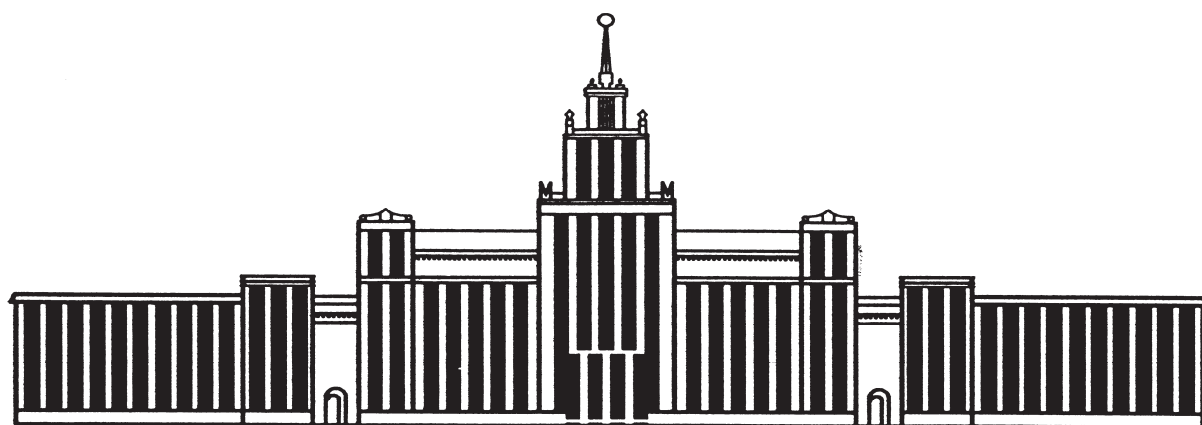




ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

62-83(07)
Т338

Г.И. Драчев, А.Н. Шишков,
А.Е. Бычков, О.Г. Брылина

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Учебное пособие к курсовому проектированию

Челябинск
2017

Министерство образования и науки Российской Федерации
Южно-Уральский государственный университет
Кафедра «Автоматизированный электропривод»

62-83(07)
Т338

Г.И. Драчев, А.Н. Шишков, А.Е. Бычков, О.Г. Брылина

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Учебное пособие к курсовому проектированию

Челябинск
Издательский центр ЮУрГУ
2017

УДК 62-83(07)
Т338

Одобрено
учебно-методической комиссией энергетического факультета

Рецензенты:
Б.Ю. Сидоренко, Н.Е. Лях

Т338 **Теория электропривода:** учебное пособие к курсовому проектированию / Г.И. Драчев, А.Н. Шишков, А.Е. Бычков, О.Г. Брылина. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2017. – 130 с.

В учебном пособии рассмотрены цели и содержание курсового проекта по дисциплине «Теория электропривода». Изложена методика выбора по мощности электродвигателя и преобразователей напряжения и частоты для механизмов повторно-кратковременного режима работы, приведена методика расчета характеристик электродвигателя при питании от преобразователей и от цеховой сети. Рассмотрен расчет переходных процессов электропривода.

Приведены методика проверки по нагреву, по перегрузочной способности двигателей и преобразователей, методика расчета энергетических показателей электропривода.

Учебное пособие предназначено для студентов энергетического факультета, обучаемых по программе подготовки бакалавров по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» и может быть использовано при дипломном проектировании. Учебное пособие будет также полезно для подготовки бакалавров других электротехнических специальностей.

УДК 62-83(07)

© Издательский центр ЮУрГУ, 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ. ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ НАД КУРСОВЫМ ПРОЕКТОМ	6
1 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ.....	8
1.1 Описание рабочей машины	8
1.2 Исходные данные для проектирования электропривода	8
1.3 Требования, предъявляемые к электроприводу	10
2 РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ	11
2.1 Нагрузочные диаграммы скорости рабочего органа	12
2.2 Нагрузочные диаграммы моментов рабочего органа	14
2.3 Расчет мощности двигателя.....	18
3 ВЫБОР ТИПА ДВИГАТЕЛЯ	
3.1 Обоснование выбора рода тока и типа электропривода.....	20
3.2 Выбор двигателя	22
3.2.1 Выбор двигателя по конструктивному исполнению	22
3.2.2 Выбор двигателя по скорости	22
3.2.3 Выбор типа и мощности двигателя	22
4 ВЫБОР РЕДУКТОРА	24
5 ПРИВЕДЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ МОМЕНТОВ И МОМЕНТОВ ИНЕРЦИИ К ВАЛУ ДВИГАТЕЛЯ	25
6 ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ДВИГАТЕЛЯ ПО НАГРЕВУ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ	31
7 ВЫБОР ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА.....	34
7.1 Выбор основных элементов системы ТП – Д.....	35
7.2 Выбор основных элементов системы ПЧ–АД.....	37
7.3 Выбор станции управления для двигателя, питающегося от цеховой сети.....	41
8 РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПРИВОДА	
8.1 Общие положения	41
8.2 Расчет естественных характеристик электродвигателей	42
8.2.1 Естественные характеристики двигателя независимого возбуждения.....	42

8.2.2 Естественные характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения	45
8.2.3 Естественные характеристики асинхронного двигателя.....	46
8.3 Расчет параметров схем включения, обеспечивающих работу двигателя в заданных точках	
8.3.1 Расчет параметров схем включения посредством специализированных программ	49
8.3.2 Расчет параметров схем включения графическим методом ..	49
8.3.3 Расчет параметров схем включения аналитическим методом	50
9 РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА	
9.1 Общие положения	60
9.2 Путь первый. Готовые аналитические решения.....	61
9.2.1 Механические переходные процессы электроприводов с прямолинейными механическими характеристиками и с идеально жесткими связями	61
9.2.2 Расчёт нагрузочных диаграмм при нелинейных механических характеристиках	62
9.2.3 Электромеханический переходный процесс без учета упругости.....	64
9.2.4 Электромеханический переходный процесс с учетом двухмассовой упругой системы.....	65
9.2.5 Среднеквадратичное значение тока (момента)	69
9.3 Путь второй. Частотный анализ.....	70
9.3.1 Механическая часть электропривода	70
9.3.2 Структурная схема электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения.....	71
9.3.3 Структурная схема асинхронного двигателя.....	73
9.3.4 Структурная схема системы ТП–Д.....	74
9.3.5 Структурная схема системы ПЧ–АД.....	75
9.4 Путь третий. Интегрирование уравнений	79
10 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СХЕМ ПУСКА И ТОРМОЖЕНИЯ	
10.1 Общие положения	79
10.2 Система преобразователь – двигатель	80

11 ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ	
11.1 Общие положения	84
11.2 Проверка на перегрузочную способность	85
11.3 Проверка на заданную производительность.....	86
11.4 Проверка по нагреву двигателя и преобразователя	
11.4.1 Проверка выбранного двигателя по нагреву	87
11.4.2 Проверка по нагреву преобразователя	89
11.5 Расчёт энергетических показателей электропривода	89
11.6 Расчёт энергетических показателей электропривода	93
12 ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ЭЛЕКТРОПРИВОДА. ВЫБОР АППАРАТОВ	93
12.1 Выбор фильтров и коммутирующей аппаратуры для преобразователя частоты	94
12.2 Выбор блоков тормозных резисторов системы ПЧ–АД	97
12.3 Система управления пуском и торможением электропривода.	102
ПРИЛОЖЕНИЯ	
Приложение А Кинематические схемы рабочих машин	
А1. Электропривод механизма подъема	104
А2. Электропривод тележки мостового крана	106
А3. Электропривод моста	108
А.4 Электропривод грузового лифта.....	110
А5. Электропривод рольганга перед ножницами	112
А6. Электропривод цепного транспортера	115
А7. Электропривод толкателя методической печи	117
А8. Электропривод штабелирующего стола	119
А9. Электропривод сталкивателя слябов	121
А10. Электропривод подъемника	123
А.11. Электропривод механизма захватов манипулятора.....	125
Приложение В Технические данные трансформаторов, реакторов, автоматических выключателей	127
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	130

ВВЕДЕНИЕ. ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ НАД КУРСОВЫМ ПРОЕКТОМ

В учебном пособии рассмотрены вопросы проектирования электропривода для механизма, имеющего повторно-кратковременный циклический режим работы. Оно предназначено для студентов, обучающихся по направлению «Электроэнергетика и электротехника» и может быть использовано при выполнении курсового проекта по дисциплинам «Электрический привод», «Теория электропривода», а также при дипломном проектировании. Учебное пособие может быть полезно студентам других электротехнических специальностей при изучении дисциплины «Электрический привод».

Целями курсового проекта являются:

- систематизация и закрепление знаний по дисциплине «Теория электропривода»;
- ознакомление с серийно выпускаемым электрооборудованием (электродвигателями, преобразователями, аппаратурой управления);
- освоение распространенных методов расчетов электропривода;
- обоснованный выбор силового оборудования и аппаратуры управления электропривода рабочей машины;
- оценка статических, динамических и энергетических показателей выбранного электропривода.

Задание на курсовой проект (приложение А) выдаётся студенту в день начала курсового проектирования.

Для студентов – заочников вариант задания на курсовой проект назначается преподавателем или определяется по двум последним цифрам номера зачетной книжки. Например, шифр студента 6137 означает, что его вариант 37.

В учебном пособии предусмотрены варианты кинематических схем типовых механизмов, применяемых в промышленности, а также обеспечивается возможность расчета электропривода по выбору студента (заказу предприятия) по итогам производственной практики.

Предлагается выбор системы электропривода при питании двигателей от цеховой сети или при питании от силовых полупроводниковых преобразователей электрической энергии (системы ТП–Д, ПЧ–АД и т.п.).

Проект состоит из пояснительной записки и графической части.

В пояснительной записке должны быть представлены исходные данные для проектирования, включая кинематическую схему механизма, даны обоснования всех принятых решений, указаны методы расчётов, приведены все расчётные формулы и результаты расчётов. Результаты однотипных расчётов представляются в табличной форме.

Пояснительная записка выполняется на листах формата А4 в соответствии с правилами Единой системы конструкторской документации (ЕСКД) и стандартом предприятия СТО ЮУрГУ04 – 2008 [10].

Графическая часть проекта выполняется, как правило, на чертеже формата А1. Одна половина чертежа (формат А2) отводится для вычерчивания схем электрических принципиальных (ЭЗ):

- системы электропривода с перечнем элементов;
- соединения пусковых и тормозных резисторов.

На другой половине (формат А2) приводится графический материал теоретической части (ТЧ):

- кинематическая схема рабочей машины;
- структурная схема электропривода;
- статические и динамические характеристики электропривода;
- нагрузочные диаграммы электропривода.

Допускается выполнение графической части проекта в формате А4 с обязательным соблюдением требований ЕСКД. Помимо этого, графическая часть может быть выполнена в электронной форме в виде презентации *Microsoft Power Point*.

Законченный курсовой проект после проверки его преподавателем-руководителем проекта и исправления указанных недочётов защищается в комиссии из преподавателей кафедры. Защиты проектов проводятся по заранее объявленному расписанию. На защите курсового проекта студент делает доклад, в котором должны быть:

- сформулирована тема проекта и кратко оговорены исходные технические данные;
- изложены основные принятые технические решения (род тока и тип электропривода, типы двигателя и преобразователя, схемы включения, способы пуска, торможения, регулирования скорости, статические и динамические характеристики электропривода и т.д.);
- указаны (в краткой форме, без раскрытия деталей) примененные методы расчетов, в т.ч. расчетов на ЭВМ;
- представлены выводы по работе, отражающие в какой степени в разработанном проекте обеспечено выполнение заданных технических требований.

Доклад рассчитывается на 4...5 мин. Основные положения доклада должны иллюстрироваться схемами и графиками, представленными на чертежах.

При оценке курсового проекта комиссией принимается во внимание обоснованность принятых в проекте решений, глубина проработки основных вопросов, качество оформления пояснительной записки и графической части проекта, качество доклада по работе, правильность и полнота ответов на вопросы, заданные членами комиссии в процессе защиты проекта.

1 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Объектом для проектирования электропривода является механизм с повторно-кратковременным режимом работы (механизм подъема экскаватора, крана, механизм передвижения тележки или моста крана, механизм поворота экскаватора и т.п.). Нагрузка механизма изменяется в течение цикла, включает в себя разгон до рабочей скорости, выполнение работы на этой скорости, торможение или реверс и возвращение на повышенной скорости в исходное положение. В процессе работы механизма возникает необходимость регулирования скорости и момента, ограничения предельных значений момента, ограничения ускорения рабочего органа. Возникают режимы приложения и снятия нагрузки.

1.1 Описание рабочей машины

На начальном этапе проектирования электропривода изучается место рабочей машины в технологическом процессе, ее основные функции и задачи.

При изучении рабочей машины широко используется техническая литература по соответствующим отраслям промышленности. Часто процесс работы механизмов, предложенных в задании или близких к ним изложен в видео файлах, располагающихся в сети *Internet*.

