $\left[\frac{\text{м}}{\text{с}} \right]$ и вала двигателя $\left[\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right]$;

$a_{PM.П}$ и $a_{PM.Т}$ – линейные ускорения исполнительного органа PM при пуске и торможении $\left[\frac{\text{м}}{\text{с}^2} \right]$, определяемые тангенсами соответствующих углов рис. 3.14,
 $a_{PM} = \text{tg} \gamma_{PM}$;

$\varepsilon_{ЭД.П}$ и $\varepsilon_{ЭД.Т}$ – угловые ускорения вала двигателя при пуске и торможении $\left[\frac{\text{рад}}{\text{с}^2} \right]$, также определяемые как
 $\varepsilon = \text{tg} \gamma_{Д}$.

Используя записанные выше выражения, после их преобразования получим:

$$L_{PM} = \left(t_{\psi} - \frac{V_{PM.У}}{2a_{PM.П}} - \frac{V_{PM.У}}{2a_{PM.Т}} \right) V_{PM.У};$$

$$\alpha = \left(t_{\psi} - \frac{\omega_{ЭД.У}}{2\varepsilon_{ЭД.П}} - \frac{\omega_{ЭД.У}}{2\varepsilon_{ЭД.Т}} \right) \omega_{У},$$

и перепишем эти выражения относительно времени при движении «вперед»:

$$t_{\psi} = \frac{L_{PM}}{V_{PM.У}} + \frac{V_{PM.У}}{2} \left(\frac{1}{a_{PM.П}} + \frac{1}{a_{PM.Т}} \right);$$

$$t_{\psi} = \frac{\alpha}{\omega_{ЭД.У}} + \frac{\omega_{ЭД.У}}{2} \left(\frac{1}{\varepsilon_{ЭД.П}} + \frac{1}{\varepsilon_{ЭД.Т}} \right).$$

Поскольку условиями технологии задан путь движения L_{PM} , то для обеспечения максимально возможного быстродействия при известных ус-

ловиях статического сопротивления движению F_{PM} и инерционных масс m_{PM} , противодействующих изменению скорости движения, требуется определить условия минимального времени $t_{np, min}$. Для этого необходимо взять производную от t_y по $V_{PM, y}$ и приравнять ее нулю:

$$\frac{dt_y}{dV_{PM, y}} = 0 = -\frac{L_{PM}}{V_{PM, y}^2} + \frac{a_{PM, П} + a_{PM, Т}}{2a_{PM, П} \cdot a_{PM, Т}};$$

$$\frac{dt_y}{d\omega_{ЭД, y}} = 0 = -\frac{\alpha_{ЭД}}{\omega_{ЭД}^2} + \frac{\varepsilon_{ЭД, П} + \varepsilon_{ЭД, Т}}{2\varepsilon_{ЭД, П} \cdot \varepsilon_{ЭД, Т}},$$

откуда установившиеся скорости движения рабочего органа и вала двигателя:

$$V_{PM, y} = \sqrt{\frac{2L_{PM} \cdot a_{PM, П} \cdot a_{PM, Т}}{a_{PM, П} + a_{PM, Т}}}; \quad (3.90)$$

$$\omega_{ЭД, y} = \sqrt{\frac{2\alpha_{ЭД} \cdot \varepsilon_{ЭД, П} \cdot \varepsilon_{ЭД, Т}}{\varepsilon_{ЭД, П} + \varepsilon_{ЭД, Т}}}. \quad (3.91)$$

Аналогично решается задача и для обратного хода в реверсивных электроприводах.

3.4.4. Минимизация времени технологического цикла

В основном это связано с разработкой электроприводов позиционных механизмов: подачи в станках, нажимных устройств в прокатных станках и т.п., что вызывается необходимостью обеспечения наименьших углов поворота вала ЭД при пуске и торможении с последующей точной остановкой ИОРМ. Актуальность решения такой задачи на определенных интервалах движения системы приводит к исключению времени устано-

вившегося движения, то есть к замене трапецидальной тахограммы на треугольную; тогда через приведенные выше выражения можно получить:

$$\begin{aligned}
 t_{y \min} &= 2 \sqrt{\frac{L_{PM} \cdot (a_{PM.П} + a_{PM.Т})}{2a_{PM.П} \cdot a_{PM.Т}}} = 2 \frac{S_{PM}}{V_{PM.m}} = \\
 &= 2 \sqrt{\frac{\alpha(\varepsilon_n + \varepsilon_m)}{2\varepsilon_n \varepsilon_m}} = 2 \frac{\alpha}{\omega_{ЭД.m}}. \quad (3.92)
 \end{aligned}$$

Полученные уравнения описывают двухпериодные тахограммы, со-

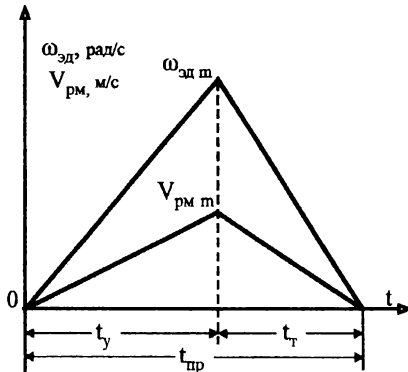


Рис. 3.16

стоящие из пуска и торможения, рис. 3.16, в чем можно убедиться чисто геометрически: путь равный площади треугольного графика скорости, определяется половиной произведения основания на высоту. В рассматриваемом случае пути проходимые валом ЭД и ИОРМ, равны площадям треугольников соответствующих тахограмм с одина-

ковыми основаниями $t_{нр}$ и различными высотами $V_{PM.m}$ и $\omega_{ЭД.m}$.

С другой стороны, исходя из уравнения движения, угловой путь поворота вала ЭД, например, при пуске определяется:

$$\alpha_n = \int_0^{t_n} \omega \cdot dt = \frac{J_{\Sigma}}{M_{дин}} \int_0^{\omega_m} \omega \cdot d\omega = \frac{J_{\Sigma} \cdot \omega_m^2}{2 \cdot M_{дин}} = \frac{W_K}{M_{дин}}, \quad (3.93)$$

где $dt = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{M_n - M_c}$ — из уравнения движения;

$M_{дин} = M_n - M_c$ — постоянный динамический момент.

Представленное выражение указывает на то, что наименьший угол поворота вала ЭД за время пуска реализуется при минимальном запасе кинетической энергии W_K в системе «ЭД-ИОРМ». При заданных рабочих параметрах РМ минимальный путь вала ЭД в переходном процессе обеспечивается наименьшим значением момента инерции якоря (ротора) двигателя $J_{ЭД}$.

3.4.5. Учет допустимых ускорений движения

Если условия технологического процесса ограничивают ускорения при пуско-тормозных включениях (например, для исключения проскальзывания металла на рольганге, либо для избежания нежелательных физиологических ощущений у пассажиров лифтов и т.п.), то величины пусковых и тормозных моментов двигателя рассчитываются по допустимым ускорениям:

$$\varepsilon_{\partial on} = \left(\frac{d\omega}{dt} \right)_{\partial on} = \frac{M_{эм} - M_c}{J_{\Sigma}} = a_{\partial on} \frac{i}{k_{nn}}, \quad (3.94)$$

откуда допустимый электромагнитный момент при пуске, торможении или управлении скоростью

$$M_{эм,\partial on} = J_{\Sigma} \cdot \varepsilon_{\partial on} \pm M_c = J_{\Sigma} \cdot a_{\partial on} \frac{i}{k_{nn}} \pm M_c \leq \lambda \cdot M_N, \quad (3.95)$$

где «+» – соответствует пуску или разгону;

«-» – торможению или замедлению;

k_{nn} – коэффициент приведения формы движения, см. § 3.2.1;

$a_{\partial on}$ – допустимое линейное ускорение на исполнительном органе РМ, которое обычно и ограничивается условиями технологии. Например, для рольганга можно вычислить

$a_{\text{дон}} = \mu_{\sigma} \cdot g$, где μ_{σ} - коэффициент трения при проскальзывании проката; $g = 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ - ускорение тяготения.

Далее, используя (3.67) и (3.68), определяют время переходного процесса $t_{\text{нп}}$ на интервалах пуска, торможения, управления скоростью. Через рассчитанные отрезки времени переходных режимов находят соответствующие пути движения рабочего органа:

-при пуске и торможении:

$$L_{PM_{\text{н/т}}} = \frac{V_{PM} \cdot t_{\text{н/т}}}{2}; \quad (3.96)$$

- при разгоне и замедлении:

$$L_{PM_{\text{раз/зам}}} = \frac{(V_{PM1} - V_{PM2}) \cdot t_{\text{раз/зам}}}{2}. \quad (3.97)$$

Пути установившегося движения с той или иной заданной (или принятой) скоростью определяются исключением из полного расстояния (например расстояние подхода детали к резцу при одной скорости, длины обрабатываемой детали при другой скорости и т.п.) пути пуско-тормозных и регулировочных включений. Это выполняется для прямого (рабочего) и обратного хода исполнительного органа РМ. В результате найденные пути установившегося движения с конкретными скоростями позволяют рассчитать соответствующие отрезки времени установившегося движения:

$$t_y = \frac{S_y}{V_y} = \frac{\alpha_y}{\omega_y}; \quad (3.98)$$

сумма которых при прямом и обратном ходе позволяет определить $t_{\text{нп}}$, $t_{\text{обр}}$ и t_y .

Если требуется, то по выражениям, аналогичным (3.96) и (3.97), определяют соответствующий угловой путь вала ЭД $\alpha_{эд}$ в радианах или $N_{эд}$ в оборотах.

3.4.6. Оптимальное передаточное отношение редуктора

При заданной кинематике и известном передаточном отношении редуктора через требуемую скорость движения рабочего органа определяется величина номинальной скорости двигателя. Чтобы выбираемый двигатель наиболее полно соответствовал требованиям динамики, предъявляемым к электрифицированному механизму со стороны технологического процесса, необходимо удовлетворение условия, выраженного в (3.91). Последнее, в свою очередь, может вызвать необходимость корректировки заданной величины передаточного отношения

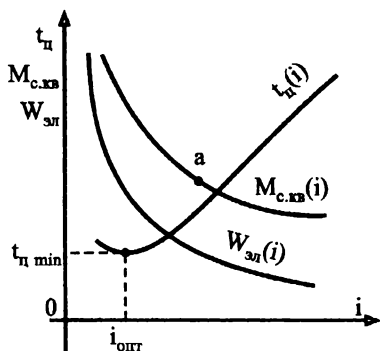


Рис. 3.17

редуктора, поскольку $t_{ц\ min}$ должно соответствовать оптимальное значение $i_{опт}$ рис. 3.17, ранее заданное i , вероятнее всего, от него будет отличаться. На рис. 3.17 показаны также среднеквадратичный момент $M_{с.кв}$ за цикл и потребляемая электрическая энергия $W_{эл}$, величины и произ-

водные которых снижаются по мере увеличения передаточного отношения редуктора. И здесь нет гарантии того, что $t_{ц\ min}$ будет соответствовать $M_{с.кв} \leq M_N$, т.е. предельно допустимому использованию двигателя по нагреванию; более вероятно, что условие $M_{с.кв} \leq M_N$ относится к зоне темпа изменения производной $M_{с.кв}$ по i , где $i > i_{опт}$ точка «а», в чем необ-

ходимо убедиться. Кроме того, требуется проверка выбираемого двигателя по перегрузочной способности для обеспечения ускорений входящих в (3.90) и (3.91).

С целью проверки заданного или непосредственного определения оптимального передаточного отношения редуктора исходят из минимальной продолжительности процессов пуска и торможения. Полагая рабочие параметры РМ известными и скорость движения рабочего органа ω_{PM} или V_{PM} заданной, рассматривают время переходного процесса выраженное уравнением (3.81), как явную функцию i , а остальные величины полагают как не зависящие от i .

Уравнение (3.81) показывает, что влияние i на его числитель и знаменатель оказывается различным. Например, при увеличении i возрастает момент инерции, приведенный к валу РМ, что вызывает замедление переходного процесса. Вместе с тем пусковой (или тормозной) момент двигателя, будучи приведенным к валу РМ, возрастает и вызывает снижение времени переходного процесса. То есть имеет место оптимум в зависимости $t = f(i)$, отраженной на рис. 3.17.

Для определения выражения i_{opt} берут производную по i от промежуточной записи (3.81) и приравнивают ее к нулю, откуда получают:

$$i_{opt} = \frac{M_{PM}}{M_{эм}} + \sqrt{\left(\frac{M_{PM}}{M_{эм}}\right)^2 + \frac{J_{PM}}{\delta \cdot k \cdot J_D}}, \quad (3.99)$$

где знак «-» отброшен, поскольку передаточное отношение может быть величиной только положительной.

На рис. 3.18 показана качественная картина зависимости i_{opt} от

$\frac{M_{PM}}{M_{эм}}$ при $\frac{J_{PM}}{\delta \cdot J_D} = Const$, из которой следует, что одновременно для пус-

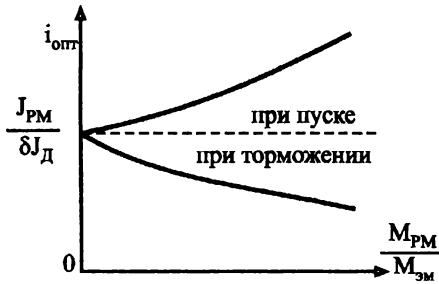


Рис. 3.18

ка и торможения однозначное решение получается только при

$M_{PM} = 0$, то есть:

$$i_{opt} = \sqrt{\frac{J_{PM}}{\delta \cdot k \cdot J_D}}. \quad (3.100)$$

Если переписать (3.100)

относительно

$\delta \cdot k \cdot J_D = \frac{J_{PM}}{i^2}$, получим выражение, которое показывает, что наиболее

быстрое перемещение исполнительного органа РМ будет при равенстве момента инерции на валу двигателя и момента инерции, приведенного со стороны РМ к валу двигателя. Для определения i_{opt} чаще всего используют выражение (3.100). При необходимости учета влияния M_c используют (3.99), ограничиваясь режимом пуска, либо выражения, уточненные по тем или иным критериям, которые приведены в [5, с. 40], а также см. [14, с. 30, 31].

Отметим, что в изложенном методе искомой является $\omega_N = i_{opt} \omega_{PM}$, а сам метод построен на предпосылке что момент двигателя $M_{эм}$ и момент инерции его ротора (якоря) J_δ постоянны. По существу же необходимо определять i_{opt} из условия постоянства мощности двигателя и его момента инерции, зависящего от номинальной скорости его вращения. Это несоответствие приводит к неточным результатам; для

их уточнения прежде всего с точки зрения использования двигателя по тепловому состоянию полезно использовать рассуждения относительно точки «а», рис. 3.17, а термин «оптимальное передаточное отношение» считать условным.