Принцип действия рабочей машины или ее рабочего органа изучается по кинематической схеме, в которой обычно приводятся все движущиеся вращательно и поступательно динамические массы, прослеживаются пути передачи мощности от приводного вала рабочей машины до ее выходного органа. В кинематической схеме видны участки выделения потерь энергии (подшипники, подпятники, перемещение тел по плоскостям и т.п.), виды передач (шестеренчатые, клиноременные, цепные и т.п.), длинные валы как элементы упругих связей и упругие муфты и др.

На основании изучения принципа действия рабочей машины формулируются требования к разрабатываемому электроприводу рабочей машины со стороны технологии (например, производительность).

На основании принципа действия и требований со стороны технологии составляются уравнения движения рабочей машины, определяются требования к электроприводу рабочей машины, включающие в себя диапазон регулирования скорости, точность поддержания скорости, момента, ускорения при пуске и торможении, необходимость реверса и др.

1.2 Исходные данные для проектирования электропривода

– кинематическая схема рабочего органа с указанием вращающихся и поступательно движущихся динамических масс, и моментов сопротивления движению;

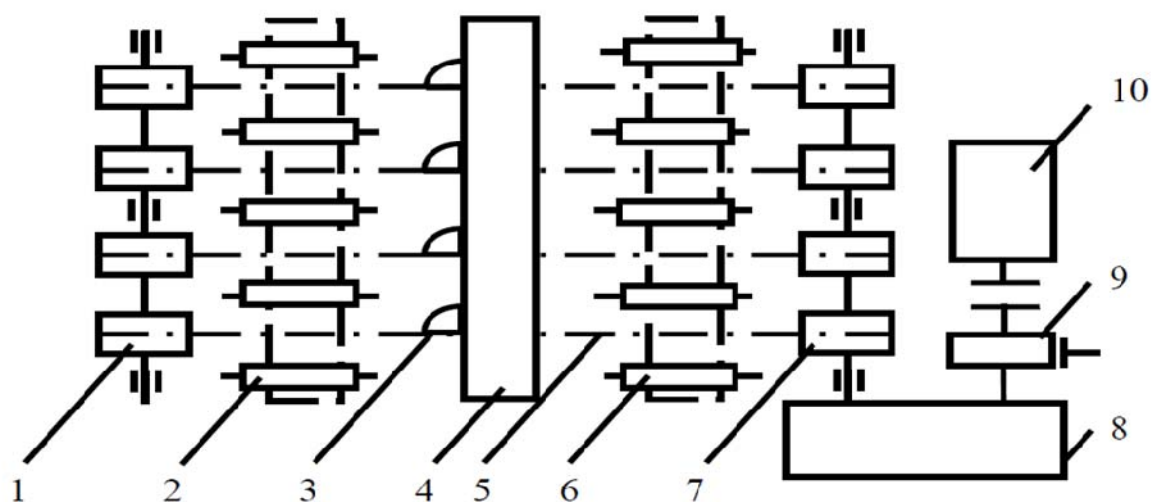
- скорости движения рабочего органа при различной нагрузке с допускаемыми отклонениями от заданного значения;
- допускаемые значения ускорения рабочего органа по условиям механической прочности или условиям технологического процесса;
- время работы механизма и число циклов в час;
- линейное перемещение (или угол поворота вала) РО;
- система электроснабжения участка (цеха), в котором работает механизм;
- условия окружающей среды (задымленность, вентиляция, влага и т.п.).

Если для курсового или дипломного проекта выбран вариант механизма во время производственной практики на предприятии, то во время практики собираются перечисленные выше исходные данные для проектирования.

Для облегчения выполнения курсового проекта по дисциплине «Теория электропривода» в приложении А приведены варианты кинематических схем.

Пример 1.1 Приложение А6 «Электропривод цепного транспортера»

Цепной транспортер (рисунок 1.1) служит для передачи заготовки по направляющим с рольганга 2 на рольганг 6. Движение заготовки обеспечивается с помощью упоров 3, закрепленных на цепях 5, натянутых между звездочками ведущего 7 и ведомого 1 валов.



*Рисунок 1.1 – Кинематическая схема цепного транспортера:
1 – ведомый вал; 2 и 6 – рольганги; 3 – упор; 4 – заготовка; 5 – цепь;
7 – ведущий вал; 8 – тормозной шкив; 9 – редуктор; 10 – двигатель*

В исходном положении упоры располагаются за рольгангом 2. После подачи заготовки и остановки рольганга 2 включается двигатель 10, транс-

портер разгоняется, через 0,2 м зацепляет заготовку и перемещает ее на рабочей скорости v_p к рольгангу 6. После достижения заготовкой рольганга 6 транспортер реверсируется и на скорости возврата $v_B > v_p$ возвращает-ся в исходное положение.

Таблица 1.1 – Исходные данные для проектирования

Обозначение	Наименование показателя	Размерность	Величина
1	2	3	4
m_z	Масса заготовки	т	7
L	Длина перемещения заготовки	м	5
v_p	Скорость рабочего хода	м/с	0,5
v_B	Скорость возвратного движения	м/с	$1,5 \cdot v_p$
$a_{доп}$	Допустимое ускорение	м/с ²	1
z	Число циклов	1/ч	70
t_p	Время работы	с	25
m_B	Масса вала со звездочками	т	2,4
D	Диаметр звездочки	м	0,3
J_B	Момент инерции вала со звездочками	кгм ²	60
$d_{ст}$	Диаметр шейки вала	м	$0,25 \cdot D$
$J_{ш}$	Момент инерции тормозного шкива	кгм ²	0,1
μ_p	Коэффициент трения скольжения в подшипниках	—	0,02
μ_c	Коэффициент трения скольжения по направляющим	—	0,2
C_k	Крутильная жесткость	МНм/рад	50

1.3 Требования, предъявляемые к электроприводу

При выборе системы электропривода необходимо учитывать совокупность требований, предъявляемых к электроприводу.

Основными требованиями, которые должны быть безусловно выполнены при проектировании электропривода, являются требования технологические:

- должна быть обеспечена заданная производительность механизма ввиду того, что никогда снижение производительности не окупается снижением стоимости оборудования;
- перемещение рабочего органа должно выполняться в пределах заданного времени и заданного угла поворота;
- ускорение рабочей машины не должно превышать заданного (допустимого) значения;
- отклонение скорости установившегося режима не должно превышать заданного значения (заданного статизма);

– по требованию рабочей машины электропривод должен обеспечивать реверс.

К требованиям, обеспечивающим надежную и экономичную работу электропривода в течение срока эксплуатации оборудования, относятся:

– величина эквивалентного тока (момента) должна быть в пределах $0,85 \dots 1$ ее допустимого значения;

– полупроводниковый преобразователь и двигатель должны выдерживать возникающие кратковременные перегрузки;

– величины сопротивлений пусковых и тормозных резисторов не должны отличаться от расчетных значений более чем на 5%;

– величина эквивалентного по нагреву тока резисторов должна быть в пределах $0,7 \dots 1$ длительного тока резистора наиболее нагруженной ступени;

– экономичность системы электропривода должна быть максимальной, обеспечивающей минимум капитальных затрат и минимум потерь энергии.

– экономичность системы электропривода должна быть максимальной, обеспечивающей минимум капитальных затрат и минимум потерь энергии.

При разработке требований к электроприводу необходимо учитывать условия электроснабжения рабочей машины (возможные колебания напряжения от +10 % до –15 % от номинального напряжения питающей сети), а также возможные изменения технологического процесса (разброс масс перемещаемых грузов вызывает изменение статического момента от +10 % до –10 % от номинального момента двигателя).

2 РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Выбор двигателя по мощности проводится, как правило, **по критерию нагрева** с последующей проверкой по перегрузочной способности. Для этого используется метод среднеквадратичного тока, однако для использования данного метода необходимо знать уровни токовых нагрузок двигателя, которые зависят и от параметров двигателя, выбор которого на данном этапе еще не произведен. В связи с этим, приходится производить сначала предварительный выбор двигателя, рассчитывать для него нагрузки при заданных условиях работы электропривода, а затем проверять предварительно выбранный двигатель по критериям нагрева, перегрузочной способности и по условиям пуска.

Предварительный расчет мощности двигателя производится приближенно, поскольку на данном этапе проектирования неизвестна полная нагрузка двигателя. На основе исходных данных могут быть достаточно близко рассчитаны лишь статические нагрузки. Динамические же нагрузки, которые в значительной степени зависят от параметров двигателя, пока еще не известны.

Наиболее простой метод предварительного расчета мощности двигателя основан на учете исключительно статических нагрузок. При этом для эквивалентирования нагрузки нескольких участков нагрузочного графика (различающихся как значениями сил сопротивления, так и скоростями движения рабочей машины) используется метод среднеквадратичного момента. Из сказанного ясно, что такой расчет не может дать точного результата, получается лишь ориентировочное значение мощности двигателя, подлежащее в дальнейшем проверке.

При задании допустимого ускорения исполнительного органа рабочей машины представляется возможным на стадии предварительного расчета мощности двигателя определить не только статические нагрузки, но и часть динамических нагрузок электропривода, обусловленных изменением скорости движущихся масс рабочей машины.

2.1 Нагрузочные диаграммы скорости рабочего органа

На базе исходных данных рабочей машины рассчитывают и строят зависимости скорости и момента рабочей машины от времени $v(t)$ и $M(t)$. Участки могут различаться значениями скоростей, статических нагрузок и моментов инерции, а, следовательно, и динамических нагрузок. На основе заданного пути перемещения рабочего органа L , установившейся скорости v_y и среднего допустимого ускорения $a_{\text{доп}}$ рассчитывают:

– время пуска $t_{\text{п}}$ до установившейся скорости с допустимым ускорением, торможения $t_{\text{т}}$ от установившейся скорости до остановки, с

$$t_{\text{п}} = t_{\text{т}} = \frac{v_y}{a_{\text{доп}}}; \quad (2.1)$$

– путь, проходимый за время пуска (торможения) рабочей машиной, м

$$L_{\text{п}} = L_{\text{т}} = \frac{v_y^2}{2a_{\text{доп}}}; \quad (2.2)$$

– время установившегося режима движения со скоростью v_y , с

$$t_y = \frac{L - (L_{\text{п}} + L_{\text{т}})}{v_y}. \quad (2.3)$$

Результаты расчета вводятся в таблицу 2.1 и строятся нагрузочные диаграммы, пример нагрузочных диаграмм $v(t)$ представлен на рисунке 2.1.

При построении зависимостей $v(t)$ следует учитывать направление движения рабочей машины. При работе грузоподъемного механизма движение вверх принимают $v > 0$. При работе в горизонтальной плоскости при движении в грузовом режиме – перемещении груза (основном технологическом режиме данной рабочей машины) принимают $v > 0$. При движении груза вниз и в порожнем (возвратном) режиме соответственно принимается $v < 0$.

С учетом указанных знаков скорости, принимают знаки ускорения a при пуске и торможении в грузовом и порожнем режимах.

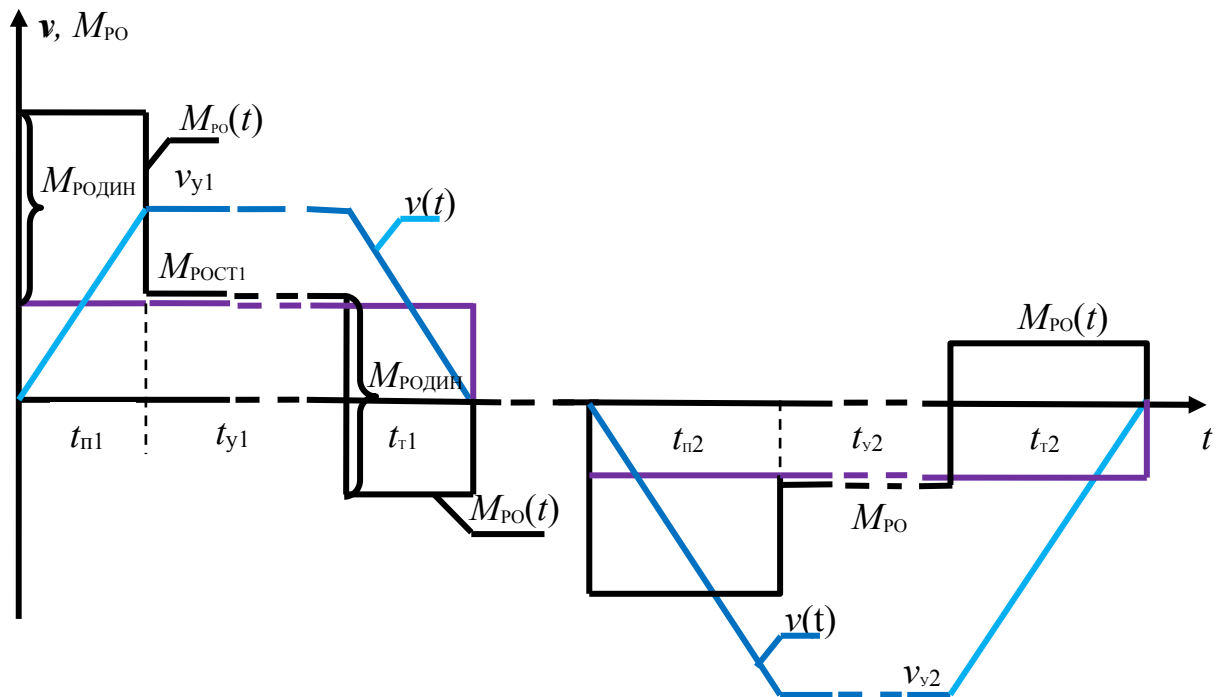


Рисунок 2.1 – Нагрузочные диаграммы скорости и моментов рабочего органа

Пример 2.1 Расчет нагрузочных диаграмм скорости рабочего органа

По данным примера 1.1 время пуска $t_{п}$ до установившейся рабочей скорости вперед v_{y1} (назад v_{y2}) с допустимым ускорением $a_{доп}$, торможения $t_{т1}$ от установившейся скорости до остановки (см. рисунок 2.1 и таблицу 2.1):

$$t_{п1} = t_{т1} = \frac{v_{y1}}{a_{доп}} = \frac{0,5}{1} = 0,5 \text{ с};$$

$$t_{п2} = t_{т2} = \frac{v_{y2}}{a_{доп}} = \frac{1,5 \cdot 0,5}{1} = 0,75 \text{ с}.$$