3.5. ПРОВЕРКА ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ВЫБРАННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПО ТЕПЛОВУМУ СОСТОЯНИЮ И КРАТКОВРЕМЕННО ДОПУСТИМОЙ ПЕРЕГРУЗКЕ

На основе анализа поведения перегрева двигателя во времени созданы практические методы проверки предварительно выбранного двигателя по его тепловому состоянию. Это методы эквивалентных потерь, тока, момента и мощности, которые в указанном порядке выведены один из другого. Если метод эквивалентных потерь является универсальным и пригодным для проверки двигателей всех типов во всех режимах нагрузки, то метод эквивалентного момента можно использовать только при пропорциональности развиваемого двигателем момента рабочему току $M_{эм} \equiv I$. Отсюда вытекает, что этот метод нельзя использовать для двигателей с изменяющимся магнитным потоком, то есть для проверки двигателей последовательного и смешанного возбуждения, а также асинхронных с короткозамкнутым ротором. Метод эквивалентной мощности еще более ограничен, поскольку приемлем только при условии $P \equiv M \equiv I$, то есть при постоянной скорости вращения двигателя; по этой причине он теряет практическую значимость для проверки двигателей с интенсивными пускотормозными и регулировочными включениями.

С практической стороны наиболее удобным является метод эквивалентного момента, поскольку он основан на использовании нагрузочной диаграммы $M_{эм} = f(t)$, которая непосредственно строится с учетом нагру-

зочных диаграмм РМ, содержащих конкретные технологические требования к электроприводу. Если же этот метод нельзя применить, то для двигателей постоянного тока по $M_{эм} = f(t)$ строится нагрузочная диаграмма $I = f(t)$, на основании которой проверяют двигатель по методу эквивалентного тока. Наибольшая точность проверки достигается методом эквивалентных потерь, но для его использования требуется нагрузочная диаграмма двигателя в виде $\Delta P_{\Sigma} = f(t)$, построение которой возможно только при наличии зависимости $\eta_{д} = f(P_2)$, взятой из справочной литературы, см. [19], [20] и др.

3.5.1. В перемежающихся режимах нагрузки S6, S7, S8

В общем случае критериями проверки по нагреву являются следующие неравенства в пределах $15 \div 20\%$:

$$\Delta P_{\vartheta} = \frac{1}{t_{\vartheta, \vartheta}} \int_0^{t_{\vartheta}} \Delta P(t) dt = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta P_i t_i}{t_{\vartheta, \vartheta}} < \Delta P_N; \quad (3.101)$$

$$I_{\vartheta} = \sqrt{\frac{\int_0^{t_{\vartheta}} I^2(t) dt}{t_{\vartheta, \vartheta}}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n I_i^2 t_i}{t_{\vartheta, \vartheta}}} < I_N; \quad (3.102)$$

$$M_{\vartheta} = \sqrt{\frac{\int_0^{t_{\vartheta}} M^2(t) dt}{t_{\vartheta, \vartheta}}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n M_i^2 t_i}{t_{\vartheta, \vartheta}}} < M_N, \quad (3.103)$$

где $t_{\vartheta, \vartheta} = \sum t_n \beta_n + \sum t_{y\omega_N} + \sum t_{y\omega < \omega_N} \beta_{\omega} + \sum t_m \beta_m + \sum t_o \cdot \beta_o =$

$$= \sum t_i \cdot \beta_i = t_y \frac{\sum t_i \cdot \beta_i}{\sum t_i} - \text{эквивалентное время цикла, учитывающее}$$

ухудшение теплообмена самовентилируемых двигателей при работе со скоростью вращения ниже номинальной, которое меньше реального времени цикла $t_y = \sum t_n + \sum t_y + \sum t_m + \sum t_o = \sum t_i$; это обеспечивает правильное определение увеличения эквивалентных величин

потерь, тока и момента; $\beta = \frac{A_{\omega < \omega_N}}{A_{\omega_N}} < 1$ - коэффициент, учитывающий

ухудшение теплообмена двигателя с самовентиляцией при $\omega < \omega_N$; A - коэффициенты теплоотдачи при разной скорости; индексы при t « n », « y », « m », « o » - обозначают соответственно «пуск», «установившееся движение», «торможение», «пауза». Значение коэффициентов β рекомендуется выбирать: для двигателей постоянного тока с самовентиляцией $\beta_n = \beta_m = 0,75$; $\beta_o = 0,5$; для асинхронных двигателей с самовентиляцией $\beta_n = \beta_m = 0,5$; $\beta_o = 0,25$.

Отметим, что неравенства (3.101), (3.102), (3.103) приемлемы для проверки использования по нагреву *двигателей электроприводов в пере-
межающихся режимах нагрузки*, когда номинальные данные предварительно выбранного двигателя соответствуют $PB = 100\%$.

3.5.2. В повторно-кратковременных режимах нагрузки S3, S4, S5

При оценке же теплового состояния двигателей в повторно-кратковременных режимах необходимо, чтобы сравнение эквивалентной величины графика нагрузочной диаграммы и номинальной величины предварительно выбранного двигателя производилось при одинаковом

значении $PВ$. Обычно $PВ_{зр}$ отличается от стандартного значения, поэтому выполняется пересчет эквивалентной величины с $PВ_{зр}$ на $PВ_{см}$. В этой связи вычисление эквивалентных величин для графиков повторно-кратковременных режимов производится по выражениям, не содержащим времени пауз t_0 :

$$\Delta P_{Э.ПВ_{зр}} = \frac{\sum \Delta P_i \cdot t_i}{\sum t_{раб.i} \cdot \beta_i}; \quad (3.104)$$

$$I_{Э.ПВ_{зр}} = \sqrt{\frac{\sum I_i^2 \cdot t_i}{\sum t_{раб.i} \cdot \beta_i}}; \quad (3.105)$$

$$M_{Э.ПВ_{зр}} = \sqrt{\frac{\sum M_i^2 \cdot t_i}{\sum t_{раб.i} \cdot \beta_i}}; \quad (3.106)$$

где $\sum t_{раб.i} \cdot \beta_i$ – эквивалентная сумма рабочих времен в цикле, соответствующих включенному состоянию двигателя с самовентиляцией.

Далее производится пересчет эквивалентных величин с $PВ_{зр}$ на ближайшее значение $PВ_{см}$ и сравнение их с номинальными:

$$\Delta P_{Э.ПВ_{см}} = \Delta P_{Э.ПВ_{зр}} \frac{PВ_{зр}}{PВ_{см}} < \Delta P_{N.ПВ_{см}}; \quad (3.107)$$

$$I_{Э.ПВ_{см}} = I_{Э.ПВ_{зр}} \sqrt{\frac{PВ_{зр}}{PВ_{см}}} < I_{N.ПВ_{см}}; \quad (3.108)$$

$$M_{Э.ПВ_{см}} = M_{Э.ПВ_{зр}} \sqrt{\frac{PВ_{зр}}{PВ_{см}}} < M_{N.ПВ_{см}}. \quad (3.109)$$

Используя (3.104) - (3.106), получим:

$$\Delta P_{\Sigma ПВсм} = \frac{\sum_1^n \Delta P_i \cdot t_i}{\sum_1^n t_{\text{раб.}i} \cdot \beta_i} \cdot \frac{ПВ_{зр}}{ПВ_{см}} < \Delta P_{N.ПВсм}; \quad (3.110)$$

$$I_{\Sigma ПВсм} = \sqrt{\frac{\sum_1^n I_i^2 \cdot t_i}{\sum_1^n t_{\text{раб.}i} \cdot \beta_i} \cdot \frac{ПВ_{зр}}{ПВ_{см}}} < I_{N.ПВсм}; \quad (3.111)$$

$$M_{\Sigma ПВсм} = \sqrt{\frac{\sum_1^n M_i^2 \cdot t_i}{\sum_1^n t_{\text{раб.}i} \cdot \beta_i} \cdot \frac{ПВ_{зр}}{ПВ_{см}}} < M_{N.ПВсм}. \quad (3.112)$$

Следует подчеркнуть, что выражения пересчета эквивалентных величин (3.107) - (3.112) *допустимо использовать только при близких $ПВ_{зр}$ и $ПВ_{см}$, поскольку они не учитывают изменения постоянных потерь, которые являются функцией скорости двигателя.*

3.5.3. Пересчет на отдаленные ПВ

При пересчете на отдаленные друг от друга $ПВ$ приходится это обстоятельство учитывать и выражения пересчета становятся громоздкими; например, соотношения эквивалентных моментов при $ПВ_{зр}$ и $ПВ_{см}$ будет иметь следующий вид:

$$\frac{M_{\Sigma ПВзр}}{M_{\Sigma ПВсм}} = \sqrt{(\gamma + 1) \frac{[ПВ_{зр} + (1 - ПВ_{зр}) \cdot \beta_0] \cdot ПВ_{см}}{[ПВ_{см} + (1 - ПВ_{см}) \cdot \beta_0] \cdot ПВ_{зр}}} - \gamma, \quad (3.113)$$

где $ПВ_{зр}$ – продолжительность включения по графику, в относительных единицах;

$PB_{ст}$ – продолжительность включения стандартная, в относительных единицах;

β_o – коэффициент учитывающий ухудшение теплообмена двигателя с самовентиляцией во время паузы;

$\gamma = \frac{\Delta P_C}{\Delta P_{VN}}$ – отношение постоянных потерь к номинальным переменным при номинальной скорости двигателя.

Величину γ можно вычислить, используя данные каталога для предварительно выбранного двигателя. Покажем это на примере двигателя независимого возбуждения. Ориентируясь на изложенное в гл. 1.6, получим:

$$\gamma = \frac{P_{2N}}{r_a \cdot I_{aN}^2} \left(\frac{1 - \eta_N}{\eta_N} \right) - 1. \quad (3.114)$$

Для двигателей с принудительным охлаждением принимают $\beta = 1$ при всех значениях скорости вращения. Отсюда $t_{у,э} = t_{у}$ и выражения эквивалентных величин от (3.101) до (3.112) приобретают новые структуры выражений, соответственно, средних потерь, среднеквадратичных тока и момента. При этом (3.113) также упрощается:

$$\frac{M_{Э.ПВ_{эп}}}{M_{Э.ПВ_{ст}}} = \sqrt{(\gamma + 1) \frac{PB_{ст}}{PB_{эп}}} - \gamma, \quad (3.115)$$

а допущение $\gamma = 0$ возвращает структуру выражения к виду (3.109):

$$M_{Э.ПВ_{ст}} = M_{Э.ПВ_{ГР}} \frac{1}{\sqrt{\frac{PB_{ст}}{PB_{эп}}}} = M_{Э.ПВ_{ГР}} \sqrt{\frac{PB_{эп}}{PB_{ст}}}.$$

3.5.4. Использование понятия фиктивного момента

Отмеченное выше удобство применения выражения эквивалентного (среднеквадратичного) момента для проверки двигателя по нагреву привело к введению понятия фиктивного момента, пропорционального реальному току, и его использованию для отражения теплового состояния двигателя независимого возбуждения на участках работы с ослабленным магнитным потоком в сравнении с его номинальным значением. Величина фиктивного момента определяется из следующих соображений: при ослабленном магнитном потоке двигатель работает на искусственной статической характеристике, располагающейся выше естественной (или основной). Установившийся режим движения при неизменном статическом моменте M_c , равном электромагнитному моменту двигателя $M_{эм}$, будет характеризоваться при ослабленном магнитном потоке Φ'_m увеличением тока якоря I'_a в сравнении с током I_a при номинальном магнитном потоке Φ_{mN} :

$$M_{эм} = c\Phi'_m \cdot I'_a = c\Phi_{mN} \cdot I_a,$$

откуда

$$I'_a = I_a \frac{\Phi_{mN}}{\Phi'_m}.$$

Из условия идеального холостого хода при ослабленном потоке Φ'_m и номинальном потоке Φ_{mN} , когда $M_c = 0$, а

$$E_a = U_a = c\Phi'_m \cdot \omega'_0 = c\Phi_{mN} \cdot \omega_0,$$

получим

$$\frac{\Phi_{mN}}{\Phi_m} = \frac{\omega_0'}{\omega_0} \cong \frac{\omega'}{\omega},$$

где отношение скоростей идеального холостого хода при ослабленном и номинальном магнитных потоках можно принять равным отношению реальных скоростей, когда ослабление потока используют для повышения скорости обратного хода без нагрузки на валу. Таким образом, можно записать равенство следующих соотношений:

$$\frac{\Phi_{mN}}{\Phi_m} = \frac{\omega_0'}{\omega_0} = \frac{I_a'}{I_a} = \frac{M_\phi}{M_{эм}} \cong \frac{\omega'}{\omega} = \frac{n'}{n},$$

откуда фиктивный момент выражается через реальный момент двигателя, умноженный на отношение скоростей при ослабленном и номинальном магнитных потоках:

$$M_\phi = M_{эм} \frac{\omega_0'}{\omega_0} \cong M_{эм} \frac{n'}{n}. \quad (3.116)$$

Нагрузочная диаграмма двигателя $M = f(t)$, как показано на рис. 3.19,

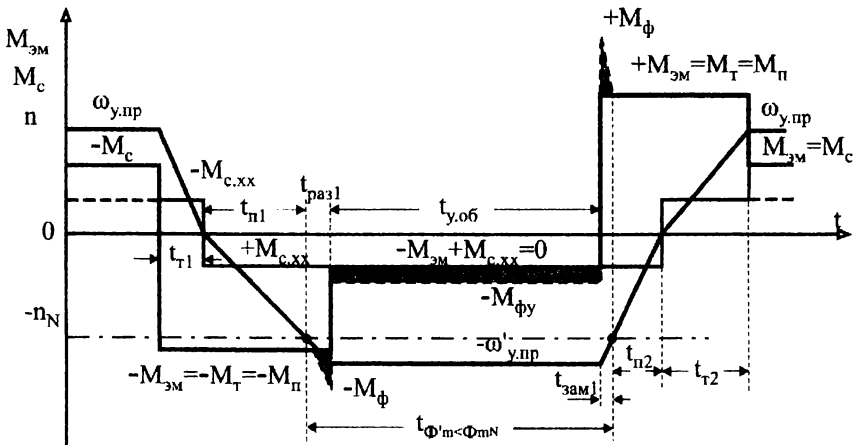


Рис. 3.19

надстраивается до значений M_{ϕ} на всем интервале работы с ослабленным магнитным потоком. Полученный результирующий график $M(t)$ по существу отражает ток, характеризующий тепловое состояние двигателя на всем интервале цикла. Этот график и используется для вычисления эквивалентного (среднеквадратичного) момента и проверки двигателя по нагреву.

3.5.5. Проверка по кратковременно допустимой перегрузке

Выполняется путем сравнения максимального значения момента или тока в соответствующих нагрузочных диаграммах двигателя с предельно допустимым для выбранного типа двигателя:

$$M_{зр. \max} \leq \lambda_M \cdot M_N ; \quad (3.117)$$

$$I_{зр. \max} \leq \lambda_I \cdot I_N . \quad (3.118)$$

3.5.6. Проверка теплового состояния через допустимое число циклов в час

Условия работы асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором АД КЗР в повторно-кратковременном режиме нагрузки с частыми пусками-тормозными включениями оказываются более тяжелыми в сравнении с ДПТ и АД ФР. Они не имеют каких-либо внешних сопротивлений (рассеивателей потерь энергии во внешнюю среду), поэтому вынуждены рассеивать потери через нагревание собственного корпуса статора, в магнитопроводе которого заложены обмотки с недопускающей перегрева изоляцией. Поэтому рассмотренные выше методы эквивалентных величин тока, момента и мощности для АД КЗР дают недопустимо большие погрешности.

Тепловое состояние АД КЗР необходимо проверять методом эквивалентных потерь, в котором условием правильности выбора будет неравенство:

$$\Delta P_{N_{15\%}} > \Delta P_{\text{экв}} = \frac{\sum_1^n \Delta P_i \cdot t_i}{\sum_1^n \beta_i \cdot t_i}.$$

Из этого неравенства проф. МЭИ А.Т. Голован разработал метод проверки АД КЗР через допустимое число циклов в час, исходя из полного использования АД КЗР по допустимому нагреву, то есть $\Delta P_N = \Delta P_{\text{экв}}$. При этом предположении, что рабочий период включает в себя пуск, установившуюся работу, торможение и паузу, правильно говорить не число включений, а число циклов. Структура упрощенной нагрузочной диаграммы $\Delta P_i = f(t)$ представлена на рис. 3.20.

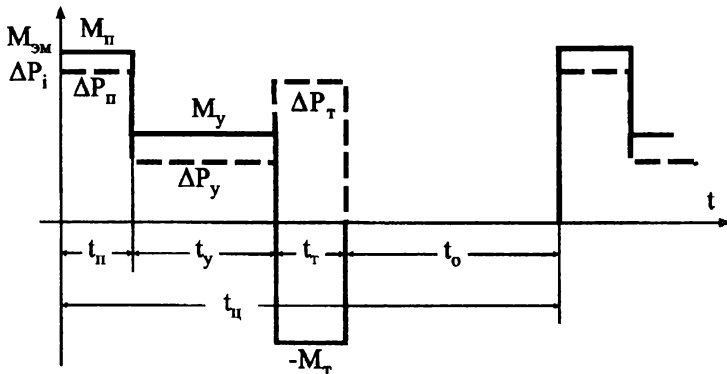


Рис. 3.20

При такой структуре цикла:

$$\Delta P_N = \frac{\Delta W_n + \Delta W_m + \Delta P_y \cdot t_y}{\beta_{n,m}(t_n + t_m) + t_y + \beta_o \cdot t_o}, \quad (3.119)$$

которое можно переписать в следующее равенство:

$$\Delta P_N \cdot \left[\beta_{n,m} \cdot (t_n + t_m) + t_y + \beta_o \cdot t_o \right] = \Delta W_n + \Delta W_m + \Delta P_y \cdot t_y, \quad (3.120)$$

где левая часть равенства описывает рассеиваемые потери АД КЗР в окружающей среде, а правая часть – выделяющиеся в АД КЗР потери за цикл. Строго говоря, знак равенства справедлив для установившегося теплового состояния при предельно допустимом числе циклов в час, следующих один за другим.

Здесь ΔP_N – потери мощности при номинальной нагрузке;

ΔW_n – энергия потерь при пуске;

ΔW_m – энергия потерь при торможении;

$\beta_{n,m,o}$ – отношение постоянных потерь к номинальным переменным при пуске, торможении и во время паузы, которая зависит от скорости, $\beta_{n,m,o} = \frac{\Delta P_c}{\Delta P_{vN}} < 1$; часто принимают

$$\beta_{n,m} = \frac{1 + \beta_o}{2}.$$

Если обозначить число циклов в час Z , то длительность одного цикла составит:

$$t_y = \frac{3600}{Z}, \quad \text{сек};$$

продолжительность рабочего интервала в цикле:

$$t_p = ПВ \cdot t_y,$$

где $ПВ = \frac{t_p}{t_y}$ – продолжительность включения в относительных единицах;

$t_y = t_p - (t_n + t_m) = ПВ \cdot \frac{3600}{Z} - (t_n + t_m)$ – работа при установившейся скорости;

$t_o = t_u - t_p = \frac{3600}{Z} \cdot (1 - ПВ)$ – время паузы.

После подстановки выражений времени в (3.120) и преобразования относительно Z получим выражение предельно допустимого числа циклов в час:

$$Z = 3600 \frac{\left(\Delta P_N - \Delta P_y \right) \cdot ПВ + \Delta P_N \cdot \beta_o (1 - ПВ)}{W_n + W_m - (t_n + t_m) \cdot \left(\Delta P_y - \Delta P_N \frac{1 - \beta_o}{2} \right)}. \quad (3.121)$$

Поскольку потери энергии при пуске и торможении в АД КЗР превышают номинальные потери в 10 ÷ 15 раз, то влияние вычитаемого в знаменателе оценивается в 3% от суммы потерь $W_n + W_m$, что позволяет упростить выражение (3.121) и придать ему вид:

$$Z = 3600 \frac{\left(\Delta P_N - \Delta P_y \right) \cdot ПВ + \Delta P_N \cdot \alpha_o (1 - ПВ)}{0,97 \cdot (\Delta W_n + \Delta W_m)}, \quad (3.122)$$

где $\Delta P_N = P_{1(эл)N} - P_{2(вал)N}$ – мощность потерь при номинальной нагрузке и номинальной скорости;

$P_{1(эл)N} = 3 \cdot U_{S\phi.N} \cdot I_{S\phi.N} \cdot \cos \varphi_N$ – номинальная мощность, потребляемая АД из сети;

$\Delta W_n = \Delta P_n \cdot t_n$ – энергия потерь при пуске;

$\Delta W_m = \Delta P_m \cdot t_m$ – энергия потерь при торможении;

$\eta_N = \frac{P_{2(вал)N}}{P_{1(эл)N}} = \eta_{эл.N} \cdot \eta_{эм.N} \cdot \eta_{мех.N}$ – номинальный КПД АД для

соответствующего режима нагрузки,.

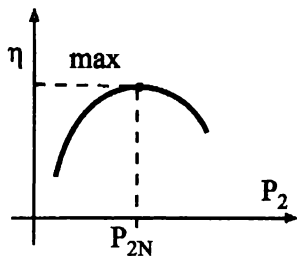


Рис. 3.21

Для различных режимов нагрузки максимум рис. 3.21, может смещаться, что указывает на различное соотношение постоянных и номинальных переменных потерь, потерь, выражаемых коэффициентом γ .

Кроме изложенного, можно воспользоваться рекомендацией [17, с. 191], где предлагается принять:

$$Z_{don} \cong Z_N \frac{J_D}{J_\Sigma} = \frac{Z_N}{(FI)}, \quad (3.123)$$

где $FI = \frac{J_\Sigma}{J_D}$ – коэффициент инерции.

В другом источнике [23, с. 64] дается еще одно выражение для предельно допустимого числа циклов в час под нагрузкой на валу:

$$Z_{don} = Z_o \frac{k_m \cdot k_p}{(FI)} \cdot \left(1 - \frac{PB}{100}\right), \quad (3.124)$$

где Z_o – число включений (пусков) в час без нагрузки на валу для двигателей серии 4А приводится в [23];

k_m – коэффициент, определяемый зависимостью статического момента от скорости вращения двигателя:

$$\mu_c = \frac{M_c}{M_N} = f\left(\frac{n}{n_c}\right);$$

значения коэффициента k_m для разных законов изменения $\mu_c(n)$ приводятся в [23, с. 85, табл. 3.6];

$$k_p = \frac{\Delta P_{\Sigma 100}}{\Delta P_{\Sigma ПВ}} = \frac{P_{1100} \cdot (1 - \eta_{100})}{P_{1ПВ} \cdot (1 - \eta_{ПВ})} = \frac{P_{2100} \frac{1 - \eta_{100}}{\eta_{100}}}{P_{2ПВ} \frac{1 - \eta_{ПВ}}{\eta_{ПВ}}} - \text{отношения суммар-}$$

ных потерь двигателя в продолжительном и повторно-кратковременных режимах.

Для увеличения допустимого Z необходимо стремиться к снижению потерь пуско-тормозных режимах, в которых W_n и W_m пропорциональны J :

- уменьшением величины J , соответственно выбирая двигатель по n_N ; по i_{onm} ;
- за счет уменьшения запаса кинетической энергии, с изменением которой связаны все пусковые и тормозные включения;
- рациональным выбором тормозного режима даже в реверсивных электроприводах, например,

$$\text{в ТПВ} \quad \Delta P_v \equiv 3W_k;$$

$$\text{в ДТ} \quad \Delta P_v \equiv 1W_k;$$

- выбором АД КЗР с более теплостойким классом изоляции обмотки статора;
- путем увеличения принудительного теплообмена, особенно в период пауз.

Все это позволяет создавать электроприводы с АД КЗР, допускающие 2000 и более циклов в час.

3.6. ВЫБОР ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИНЦИПАЛЬНОЙ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВодОВ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Общие термины и пояснения

При выполнении курсового проекта не исключается возможность обоснованной разработки разомкнутой системы сетевого электропривода, ориентированной на релейно-контакторное управление. В таком случае выбираются типовые магнитные станции.

При ориентации разработчиков на выбор системы ЭП с управляемым преобразователем электроэнергии (УПЭЭ), например, системы «УТП - ДПТ НВ», см. § 3.6.1, или «УПЧ – АД КЗР», см. § 3.6.2, в разомкнутых системах ЭП, исходят из соображений наиболее полного, результативного и надежного формирования выходных координат ЭД, требуемых со стороны технологии конкретного механизированного производства.

Выходными координатами называют физические переменные, характеризующие механическую энергию $W_{\text{мех}}$ на валу ЭД (или ЭП):

$$W_{\text{мех}} = \int P_2 \cdot dt = \int M_B \cdot \omega_B \cdot dt = \int M_B \cdot d\alpha_B = A_{\text{пол}},$$

где M_B ; ω_B ; α_B – **выходные координаты ЭД**, соответственно, момента на валу, угловой скорости вала и проходимого валом углового пути.

Наиболее значимые для технологического процесса координаты механического движения, определяющие качество функционирования рабочей машины в целом, позволяет отнести электрифицированную машину и ее электропривод к соответствующей функциональной группе:

- **программные электроприводы**, когда внешнее управляющее воздействие (ВУВ) на электропривод формируется по заранее заданной программе; это может быть моментный, скоростной и позиционный ЭП;

- **следающие электроприводы**, когда ВУВ на ЭП не является заранее известной функцией и закон управления может оказаться произвольным; это обычно скоростные и позиционные ЭП;

- **стабилизации**, когда обеспечивается поддержание постоянства какой-либо выходной координаты, а ВУВ представляет собой постоянную уставку, что используется в моментных и скоростных ЭП.

Как видим, во всех функциональных группах оказывается необходимым обеспечение координаты ω_B . Вместе с тем, по наиболее значимой координате для технологического процесса, принято называть и электропривод:

- **моментный**, когда главным технологическим требованием является обеспечение заданного закона $M = f(t)$, а поведение остальных координат оказывается соподчиненным;

- **скоростной**, когда реализуется заданный закон изменения $\omega = f(t)$ (программный или следающий), либо реализуется закон поддержания постоянства скорости при изменении внешнего возмущающего воздействия (ВВВ), то есть поддержание постоянства скорости, несмотря на изменение нагрузки на валу, который называют режимом стабилизации движения;

- **позиционный**, в котором определяющим является прохождение заданного пути или требуемого положения исполнительного органа РМ (нажимное устройство, манипулятор, лифт, летучие ножницы).

Превалирующее значение той или иной координаты не всегда является явным. Кроме того, на разных интервалах технологического цикла значимость выходных координат может изменяться.

Безусловно, система ЭП с управляемым преобразователем электроэнергии, использующим ВУВ на параметры потребляемой электрической энергии и обратные связи, сложна и дороже по стоимости в сравнении с сетевым ЭП с его ограниченными возможностями и низкими энергетическими показателями.

Электроприводы с УПЭЭ в современных автоматизированных производствах мыслятся как замкнутые системы ЭП. Но в задачу курсового проекта по дисциплине «Электрический привод» не входит разработка того или иного типа УПЭЭ и системы автоматического управления, а разрабатывается разомкнутая система ЭП. Поэтому, если принимается ЭП с УПЭЭ, то задача ограничивается выбором типа УПЭЭ, который согласуется с номинальными данными ранее выбранного ЭД, а также всех сопутствующих ему функциональных элементов принятой принципиальной схемы ЭП. Вся эта информация станет исходной при выполнении в дальнейшем курсового проекта по дисциплине «САУ электроприводов».

3.6.1. Электропривод по системе «УТП – ДПТ НВ»

Здесь внешними управляющими воздействиями на электропривод будут: U_d от УТП – по цепи якоря ЭД, а также $\Phi_m = f(i_B)$ – по цепи независимого возбуждения.

Рекомендуется предварительно изучить соответствующий материал по [14, § 5.3, с. 251-275] или другим источникам.

3.6.1.1. Выбор УТП для цепи якоря ДПТ НВ

1. *В соответствии с заданием приходится учитывать возможный реверс ЭД и рекуперацию энергии в тормозных режимах.* Для цепи якоря обычно выбирается трехфазный двухкомплектный реверсивный

преобразователь со встречно-параллельной мостовой или нулевой схемой соединения комплектов с раздельным или совместным управлением комплектами. Рационально ориентироваться на выбор стандартного УТП, входящего в состав комплектного тиристорного электропривода, например, серии КТЭУ, см. [18, с. 6-8, а также табл. 8.6 с. 270-273].

2. Определение номинальных напряжения и тока УТП.

Номинальное напряжение преобразователя U_{dN} выбирается таким, чтобы оно соответствовало номинальному напряжению якоря двигателя U_{aN} , то есть $U_{dN} \geq U_{aN}$ при допустимом неравенстве (5-15)%.

Номинальный ток преобразователя I_{dN} выбирают из ряда стандартных значений, который должен быть равным или ближайшим большим по отношению к номинальному току якоря двигателя I_{aN} , то есть $I_{dN} \geq I_{aN}$.

Следует учитывать возможное использование двухдвигательного ЭП, в котором якорные цепи машин могут соединяться последовательно или параллельно. Первое потребует в два раза большей величины U_{dN} ТП, а второе – удвоенного повышения величины I_{dN} ТП. Стандартные значения номинальных напряжений и токов ТП приведены в таблице 18, данные в которой согласуются с [18, с. 270-273].

Таблица 18

U_{dN} , В	I_{dN} , А
230, 460, 660, 825, 1050	25, 50, 100, 200, 320, 500, 800, 1000, 1600, 2500, 3200, 4000

3.6.1.2. Выбор способа связи УТП с трехфазной сетью переменного напряжения

Такая дилемма естественно возникает при разработке принципиальной схемы ЭП. Она вызвана, с одной стороны, величиной номинальной мощности ДПТ НВ, а с другой – системой электроснабжения, которая может быть с нормальным стандартным линейным напряжением 380 В, либо высоковольтная с напряжением 6 или 10 кВ.

Для электроприводов средней и большой мощности (сотни и тысячи кВт) экономически целесообразно принимать высоковольтный вариант. Однако ДПТ НВ, тем более для ЭП с частыми пуско-тормозными включениями, из-за лимитирующих условий допустимой коммутации на коллекторе не изготавливаются на напряжение $U_{aN} > 1000$ В; соответственно и тиристорный преобразователь должен иметь $U_{aN} \leq 1000$ В. Здесь дилемма разрешается подключением УТП к высоковольтной сети через понижающий (по своему назначению – согласующий) трехфазный трансформатор.