Путь, проходимый рабочей машиной за время пуска (торможения):

$$L_{п1} = L_{т1} = \frac{v_{y1}^2}{(2 \cdot a_{доп})} = \frac{(0,5)^2}{2 \cdot 1} = 0,125 \text{ м};$$

$$L_{п2} = L_{т2} = \frac{v_{y2}^2}{(2 \cdot a_{доп})} = \frac{(0,5 \cdot 1,5)^2}{2 \cdot 1} = 0,28 \text{ м}.$$

Время установившегося режима движения:

$$t_{y1} = \frac{(L - (L_{п1} + L_{т1}))}{v_{y1}} = \frac{(5 - (0,125 + 0,125))}{0,5} = 4,75 \text{ с};$$

$$t_{y2} = \frac{(L - (L_{П2} + L_{Т2}))}{v_{y2}} = \frac{(5 - (0,28 + 0,28))}{0,75} = 5,92 \text{ с.}$$

2.2 Нагрузочные диаграммы моментов рабочего органа

Для построения нагрузочной диаграммы моментов необходимо изучить кинематическую схему рабочего органа, технологическую работу которую он обеспечивает, разобраться с принципом работы механической части. Выявить места полезной работы и места выделения потерь мощности в рабочем органе и передаче.

Для конкретной рабочей машины по известной кинематической схеме следует определить составляющие моментов, основные рабочие усилия, места приложения сил трения.

Статические моменты сопротивления движению в рабочих машинах создаются силами трения и силами тяжести.

На каждом из участков работы необходимо определить виды составляющих моментов сопротивления движению и выполнить их расчеты по формулам, приводимым в технической литературе по конкретным механизмам.

На каждом из участков работы необходимо определить виды составляющих моментов сопротивления движению и выполнить их расчеты по формулам:

– момент сил трения в подшипниках

$$M_{ТП} = \frac{m_1 \cdot d_{ш} \cdot \mu_{п} \cdot g}{2}, \quad (2.4)$$

где $d_{ш}$ – диаметр шейки вала или оси, м; $\mu_{п}$ – коэффициент трения скольжения в подшипниках; m_1 – масса деталей и узлов, опирающихся на подшипники, кг;

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

– момент сил трения скольжения тела по горизонтальной плоскости

$$M_{ТС} = \frac{m \cdot \mu_{с} \cdot g \cdot D}{2}, \quad (2.5)$$

где $\mu_{с}$ – коэффициент трения скольжения тела по плоскости; D – диаметр барабана (звёздочки), находящегося на выходном валу редуктора и преобразующего вращение в поступательное движение тела, м;

– момент сил трения качения

$$M_{ТК} = m \cdot f \cdot g, \quad (2.6)$$

где m – масса движущегося тела, масса деталей, опирающихся на узел качения, масса поднимаемого или опускаемого груза, кг; f – коэффициент трения качения, м;

– суммарный момент сил трения (с учетом трения реборд колес о рельсы):

$$M_{PK} = k_P \cdot (M_{TP} + M_{TK}),$$

где k_P – коэффициент, учитывающий трение реборд колес о рельсы, возникающее вследствие возможного перекоса тележки (в расчетах можно принять $k_P = 1,3 \dots 1,4$);

– момент силы тяжести:

$$M_{CT} = \frac{m \cdot g \cdot D}{2}, \quad (2.7)$$

где D – диаметр барабана (звёздочки), находящегося на выходном валу редуктора и преобразующего вращение в поступательное движение тела, м;

– момент сил трения в винтовой передаче при выдвигании винта, преодолевающего силу Q

$$M_{BП1} = \frac{Q \cdot d_B}{2} \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \varphi); \quad (2.8)$$

– момент сил трения в винтовой передаче при возвратном движении винта в направлении действия силы Q

$$M_{BП1} = \frac{Q \cdot d_B}{2} \cdot [\operatorname{tg}(\alpha + \varphi) - \operatorname{tg}(\alpha)], \quad (2.9)$$

где d_B – средний диаметр нарезки винта, м;

α – угол подъема нарезки винта, рад;

φ – угол трения в нарезке винта, рад;

– момент сил трения при буксовании (проскальзывании) заготовки в случае её остановки

$$M_B = M_{TP} = \frac{m \cdot \mu_B \cdot g \cdot D}{2}, \quad (2.10)$$

где μ_B – коэффициент трения скольжения роликов по заготовке при буксовании (для горячего металла можно принять $\mu_B = 1,3 \dots 1,4$).

Статический момент на каждом участке определяется суммой всех составляющих $M_{\text{рост}} = \Sigma M$.

Результаты расчета составляющих статических моментов на валу рабочего органа на каждом из участков работы механизма вводятся в таблицу 2.1. В таблице 2.1 в перечне моментов следует оставить составляющие моментов только данного РО.

Динамические моменты обеспечивают возможность способность движущимися массами рабочего органа запасать (и выделять) кинетическую энергию.

Для определения **динамических моментов** рабочей машины рассчитываются моменты инерции рабочей машины (рабочего органа):

$$J_{PO} = J_1 + J_2 + \dots + (m_1 + m_2 + \dots) \cdot D^2/4, \quad (2.11)$$

где J_1, J_2 – моменты инерции вращающихся элементов рабочей машины, кгм^2 ;

m_1, m_2 – масса поступательно движущихся частей, кг;

D – диаметр колеса (барабана, звездочки, шкива и т.п.), находящегося на выходном валу редуктора и преобразующего вращение вала в поступательное движение рабочей машины, м.

При заданной величине допустимого ускорения $a_{\text{доп}}$ для каждого режима рабочей машины определяются динамические моменты

$$M_{\text{РОДИН1}} = J_{\text{РО}} \cdot 2a_{\text{доп}}/D. \quad (2.12)$$

Таблица 2.1 – Данные рабочего органа РО по участкам движения

Участок движения		Рабочий ход			Обратный ход		
Расчетные данные	Обозначение	пуск	Уст. режим	торможение	пуск	Уст. режим	торможение
Скорость, м/с	$v_{\text{РО}}$		0,5			–0,75	
Время работы, с	$t_{\text{РО}}$	0,5	9,5	0,5	0,75	5,92	0,75
Путь, м	$L_{\text{РО}}$	0,125	4,75	0,125	–0,28	–4,44	–0,28
Моменты РО, Нм:							
– силы тяжести	$M_{\text{СТ}}$	–	–	–	–	–	–
– трения скольжения в подшипниках	$M_{\text{ТП}}$	45,6	45,6	45,6	35,3	35,3	35,3
– трения качения	$M_{\text{ТК}}$	–	–	–	–	–	–
– трения скольжения по горизонтальной плоскости	$M_{\text{ТС}}$	2061			0		
Статический момент, Нм	$M_{\text{РОСТ}}$	2106,6			– 35,3		
Момент инерции, кгм^2	$J_{\text{РОСТ}}$	174			120		
Динамический момент, Нм	$M_{\text{РОДИН}}$	1160	0	–1160	– 800	0	800
Суммарный момент, Нм	$M_{\text{РО}}$	3266,6	2106,6	946,6	– 835,3	– 35,3	764,7

Полный момент рабочей машины

$$M_{\text{РО}} = M_{\text{РОСТ}} + M_{\text{РОДИН}}. \quad (2.13)$$

Знаки полного момента и его составляющих зависят от направления движения и режима работы (пуск, торможение). Результаты расчетов скоростей и моментов для каждого участка движения приводят в табл. 2.1.

По результатам расчетов с учетом времени пуска, торможения, установившегося движения на рисунке 2.1 совместно с уже построенными диа-

граммами скорости строят нагрузочную диаграмму моментов рабочего органа для каждого режима работы $M_{PO}(t)$.

Пример 2.2 Расчет нагрузочных диаграмм момента РО

Участок полезной работы – перемещение заготовки по направляющим. Моменты сил трения скольжения определяются массой заготовки m_3 , коэффициентом трения скольжения по направляющим μ_c и диаметром вала со звездочками D :

$$M_{TC} = m_3 \cdot g \cdot \mu_c \cdot \frac{D}{2} = 7000 \cdot 9,81 \cdot 0,2 \cdot \frac{0,3}{2} = 2,061 \text{ кНм.}$$

При возвратном движении при возвращении транспортера в исходное положение при отсутствии заготовки $M_{TC2} = 0$.

Моменты потерь в подшипниках зависят от сил трения (при коэффициенте трения скольжения в подшипниках μ_n) и диаметра шейки вала.

Момент сил трения в подшипниках качения ведомого вала со звездочками:

$$M_{ТП1} = m_b \cdot g \cdot \mu_n \cdot \frac{d_{ст}}{2} = 2400 \cdot 9,81 \cdot 0,02 \cdot \frac{0,25 \cdot 0,3}{2} = 17,65 \text{ Нм.}$$

Момент сил трения в подшипниках ведущего вала со звездочками при перемещении заготовки:

$$\begin{aligned} M_{ТП2} &= g \cdot (m_b + m_3 \cdot \mu_c) \cdot \mu_n \cdot \frac{d_{ст}}{2} = \\ &= 9,81 \cdot (2400 + 7000 \cdot 0,2) \cdot 0,02 \cdot \frac{0,25 \cdot 0,3}{2} = 27,95 \text{ Нм.} \end{aligned}$$

Момент сил трения в подшипниках ведущего вала со звездочками при перемещении без заготовки: $M_{ТП3} = M_{ТП1}$.

Статический момент на каждом участке определяется суммой всех составляющих.

При перемещении заготовки (участки I – III)

$$M_{РОСТ1} = M_{TC} + M_{ТП1} + M_{ТП2} = 2061 + 27,95 + 17,65 = 2106,6 \text{ Нм.}$$

При возвращении в исходное положение (участки IV – VI)

$$M_{РОСТ2} = M_{TCB} + M_{ТП1B} + M_{ТП2B} = 0 + 17,65 + 17,65 = 35,3 \text{ Нм.}$$

Моменты инерции рабочего органа при движении с заготовкой:

$$J_{PO} = 2 \cdot J_B + m_3 \cdot \frac{D^2}{4} = 2 \cdot 60 + 2400 \cdot \frac{0,3^2}{4} = 174 \text{ кгм}^2.$$

При движении назад без заготовки:

$$J_{PO} = 120 \text{ кгм}^2.$$

Динамические моменты при разгоне и торможении с заготовкой

$$M_{\text{РОДИН1}} = J_{\text{РО}} \cdot \frac{2 \cdot a}{D} = 174 \cdot \frac{2 \cdot 1}{0,3} = 1160 \text{ Нм.}$$

Разгон и торможение без заготовки:

$$M_{\text{РОДИН2}} = 120 \cdot \frac{2 \cdot 1}{0,3} = 800 \text{ Нм.}$$

Полный момент рабочей машины:

$$M_{\text{РО}} = M_{\text{РОСТ}} + M_{\text{РОДИН}}.$$

Значения статических моментов, моментов инерции, полного момента рабочей машины для каждого участка движения сведены в таблицу 2.1.

Полученные значения моментов показаны на нагрузочных диаграммах рабочего органа на рисунке 2.1.

Полученные зависимости $v(t)$ представляют собой графическое задание на проектирование электропривода и на завершающем этапе проектирования позволят оценить качество выполнения технологических требований. Кроме того, они используются для построения графиков статических и динамических моментов рабочей машины. Если требование допустимого ускорения отсутствует в техническом задании, то следует принять значение $a_{\text{доп}}$ для аналогичных механизмов из литературных источников [13].

2.3 Расчет мощности двигателя

На основании построенной нагрузочной диаграммы момента рабочей машины можно рассчитать:

– **среднеквадратичное значение момента**, в котором учтены статические нагрузки и часть динамических нагрузок:

$$M_{\text{СРКВ}} = \sqrt{\sum_{k=1}^m M_k^2 \cdot t_{k2} / \sum_{k=1}^m t_k}, \quad (2.14)$$

где M_k – момент двигателя на k -ом участке ($k=1, \dots, m$), где под участком понимается промежуток времени, в течение которого действующее значение момента РО не изменяется, при этом происходит только один из следующих процессов: происходит разгон, или торможение, или работа с постоянной скоростью;

t_k – длительность k -го участка.