Для электроприводов относительно небольшой мощности при близких значениях действующих напряжений питающей сети и цепей УТП используют связь последнего с сетью через токоограничивающий реактор.

А. Вариант трансформаторной связи УТП с сетью.

Расчет параметров и выбор ТС

1. Определение необходимых номинальных данных согласующего трансформатора (ТС) при любых схемах включения его первичной и вторичной обмоток (\wedge/\wedge ; \wedge/Δ ; Δ/\wedge) начинается с выяснения требуемой величины линейного напряжения его вторичной (понижающей) обмотки $U_{2Л}$, которая естественно должна быть согласованна с номинальными на-

пряжениями U_{dN} ТП, а значит с U_{aN} ЭД. Требуемая величина $U_{2ЛN}$ задается величиной номинального напряжения U_{dN} на выходе ТП и коэффициентом схемы включения тиристоров по напряжению $k_{cx.U}$, значение которого предопределяется схемой включения тиристоров преобразователя:

$$U_{2ЛN} = \frac{U_{dN}}{k_{cx.U}}, \quad \text{В}, \quad (3.125)$$

где $k_{cx.U_M} = \frac{U_{dN}}{U_{2ЛN}} = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{2 \cdot \pi} = 1,35$ – при мостовой схеме включения тиристоров;

$k_{cx.U_0} = \frac{U_{dN}}{U_{2ЛN}} = \frac{1,35}{2} = 0,675$ – при нулевой схеме, в чем можно убедиться из [22, $k_{cx.U_M}$ – табл. 1.20, с. 77 и $k_{cx.U_0}$ – табл. 1.21, с. 80].

2. Далее определяется номинальная величина линейного вторичного тока трансформатора $I_{2ЛN}$, которая также согласуется с номинальным током преобразователя I_{dN} и коэффициентом схемы включения тиристоров по току $k_{cx.I}$, значение которого предопределяется схемой включения тиристоров преобразователя.

$$I_{2ЛN} = k_{cx.I} \cdot I_{dN}, \quad \text{А}, \quad (3.126)$$

где $k_{cx.I_M} = \frac{I_{2ЛN}}{I_{dN}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 0,816$ – при мостовой схеме включения тиристоров;

$k_{cx.I_0} = \frac{I_{2ЛN}}{I_{dN}} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,58$ – при нулевой схеме включения тиристоров.

При этом следует обратить внимание на схему включения вторичной обмотки трансформатора, поскольку в схеме "Λ" $I_{2\Phi_N} = I_{2Л_N}$, а при "Δ"

$$I_{2\Phi_N} = I_{2Л_N} / \sqrt{3}, \text{ то есть } k_{cx.I0} = \frac{I_{2\Phi_N}}{I_{d_N}} = \frac{0,58}{\sqrt{3}} = 0,33; \text{ отмеченное указы-}$$

вает на целесообразность определения $k_{cx.I}$ всегда с использованием линейных значений токов, как это было выше показано при определении $k_{cx.U}$ через линейные напряжения. И здесь рекомендуется обращение к [22, табл. 1.20, с. 79 и табл. 1.21, с. 81].

3. Определяется коэффициент трансформации ТС:

$$k_{cx.U_M} = \frac{U_{2Л_N}}{U_{1Л_N}}, \quad (3.127)$$

и выбирается трансформатор, например, типа ТСП – трехфазный двухобмоточный сухой с естественным воздушным охлаждением открытого исполнения или типа ТСЗП – защищенного исполнения по справочнику [18, с. 268-274] и далее производится определение параметров его электрической цепи.

4. Линейный ток в первичной цепи ТС:

$$I_{1Л_N} = \frac{S_m}{\sqrt{3} \cdot U_{1Л_N}}, \quad \text{А}, \quad (3.128)$$

где S_m – полная номинальная мощность, кВ·А, по типу выбранного ТС берется из [13, с. 270-273];

$U_{1Л_N}$ – первичное линейное номинальное напряжение, В, [13, с. 270-273].

5. Активное сопротивление фазы ТС:

$$R_m = k_{mp}^2 \cdot \frac{\Delta P_{кз}}{3 \cdot I_{1Л_N}^2}, \quad \text{Ом}, \quad (3.129)$$

где $\Delta P_{кз}$ – мощность потерь в режиме короткого замыкания, Вт, [13, с. 270-273].

6. Активная составляющая напряжения к.з.:

$$U_{ка} = \frac{\Delta P_{кз} \cdot 100}{\sqrt{3} \cdot U_{1ЛН} \cdot I_{1ЛН}}, \% . \quad (3.130)$$

7. Реактивная составляющая напряжения к.з.:

$$U_{кр} = \sqrt{U_{к}^2 - U_{ка}^2}, \% , \quad (3.131)$$

где $U_{к}$ – полное напряжение к.з., %, берется из [13, табл. 8.5, с. 270-271].

8. Индуктивное сопротивление фазы ТС:

$$X_m = R_m = k_{мп}^2 \cdot \frac{U_{кр}}{100} \cdot \frac{U_{1ЛН}}{\sqrt{3} \cdot I_{1ЛН}}, \quad \text{Ом.} \quad (3.132)$$

9. Индуктивность фазы ТС:

$$L_m = \frac{X_m}{\omega_1}, \quad \text{Гн,} \quad (3.133)$$

где $\omega_1 = 2\pi \cdot f_1$ – угловая частота напряжения питающей сети, рад/с;

$f_1 = 50$ Гц – циклическая частота.

Б. Вариант связи УТП через токоограничивающий реактор.

Определение индуктивности реактора

Как указано выше, этот вариант используют при близких значениях действующих напряжений питающей сети и цепей ТП, при этом используют связь УТП с сетью через токоограничивающий реактор, например, серии РТСТ, см. схемы [18, рис. 1.1, 1.2, 1.3, с. 21-23].

Токоограничивающий реактор представляет собой катушку без стального сердечника, индуктивность которой остается постоянной и неза-

висимой от величины тока в ее цепи, поэтому его назначением является ограничение величины токов короткого замыкания и поддержание напряжения на потребителе электроэнергии. Реактор включается в каждую фазу потребителя ЭЭ.

При курсовом проектировании целью выбора реактора является определение его фазной индуктивности, входящей в один из параметров силовой цепи ЭП. Для ее определения требуется знать следующие электрические переменные:

- номинальное линейное напряжение сети U_{cN} , например 380 В, которое согласуется с U_{dN} УТП;
- номинальный линейный ток I_{cN} , который согласуется с I_{dN} УТП.

Названные переменные определяются, аналогично рассмотренному выше трансформаторному варианту, с учетом коэффициентов схем по напряжению $k_{cx,U}$ и по току $k_{cx,I}$, учитывающих отличия включения тиристоров в мостовой и нулевой схемах УТП.

Индуктивность реактора можно выбрать из [18, табл. 8.31, с. 304].

Следует уточнить ее величину, выполнив расчет аналогичный трансформаторному варианту (пункты 5-9, с. 184-185). Для удобства определения переменных оставлена прежняя "трансформаторная" индексация «*m*», которая теперь будет указывать на реакторный вариант, при этом коэффициент трансформации $k_{mp} = 1$ (в пунктах 5 и 8, с. 184-185).

В. Определение индуктивности и выбор сглаживающего дросселя цепи «УТП-ЭД»

Такая задача может возникнуть в тиристорном электроприводе как при трансформаторном, так и при реакторном вариантах связи УТП с сетью.

Все обусловлено спецификой работы силовых элементов УТП – тиристоров, которые, как известно, представляют собой электрические вентили, выполняющие функции управляемых электрических ключей, пропускающих ток при малом падении напряжения в проводящую часть периода и запирающих цепи в непроводящую часть. Однако для целей управляемого ЭП свойство "управляемой вентильности" тиристоров нельзя признать совершенным, то есть они обладают ограниченной управляемостью. Например, при управлении напряжением УТП тиристоры задерживают начало пропускания тока в проводящую часть периода, но не прекращают протекания тока до его естественного перехода через ноль. Задержка открытия тиристора в проводящую часть периода сокращает длительность его открытого состояния на угол запаздывания α , отсчитываемый от точки естественной коммутации, после которого на интервале угла γ развивается коммутационный переходный процесс, обусловленный изменением E_d , U_d и токов I_{ϕ_A} , I_{ϕ_B} и I_{ϕ_C} в фазах УТП см. [14, рис. 5.23 и 5.24, с. 253-255]. В результате U_d и I_d на выходе УТП содержат, помимо постоянной составляющей, еще и пульсации переменных составляющих. Кроме того, при малых нагрузках на валу ЭД, необходимо как-то уменьшать зону прерывистых токов, чтобы получить гранично-непрерывный режим при заданном значении угла управления α , а с другой стороны, требуется ограничивать ток через тиристоры в первый полупериод питающего напряжения при коротком замыкании на стороне вы-

прямоугольного тока. Рассмотренные факторы, обуславливают пульсации переменной составляющей тока I_d и U_d , которые неблагоприятно отражаются на процессе нагрева и коммутации ДПТ НВ.

С целью уменьшения пульсаций в цепь нагрузки УТП (последовательно с якорной обмоткой ЭД) включают сглаживающий дроссель. Дросселем называется электрическая катушка со стальным сердечником или без него, обладающая индуктивным сопротивлением и предназначенная для включения в цепь постоянного тока с целью ограничения ее от протекания переменных токов.

Индуктивность сглаживающего дросселя определяется из условия ограничения пульсаций и рассчитывается для всей трехфазной силовой цепи «УТП–ДПТ НВ» как минимально необходимая величина по следующей формуле:

$$L_{y,\min} = \frac{k_n \cdot E_{d0}}{k_{I_{\delta,d}} \cdot p \cdot \omega_1 \cdot I_{aN}}, \quad \text{Гн}, \quad (3.134)$$

где $E_{d0} = k_{cx,U} \cdot U_{2лN}$ – ЭДС УТП при угле управления $\alpha = 0$;

I_{aN} – номинальный ток якоря ЭД;

$k_{cx,U}$ – коэффициент схемы УТП по напряжению: для мостовой схемы включения тиристоров 1,35; для нулевой схемы 0,675;

$k_{I_{\delta,d}}$ – допустимый коэффициент пульсаций тока якоря, зависит от типа ЭД: 0,07 – для ЭД серии 4П, см. [19, с. 368]; 0,15 – для ЭД серии Д;

k_n – коэффициент пульсаций напряжения: для мостовой схемы 0,13; для нулевой схемы 0,4-0,45;

p – пульсность трехфазного УТП: для мостовой схемы 6; для нулевой схемы 3;

$\omega_1 = 2\pi \cdot f_1$ – круговая частота напряжения сети, с^{-1} ;

$f_1 = 50$ Гц – циклическая частота напряжения сети.

Расчетная индуктивность сглаживающего дросселя определяется:

$$L_{cd} = L_{\text{ч}_{\min}} - a \cdot L_m - L_a, \quad \text{Гн}, \quad (3.135)$$

где L_m – индуктивность фазы согласующего трансформатора, см. (3.133) с. 185, в реакторном варианте индуктивность фазы цепи реактора, Гн;

a – коэффициент учитывающий число фаз прохождения тока в пропускающем интервале периода: $a = 2$ – в мостовой схеме; $a = 1$ – в нулевой схеме;

L_a – индуктивность якоря ЭД, Гн.

Индуктивность якоря ЭД удобно вычислить через его номинальные величины, см. [22, с. 130]:

$$L_a = k \cdot \frac{60 \cdot U_{a_N}}{2\pi \cdot I_{a_N} \cdot n_N \cdot p_\partial}, \quad \text{Гн}, \quad (3.136)$$

где U_{a_N} – номинальное напряжение якоря ЭД, В;

I_{a_N} – номинальный ток якоря ЭД, А;

n_N – номинальная частота вращения, об/мин;

p_∂ – число пар полюсов;

k – коэффициент, учитывающий размагничивающее действие реакции якоря: $k = 0,5 \div 0,6$ для некомпенсированных машин; $k = 0,1$ для компенсированных, то есть оснащенных компенсационной обмоткой, см. [22, с. 130].

Если рассчитанная по (3.135) индуктивность оказалась отрицательной или равной нулю, то это указывает на отсутствие необходимости в сглаживающем дросселе.

Если же требуется для сглаживания пульсаций индуктивность, то по справочнику [18, с. 299-305] выбирается дроссель, например, серии ФРОС, СРОС, или РТСТ, по величинам $U_{2ЛN}$, $I_{2ЛN}$ и вычисленной $L_{сд}$.

Г. Определение индуктивности для ограничения уравнильных токов в двухкомплектном УТП.

Выбор токоограничивающих дросселей

Такая задача возникает при выборе реверсивного двухкомплектного УТП по мостовой или нулевой схемам с согласованным управлением комплектами с целью ограничения уравнильных токов, минующих цепь нагрузки (якоря ЭД) и замыкающихся непосредственно между комплектами. Для ограничения уравнильных токов используют токоограничивающие дроссели, см. [14, рис. 5-32, а и б, с. 268].

Ограничивающая уравнильные токи индуктивность определяется, см. [22, с. 133]:

$$L_{ур} = k_{\partial} \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot U_{2Л}}{\omega_1 \cdot I_{ур}}, \quad \text{Гн}, \quad (3.137)$$

где $\sqrt{2} \cdot U_{2Л}$ – амплитуда линейного напряжения вторичной обмотки трансформатора или питающего напряжения сети (при реакторном варианте);

$I_{ур} \cong 0,1 \cdot I_{aN}$ – действующее значение уравнильного тока, обычно его принимают в долях от I_{aN} ЭД;

k_{∂} – коэффициент действующего значения уравнильного тока, определяется схемой УТП: 0,08 – для мостовой схемы; 0,3 – для нулевой, см. [22, рис. 1.158, с. 133].

Далее по справочнику [18, с. 299-305] выбирается дроссель серии ФРОС, СРОС или РТСТ по величинам U_{2L_N} , I_{2L_N} и вычисленной L_{yp} .

Д. Уточнение параметров функциональных элементов силовой цепи реверсивного тиристорного ЭП

Принципиальная схема силовой цепи ЭП, составленная в соответствии с функциональными схемами электроприводов КТЭУ, см. [18, рис. 1.1; 1.2; 1.3, с. 21-23] должна содержать развернутые схемы соединения функциональных элементов: ЭД, УТП и связи (трансформаторной или реакторной) с сетью.

Для уточнения параметров силовых элементов, принципиальную схему силовой цепи рационально представить полной схемой замещения в режиме непрерывных токов с раскрытием всех ранее вычисленных физических величин и принятых обозначений, см. рис. 3.22.

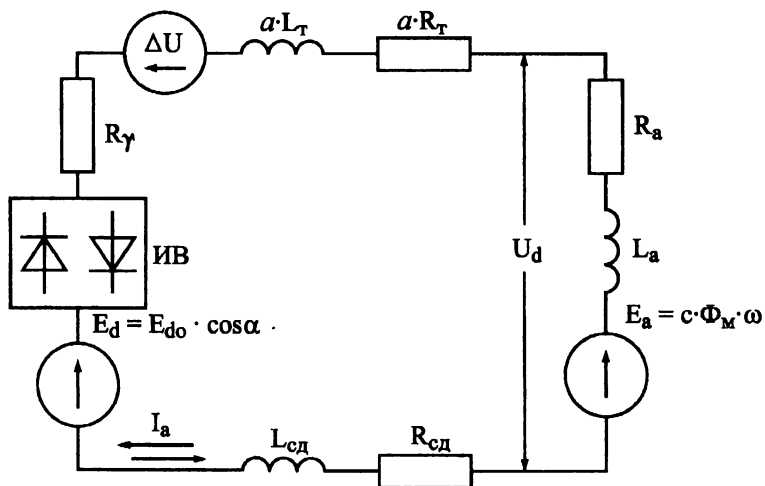


Рис. 3.22

На электрической схеме замещения реверсивного тиристорного ЭП обозначены:

$$E_d = E_{d0} \cdot \cos \alpha - \text{ЭДС УТП, В;}$$

$$E_{d0} - \text{ЭДС неуправляемого преобразователя, В;}$$

α – угол управления, град;

$$\Delta U - \text{падение напряжения на тиристоре, } \Delta U = 0,5 \div 1 \text{ В;}$$

ИВ – идеальный вентиль;

$$R_\gamma = a \cdot \frac{p}{2\pi} \cdot L_T \cdot \omega_1 - \text{фиктивное сопротивление УТП, обусловленное коммутацией тиристорov, Ом;}$$

a – коэффициент, учитывающий число тиристорov (или число фаз) при прохождении тока в пропускающем интервале периода, определяется схемой включения: для мостовой схемы $a = 2$, для нулевой схемы $a = 1$;

p – пульсность трехфазного УТП: для мостовой схемы $p = 6$, для нулевой $p = 3$;

ω_1 – круговая частота напряжения сети, с^{-1} ;

L_T – индуктивность фазы ТС (или токоограничивающего реактора) при связи с сетью, Гн;

R_T – активное сопротивление фазы ТС (или токоограничивающего реактора), Ом;

L_{cd} – индуктивность сглаживающего дросселя, Гн;

R_{cd} – активное сопротивление сглаживающего дросселя, Ом;

L_a – индуктивность якорной цепи ЭД, Гн;

$R_a = r_{я} + r_{\partial n} + r_{кo} + r_{щ}$ – сопротивление цепи якоря ЭД, Ом;

$r_{я}$ – собственное сопротивление обмотки якоря, Ом;

$r_{\partial n}$ – сопротивление обмотки дополнительных полюсов, Ом;

r_{ko} – сопротивление компенсационной обмотки, Ом;

$r_{щ} = \delta \cdot \frac{\Delta U_{щ}}{I_{aN}}$ – сопротивление щеточных контактов ЭД, определя-

ется через число пар щеток (δ) и допустимое падение напряжения на щетках, отнесенное к номинальному току якоря, Ом;

U_d – подводимое напряжение от УТП к якорной цепи ЭД, В;

I_a – ток в цепи УТП-ЭД, А.

Пренебрегая столь незначительной величиной ΔU и объединяя параметры цепей единой физической природы, получают так называемые эквивалентные параметры:

$$L_{\partial} = L_a + L_{c\partial} + a \cdot L_m, \quad (3.138)$$

$$R_{\partial} = R_a + R_{c\partial} + a \cdot R_m + R_{\gamma}, \quad (3.139)$$

компактной эквивалентной схемы замещения главной цепи реверсивного тиристорного электропривода с ДПП НВ в двигательном и тормозных режимах работы, см. рис. 3.23.

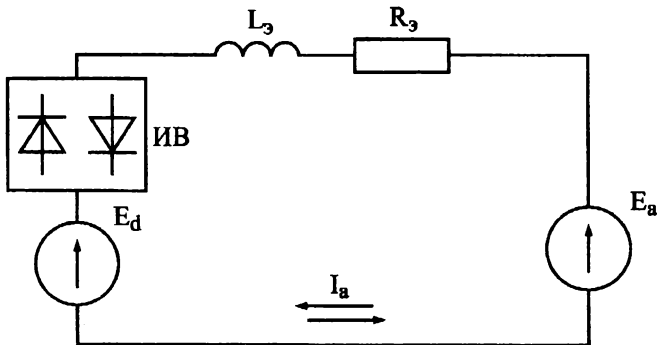


Рис. 3.23

3.6.1.3. Выбор преобразователя для цепи

независимого возбуждения ЭД

Цепь независимого возбуждения входит в понятие принципиальной схемы ЭП с ДТГ НВ.

При однозонном управлении скоростью ($\Phi_{mN} = \Phi_m = Const$) обмотка независимого возбуждения обычно получает электроэнергию через неуправляемый двухполупериодный выпрямитель с коэффициентом схемы $k_{схУ} = 0,9$. Выпрямитель включается в сеть обычно через двухфазный согласующий трансформатор, см. [18, рис. 1.1, с. 21], либо через токоограничивающий реактор, [18, рис. 1.2, с. 22].

Если используется *двухзонное управление скоростью* ($\Phi_m = Var$ в зоне $\omega > \omega_{0_{ест.осн.}}$), то для питания цепи возбуждения лучше отдать предпочтение нереверсивному тиристорному преобразователю с трехфазной нулевой или мостовой схемой при трансформаторной или реакторной связи с сетью; все определяется мощностью ДТГ и допустимой степенью пульсаций выпрямленного напряжения.

Не следует забывать, что в двигателях относительно небольшой мощности значения номинальных напряжений цепи якоря U_{aN} и цепи независимого возбуждения U_{BN} одинаковы. При этом $I_{BN} = (0,03 \div 0,05) \cdot I_{aN}$. В машинах средней и большой мощности, возможно, что $U_{BN} < U_{aN}$ и для обеспечения необходимого магнитного потока соотношение между I_{BN} и I_{aN} может быть другим.

В двухдвигательном ЭП обмотки НВ всегда включаются параллельно одна относительно другой.

При разработке цепи обмотки НВ необходимо предусмотреть защиту «от обрыва поля» и «цепь гашения поля» через диод и разрядное сопротивление, защищающие от перенапряжения при отключении цепи НВ.

3.6.2. К разработке электропривода по системе «УПЧ - АД КЗР»

3.6.2.1. Историческая информация

Построение статических преобразователей электроэнергии началось с появлением бесконтактных силовых управляемых полупроводниковых вентилях (транзисторов и тиристоров). Вначале (60-70-е годы прошлого века) интерес был проявлен к управляемым преобразователям электроэнергии (УПЭЭ) постоянного напряжения для электроприводов с ДПТ НВ. И задолго до окончания 20 века считалось в нашей стране и за рубежом, что методика построения систем «УТП-ДПТ НВ» отработана: были установлены и проверены практикой алгоритмы синтеза силовой части замкнутой системы подчиненного регулирования выходных координат; имелась техническая литература, в том числе учебно-методической направленности. Дальнейшее совершенствование таких электроприводов фактически было связано с перспективой появления более совершенной силовой и управляющей элементной базой. Это привело к внедрению на рабочих машинах различных производств, требующих управления скоростью, электроприводов постоянного тока с УТП.

Специалистам в области электрических машин, электропривода, статических преобразователей электроэнергии и систем управления хорошо известны имена нескольких поколений отечественных ученых и инженеров, которые во второй половине 20-го века внесли фундаментальный вклад в теорию и создание управляемых статических преобразователей

электроэнергии не только постоянного, но и переменного напряжения (тока). Их имена называются в соответствующей научно-технической и учебно-методической литературе. Легче перечислить известные в нашей стране научные школы, в которых они трудились: Московская (МЭИ, ВНИИ ЭП), Ленинградская (ЛЭТИ, ЛПИ), Новосибирская (НЭТИ), Харьковская (ХПИ, ХЭМЗ), Уральская (УПИ) и др.

Привлекала идея: ранее считавшиеся неуправляемыми АД КЗР и синхронные двигатели сделать управляемыми. Этому способствовало, прежде всего, понимание сложности в технической реализации управления электромеханическими и энергетическими переходными физическими явлениями, протекающими в АД КЗР, которые имеют место в его достаточно простом и надежном конструктивном исполнении:

- не имеет коллектора, бандажей, колец и щеточных контактов, что позволяет изготавливать АД на большие частоты вращения, значительно превышающие 3000 об/мин, а для средних и больших мощностей – выпускать их в высоковольтном исполнении;
- отличается относительно простой технологией механизированного изготовления, небольшой стоимостью и низкими эксплуатационными расходами, которые в сравнении с ДПТ соотносятся примерно как 1:10;
- в частотно – управляемых электроприводах работа АД КЗР осуществляется на механических характеристиках, обладающих высокой жесткостью, когда скольжение $S \leq S_N$, что обеспечивает им наибольший энерго- и ресурсосберегающий эффект.

Во время Великой Отечественной войны были разрушены электромашиностроительные заводы в западной части страны, выпускавшие ДПТ НВ для прокатного оборудования металлургических предприятий Урала. На цели обороны оборудование работало в интенсивных режимах, превы-

шающих зачастую допустимые нормы, что приводило к выходу из строя электрических машин. Для сохранения ДПТ НВ, управляемых по системе «Г-Д», резерв которых отсутствовал и не было возможности налаживания их быстрого изготовления, было принято решение на неуправляемых по скорости, но с частыми пуско-тормозными включениями ЭП устанавливать АД КЗР. Их достаточный выпуск был быстро организован на машиностроительных заводах Урала.

Но в интенсивных режимах включения АД КЗР быстро выходили из строя и, например, электроремонтный цех НТМК г.Н.Тагила фактически был загружен их восстановительным ремонтом. Характер поломок оказался существенным и не ограничивался нарушением изоляции обмоток статора из-за перегрева, а часто выражался в механических нарушениях, связанных с проворотом магнитной системы ротора относительно вала, а также с разрушением подшипниковых щитов. Все это указывало на развитие в переходных процессах таких электромагнитных моментов и усилий, которые многократно превышали расчетные по статическим характеристикам АД КЗР.

Так, в начале 40-х годов прошлого столетия в Уральском политехническом институте на кафедре электропривода возникло научное направление по исследованию электромеханических и электромагнитных переходных процессов в АД КЗР, переросшее в общепризнанное научное направление научной школы Урала по автоматизированному электроприводу под руководством доктора технических наук, профессора В.А.Шубенко, о котором помнят многие поколения выпускников 40-70 лет прошлого столетия.

Во второй половине 60-х г. и в 70 гг. прошлого столетия начали появляться статьи в журналах и монографии по частотным преобразователям разных типов и частотно-управляемым электроприводам: появились соответствующие публикации и за рубежом.

В 1971г. F.Blaschke, фирма Siemens, на основе удачного выбора математической модели АД с преобразованием координат и ориентацией системы координат по вектору потокосцеплений ротора послужил основой разработки нового эффективного **принципа ориентации по полю**. В результате были созданы высококачественные системы управления АД TRANSVEKTOR, представившие собой значительный этап развития управляемых электроприводов переменного тока.

В это же время, в 1971г. независимо от F.Blaschke, в нашей стране была разработана аналогичная модель (см. библиографию в [8]), выпускником Уральской научной школы электропривода В.А. Шубенко, ныне доктором технических наук, профессором РГППУ Р.Т. Шрейнером, которая позволила впервые получить корректное решение задач оптимального частотного управления асинхронными электроприводами с учетом электромагнитных переходных процессов в АД. Были выявлены определенные закономерности, обеспечивающие быстродействие АД КЗР при произвольных электромагнитных начальных условиях и обоснованы законы регулирования магнитного потока, существенно снижающие потери энергии в силовой части электропривода не только в установившихся, но и в переходных режимах его работы. На основе использования математических моделей с произвольной ориентацией вращающейся системы координат были разработаны системы управления АД с **ориентацией магнитного поля**, не требующие датчиков магнитного потока. Такие системы явились дальнейшим развитием систем частотно-токового управления в части обеспечения возможности оптимального регулирования магнитного потока в статических и динамических режимах в сочетании с нормированными электромеханическими свойствами ЭП. Высокоточные быстродействующие модели двигателей переменного тока явились неотъемлемыми атрибу-

тами современных систем прямого управления развиваемым моментом.

В 1977г. на Всемирной электротехнической выставке Электро-77 в Москве от кафедры электропривода Уральского политехнического института демонстрировался разработанный группой сотрудников под руководством Р.Т Шрейнера образец регулируемого в диапазоне 1:1000 трехфазного АД КЗР. Привод был выполнен с двухзвенным транзисторным преобразователем частоты с ШИМ и снабжен векторной системой подчиненного регулирования с преобразованием координат и управляемой полосой пропускания внешнего контура САР в функции скорости. Привод имел абсолютно жесткую статическую механическую характеристику с возможностью работы в четырех квадрантах с ограничением тока и момента при возможной перегрузке и работе на упор.

В 80-е годы прошлого столетия создание, промышленное освоение и внедрение статических преобразователей электроэнергии переменного напряжения (тока) и частотно-управляемых асинхронных и синхронных электроприводов на напряжения 0,4÷6 кВ обеспечили нашей стране одно из ведущих мест на рынке названной продукции, которое, в силу всем известных причин вскоре было утеряно.

Только в настоящее время, благодаря взаимно налаживающимся рыночным отношениям между производственными и научными подразделениями в нашей стране и зарубежными фирмами (в организационных формах ОАО и др.), а также благодаря получению определенных инвестиций, появилась возможность не только приобретать качественные силовые транзисторы и тиристоры, а также другие комплектующие изделия, но и разворачивать активные работы по созданию отечественных преобразователей частоты и автоматизированных электроприводов переменного тока.

Интересную информацию дает один из ведущих российских специалистов в области регулируемого электропривода, член-корреспондент АЭН РФ, Г.Б. Лазарев в журнале Новости электротехники № 2 (32), 2005г. На основе совместных разработок Ансальдо – ВЭИ и ВНИИЭ разработана серия высоковольтных преобразователей частоты для асинхронного электропривода. ОАО «Электровыпрямитель» завершает работу по созданию преобразователя частоты для асинхронного электропривода напряжением 6000 В. Опытно-промышленный образец такого преобразователя предназначен для установки в Москве на районной станции теплоснабжения для регулирования сетевого насоса. Близка к завершению разработка высоковольтного преобразователя частоты в фирме «ЭЛ СИ ЭЛ», г. Москва. Создается преобразователь для электропривода 1250 кВт, 6000 В. Фирмой «Электротехс», г. Орел, где по аналогичной схеме изготовлен опытный образец ВПЧ для электропривода 1000 кВт, 6000 В.

Не остается в стороне и Урал. Например, ЗАО «Автоматизированные системы и комплексы», г. Екатеринбург, с середины 90-х гг. выполняет сотни заказов по реконструкции электроприводов с внедрением частотно-управляемых АД КЗР и различных типов УПЧ зарубежных и отечественных фирм, на главных (6,2 МВт, 6000 В) и вспомогательных (от 2,5 до 600 кВт, 380÷600 В) механизмах сорто- и трубопрокатных производств на уральских и др. металлургических предприятиях. Должное внимание уделено и городскому электротранспорту: со второй половины 90-х годов разработан и в 2000 году внедрен частотно-управляемый двухдвигательный электропривод с трехфазными АД КЗР на трамваях, которые уже курсируют в Екатеринбурге, Н.Тагиле, Красноурьинске, Казани, Уфе и Ташкенте. Специальные АД КЗР разработаны и выпускаются в г. Баранча (170 кВт, 345 В). Аналогичный однодвигательный ЭП в 1998г. разработан и в 2003г. внедрен на троллейбусе, г. Уфа. В настоящее время внедряется час-

точно-управляемый асинхронный электропривод с экспериментальным двухзвенным НПЧ без фильтра с оригинальной векторной системой управления на тяжелом продольно-строгальном станке, в связи с его модернизацией, г. Н.Салда.