– **время цикла** при заданном z – числе циклов работы машины в час

$$t_{\text{Ц}} = \frac{3600}{z}; \quad (2.15)$$

– **продолжительность включения ПВ_{факт}** по времени работы t_k на всех m участках движения времени

$$ПВ_{ФАКТ} = \sum_{K=1}^m t_K / t_{Ц}. \quad (2.16)$$

Расчетная мощность двигателя может быть определена по соотношению

$$P_{ДВ} = k_1 \cdot M_{СРКВ} \frac{2v_0}{D} \cdot \sqrt{\frac{ПВ_{ФАКТ}}{ПВ_{КАТ}}}, \quad (2.17)$$

где v_0 – основная скорость движения РО (при работе двигателя на естественной механической характеристике), м/с;

D – диаметр шестерни выходного вала редуктора, м;

$ПВ_{КАТ}$ – ближайшее к $ПВ_{ФАКТ}$ каталожное значение относительной продолжительности включения для электродвигателей выбранной серии.

k_1 – коэффициент, учитывающий динамические нагрузки, обусловленные вращающимися элементами электропривода (двигатель, редуктор), а также потери мощности в редукторе.

Величина k_1 зависит от отношения времени переходных процессов к времени установившегося движения электропривода, а также от отношения максимальных моментов рабочей машины к статическим моментам. Для рабочих машин, представленных в данном пособии, коэффициент k_1 можно принять $k_1 = 1,3 \dots 1,5$.

Пример 2.3 Расчет мощности двигателя

По рассчитанным значениям моментов на каждом участке (см. таблицу 2.2) можно найти среднеквадратичное значение момента за время работы:

$$\begin{aligned} M_{СРКВ} &= \sqrt{\sum_{k=1}^m M_k^2 \cdot t_{k2} / \sum_{k=1}^m t_k} = \\ &= \sqrt{\frac{3266,6^2 \cdot 0,5 + 2106,6^2 \cdot 9,5 + 946,6^2 \cdot 0,5 + (-835,3)^2 \cdot 0,75 + (-35,3)^2 \cdot 5,92 + 764,7^2 \cdot 0,75}{0,5 + 9,5 + 0,5 + 0,75 + 5,92 + 0,75}} = \\ &= \sqrt{\frac{48911363,4}{17,72}} = 1660,9 \text{ Нм}. \end{aligned}$$

В данном расчете время паузы не является участком и не включается в расчет.

Время цикла

$$t_{Ц} = \frac{3600}{z} = \frac{3600}{70} = 51,4.$$

Продолжительность включения фактическая

$$ПВ_{ФАКТ} = \frac{1}{t_{Ц}} \sum_{K=1}^m t_K \cdot 100 \% = \frac{17,72}{51,4} \cdot 100 \% = 34,5 \%.$$

Расчетная мощность двигателя **при ближайшем** $P_{ВКАТ}=40\%$

$$P_{ДВ} = k_1 \cdot M_{СРКВ} \frac{2v_0}{D} \cdot \sqrt{\frac{P_{ВФАКТ}}{P_{ВКАТ}}} = 1,5 \cdot 1660,9 \cdot \frac{2 \cdot 0,5}{0,3} \cdot \sqrt{\frac{34,5}{40}} = 7712 \text{ Вт.}$$

При выборе значения $P_{ВКАТ}$ необходимо по возможности выбирать большие значения $P_{В}$, что позволит получить дополнительный запас по мощности, однако следует избегать значительного завышения $P_{В}$, так как это может привести к более низким энергетическим показателям работы электропривода.

3 ВЫБОР ТИПА ДВИГАТЕЛЯ

3.1 Обоснование выбора рода тока и типа электропривода

В рамках курсового проектирования род тока и тип двигателя часто задаются преподавателем, однако, при проектировании электропривода в промышленных условиях, проектант волен выбирать тип привода руководствуясь своими знаниями.

Выбор рода тока и типа электропривода целесообразно производить на основе рассмотрения и сравнения технико-экономических показателей ряда вариантов, удовлетворяющих техническим требованиям данной рабочей машины.

На основании исходных данных и требований, предъявляемых к электроприводу, необходимо выбрать вариант электропривода, способный полностью выполнить требования и быть одновременно максимально экономичным.

Выбор рода тока. «Правила устройства электроустановок» рекомендуют начинать с двигателей переменного тока.

Для привода механизмов, не требующих регулирования частоты вращения, независимо от их мощности, рекомендуется применять электродвигатели синхронные или асинхронные с короткозамкнутым ротором.

Для привода механизмов, имеющих тяжелые условия пуска или работы, либо требующих изменения частоты вращения, следует применять электродвигатели с наиболее простыми и экономичными методами пуска или регулирования частоты вращения, возможными в данной установке.

Электродвигатели постоянного тока допускается применять только в тех случаях, когда электродвигатели переменного тока не обеспечивают требуемых характеристик механизма либо не экономичны...»

Для нерегулируемого привода выбор типа двигателя прост. Двигатели переменного тока проще по конструкции, стоимость их ниже, обслуживание тоже требует меньших затрат. При повторно-кратковременном режиме работы с частыми пусками и торможениями при питании электродвигателя

напрямую от сети рационально использовать двигатели повышенного скольжения.

Для регулируемого привода задача выбора типа привода решается сложнее. В зависимости от диапазона и плавности регулирования скорости, требований к качеству переходных процессов могут быть применены как системы реостатного регулирования скорости, так и системы с индивидуальными преобразователями. В асинхронном электроприводе при использовании системы реостатного регулирования следует применять двигатели с фазным ротором, а при использовании преобразователя частоты – двигатели с короткозамкнутым ротором. Применение двигателей с фазным ротором в частотно-регулируемом электроприводе допустимо только при модернизации оборудования, ввиду их более высокой стоимости и требованиям к обслуживанию.

При глубоком регулировании скорости в большинстве случаев вопрос решается в пользу приводов постоянного тока. Однако конкурентными по своим свойствам являются приводы с частотным и частотно-токовым и векторным управлением. Преимущества приводов с асинхронными двигателями – простота конструкции и повышенная надежность двигателей, возможность их изготовления в поточном производстве.

На основании требований, предъявляемых к электроприводе, осуществляется выбор рода тока и типа электропривода, обоснован **выбор системы электропривода**, приняты и обоснованы способы регулирования скорости, способы пуска и торможения электропривода.

Выбор системы определяет главное направление дальнейших расчетов.

1. Электродвигатель получает питание от сети неизменного напряжения (цеховой сети) и для обеспечения технологических требований осуществляется регулирование параметров цепи двигателя (резисторов в цепях обмоток).

2. Электродвигатель получает питание от индивидуального преобразователя постоянного напряжения или преобразователя частоты.

Из-за ограниченности времени, отводимого на выполнение курсового проекта, **род тока и тип электропривода может задаваться преподавателем** – руководителем проекта из числа вариантов, применяемых в настоящее время. Вариант должен обеспечивать выполнение заданных технологических требований в отношении скоростей движения исполнительного органа рабочей машины, времени работы, ускорений и т.п.

В данном разделе курсового проекта приводятся достоинства разрабатываемого варианта электропривода, существенные для заданной рабочей машины. Там же указываются и недостатки принятого варианта электропривода.

3.2 Выбор двигателя

Выбор двигателя для электропривода включает в себя:

- выбор конструкции (исполнения) двигателя;
- выбор двигателя по скорости;
- выбор типа и мощности двигателя.

3.2.1 Выбор двигателя по конструктивному исполнению

При выборе двигателя по конструктивному исполнению необходимо учитывать режим работы электропривода и условия эксплуатации оборудования, под которым и следует понимать условия окружающей среды (содержание пыли, коррозионно-активных элементов, взрыво- и пожароопасных смесей и т.п.), воздействие климатических факторов и т.д.

Выбор двигателя по конструктивному исполнению состоит в применении в проектируемом электроприводе двигателя, подходящего по способу защиты от воздействия окружающей среды (закрытый, защищенный и т.д.). Способу вентиляции (с самовентиляцией, с независимой вентиляцией и т.д.). Способу крепления двигателя к рабочему органу и основанию (на лапах, фланцевый и т.д.) По наличию или отсутствию встроенного датчика скорости и другим конструктивным особенностям, которые указываются в каталогах и справочниках на электрические машины [2, 11].

3.2.2 Выбор двигателя по скорости

Выбор двигателя по скорости должен при известной кинематической схеме рабочей машины обеспечить требуемые скорости технологического процесса. При этом предварительно должен быть намечен способ регулирования скорости двигателя, обеспечивающий наилучшие технико-экономические показатели.

Если рабочий ход выполнять на естественной характеристике, то возвратный ход должен выполняться на более высокой скорости – в режиме ослабления поля. Система электропривода в этом случае должна обеспечивать двухзонное регулирование скорости.

Если на естественной характеристике выполнять возвратный ход, то рабочий ход должен выполняться на пониженной скорости при снижении напряжения (или частоты) или с введенными резисторами в силовой цепи при питании от цеховой сети.

Основной скоростью движения электропривода будем называть скорость на естественной механической характеристике при номинальных напряжении, частоте, потоке двигателя. Это условие определит в дальнейшем расчетную мощность двигателя.

3.2.3 Выбор типа и мощности двигателя

Для повторно – кратковременного режима работы следует выбирать двигатели специальных серий, предназначенных для этого режима (режим

работы S3). Наиболее известна краново-металлургическая серия, в которой по сравнению с двигателями общепромышленной серии:

- усилены быстронагревающиеся части (коллектор – в двигателях постоянного тока, усилены обмотки статора и ротора асинхронных двигателей – выдерживают токи короткого замыкания)
- за счет уменьшения диаметра ротора (якоря) снижены моменты инерции;
- увеличена перегрузочная способность двигателей до 3...4 значений номинального момента.

Двигатели этой серии (постоянного тока – типа ДМ (или более старой серии Д), переменного тока – типа 4МТF(H)) имеют другой способ нормирования, при котором в каталоге указывается допускаемая нагрузка на валу при различных значениях $P_{ВКАТ}=15, 25, 40, 60, 100\%$. Приводятся в каталогах также и каталожные кривые $M, I, \cos\varphi_1 = f(S)$ – для асинхронных двигателей и $M, n, \eta = f(I)$ – для двигателей постоянного тока.

Двигатель выбирается по каталогу таким образом, чтобы значение его мощности при $P_{ВКАТ}$ было бы равно или несколько больше мощности $P_{дв}$, рассчитанной по формуле (2.10).

Для выбранного по каталогу двигателя в пояснительной записке приводятся все каталожные данные, рассчитывается перегрузочная способность и определяется максимально-допустимое значение тока. Для двигателей краново-металлургической серии, работающих в повторно-кратковременном режиме, номинальными данными (P_H, ω_H, I_H и т.д.) являются каталожные данные при $P_{ВКАТ} = 40\%$.

Пример 3.1 Выбор конструктивного исполнения, скорости, типа и мощности двигателя

Из условий работы электропривода (металлургическое производство при высоких температурах, запыленности, повышенной надежности и т.д.) выбирается закрытого исполнения асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором с меньшей скоростью в связи с повторно-кратковременным режимом работы.

Расчетная мощность двигателя $P_{дв} = 7712$ Вт (пример 2.3) при $P_{ВКАТ}=40\%$.

Из асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором выбираем из [1] двигатель краново-металлургической серии 4МТKF(H)160L6. Каталожные данные двигателя сведены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Номинальные данные двигателя 4МТКF(H)160L6 [1]

Обозначение	Наименование показателя	Размерность	Величина
P_H	Номинальная мощность на валу	кВт	11
n_H	Номинальная частота вращения	об/мин	910
I_{1H}	Номинальный ток статора	А	29
$\cos\varphi_H$	Коэффициент мощности в номинальном режиме	–	0,76
I_{Π}	Пусковой ток	А	148
M_{Π}	Пусковой момент	Нм	340
$M_{\text{МАКС}}$	Максимальный (критический) момент	Нм	395
r_1	Активное сопротивление фазной обмотки статора	Ом	0,35
I_0	Ток холостого хода в номинальном режиме	Ом	20,4
$R_{\text{кз}}$	Активное сопротивление короткого замыкания	Ом	1,15
$X_{\text{кз}}$	Индуктивное сопротивление короткого замыкания	Ом	1,18
k_r	Коэффициент приведения сопротивлений	–	0,695
$J_{\text{дв}}$	Момент инерции двигателя	кгм ²	0,23

4 ВЫБОР РЕДУКТОРА

Передаточное число редуктора определяется по номинальной скорости вращения выбранного двигателя ω_H и основной скорости движения исполнительного органа v_o

$$j_P = \frac{\omega_H D}{2v_o}, \quad (4.1)$$

где D – диаметр колеса (ролика, шкива и т.п.), находящегося на выходном валу редуктора и преобразующего вращение вала в поступательное движение исполнительного органа рабочей машины.