С другой стороны, в условиях дефицита отечественной учебной и справочной литературы, в частности по электроприводам переменного тока, развивающаяся конкуренция всевозможных фирм-производителей, которые ориентируются под конкретный заказ, не способствует получению необходимой информации, поэтому не представляется возможным рекомендовать конкретный источник.

3.6.2.2. Законы частотного управления

Как известно, с целью формирования управляющего воздействия на угловую скорость вращения ротора

$$\omega_D = \omega_0(1 - S), \quad (3.125)$$

прежде всего ориентируются на изменение круговой частоты питающего напряжения $\omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot f_1$, в соответствии с выражением угловой скорости вращения магнитного поля

$$\omega_0 = \frac{\omega_1}{p} = \frac{2 \cdot \pi}{p} \cdot f_1, \quad (3.126)$$

где f_1 – циклическая частота напряжения питающей сети, Гц;

p – число пар полюсов машины.

Если изменять только f_1 и не воздействовать на другие переменные энергопреобразования ($U_{s\phi}$, $I_{s\phi}$), которые являются функциями электромагнитного момента двигателя и нагрузки на его валу, то **желаемого эффекта не получится**. Объясняется это следующим: при неизменном $U_{s\phi}$

повышение $f_1 > f_{1N}$ с целью увеличения $\omega_D > \omega_{DN}$, приведет к увеличению индуктивности рассеяния $L_{\sigma s}$ и $L_{\sigma r}$, снижению ψ_m и I_r , то есть к ухудшению электромеханических свойств и энергетики АД КЗР. Механическая характеристика АД будет смягчаться из-за возрастания скольжения, перегрузочная способность падать, например, при устремлении $\omega_D \rightarrow \infty$ механическая характеристика выродится в прямую по оси ординат.

В современных частотно-управляемых электроприводах может быть использовано более двух десятков законов частотного управления электроприводами переменного тока, которые подразделяются следующим образом: законы скалярного частотного управления и законы векторного частотного управления, которые в свою очередь рассматривают как законы прямого и косвенного векторного управления.

Их целью является выработка необходимых управляющих воздействий на переменные энергопреобразования через управляемый преобразователь для обеспечения требуемых выходных координат электропривода с ЭД переменного тока.

1. Законы скалярного частотного управления

Еще в первой четверти прошлого столетия М.П. Костенко определенным образом сформулировал законы частотного управления, обратив внимание на зависимость величины фазного напряжения $U_{s\phi}$, подводимого к статору АД КЗР от частоты этого напряжения f_1 и нагрузки на валу M_c . А.А. Булгаков в 60-е годы обобщил этот закон на любой способ управления скоростью вращения двигателя.

Термин «скалярный» указывает на *управляющее воздействие по модулю физической величины* ($U_{s\phi m}$, $I_{s\phi m}$ и др.) не воздействуя на её

аргумент, вместе с тем действующее значение $U_{s\phi}$ и его частоты взаимно связаны.

а. Самым простым законом управления частотой является поддержание отношения модуля напряжения к частоте постоянным

$$\frac{U_{s\phi}}{f_1} = Const, \quad (3.127)$$

что обеспечивает удобства, когда нагрузка на валу неизменная, $M_c = Const$.

При управлении «вверх» от f_{1N} повышение $U_{s\phi}$ позволяет сохранить магнитный поток машины, что отчасти сохраняет постоянство электромагнитного состояния и перегрузочной способности АД КЗР, $\Phi_m \cong Const$ и $\lambda = \frac{M_{B\max}}{M_{BN}} \cong Const$.

Данные свойства сохраняются и при управлении скоростью «вниз», за исключением области малых частот, когда f_1 и $U_{s\phi}$ устремляются к нулю. При $f_1 \cong 0$ механическая характеристика АД вырождается в точку начала координат из-за возросшего отрицательного влияния падения напряжения на активном сопротивлении цепи статора.

Для компенсации влияния R_s при управлении скоростью «вниз» можно использовать законы «б» и «в».

б. В области частот $f_1 < 50$ Гц можно перейти от пропорционального «закона а» к параболической зависимости между $U_{s\phi m}$ и f_1 и этим замедлить темп снижения $U_{s\phi}$ при уменьшении f_1 . Уравнение параболы

$$y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c,$$

в интересующей области удобно задать координатами трех точек. При этом интересующие переменные целесообразно выразить в относительных

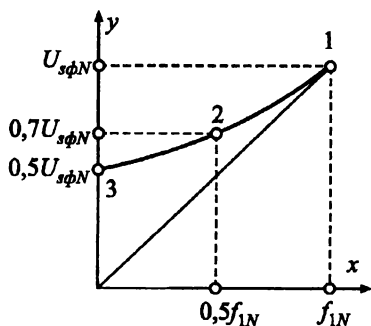


Рис. 3.24.

единицах, приняв за базовые их номинальные значения, рис. 3.24. Например, точка 1 (1; 1) – точка номинального режима работы; точка 2 (0,7; 0,5) – промежуточная точка; точка 3 (0,5; 0) – конечная точка. С учетом значений принятых координат записываем уравнения для каждой точки, при совместном решении которых получаем коэффициен-

ты: $a = 0,2$; $b = 0,3$; $c = 0,5$. Таким образом, на рассматриваемом участке, зависимость $U_{s\phi} = f(f_1)$ запишется

$$U_{s\phi} = 0,2 \cdot f_1^2 + 0,3 \cdot f_1 + 0,5. \text{ [о.е.]} \quad (3.128)$$

в. Закон поддержания

$$\frac{E_{s\phi}}{f_1} = Const, \quad (3.129)$$

см. рис. 3.25, который эквивалентен $\psi_s = Const$, что обеспечивает компенсацию падения напряжения на активном сопротивлении R_s за счет увеличения модуля $U_{s\phi}$:

$$\frac{\overset{\bullet}{U}_{s\phi} \uparrow - R_s \cdot \overset{\bullet}{I}_{s\phi}}{f_1 \downarrow} = Const. \quad (3.129^*)$$

г. Закон поддержания

$$\frac{E_m}{f_1} = Const, \quad (3.130)$$

см. рис. 3.25, который эквивалентен $\psi_m \doteq Const$, что обеспечивает компенсацию влияния R_s и индуктивного сопротивления рассеяния X_s за счет ещё большего увеличения модуля $U_{s\phi}$:

$$\frac{\overset{\bullet}{U}_{s\phi} \uparrow\uparrow}{f_1 \downarrow} \frac{-(R_s + jX_s) \cdot \overset{\bullet}{I}_{s\phi}}{f_1 \downarrow} = Const. \quad (3.130')$$

д. Закон поддержания

$$\frac{E_{r\phi}}{f_1} = Const, \quad (3.131)$$

см. рис. 3.25, который эквивалентен $\psi_r = Const$ и обеспечивает компенсацию влияния R_s и индуктивных сопротивлений X_s и X_r , что заставляет еще больше увеличивать модуль $U_{s\phi}$:

$$\frac{\overset{\bullet}{U}_{s\phi} \uparrow\uparrow\uparrow}{f_1 \downarrow} \frac{-(R_s + jX_s) \cdot \overset{\bullet}{I}_{s\phi} - jX_r \cdot \overset{\bullet}{I}_{r\phi}}{f_1 \downarrow} = Const. \quad (3.131')$$

е. Закон поддержания

$$\frac{U_{s\phi}}{\sqrt{f_1}} = Const, \quad (3.132)$$

который обеспечивает постоянство мощности при всех скоростях вращения ЭД: $P_2 = M_c \uparrow\downarrow \cdot \omega_D \downarrow\uparrow = Const$ и используется в электроприводах моталок, размотывателей и др.

ж. Закон поддержания

$$\frac{U_{s\phi}}{f_1^2} = Const, \quad (3.133)$$

который используется в электроприводах механизмов с так называемой «вентиляторной нагрузкой».

Скалярное частотное управление может использоваться как в разомкнутых, так и в замкнутых системах электропривода. В качественном отношении скалярное управление менее совершенно. Если оно дает достаточно удовлетворяющие результаты в квазиустановившихся режимах, являясь относительно простым и дешевым, то для электроприводов механизмов с высокими требованиями к динамике и быстрдействию его нельзя признать удовлетворительным.

Поскольку при анализе законов частотного управления скоростью ротора ω_D изменяют частоту напряжения f_1 и его действующее значение $U_{s\phi}$, стремясь обеспечить работу АД КЗР на достаточно жесткой характеристике при небольшом значении скольжения $S \approx S_N$, оказалось рациональным выражать названные физические величины в относительных единицах:

$$\alpha = \frac{f_1}{f_{1N}} = \frac{\omega_1}{\omega_{1N}} = \frac{\omega_0}{\omega_{0N}} = \frac{2\pi \cdot f_1}{p} \bigg/ \frac{2\pi \cdot f_{1N}}{p}, \quad (3.134)$$

- относительные циклическая и круговая частоты питающего напряжения; угловая скорость вращающегося магнитного поля; отметим, что число пар полюсов в о.е. получается $p = 1$;

$$\beta = \frac{S}{S_N} = \frac{\Delta\omega}{\omega_{0N}} = \frac{\Delta n}{n_{0N}}, \quad (3.135)$$

- абсолютное скольжение;

$$\gamma = \frac{U_{s\phi m}}{U_{s\phi mN}}, \quad (3.136)$$

- относительное значение амплитуды фазного напряжения на статоре;

$$v = \frac{\omega D}{\omega_{0N}} = \frac{n D}{n_{0N}}, \quad (3.137)$$

– относительная скорость вращения ротора, откуда

$$\beta = \frac{(\omega_{0N} - \omega D N)}{\omega_{0N}} = \alpha - v. \quad (3.138)$$

В качестве базовых берутся физические величины, соответствующие основной (естественной) механической характеристике двигателя. Удобство использования состоит в том, что любая относительная величина выражается через номинальную в принятых физических единицах измерения. Покажем это на T-образной эквивалентной схеме замещения АД, рис. 3.25, которая дает общее представление о возможностях частотного управления АД КЗР.

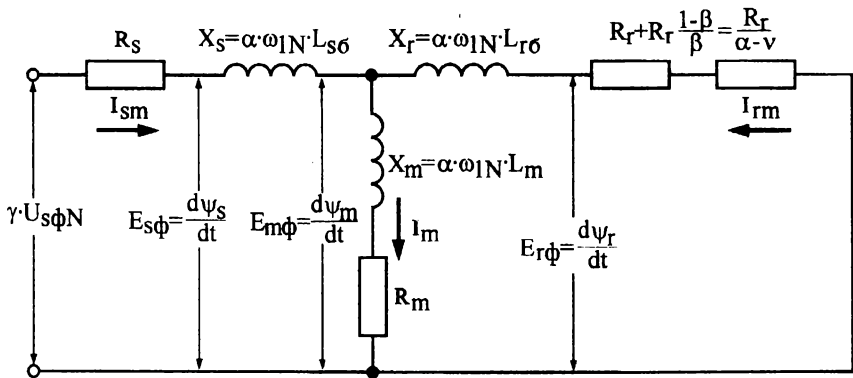


Рис. 3.25

Переменные и параметры цепи ротора считаются приведёнными к цепи обмотки статора. Электромагнитное состояние АД характеризуется зависимостью $\Phi_m = f(I_m)$, где $I_m = I_s + I_r = \frac{E_m}{Z_m}$. Слагаемое $R_r \cdot \frac{1 - \beta}{\beta}$ пропорционально механической мощности, развиваемой ротором.

2. Законы векторного частотного управления

В названной группе законов управляющим воздействием для формирования требуемых выходных координат электропривода ($M_{эм}$, ω_D и α_D) является потокосцепление (ψ_s , ψ_m или ψ_r), в котором задается не только модуль, но и аргумент. Принципиальное отличие между законами прямого и косвенного векторного управления заключается в различных способах ориентации систем координат, привязанной к конкретному потокосцеплению.

Законы прямого векторного управления, называемые «с прямой ориентацией по полю» строятся на основе прямого измерения потокосцепления, например, используя датчик Холла.

Законы косвенного векторного управления, называемые «с косвенной ориентацией поля», например, когда ψ_r вычисляется через измеренные ω_D и $I_{s\phi}$ с использованием прецизионной математической модели двигателя переменного тока.

Блок схема такого двигателя как объекта управления дана в [8, §10.4, с.239], которая представлена совокупностью блоков:

- прямого преобразования внешних воздействий;
- решения преобразованных уравнений электромагнитных контуров;
- обратного преобразования координат состояния;
- решения уравнений электромагнитного преобразования энергии;
- решения уравнений механического движения ротора.

Такая математическая модель даёт достаточно широкое и полное представление о процессах, протекающих в двигателе при произвольном характере изменения внешних управляющих и возмущающих воздействий.

Модель перспективна во многих отношениях и может быть использована для описания двигателя как элемента более сложных электромеханических систем, в соответствии с методом структурного моделирования.

Законы прямого и косвенного векторного управления позволяют, помимо законов скалярного частотного управления, оптимизировать энергетические показатели асинхронного электропривода (потребляемую мощность, потери, коэффициент мощности) в динамике и при изменении нагрузки на валу.

3.6.2.3. Выражения электромагнитного момента через обобщенные комплексы электромагнитных переменных

Активная электрическая энергия, потребляемая системой «УПЧ – АД КЗР» из сети и направляемая на преобразование в электрическую же с другими параметрами запишется

$$W_{1A} = \int R_1 \cdot dt = \int \frac{3}{2} \cdot U_{s\phi} \cdot I_{s\phi} \cdot \cos \varphi, \quad (3.139)$$

Используя значения действующего фазного напряжения статора $U_{s\phi}$, можно расписать выражения мгновенных напряжений в фазах:

$$\left. \begin{aligned} U_{sA} &= U_{s\phi} \cos(\omega_1 \cdot t + \psi); \\ U_{sB} &= U_{s\phi} \cos(\omega_1 \cdot t + \psi - \frac{2}{3}\pi); \\ U_{sC} &= U_{s\phi} \cos(\omega_1 \cdot t + \psi + \frac{2}{3}\pi); \end{aligned} \right\} \quad (3.140)$$

где ψ – начальная фаза, эл. рад;

$\frac{2}{3}\pi$ – сдвиг фазных напряжений относительно фазы «А», эл. рад.

К параметрам потребляемой АД электроэнергии прежде всего относятся: амплитудное или действующее значение фазного напряжения (тока) и его круговая частота $\omega_1 = 2\pi \cdot f_1$, рад/с, или циклическая частота f_1 , стандартные значения которой для электрических машин в нашей стране установлены: 50 Гц, базовая, а также повышенная 200 и 400 Гц. Ток $I_{s\phi}$ статора определённым образом отражает нагрузку на валу двигателя M_c и активно взаимодействует с другими переменными и параметрами электромагнитных цепей в процессе энергопреобразования, который физически связан с электромагнитной мощностью $P_{эм}$, передаваемой через воздушный зазор от статора к ротору и с развиваемым между ними электромагнитным моментом $M_{эм}$.

Если обратиться к математическому описанию АД КЗР в естественной трёхфазной системе координат, жёстко связанной с неподвижными магнитными осями фаз обмоток статора, выражая переменные электрических цепей в фазах статора и ротора через их мгновенные значения, получают громоздкую систему уравнений с периодическими коэффициентами. В 50-е годы 20-го столетия доктором технических наук, профессором УПИ А.А. Янко-Триницким [Электричество, 1951, №3, с.18-25] было предложено преобразование уравнений АД от мгновенных значений фазных переменных к мгновенным значениям их обобщенных комплексов в комплексной системе координат с так называемыми «прямым» и «обратным» преобразованиями переменных, а также приведение полученной системы обобщенных комплексов электромагнитных переменных к произвольной угловой скорости вращения координат ω_k . Такой прием позволил сократить число дифференциальных уравнений, избавиться от периодических коэффициентов, а через проекции обобщенных комплексов переменных на оси комплексной декартовой системы координат осуществить эквивалент-

ное представление АД в инвариантном энергетическом отношении как трехфазной и двухфазной машины с сохраняющимся числом пар полюсов на фазу.

Использование аппарата обобщенных комплексов переменных позволяет перейти к выражениям энергетических величин.

Мгновенное значение потребляемой из сети активной электрической мощности можно выразить как действительную часть произведения мгновенных значений обобщенных комплексов фазного напряжения U_s и сопряженного комплекса тока статора I_s

$$P_{эл} = \frac{3}{2} \cdot \operatorname{Re}[U_s \cdot I_s^*], \quad \text{Вт}, \quad (3.141)$$

а из раскрытия её баланса можно выделить выражение электромагнитной мощности $P_{эм}$, передаваемой через воздушный зазор от статора к ротору:

$$P_{эм} = \frac{3}{2} \cdot \operatorname{Re}[j \cdot \omega_1 \cdot L_m \cdot I_s \cdot I_r^*] = M_{эм} \cdot \omega_2, \quad \text{Вт}, \quad (3.142)$$

откуда

$$M_{эм} = \frac{3}{2} \cdot \operatorname{Re}[j \cdot p \cdot L_m \cdot I_s \cdot I_r^*] = M_B + \Delta M_c, \quad \text{Н}\cdot\text{м}, \quad (3.143)$$

где j – множитель, поворачивающий произведение обобщенных комплексов на 90° против часовой стрелки;

p – число пар полюсов двигателя;

L_m – взаимная индуктивность, Гн;

I_s – обобщенный комплекс тока статора, А;

I_r^* – сопряженное значение обобщенного комплекса тока ротора, А;

M_B – механический момент на валу ЭД, Н·м;

ΔM_c – момент постоянных потерь холостого хода, Н·м.

Выражение электромагнитного момента можно представить многими вариантами записи произведений обобщенных комплексов токов статора и ротора, потокоцеплений ψ_s , ψ_m и ψ_v , а также параметров электромагнитных цепей энергопреобразования не только в абсолютных, но и в относительных единицах, в формах векторных произведений, см. [8, гл.10.2, с.238], которые обеспечивают удобство решения задач управления.

3.6.2.4. Классификация УПЧ для трехфазных асинхронных электроприводов

Известны различные типы преобразователей переменного напряжения (тока) конкретного производственного назначения. Для целей управляемого трехфазного электропривода с АД КЗР относятся следующие типополнения УПЧ, см. [6], [7], [8], [10], [22]:

- преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока и автономным инвертором напряжения (АИН) или тока (АИТ), которые позволяют регулировать частоту выходного напряжения как вверх, так и вниз от номинального значения частоты сети;
- преобразователи с непосредственной связью с сетью – непосредственные преобразователи частоты (НПЧ), в которых частота регулируется только вниз от номинала.

А. Общая характеристика преобразователей частоты с автономным инвертором напряжения (АИН)

Такое типополнение преобразователя частоты представляет собой комбинацию выпрямителя (промежуточное звено постоянного тока) и ав-

тономного инвертора. В преобразователях рассматриваемого типа напряжение сети сначала выпрямляется, а затем инвертируется в переменное напряжение необходимой частоты, т.е. происходит двухступенчатое преобразование энергии по схеме переменный ток – постоянный ток – переменный ток.

В практике электропривода применяют три структурных варианта преобразователей частоты с АИН, отличающихся методом регулирования напряжения:

1) амплитудное регулирование напряжения с помощью управляемого выпрямителя (рис. 3.26);

2) амплитудно-импульсное регулирование напряжения с помощью неуправляемого выпрямителя и широтно-импульсного преобразователя (рис. 3.27);

3) широтно-импульсная модуляция, осуществляемая в АИН, который в этом случае выполняет функции регулятора напряжения и частоты (рис. 3.28).

1. УПЧ с амплитудным регулированием напряжения управляемым выпрямителем

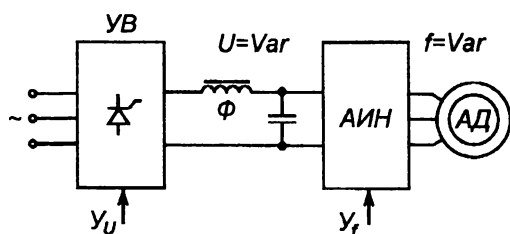


Рис. 3.26

Здесь, рис. 3.26, преобразователь частоты состоит из управляемого выпрямителя, фильтра и автономного инвертора (регулирование напряжения и частоты осуществляется

раздельно). Управляемый преобразователь в приводе с частотным управлением работает точно так же, как и в приводе постоянного тока.

Автономный инвертор представляет собой реверсивный переключатель, преобразующий выпрямленное напряжение в периодические прямоугольные равнополярные импульсы, аппроксимирующие синусоиду напряжения.

2. УПЧ с амплитудно-импульсным регулированием напряжения при неуправляемом выпрямителе и широтно-импульсном преобразователе (ШИП)

В таком варианте исполнения УПЧ управляемый выпрямитель заменен комбинацией неуправляемого выпрямителя и широтно-импульсного преобразователя (ШИП) (рис. 3.27). Напряжение сети выпрямляется, фильтруется и регулируется с помощью ШИП. На выходе ШИП формиру-

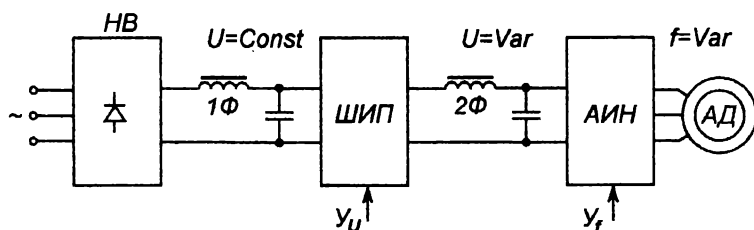


Рис. 3.27

ются прямоугольные импульсы, поэтому необходим еще один фильтр для сглаживания высокочастотных пульсаций напряжения. Звено постоянного тока структурно более сложно, однако, по сравнению с управляемым выпрямителем число силовых транзисторов уменьшается. Регулирование частоты осуществляется АИН. Таким образом, в преобразователях частоты этого типа частота и напряжение регулируются раздельно.

Для возможности рекуперирования энергии по встречно-параллельной схеме относительно НВ включают управляемый инвертор.

3. УПЧ с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) напряжения в самом инверторе

В такой структуре УПЧ инвертор не только изменяет частоту выходного напряжения, но и регулирует его амплитуду, что позволяет отказаться от регулируемого выпрямителя в звене постоянного тока и использовать более простой нерегулируемый диодный выпрямитель, рис. 3.28.

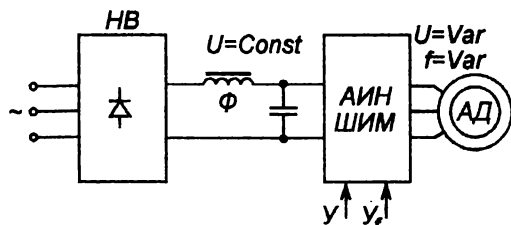


Рис. 3.28

Принцип действия инвертора с ШИМ иллюстрирует рис. 3.29. Период синусоидального сигнала разбивается на большое число малых интервалов длительностью Δt . На каждом интервале создаются два равнополярных импульса длительностью

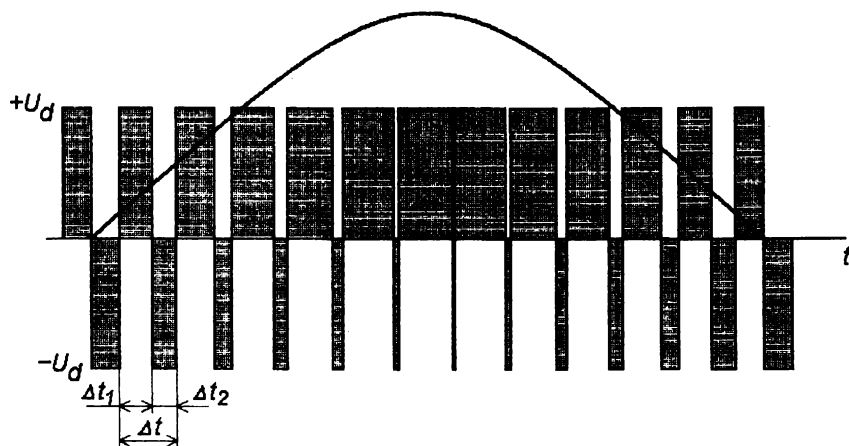


Рис. 3.29

Δt_1 и Δt_2 . Если длительность положительного и отрицательного импульса одинакова, то среднее значение напряжения на интервале Δt равно нулю. В

противном случае получают положительное или отрицательное среднее напряжение, пропорциональное модулю разности длительности этих импульсов $\pm|\Delta t_1 - \Delta t_2|$.

Когда один из импульсов имеет нулевую длительность, получают максимальное среднее напряжение, равное U_d . ШИМ позволяет уменьшить высшие гармонические составляющие в выходном токе инвертора и приблизить его к точной синусоиде. Точность аппроксимации синусоиды повышается по мере увеличения частоты коммутации, которая определяется, в первую очередь, динамическими возможностями силовых ключей. Поэтому в преобразователях частоты с ШИМ применяют ключи на силовых транзисторах.

Б. УПЧ с автономным инвертором тока (АИТ)

Преобразователь частоты с АИТ обеспечивает постоянство тока нагрузки независимо от режима его работы, т.е. обладает свойствами источника тока. Идеальный источник тока должен иметь бесконечно большое внутреннее сопротивление.

Преобразователь частоты с АИТ, рис. 3.30, состоит из управляемого выпрямителя, фильтра и автономного инвертора, т.е. структура АИТ совпадает со структурой АИН. Отличие заключается в том, что фильтр имеет

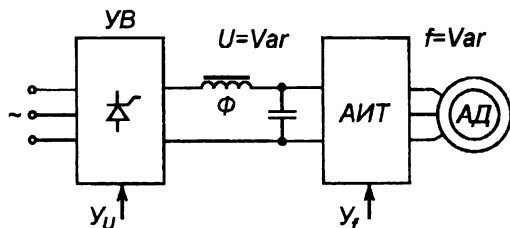


Рис. 3.30

дроссель L с большой индуктивностью и, следовательно, большим индуктивным сопротивлением, что увеличивает полное внутреннее сопротивление источника. Кроме того,

управляемый выпрямитель охвачен обратной связью по току, стабилизирующей ток в цепи нагрузки. Важным преимуществом преобразователей частоты с АИТ является возможность рекуперации энергии в сеть при торможении. Для этого нереверсивный управляемый выпрямитель переводят в режим инвертора, ведомого сетью.

В. УПЧ, построенные на основе непосредственного преобразования частоты (НПЧ)

НПЧ осуществляет однократное преобразование электрической энергии, поэтому в нем нет промежуточного звена постоянного тока, и силовой преобразователь питается синусоидальным напряжением сети, изменяя его амплитуду и частоту, см. [10], [22]. Такие преобразователи часто называют циклоконверторами, ведомыми сетью. По своей структуре НПЧ является реверсивным управляемым выпрямителем, на который подается синусоидальное управляющее напряжение.

Из принципа действия НПЧ вытекает его особенность – однозонное регулирование частоты только в сторону уменьшения относительно частоты сети. При этом, хотя теоретически максимальная частота выходного напряжения совпадает с частотой сети, но на практике это значение примерно вдвое меньше. Из этого следует, что НПЧ выгодно применять в тихоходном электроприводе. Так же, как и автономные инверторы, НПЧ могут работать в режиме источников напряжения или тока. В последнем случае преобразователь должен быть охвачен быстродействующей обратной связью по току.

а. Определенный практический интерес представляют схемы с трехфазным выходом. Простейшая схема НПЧ, рис. 3.31, содержит 18

тиристоров, объединенных в 6 групп, включенных попарно встречно-параллельно.

Достоинством схемы является относительно малое число тиристоров и возможность включения нагрузки в трехфазную группу без применения многообмоточного трансформатора. К недостаткам схемы относится большое содержание высших гармоник в кривой выходного напряжения, что может потребовать установки на выходе НПЧ сглаживающих фильтров. Другим недостатком схемы является наличие в кривой потребляемого

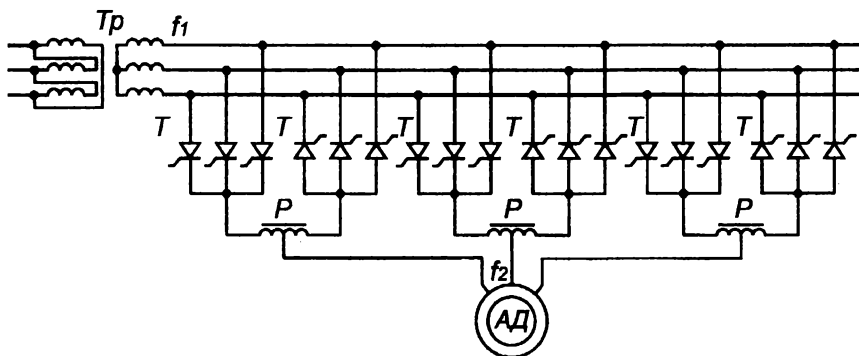


Рис. 3.31

тока субгармоник, частоты которых определяются частотой и формой кривой выходного напряжения. Эти субгармоники дополнительно загружают питающую сеть, а при наличии на входе схемы силового трансформатора вызывают увеличение его установленной мощности. При совместном управлении группами тиристоров эта схема требует установки довольно мощных реакторов для ограничения уравнивающих токов. Преобразователи по схеме на рис. 3.31 применяются в установках электропривода относительно малой мощности (десятки киловатт).