Редуктор выбирают по справочнику [1], исходя из требуемого передаточного числа, заданного значения номинальной мощности (или моментов

на тихоходном и быстроходном валу) и скорости выбранного двигателя с учетом характера нагрузки (режима работы) РО, для которого проектируется электропривод.

Выбранный редуктор должен иметь передаточное число, равное или несколько меньшее расчетного значения. При передаточном числе, превышающем расчетное значение, скорость на валу рабочего органа не достигнет заданного значения, что приведет к снижению производительности рабочей машины.

Так как на данном этапе известны и номинальный момент электродвигателя, и среднеквадратичный момент рабочего органа, редуктор выбирается с таким условием, что среднеквадратичный момент РО должен быть меньше момента на тихоходном валу редуктора, иначе в наиболее нагруженных режимах может произойти излом зубцов шестерней редуктора.

Для большинства механизмов, представленных в пособии предпочтительно выбирать цилиндрический редуктор, однако существуют механизмы, в который наиболее правильно использовать червячный редуктор. Режим работы редуктора для рассматриваемых в данном пособии рабочих машин следует принимать «тяжелый».

Пример 4.1 Выбор редуктора по номинальной скорости двигателя и по основной скорости рабочего органа.

Передаточное число редуктора

$$j_p = \frac{\omega_H \cdot D}{2 \cdot v_0} = \frac{n_H}{9,55} \cdot \frac{D}{2 \cdot v_0} = \frac{910}{9,55} \cdot \frac{0,3}{2 \cdot 0,5} = 28,6.$$

Выбираем из [1] редуктор цилиндрический двухступенчатый Ц 2–250, данные которого приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Характеристики редуктора Ц 2–250

Передаточное число j_p	28,6
Частота вращения быстроходного вала, об/мин	1500
Максимальная мощность на быстроходном валу, кВт	16
КПД, η	0,88

5 ПРИВЕДЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ МОМЕНТОВ И МОМЕНТОВ ИНЕРЦИИ К ВАЛУ ДВИГАТЕЛЯ

При составлении расчетной схемы механической части электропривода моменты сопротивления движению РО (статические моменты) и моменты инерции приводятся к валу двигателя.

Критерием приведения моментов к валу двигателя является энергетический баланс механической части электропривода. Статические и динамические моменты на валу рабочей машины приведены в таблице 2.1. Выбран редуктор с передаточным числом i_P и коэффициентом полезного действия η_P .

Статические моменты рабочей машины, приведенные к валу двигателя, без учета потерь в редукторе ($\eta_P = 1$), рассчитываются по формуле

$$M_{PC} = \frac{M_{\text{РОСТ}}}{j_P}. \quad (5.1)$$

Статические моменты на валу с учетом потерь в редукторе ($\eta_P < 1$) рассчитывают в зависимости от режима работы электропривода.

Статический момент на валу в двигательном режиме

$$M_{BC} = \frac{M_{PC}}{\eta_P}. \quad (5.2)$$

При работе электропривода в тормозных режимах потери в редукторе вызывают уменьшение нагрузки двигателя, при этом моменты на валу определяют по формуле

$$M_{BC} = M_{PC} \cdot \eta_P. \quad (5.3)$$

Результаты расчета вводятся в таблицу 5.1.

В проекте допускается рассчитывать приведенные моменты к валу двигателя приближенно, принимая в расчетах номинальное значение коэффициента полезного действия редуктора η_P , указываемое в каталогах и справочниках по редукторам [1]. Более точные результаты расчетов могут быть получены при использовании метода разделения потерь в передаче.

При уточненных расчетах установившихся и переходных режимов работы электропривода необходимо также учитывать момент потерь холостого хода (момент постоянных потерь) двигателя ΔM_X .

В двигательном режиме работы двигателя статический момент увеличивается на величину момента потерь холостого хода (ΔM_X покрывается за счет электромагнитного момента двигателя)

$$M_C = M_{BC} + \Delta M_X. \quad (5.4)$$

При работе двигателя в тормозном режиме статический момент уменьшается на величину момента потерь холостого хода (ΔM_X покрывается за счет статического момента рабочего органа)

$$M_C = M_{BC} - \Delta M_X.$$

Таким образом, приведенные статические моменты системы электропривод – рабочая машина рассчитывают для каждого участка с учетом режима работы электропривода. При этом в статическом моменте учитываются не только силы сопротивления движению в рабочей машине, но также и потери в редукторе, и механические потери в двигателе.

Суммарный приведенный к валу двигателя **момент инерции** системы может быть рассчитан по соотношению

$$J = \delta J_{\text{д}} + J_{\text{пр}}, \quad (5.5)$$

где $J_{\text{д}}$ – момент инерции ротора двигателя;

δ – коэффициент, учитывающий момент инерции остальных элементов электропривода: муфт, тормозного шкива, редуктора и др.;

$J_{\text{пр}} = J_{\text{р0}}/j_{\text{р}}^2$ – приведенный к валу двигателя суммарный момент инерции движущихся исполнительных органов рабочей машины и связанных с ними движущихся масс (грузов, заготовок и т.п.).

В проекте допускается рассчитывать момент инерции передачи приближенно, принимая в формуле (5.5) коэффициент $\delta = 1,3 \dots 1,5$.

При необходимости (по указанию руководителя проекта) **учета влияния упругостей** в механизме в каждом варианте задания указана крутильная жесткость C_k , отнесенная к рабочему валу, либо линейная жесткость $C_{\text{л}}$ механизма, отнесенная к поступательно движущемуся исполнительному органу.

Приведенную к валу двигателя жесткость упругой механической связи $C_{\text{пр}}$ определяют через значение **крутильной жесткости** рабочего вала (упругой муфты) по формуле:

$$C_{\text{пр}} = C_k / j_{\text{р}}^2 \quad (5.6)$$

через значение **линейной жесткости** – по формуле:

$$C_{\text{пр}} = C_{\text{л}} \cdot \frac{D^2}{4j_{\text{р}}^2} \quad (5.7)$$

Установившаяся скорость двигателя

$$\omega_{\text{с}} = \frac{2v_0}{D} \cdot j_{\text{р}} \quad (5.8)$$

Динамический момент

$$M_{\text{дин}} = J \cdot \frac{2a_{\text{доп}} \cdot j_{\text{р}}}{D} \quad (5.9)$$

Моменты двигателя $M_{\text{доп.пуск}}$, допускаемые по ускорению, при которых обеспечивается возможность работы электропривода с заданным или допустимым ускорением при разгоне

$$M_{\text{п}} = M_{\text{с}} + M_{\text{дин}} \quad (5.10)$$

и при торможении

$$M_{\text{п}} = M_{\text{с}} - M_{\text{дин}}. \quad (5.11)$$

Если момент $M_{\text{доп.пуск}}$ больше максимального допустимого момента двигателя, то ускорение приходится снижать, что повлечет за собой уменьшение производительности рабочей машины, или выбирать двига-

тель большей мощности, обеспечивающий требуемое ускорение электропривода.

Примеры расчета приведены в [5].

Разделом 5 проекта заканчивается подготовка данных к дальнейшим расчетам электропривода. Для каждого участка работы электропривода в таблицу 5.1 вносятся параметры расчетной схемы механической части электропривода.

Пример 5.1 Приведение статических моментов и моментов инерции к валу двигателя

Статические моменты и моменты инерции РО приведены в таблице 2.1 и продублированы в таблице 5.1. Выбран редуктор с передаточным числом $j_p = 24,9$ и коэффициентом полезного действия $\eta_p = 0,88$.

Установившаяся скорость двигателя

$$\omega_c = \frac{j_p \cdot v_{po} \cdot 2}{D} = \frac{24,9 \cdot 0,5 \cdot 3}{0,3} = 83 \text{ рад/с.}$$

Статические моменты рабочей машины, приведенные к валу двигателя, без учета потерь в редукторе ($\eta_p = 1$), при движении с заготовкой:

$$M_{\text{ПР1}} = \frac{M_{\text{РОСТ1}}}{j_p} = \frac{2106,6}{24,9} = 84,6 \text{ Нм;}$$

при движении без заготовки:

$$M_{\text{ПР2}} = \frac{M_{\text{РОСТ2}}}{j_p} = \frac{35,3}{24,9} = 1,42 \text{ Нм.}$$

Статические моменты на валу с учетом потерь в редукторе ($\eta_p = 0,88$) в двигательных режимах:

$$M_{\text{BC1}} = \frac{M_{\text{ПР1}}}{\eta_p} = \frac{84,6}{0,88} = 96,1 \text{ Нм;}$$

$$M_{\text{BC2}} = \frac{M_{\text{ПР2}}}{\eta_p} = \frac{1,42}{0,88} = -1,61 \text{ Нм.}$$

В тормозных режимах:

$$M_{\text{BC1T}} = M_{\text{BC1}} \cdot \eta_p = 84,6 \cdot 0,88 = 74,45 \text{ Нм;}$$

$$M_{\text{BC2T}} = M_{\text{BC2}} \cdot \eta_p = 1,42 \cdot 0,88 = -1,25 \text{ Нм.}$$

Для расчета статического момента двигателя $M_c = M_{\text{BC}} \pm \Delta M_x$, приведенного к его электромагнитному моменту, можно приближенно оценить **потери момента холостого хода** ΔM_x через потери мощности в номинальном режиме

$$\Delta M_x = \frac{\Delta P_H}{3 \cdot \omega_H} - \text{для асинхронного двигателя;}$$

Таблица 5.1 – Приведение статических моментов и моментов инерции к валу двигателя

Участок движения		Рабочий ход			Обратный ход		
Расчетные данные	Обозначение	пуск	уст. режим	торможение	пуск	уст. режим	торможение
1	2	3	4	5	6	7	8
По данным таблицы 2.1							
Скорость рабочего органа, м/с	v_{po}		0,5			–0,75	
Момент статический рабочего органа, Н·м	$M_{рост}$	2106,6			– 35,3		
Момент инерции рабочего органа, кгм ²	$J_{рост}$	174			120		
Приведение к валу двигателя ($j_p = 24,9$, $\eta_p = 0,88$)							
Скорость двигателя, рад/с	ω_c		83			–124,5	
Момент статический, Нм:							
– без учета потерь в передаче	$M_{пр}$	84,6			–1,42		
– с учетом потерь	$M_{вс}$	96,1	96,1	74,45	–1,61	–1,61	–1,25
– с учетом потерь холостого хода двигателя	M_c	108,5	108,5	62	–14	–14	11,15
Приведенный момент инерции, кгм ²	$J_{пр}$	0,28			0,194		
Момент инерции электропривода, кгм ²	J	0,64			0,54		
Динамический момент, Нм	$M_{дин}$	106,2	–	–106,2	–86,9	–	86,9
Момент двигателя, допускаемый по ускорению, Нм	$M_{доп}$	214,7	108,5	2,3	–103,6	–1,61	75,6
Данные предварительного расчета							
Момент двигателя средний на участке, Нм	$M_{ср}$,	214,7	108,5	2,3	–103,6	–1,61	75,6
Время работы, с	t_b	0,5	9,5	0,5	0,75	5,92	0,75
Угол поворота вала двигателя, рад	α_b	20,75	788,5	20,75	–46,7	–736,6	–46,7

$$\Delta M_X = \frac{\Delta P_H}{2 \cdot \omega_H} - \text{для двигателя постоянного тока.}$$

Для выбранного двигателя 4MTF(H)160L6 (см. таблицу 3.1)

$$\begin{aligned} \Delta M_X = \Delta M_{XH} &= \frac{\Delta P_H}{3 \cdot \omega_H} = \frac{3 \cdot U_{1H} \cdot I_{1H} \cdot \cos \varphi_{1H} - P_H}{3 \cdot n_H} \cdot 9,55 = \\ &= \frac{3 \cdot 220 \cdot 29 \cdot 0,76 - 11000}{3 \cdot 910} \cdot 9,55 = 12,4 \text{ Нм.} \end{aligned}$$

В двигательных режимах

$$M_{C1} = M_{BC1} + M_X = 96,1 + 12,4 = 108,5 \text{ Нм;}$$

$$M_{C2} = M_{BC2} + M_X = -1,61 - 12,4 = -14 \text{ Нм.}$$

В тормозных режимах:

$$M_{C1T} = M_{BC1T} - \Delta M_X = 74,45 - 12,4 = 62 \text{ Нм;}$$

$$M_{C2T} = M_{BC2T} - \Delta M_X = -1,25 - (-12,4) = 11,15 \text{ Нм.}$$

Приведенный к валу двигателя момент инерции РО при движении:
– с заготовкой

$$J_{ПР1} = \frac{J_{PO1}}{j_P^2} = \frac{174}{24,9^2} = 0,28 \text{ кгм}^2;$$

– без заготовки

$$J_{ПР2} = \frac{J_{PO2}}{j_P^2} = \frac{120}{24,9^2} = 0,194 \text{ кгм}^2.$$

Момент инерции электропривода

$$J_1 = \delta \cdot J_{ДВ} + J_{Ш} + J_{ПР1} = 1,1 \cdot 0,23 + 0,1 + 0,28 = 0,64 \text{ кгм}^2;$$

$$J_2 = \delta \cdot J_{ДВ} + J_{Ш} + J_{ПР2} = 1,1 \cdot 0,23 + 0,1 + 0,194 = 0,54 \text{ кгм}^2.$$

Динамический момент при движении с заготовкой:

$$M_{дин1} = J_1 \cdot \frac{2a_{доп} \cdot j_P}{D} = \frac{0,64 \cdot 1 \cdot 24,9 \cdot 2}{0,3} = 106,2 \text{ Нм;}$$

при движении без заготовки:

$$M_{дин2} = J_2 \cdot \frac{2a_{доп} \cdot j_P}{D} = \frac{0,54 \cdot 1 \cdot 24,9 \cdot 2}{0,3} = 89,6 \text{ Нм.}$$

Пусковой и тормозной моменты при движении с заготовкой с допустимым ускорением:

$$M_{П1} = M_{C1} + M_{дин1} = 108,5 + 106,2 = 214,7 \text{ Нм;}$$

$$M_{Т1} = M_{C1} - M_{дин1} = 108,5 - 106,2 = 2,3 \text{ Нм.}$$

Пусковой и тормозной моменты при движении без заготовки с допустимым ускорением:

$$M_{П2} = M_{C2} + M_{дин2} = -14 - 89,6 = -103,6 \text{ Нм;}$$

$$M_{Т2} = M_{C2} - M_{дин2} = -14 - (-89,6) = 75,6 \text{ Нм.}$$

Для каждого из участков все значения приведены в таблице 5.1.