б. Наиболее распространенными являются НПЧ, в силовых схемах которых применены трехфазные мостовые схемы. Трехфазный мост может выполнять роль группы тиристоров, формирующей одну полу-

волну тока нагрузки, или же являться ячейкой более сложных схем. Рассмотрим сначала НПЧ, в которых кривая тока каждой фазы нагрузки формируется двумя трехфазными мостами, включенными встречно-параллельно.

Схема НПЧ, выполненного по мостовой схеме с трехфазным выходом, приведена на рис. 3.32. Минимальное число тиристоров в такой схеме 36.

К достоинствам НПЧ, выполненных с использованием трехфазных мостов, следует отнести то, что амплитуда пульсаций в кривой выходного напряжения по сравнению с трехфазной нулевой схемой уменьшается примерно в 2 раза при одновременном увеличении вдвое частоты пульсаций. Это позволяет в большинстве случаев при работе на АД обойтись без установки сглаживающего фильтра.

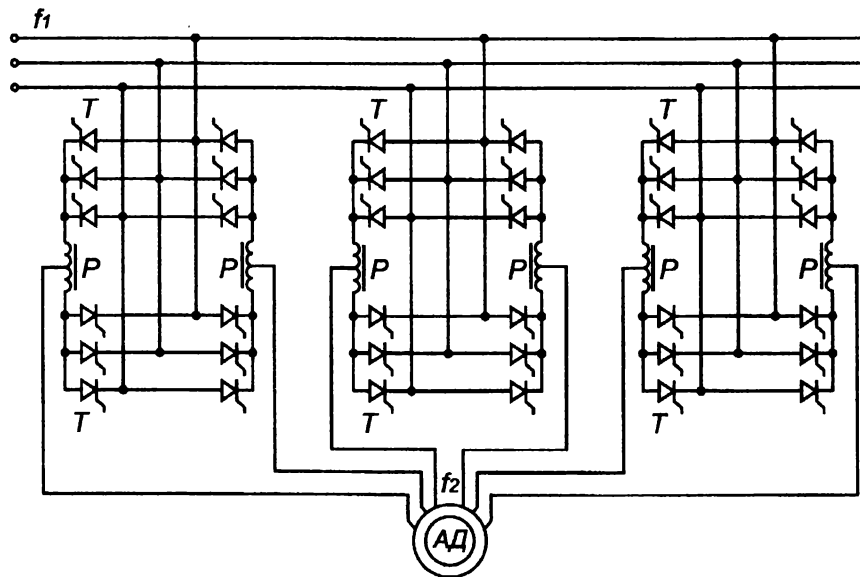


Рис. 3.32

При наличии на стороне питающей сети силового трансформатора его параметры в значительной степени влияют на параметры НПЧ.

Влияние трансформатора на параметры НПЧ выражается в следующем:

- количество, схема включения и компоновка обмоток определяют установленную мощность трансформатора и, следовательно, влияют на массогабаритные показатели трансформатора и НПЧ в целом;

- количество и схема включения обмоток определяют возможность включения нагрузки НПЧ в трехфазную группу;

- при совместном управлении группами вентилей НПЧ схема включения обмоток трансформатора определяет контуры протекания уравнивающих токов, значения этих токов, установленную мощность ограничивающих реакторов и оказывает влияние на энергетические характеристики НПЧ;

- сопротивления рассеяния обмоток трансформатора, а при наличии нескольких вторичных обмоток, и соотношения между их сопротивлениями рассеяния, определяют падение напряжения НПЧ, обусловленное коммутацией тока как в тиристорах данной фазы НПЧ, так и в тиристорах других фаз;

- значения сопротивлений рассеяния обмоток трансформатора наряду с реактивным сопротивлением питающей сети определяют скорость изменения тока в тиристорах силовой схемы в процессе коммутации.

В простейшем случае питающий трансформатор имеет одну вторичную обмотку. Установленная мощность трансформатора в этом случае получается минимальной и равной полной мощности НПЧ, потребляемой им от питающей сети. В случае совместного управления из-за связи тиристорных групп НПЧ между собой через вторичную обмотку трансформатора значения уравнивающих токов получаются такими же, как и в НПЧ, вы-

полненном по трехфазной нулевой схеме. В рассматриваемой схеме НПЧ из-за образования короткозамкнутых контуров недопустима гальваническая связь между цепями нагрузки отдельных фаз. Провалы и всплески в кривых напряжения вторичной обмотки трансформатора, возникающие при коммутации тока в тиристорах одной фазы НПЧ, присутствуют также в кривых напряжения, прикладываемого к тиристорным схемам двух других фаз, что оказывает влияние на внешние характеристики НПЧ.

В ряде случаев целесообразно применять схему НПЧ с трансформатором, имеющим три вторичные обмотки, каждая из которых питает два тиристорных моста, образующих одну фазу НПЧ. Установленная мощность трансформатора в этом случае увеличивается незначительно.

в. В установках вентильного электропривода средней и большой мощности с НПЧ целесообразно применить многофазные схемы как на стороне питающей сети, так и на стороне нагрузки. Наиболее рациональным это оказывается в тех случаях, когда для увеличения мощности установки приходится использовать параллельное или последовательное соединение тиристоров в каждом плече схемы.

Система ЭП с НПЧ, схема которого приведена на рис. 3.33, выполнена по эквивалентной двенадцатифазной схеме, которая содержит шесть пар трехфазных тиристорных мостов, включенных в пределах каждой пары встречно-параллельно. Питание вентильной схемы производится от сети переменного тока, причем обеспечивается фазовый сдвиг в 30 эл. град. между системами напряжений, питающих две половины групп мостов НПЧ, например, мосты 1-6 и 7-12:

$$U_{A1} = U_{1m} \sin \omega_1 t;$$

$$U_{A2} = U_{1m} \sin(\omega_1 t - \frac{\pi}{6});$$

$$U_{a1} = U_{2m} \sin \omega_2 t;$$

$$U_{a2} = U_{2m} \sin(\omega_2 t - \frac{\pi}{6}).$$

Тиристорные мосты 1-6 формируют одну систему трехфазного выходного напряжения, а мосты 7-12 – другую систему со сдвигом в 30 эл. град. выходной частоты по отношению к первой системе.

Двигатель нагрузки АД должен иметь две трехфазные обмотки, питание каждой из которых производится от одной системы выходного напряжения НПЧ.

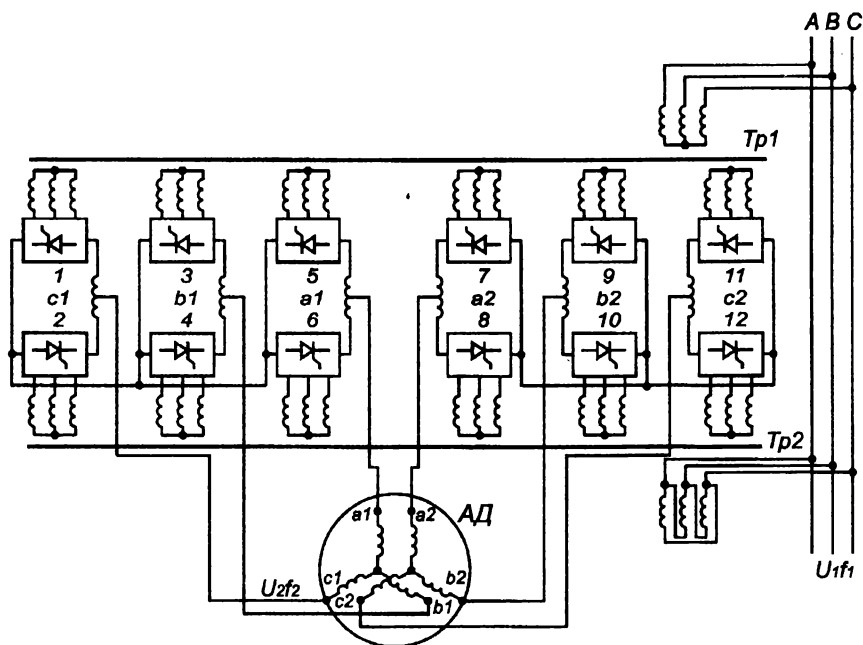


Рис. 3.33

Наличие фазового сдвига в 30 эл. град. между системами питающего напряжения групп тиристорных мостов позволяет снизить содержание высших гармоник в кривой первичного тока путем исключения 5-й и 7-й гармоник, вызывающих наибольшие трудности при фильтрации в НПЧ, выполненном по обычной мостовой схеме. При использовании схемы

рис. 3.33 коэффициент нелинейных искажений кривой потребляемого тока снижается до 17 – 20 %.

Фазовый сдвиг в 30 эл. град. в угловой мере частоты вторичной сети между двумя системами выходного напряжения позволяет снизить модуляцию основной гармоники первичного тока более, чем в 2 раза, и повысить вдвое частоту модуляции.

При дальнейшем увеличении мощности установки вместо каждого из тиристорных мостов в схеме на рис. 3.33 целесообразно применять два трехфазных моста с поочередным управлением. В такой схеме значительно улучшаются энергетические характеристики на стороне, связанной с питающей сетью.

Изложенное относится к НПЧ с естественной коммутацией, в схеме которых использованы однооперационные тиристоры. В последние годы интенсивно разрабатываются и внедряются НПЧ с искусственной коммутацией, в которых используются двухоперационные тиристоры, либо полностью управляемые транзисторные ключи и импульсно-модуляционные алгоритмы управления (ШИМ). Это позволяет существенно расширить функциональные возможности НПЧ в части диапазона регулирования частоты, а также электромагнитной и энергетической совместимости преобразователя с питающей сетью и двигателем.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Основная:

1. Ильинский Н.Ф. - Основы электропривода: Изд. МЭИ, 2003. – 224с.
2. Ключев В.И. Теория электропривода: Учеб. для вузов.- М.: Энергоатомиздат, 1998. – 704 с.
3. Ковчин С.А., Сабинин Ю.А. Теория электропривода: Учебн. для вузов. – СПб.: Энергоатомиздат, 1994.
4. Ильинский Н.Ф., Козаченко В.Ф. – Общий курс электропривода: Учебник для вузов.- М: Энергоатомиздат, 1992-544с.
5. Москаленко В.В.- Автоматизированный электропривод: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат; 1986.- 416с.: ил.
6. Фираго Б.И., Павлячик Л.Б. Теория электропривода: Учебное пособие для вузов. – Минск.: ЗАО Техноперспектива, 2004. – 527 с.
7. Усынин Ю.С. Системы управления электроприводов: Учебное пособие для вузов. – Челябинск.: Изд-во ЮУрГУ, 2001. – 329 с.

Дополнительная:

8. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты: Екатеринбург. УРО РАН, 2000. – 654 с.
9. Шрейнер Р.Т., Дмитренко Ю.А. Оптимальное частотное управление электроприводами: Кишинев, Штеница, 1982. – 224 с.
10. Тиристорные преобразователи частоты в электроприводе / А.Я. Берштейн, Ю.М. Гусяцкий, А.В. Кудрявцев, Р.С. Сарбатов; Под ред. Р.С. Сарбатова. – М.: Энергия, 1980. – 328 с.

11. Королев А.А. Механическое оборудование прокатных и трубных цехов: Учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1987. – 480 с.
12. Бычков В.П. Электропривод и автоматизация металлургического производства. – М.: Высш. шк., 1977. – 280 с.
13. Егоров К.А. Системы управления пассажирскими лифтами. – М.: Стройиздат, 1977. – 240 с.
14. Чилкин М.Г., Соколов М.М., Терехов В.М., Шинянский А.В. Основы автоматизированного электропривода: Учебн. пособие для вузов. – М., Энергия, 1974. – 568 с.
15. Дранников В.Г., Звягин И.Е. автоматизированный электропривод подъемно-транспортных машин. – М.: Высш. шк., 1973. – 278 с.
16. Сандлер А.С. Электропривод и автоматизация металлорежущих станков. – М.: Высш. шк., 1972. – 439 с.

Справочники:

17. Справочник по автоматизированному электроприводу. / Под ред. Елисеева В.А. и Шинянского А.В. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.
18. Комплектные тиристорные электроприводы: Справочник / Евзеров И.Х., Горобец А.С. и др., Под ред. Перельмутера В.М. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 319 с.
19. Справочник по электрическим машинам: в 2-х т. / Под ред. Копылова И.П. и Клокова Б.К. – Т.1. – М.: Энергоатомиздат, 1988.-455 с.
20. Справочник по электрическим машинам: в 2-х т. / Под ред. Копылова И.П. и Клокова Б.К. – Т.2. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 688 с.

21. Электротехнический справочник: В 3-х т. Т. 2. Электротехнические изделия и устройства / Под общ. ред. профессоров МЭИ (гл. ред. Орлов И.Н.) и др. – 7-е изд., и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986.- 712с.
22. Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами / Под ред. Круповича В.И., Барыбина Ю.Г., Самовера М.Л.. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1982.- 416с.
23. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / Кравчик А.Э. и др. – М.: Энергоиздат, 1982.- 504с.
24. Вешеневский С.Н. – Характеристики двигателей в электроприводе. Изд. 6-е, М., Энергия, 1977.- 432с.
25. С.Т. Усатенко, Т.К. Каченюк, М.В. Терехова. Выполнение электрических схем по ЕСКД: Справ. 2-е изд. – М: Изд-во стандартов, 1992. – 316 с.

**Приложение 1. КЛАССЫ НАГРЕВОСТОЙКОСТИ
ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН**

А	Е	В	Ф	Н
Предельно допустимые превышения температуры, °С				
65	80	90	115	140

Начальными нормальными условиями считаются:

$$\Theta_{окр.ср} = +40^0 \text{ С,}$$

на высоте над уровнем моря не более 1000 м.

Приложение 2. ЗНАЧЕНИЯ НОМИНАЛЬНЫХ КПД ПЕРЕДАЧ С УЧЕТОМ ПОТЕРЬ В ОПОРАХ

1. Ременная открытая, без натяжного ролика	0,96
2. Ременная открытая, с натяжным роликом	0,94
3. Клиноременная	0,93 – 0,95
4. Зубчатая пара с опорой трения качения	0,975 – 0,985
5. Зубчатая пара с опорой трения скольжения	0,96 – 0,97
6. Червячная пара	0,5 – 0,7
7. Цепная зубчатая передача	0,97 – 0,98
8. Цепная роликовая передача	0,96 – 0,97
9. Кривошипно-шатунная передача	0,9

Полный КПД передачи определяется произведением КПД входящих в нее кинематических пар:

$$\eta_n = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \dots \cdot \eta_n.$$

КПД зависит не только от нагрузки, передаваемой через передачу, и числа входящих в нее пар, но и от скорости. При одинаковой нагрузке с увеличением скорости КПД падает.

Обычно принимают КПД холостого хода $\eta_{хх}$ равным $0,5\eta_N$.

Томашевский Николай Иосифович,
Томашевский Дмитрий Николаевич,
Емельянов Александр Александрович,
Ипполитов Владимир Владимирович.

Под редакцией канд. техн. наук, доцента Н.И. Томашевского.

Разработка электроприводов производственных механизмов

Учебно-методическое пособие к курсовому проектированию

Подписано в печать *25.04.04* Формат 60x84/16. Бумага для множ. аппаратов.
Печать плоская. Усл. печ. л. *133*. Уч.-изд. л. *142*. Тираж *200* экз. Заказ *№142*