6 ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ДВИГАТЕЛЯ ПО НАГРЕВУ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Целями предварительной проверки являются:

- изучение приближенных способов оценки времени переходных процессов;
- уточнение нагрузочных диаграмм момента и скорости двигателя с учетом момента инерции предварительно выбранного двигателя;
- снижение затрат времени на выполнение курсового проекта для случая, когда предварительно выбранный двигатель не проходит по нагреву.

Для приближенного расчета времени переходного процесса оценивают средний момент двигателя M_{CP} :

- при реостатном пуске

$$M_{\text{CP}} = \frac{(M_{\text{П}} + 1,2 \cdot M_{\text{С}})}{2}; \quad (6.1)$$

- при динамическом торможении

$$M_{\text{CP}} = \frac{M_{\text{Т}}}{2}; \quad (6.2)$$

- при торможении противовключением

$$M_{\text{CP}} = M_{\text{Т}} \cdot \frac{|\omega_0| + \frac{\omega_{\text{НАЧ}}}{2}}{|\omega_0| + \omega_{\text{НАЧ}}}. \quad (6.3)$$

При питании от преобразователя с задатчиком интенсивности средний момент двигателя можно принять равным моменту, допустимому по ускорению:

- при пуске

$$M_{\text{CP}} = M_{\text{П}}; \quad (6.4)$$

- при торможении

$$M_{\text{CP}} = M_{\text{Т}}. \quad (6.5)$$

Используя выбранные выше значения средних моментов M_{CP} , скоростей установившихся режимов $\omega_{\text{С}}$ и возможности выбранной схемы управления двигателем, рассчитывают:

- время переходных процессов

$$t_i = J \cdot \frac{\omega_{\text{С}}}{M_{\text{CP}} - M_{\text{С}}}; \quad (6.6)$$

- угол поворота вала двигателя за время переходного процесса

$$\alpha_i = \frac{\omega_{\text{С}} \cdot t_i}{2}; \quad (6.7)$$

– угол поворота вала двигателя, соответствующий величине перемещения в данном режиме

$$\alpha = \frac{2 \cdot L \cdot j_p}{D}; \quad (6.8)$$

– время работы с установившейся скоростью

$$t_y = \frac{\alpha - (\alpha_{\text{п}} + \alpha_{\text{т}})}{\omega_{\text{с}}}, \quad (6.9)$$

где $\alpha_{\text{п}}$, $\alpha_{\text{т}}$ – угол поворота вала за время пуска и торможения соответственно.

На предварительном этапе расчета принимают, что момент двигателя за время переходного процесса от начального до конечного значения скорости остается постоянным, т.е. не учитывается изменение момента в процессе пуска по правильной пусковой диаграмме при управлении от магнитного контроллера, а также нарастание и снижение момента – при управлении от полупроводниковых преобразователей. Результаты расчета удобно представить в таблице 5.1.

Проверка двигателя **по производительности** заключается в сравнении суммарного фактического времени работы электропривода в цикле $t_{\text{факт}}$ с заданным значением времени работы t_p в исходных данных для проектирования. Задание по производительности должно быть безусловно выполнено, $t_{\text{факт}} < t_p$.

Предварительная проверка двигателя **по нагреву** осуществляется сравнением среднеквадратичного момента с допускаемым моментом двигателя при его работе с фактической продолжительностью включения ПВ_{ФАКТ}.

Продолжительность включения ПВ_{ФАКТ}

$$\text{ПВ}_{\text{ФАКТ}} = \frac{1}{t_{\text{ц}}} \sum_{i=1}^n t_i \cdot 100\%. \quad (6.10)$$

Момент двигателя при ПВ_{КАТ}, ближайшем к ПВ_{ФАКТ}

$$M_{\text{КАТ}} = \frac{P_{\text{КАТ}}}{\omega_{\text{КАТ}}}. \quad (6.11)$$

Момент двигателя, допускаемый по нагреву для фактического графика

$$M_{\text{ДОП}} = M_{\text{КАТ}} \cdot \sqrt{\frac{\text{ПВ}_{\text{КАТ}}}{\text{ПВ}_{\text{ФАКТ}}}}. \quad (6.12)$$

Среднеквадратичный момент двигателя при фактическом графике нагрузки по результатам предварительного расчета

$$M_{\text{СРКВ}} = \sqrt{\sum_{i=1}^m M_i^2 \cdot t_i / \sum_{i=1}^m t_i} \leq M_{\text{ДОП}}. \quad (6.13)$$

Если $M_{\text{СРКВ}} \leq M_{\text{доп}}$, то двигатель проходит по условиям нагрева и следует приступить к детальному точному расчету выбранного электропривода. Для асинхронных двигателей, двигателей постоянного тока последовательного возбуждения, для режима ослабления поля двигателя независимого возбуждения метод эквивалентного момента дает значительные погрешности. Для этих двигателей следует величину допустимого по нагреву момента $M_{\text{доп}}$ снижать на 15...20 %.

Если двигатель по нагреву не проходит или значительно недоиспользуется, то переходят к выбору нового двигателя, мощность которого можно ориентировочно определить по соотношению

$$P_{\text{H}} = P_{\text{НВЫБ}} \cdot \frac{M_{\text{СРКВ}}}{M_{\text{доп}}}, \quad (6.14)$$

где $P_{\text{НВЫБ}}$ – номинальная мощность предварительно выбранного двигателя, кВт.

Пример 6.1 Предварительная проверка двигателя по нагреву и производительности

Для проверки используем данные таблицы 5.1. Принимаем средние моменты двигателя $M_{\text{СР}}$ в переходных процессах с задатчиком интенсивности равными моментам, допустимым по ускорению $M_{\text{СР}} = M_{\text{доп}}$.

Используя значения статических $M_{\text{С}}$ и средних моментов $M_{\text{СР}}$, скоростей установившихся режимов $\omega_{\text{С}}$ рассчитываем:

– время переходного процесса на участке 1:

$$t_1 = J_1 \cdot \frac{\omega_{\text{С}}}{M_{\text{СР}} - M_{\text{С}}} = 0,64 \cdot \frac{83}{214,7 - 108,5} = 0,5 \text{ с};$$

– время переходного процесса на участке 3:

$$t_1 = J_1 \cdot \frac{\omega_{\text{С}}}{M_{\text{СР}} - M_{\text{С}}} = 0,64 \cdot \frac{-83}{2,3 - 108,5} = 0,5 \text{ с};$$

– угол поворота вала двигателя за время работы на участке 1 и на участке 3:

$$\alpha_1 = \alpha_3 = \frac{\omega_{\text{С}} \cdot t_1}{2} = \frac{83 \cdot 0,5}{2} = 20,75 \text{ рад};$$

– угол поворота вала двигателя, соответствующий длине перемещения заготовки:

$$\alpha_{\Sigma} = \frac{2 \cdot L \cdot j_{\text{p}}}{D} = \frac{2 \cdot 5 \cdot 24,9}{0,3} = 830 \text{ рад};$$

– время работы с установившейся скоростью на участке 2:

$$t_{y2} = \frac{\alpha_{\Sigma} - (\alpha_1 + \alpha_3)}{\omega_{\text{С}}} = \frac{830 - (20,75 + 20,75)}{83} = 9,5 \text{ с}.$$

Результаты расчета на участках 4...6 выполнены по вышеприведенным формулам и представлены в таблице 5.1.

Проверка двигателя по **производительности**.

Фактическое время работы электропривода в цикле

$$t_{\text{факт}} = 0,5 + 9,5 + 0,5 + 0,75 + 5,92 + 0,75 = 17,92 \text{ с} < 25 \text{ с} = t_p - \text{заданного времени работы.}$$

Задание по производительности безусловно выполнено.

Предварительная проверка двигателя **по нагреву**.

Продолжительность включения $PВ_{\text{ФАКТ}}$

$$PВ_{\text{ФАКТ}} = \frac{1}{t_{\text{ц}}} \sum_{i=1}^n t_i \cdot 100 \% = \frac{z}{3600} \cdot t_{\text{факт}} \cdot 100 \% = \frac{70}{3600} \cdot 17,92 \cdot 100 \% = 34,8 \%$$

Момент двигателя при $PВ_{\text{КАТ}}$, ближайшем к $PВ_{\text{ФАКТ}}$

$$M_{\text{КАТ}} = \frac{P_{\text{КАТ}}}{\omega_{\text{КАТ}}} = \frac{11000}{910} \cdot 9,55 = 115,44 \text{ Нм.}$$

Момент двигателя, допускаемый по нагреву для рассчитанного (фактического) графика нагрузки

$$M_{\text{ДОП}} = M_{\text{КАТ}} \cdot \sqrt{\frac{PВ_{\text{КАТ}}}{PВ_{\text{ФАКТ}}}} = 115,44 \cdot \sqrt{\frac{40}{34,8}} = 123,76 \text{ Нм.}$$

Среднеквадратичный момент двигателя при фактическом графике нагрузки по результатам предварительного расчета

$$M_{\text{СРКВ}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n M_i^2 \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}} = \sqrt{\frac{214,7^2 \cdot 0,5 + 108,5^2 \cdot 9,5 + 2,3^2 \cdot 0,5 + (-103,6)^2 \cdot 0,75 + (-1,61)^2 \cdot 5,92 + 75,6^2 \cdot 0,75}{17,92}} = \sqrt{\frac{147238,65}{17,92}} = 90,64 \text{ Нм} \leq M_{\text{ДОП}} = 0,8 \cdot 123,76 = 99 \text{ Нм.}$$

Двигатель проходит по условиям нагрева.

7 ВЫБОР ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

На основании требований, предъявляемых к электроприводу, и анализа результатов предварительной проверки двигателя по производительности, нагреву и обеспечению технологических условий следует проверить правильность выбора системы электропривода.

В зависимости от выбранной системы электропривода меняются методы расчета характеристик электропривода и способы обеспечения переходных процессов согласно требованиям технологии рабочей машины.

В приложении В приведены расчетные выражения для выбора силовых элементов систем ТП – Д и ПЧ – АД.

Для расчета и выбора элементов других систем электропривода (ШИП – Д, ШИП – АД, Г – Д, АВК, ПН – АД и т.д.) следует использовать рекомендации литературы.

7.1 Выбор основных элементов системы ТП – Д

В настоящее время тиристорные преобразователи выпускаются с устройствами, обеспечивающими выполнение необходимых обратных связей (по току, по скорости и т.п.) в системе управления не только преобразователем, но и электроприводом. Такие установки называют **комплексным тиристорным электроприводом**, хотя чаще всего двигатель в комплект не входит.

В проекте выбираются (рисунок 7.1) электродвигатель M , силовой тиристорный преобразователь для питания двигателя $UZ1$, силовой трансформатор для питания преобразователя TV (или токоограничивающий реактор), сглаживающий реактор Ld в цепи постоянного тока (при необходимости).

Тиристорный преобразователь $UZ1$ состоит из двух встречно включенных мостов с отдельным управлением, получает питание от сети через автоматический выключатель $QF1$ и трансформатор TV (возможна установка токоограничивающих реакторов).

Якорь двигателя подключен к выходу $UZ1$ через автоматический выключатель $QF3$ и линейный контактор $KM1$. Тиристорный возбудитель $UZ2$ подключается к сети через автоматический выключатель $QF2$ и токоограничивающий реактор Lf . Система управления электроприводом обеспечивает двухзонное регулирование скорости. В первой зоне регулирования скорости осуществляется изменением напряжения на якоре системой подчиненного регулирования с внутренним контуром тока якоря и внешним контуром скорости. Вторую зону регулирования скорости обеспечивает зависимая система ослабления поля с внутренним контуром регулирования тока возбуждения и внешним контуром регулирования ЭДС двигателя.

Электропривод имеет различные типы защит:

- от внутренних и внешних коротких замыканий;
- от перенапряжений на якоре и обмотке возбуждения;
- от снижения тока возбуждения ниже допустимого;
- от перегрузки двигателя (по среднеквадратичному току) и т.д.

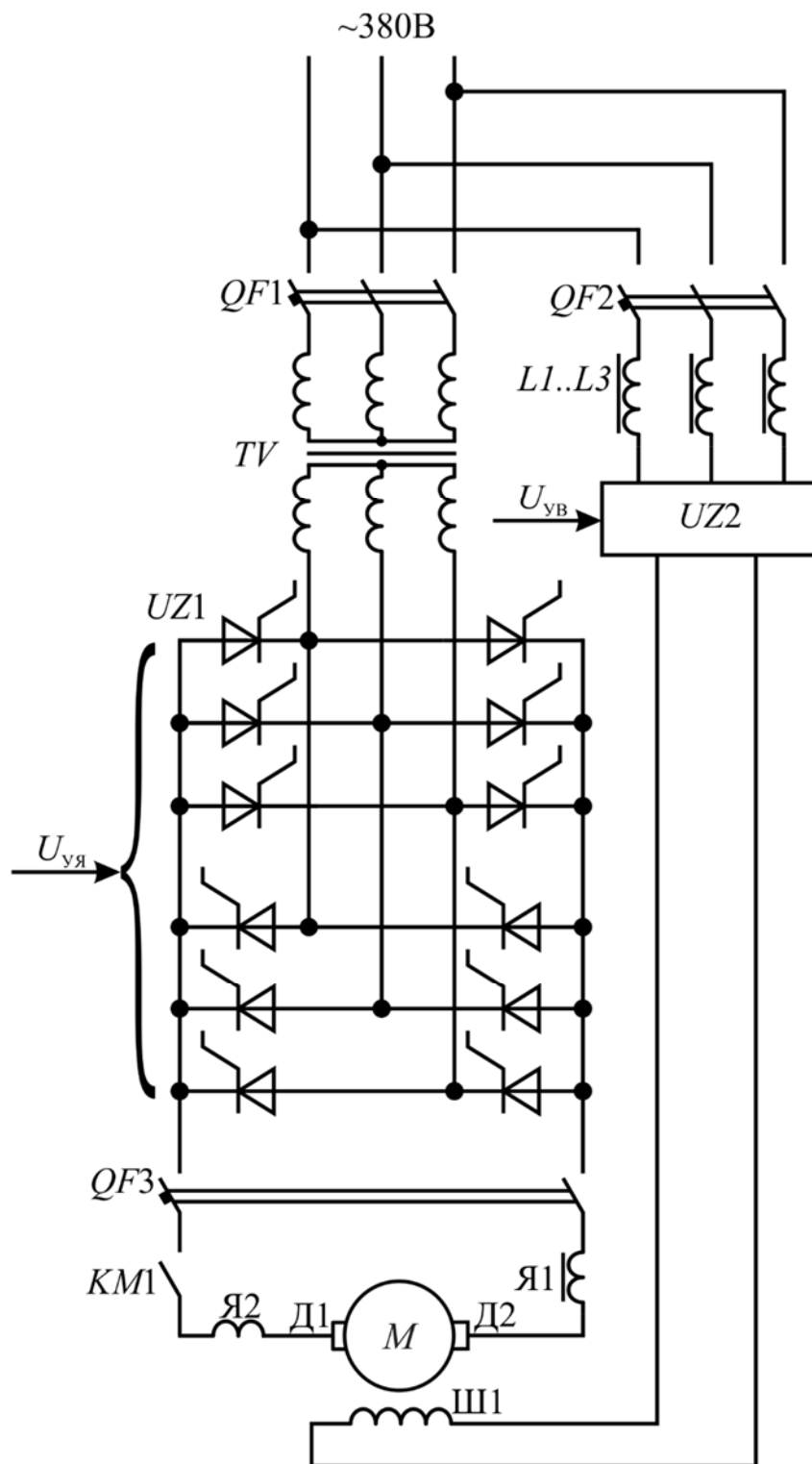


Рисунок 7.1 – Схема реверсивного тиристорного электропривода постоянного тока

По выпрямленному току тиристорные преобразователи допускают перегрузку в циклическом режиме не более 75% в течение 1 мин и не более

110% в течение 15 с. При этом среднеквадратичный ток не должен превышать номинальный при времени усреднения 10 мин.

Выбор преобразователей осуществляется по каталогам электротехнической промышленности, по справочникам или на сайтах Интернета на базе номинальных данных предварительно выбранного двигателя

$$U_{\text{НТП}} \geq U_{\text{Н}}; I_{\text{НТП}} \geq I_{\text{Н}}.$$

При этом выбирается тип преобразователя (комплектного электропривода), определяется его номинальные данные, перегрузочная способность, схема выпрямления, габаритные размеры, наличие трансформатора (токоограничивающего реактора), сглаживающего дросселя.

Типы реверсивных тиристорных преобразователей постоянного тока можно выбирать в Internete.

Для примера приводятся технические данные и схема подключения преобразователя *Mentor II*, позволяющая оценить условия выбора преобразователей из предлагаемого перечня литературных источников.

Выбор трансформатора производится из условия обеспечения номинального напряжения на якоре двигателя при допустимых колебаниях напряжения сети

(–10% ...+15%) и номинальном токе якоря. Практически при номинальном напряжении на якоре двигателя $U_{\text{Н}} = 220$ В применяют трансформатор, при $U_{\text{Н}} = 440$ В – токоограничивающий реактор. Основные параметры некоторых трансформаторов приведены в приложении В.

Выбор токоограничивающих реакторов, включаемых в цепь переменного тока мостовой схемы выпрямления тиристорного преобразователя, производится по номинальному току, потребляемому из сети переменного тока, при номинальном напряжении. Для тиристорных преобразователей используют реакторы серии РТСТ (реактор трехфазный сухой токоограничивающий). Индуктивное сопротивление реакторов соответствует напряжению короткого замыкания (для номинального тока), равному 5,5%. Основные параметры некоторых реакторов приведены в приложении В.

7.2 Выбор основных элементов системы ПЧ–АД

Питание двигателей переменного тока может выполняться от тиристорных и транзисторных преобразователей частоты [4, 5]:

- двухзвенных ПЧИ с автономными инверторами, осуществляющими преобразование напряжения питающей сети последовательно в напряжение постоянного тока, а затем в трехфазное напряжение регулируемой частоты;

- с непосредственной связью НПЧ, состоящих из нескольких управляемых выпрямителей, подключенных к сети переменного тока.

Выбор типа преобразователей зависит от частоты питающей сети, от требуемого диапазона изменения частоты на выходе преобразователя, определяемого диапазоном изменения скорости вращения двигателя, от мощности двигателя, диапазона изменения нагрузки на валу двигателя, наличия или отсутствия реверса, режимов работы двигателя.

При сетевой частоте 50 Гц и выходных частотах 25...12,5 Гц и ниже для любого типа привода целесообразно использовать преобразователь с непосредственной связью.

При выходных частотах 50 Гц и ниже или выше 50 Гц используются ПЧИ преобразователи (см. рисунок 7.2) с автономными инверторами напряжения АИН или тока АИТ. Применение АИТ целесообразно в приводах, работающих с поддержанием заданной величины момента.

Силовой канал ПЧИ осуществляет двухступенчатое преобразование электрической энергии – выпрямление сетевого напряжения с помощью диодного выпрямителя В и последующее инвертирование выпрямленного постоянного по величине напряжения посредством АИН. В режиме рекуперативного торможения двигатель переводится в генераторный режим, АИН обеспечивает подачу на статор реактивного тока заданной частоты и осуществляет выпрямление тока статора, заряжая емкость фильтра C_{Φ} . При изменении направления тока в звене постоянного тока включается в работу управляемый выпрямитель В, обеспечивая передачу в сеть избыточной электрической энергии. Для приводов мощностью менее 200 кВт применяют неуправляемый выпрямитель, а избыточную энергию торможения «сливают» на добавочное сопротивление.

Токоограничивающий реактор. Основные параметры некоторых трансформаторов приведены в приложении В.

Выбор преобразователей с управляемым УВ или неуправляемым НВ выпрямителем на входе преобразователя связан с необходимостью повышения коэффициента мощности установки (НВ), с частым использованием рекуперативного торможения (УВ) и другими технологическими условиями.

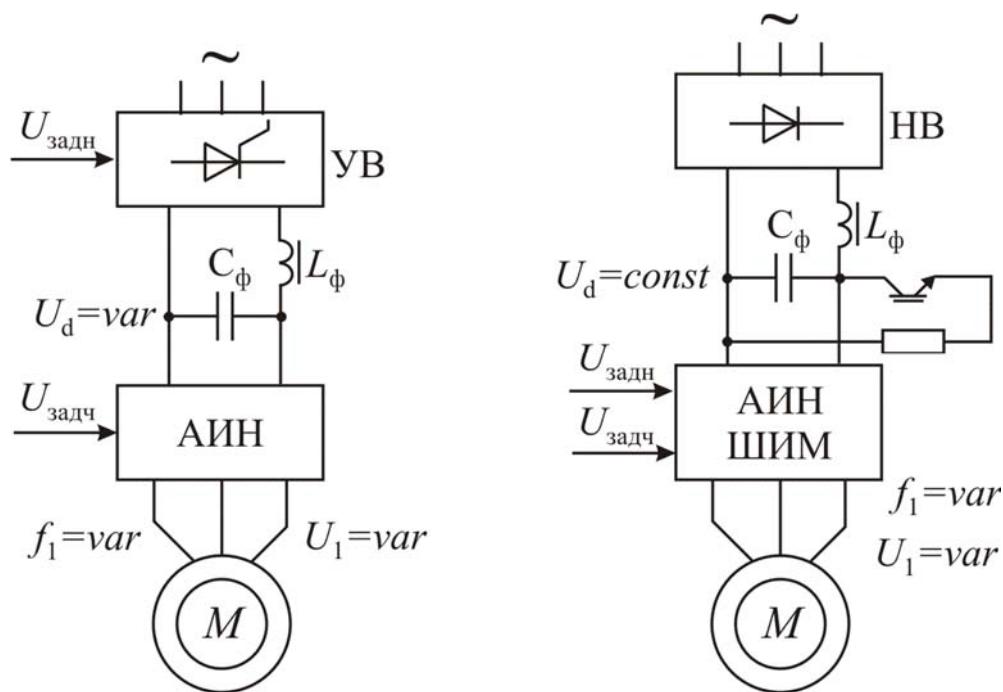


Рисунок 7.2 – Схемы преобразователей частоты со звеном постоянного тока

При широких диапазонах регулирования скорости двигателя подобные преобразователи используются лишь в замкнутых системах электропривода.

Выбор преобразователей частоты осуществляется по справочникам, каталогам электротехнической промышленности, на основе номинальных данных предварительно выбранного двигателя:

$$U_{нпч} \geq U_{нл}; I_{нпч} \geq I_{н1},$$

где $U_{нл}$, $I_{н1}$ – номинальные линейное напряжение и фазный ток статора двигателя;

$U_{нпч}$, $I_{нпч}$ – номинальные линейное напряжение и ток нагрузки преобразователя частоты.

Диапазон изменения выходной частоты преобразователя должен быть не менее требуемого диапазона изменения частоты питания двигателя.

Каталожные данные некоторых элементов системы ПЧ–АД (фильтров, тормозных резисторов, коммутационной аппаратуры и пр.) приведены в приложении В.

Пример 7.1 Выбор преобразователя частоты

С учетом рекомендаций по выбору преобразователей частоты

$$U_{\text{нпч}} \geq U_{\text{нл}} = 380 \text{ В}; I_{\text{нпч}} \geq I_{\text{н1}} = 29 \text{ А}.$$

Выбираем преобразователь частоты «DELTA ELECTRONICS» типа VFD-B модели VFD110843A, применяемого для электроприводов различных механизмов, в том числе для крановых и станочных установок.

При номинальной мощности выбранного двигателя $P_{\text{н}} = 11 \text{ кВт}$ и токе статора $I_{\text{н1}} = 29 \text{ А}$ преобразователь для такой мощности двигателя предлагает ток нагрузки только $I_{\text{прн}} = 24 \text{ А}$. Выбираем преобразователь большего габарита модели с $P_{\text{н}} = 15 \text{ кВт}$ и $I_{\text{прн}} = 32 \text{ А}$.

Технические данные преобразователя частоты модели VFD110B43A приведены в таблице 7.1. Там же приводятся данные по перегрузочной способности, системе управления, функциям работы и защиты.

Таблица 7.1 – Технические данные преобразователя частоты модели D110B43A

Номинальная мощность двигателя, кВт	15
Номинальный ток нагрузки $I_{\text{н}}$, А	32
Питающая сеть	380 В (+10%, –15%), 50 Гц (±2%)
Выходная частота	0...400 Гц ± 0,05%
Перегрузочная способность	1,5 · $I_{\text{н}}$ в течение 1 мин 2 · $I_{\text{н}}$ в течение 2 с
Характеристика момента	Автоматическая компенсация момента и скольжения; Пусковой момент: 1,5 $M_{\text{н}}$ на 1 Гц
Выходное напряжение	3х (0...220 В ± 2%)
Функции работы	S-кривая разгона/замедления, торможение постоянным током, автотестирование двигателя, обратная связь по скорости, ПИД-регулятор, режим автоматического энергопотребления и др.
Функции защиты	Повышенное и пониженное напряжение, пропадание фазы, перегрузка и недогрузка по току, внешнее отключение, короткое замыкание, замыкание на землю, перегрев радиатора и др.

7.3 Выбор станции управления для двигателя, питающегося от цеховой сети

Типовой электропривод при питании электродвигателя от цеховой сети с управлением от магнитного контроллера (релейно-контакторная система) включает в себя [13]:

- электродвигатель;
- станцию управления с цепями защиты и сигнализации;
- электрические аппараты для управления электроприводом (кнопки управления, универсальные переключатели, командоконтроллеры);
- резисторы в силовых цепях электродвигателя;
- путевые и конечные выключатели.

При выбранном двигателе расчет пусковых, тормозных и регулировочных резисторов в силовых цепях двигателя выполняется из условия обеспечения требований, предъявляемых к электроприводу:

- диапазона регулирования скорости;
- ограничения ускорения;
- необходимости точной остановки, и т.д.

При отсутствии особых требований к плавности пуска число ступеней пусковых резисторов принимается равным 2...3.

По окончании пуска двигатель может работать как в естественной схеме включения (при номинальном напряжении и отсутствии резисторов в цепях обмоток двигателя), так и на искусственных характеристиках (при наличии резисторов в цепях обмоток двигателя).

Выбор режима торможения двигателя (противовключения, динамического или рекуперативного торможения) основывается как на технологических требованиях к приводу в отношении интенсивности торможения и точности остановки, так и на технико-экономических показателях – учете потерь энергии при торможении и сложности аппаратурной реализации режима.

8 РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПРИВОДА

8.1 Общие положения

Целью расчета является обеспечение технологических задач, заложенных в требования к электроприводу. Технологические скорости рабочего и обратного хода в установившемся режиме, пониженные скорости при пуске и остановке рабочего органа должны быть обеспечены с заданной степенью точности.

Заданными данными для расчета являются скорость движения механизма $\omega_{\text{зад}} = \omega_{\text{с}}$, приведенная к валу двигателя, и заданный момент сопро-

тивления движению M_c , приведенный к валу двигателя и включающий в себя момент механических потерь холостого хода двигателя ΔM_x .

По результатам расчетов механической части из таблицы 5.1 получены заданные точки установившихся режимов работы.

Задачей расчета является определение параметров электропривода (в зависимости от конкретной схемы управления), при которых выполняются требования к электроприводу по обеспечению заданных скоростей движения рабочего органа (рабочей машины).

Исходными данными для расчета статических характеристик являются каталожные данные электродвигателя и другого оборудования, установленного в его силовой цепи.

8.2 Расчет естественных характеристик электродвигателей

С помощью естественной характеристики оценивают возможности двигателя при его работе в механической системе:

- выдерживать предельные значения тока (момента), которые двигатель может развивать кратковременно;
- обеспечивать перевод двигателя в генераторный режим и др.

Расчет естественной характеристики выполняют аналитическим, графическим или графоаналитическим методами. Наиболее точным изображением естественной характеристики двигателя является ее каталожная кривая. При наличии каталожной кривой отпадает необходимость в расчете характеристики, лишь иногда для получения на базе естественной характеристики искусственных характеристик приходится линеаризировать естественную характеристику на рабочем участке. Характеристики двигателей постоянного тока довольно легко рассчитываются аналитическим методом ввиду простоты уравнений их описывающих. Для двигателей переменного тока в курсовом проекте предусмотрен не только аналитический расчет, но и расчет посредством специализированных программ.

8.2.1 Естественные характеристики двигателя независимого возбуждения

Каталожными данными двигателя постоянного тока независимого возбуждения являются номинальные данные:

- U_H – номинальное напряжение на якоре, В;
- P_H – номинальная мощность на валу, кВт;
- I_H – номинальный ток якорной цепи, А;
- n_H – номинальная частота вращения, об/мин,
- $n_{\max}$ – максимальная допускаемая частота вращения, об/мин;
- $M_{\max}$ – максимальный вращающий момент, кгм;
- $J_{дв}$ – момент инерции якоря, кгм² (или $GD^2 = 4 J_{дв}$ – маховый момент).

В каталогах некоторых серий двигателей (в частности, краново-металлургической серии Д) и справочниках приводятся:

$2p_{\Pi}$ – число полюсов;

N – число активных проводников якоря;

$2a$ – число параллельных ветвей якоря;

$r_{оя}$ – сопротивление обмотки якоря, Ом;

$r_{дп}$ – сопротивление обмотки добавочных полюсов, Ом;

$w_{вп}$ – число витков параллельной обмотки на полюс;

$r_{ов}$ – сопротивление параллельной обмотки, Ом;

Φ_H – номинальный магнитный поток на полюс, мВб, а также характеристики намагничивания двигателей $\Phi = f(F)$ и рабочие характеристики – каталожные зависимости от тока якоря I частоты вращения $n = f(I)$, момента на валу $M_B = f(I)$, мощности на валу $P_B = f(I)$ и коэффициента полезного действия $\eta = f(I)$.

Необходимо отметить, что для дальнейших расчетов каталожные данные частоты вращения n и момента M нужно пересчитать в единицах измерения системы СИ:

$$\omega \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right) = \frac{n \left(\frac{\text{об}}{\text{мин}} \right)}{9,55};$$

$$M(\text{Нм}) = 9,81M(\text{кгм}).$$

Механические характеристики двигателя независимого возбуждения прямолинейны и математически выражаются формулой:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - M \frac{R}{(k\Phi)^2}. \quad (8.1)$$

Для естественной механической характеристики напряжение равно номинальному $U = U_H$, поток равен номинальному $\Phi = \Phi_H$, сопротивление якорной цепи равно внутреннему (невключаемому):

$$R = r_{оя} + r_{дп} + r_{ко} = r_{я},$$

при этом следует обратить внимание, что в некоторых конструкциях двигателей могут отсутствовать компенсационная обмотка и обмотка добавочных полюсов. Учитывая вышеизложенное, уравнение для естественной механической характеристики принимает вид

$$\omega = \frac{U_H}{k\Phi_H} - M \frac{R_{я}}{(k\Phi_H)^2}. \quad (8.2)$$

При отсутствии данных по сопротивлению якорной цепи величина $r_{я}$ может быть приближенно определена из условия равенства постоянных и переменных потерь в номинальном режиме по формуле

$$R_{я} = \frac{U_H \cdot I_H - P_H}{2I_H^2}. \quad (8.3)$$

Стоит отметить, что данный алгоритм носит приблизительный характер и может быть использован исключительно для случая, когда двигатель уже имеется в наличии и по данным необходимо оценить его сопротивление. В случае проектирования новой системы электропривода рекомендуется придерживаться каталожных данных.

Произведение $k\Phi_H$ также можно определить через каталожные данные

$$k\Phi_H = \frac{U_H - I_H \cdot r_{\Sigma}}{\omega_H}. \quad (8.4)$$

Естественная механическая характеристика строится по двум точкам:

$$(\omega_H, M_H) \text{ и } (\omega_{0H}, M = 0).$$

Скорость идеального холостого хода ω_{0H} определяется по формуле

$$\omega = \frac{U_H}{k\Phi_H}. \quad (8.5)$$

Электромагнитный момент

$$M_H = k\Phi_H \cdot I_H, \quad (8.6)$$

который двигатель развивает при нормальной частоте вращения ω_H .

Необходимо отметить, что механические характеристики двигателей $\omega = f(M)$ строятся в зависимости от электромагнитного момента

$$M = M_B + M_X. \quad (8.7)$$

Момент потерь холостого хода часто принимают постоянным и равным номинальному моменту потерь холостого хода. Определяют эту величину по каталожным данным номинального режима

$$M_{XH} = M_H - M_{BH}; \quad (8.8)$$

$$M_{BH} = \frac{P_H}{\omega_H}, \quad (8.9)$$

где M_{BH} – номинальный момент на валу двигателя.

Естественная электромеханическая характеристика $\omega = f(I)$ определяется соотношением

$$\omega_H = \frac{U_H - I_H \cdot r_{\Sigma}}{k\Phi_H} \quad (8.10)$$

и строится также по двум точкам: (ω_H, I_H) и $(\omega_{0H}, I = 0)$.

Часто в рамках автоматизированного электропривода используются характеристики, построенные в относительных единицах (о.е.). Для перехода к о.е. назначаются базовые величины, за которые обычно принимаются номинальные значения: $U_B = U_H$, $I_B = I_H$, $\Phi_B = \Phi_H$ и лишь за базовую частоту вращения $\omega_B = \omega_{0H}$.

Базовые значения других переменных определяются через базовые значения основных переменных:

$$M_B = M_H = k\Phi_H \cdot I_H;$$

$$E_B = E_H = k\Phi_H \cdot \omega_{0H};$$

$$R_B = R_H = \frac{U_H}{I_H}.$$

Естественные механическая и электромеханическая характеристики в о.е. совпадают

$$\begin{aligned}\bar{\omega} &= 1 - \bar{M} \cdot \bar{r}_Я; \\ \bar{\omega} &= 1 - \bar{I} \cdot \bar{r}_Я; \\ \bar{I} &= \bar{M}\end{aligned}\tag{8.11}$$

и строятся по точкам:

$$(\bar{\omega} = 1, \bar{M} = 0) \text{ и } (\bar{\omega} = 1 - \bar{r}_Я, \bar{M} = 1).$$

Использование изображения характеристик в о.е. позволит в дальнейшем легко строить искусственные характеристики и определять параметры схем включения.

8.2.2 Естественные характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Двигатели последовательного возбуждения постепенно вытесняются из электроприводов промышленных механизмов асинхронными двигателями. Эти двигатели сохраняют свое место в электроприводе транспортных устройств (электровозы, троллейбусы, трамваи) благодаря их достоинствам для этого типа приводов:

- однопроводное питание;
- поток не зависит от напряжения сети;
- постоянство статической мощности;
- возможность форсирования переходных режимов и т.д.

Обмотка возбуждения двигателя последовательного возбуждения включается в цепь якоря, и поток машины определяется током якоря, который в данном случае одновременно является и током возбуждения. Механическая и электромеханическая характеристики двигателя определяются кривой намагничивания машины, поэтому, естественные характеристики не поддаются аналитическому расчету. Расчет характеристик двигателя – графоаналитический, и исходными данными для расчета являются каталожные кривые – зависимости от тока якоря I момента на валу M_B и частоты вращения n , а также мощности на валу P_B и коэффициента полезного действия η .

В каталогах [11] приводятся также номинальные данные двигателя (P_H, I_H, U_H, n_H), а также предельные значения момента $M_{\text{макс.доп}}$ и частоты вращения $\omega_{\text{макс}}$, момент инерции якоря $J_{\text{дв}}$ или маховый момент $GD^2 = 4 \cdot J_{\text{дв}}$. Для двигателей краново-металлургической серии (двигатели типа Д) приводятся значения допускаемых нагрузок P, I, n при каталожных значе-

ниях ПВ, что позволяет построить участок электромеханической характеристики.

Для дальнейших расчетов искусственных характеристик целесообразно построить зависимости электромагнитного момента $M_{\text{ЭМ}}(I)$ и тормозного момента $M_{\text{Т}}(I)$. Для этого задаются током якоря $I_{\text{ЗАД}}$, по каталожным кривым определяют частоту вращения $\omega_{\text{е}}$ на естественной электромеханической характеристике и значение момента на валу $M_{\text{В}}$ по каталожной зависимости $M_{\text{В}}(I)$.

Электромагнитный момент рассчитывается по соотношению

$$M_{\text{ЭМ}} = k\Phi \cdot I_{\text{ЗАД}} = \frac{U_{\text{Н}} - I_{\text{ЗАД}} \cdot (r_{\text{Я}} + r_{\text{ОВ}})}{\omega_{\text{В}}} \cdot I_{\text{ЗАД}}. \quad (8.12)$$

а тормозной момент

$$M_{\text{Т}} = 2 \cdot M_{\text{ЭМ}} - M_{\text{Т}} \quad (8.13)$$

По результатам расчетов строятся зависимости $M_{\text{ЭМ}}(I)$ и $M_{\text{Т}}(I)$, а также естественная механическая характеристика $\omega = f(M_{\text{ЭМ}})$.

8.2.3 Естественные характеристики асинхронного двигателя

В каталогах электротехнической промышленности [12, 13] приводятся номинальные данные двигателя:

$U_{1\text{Н}}$ – номинальное напряжение статора, В;

$I_{1\text{Н}}$ – ток статора, А;

$P_{\text{Н}}$ – мощность на валу, кВт;

$n_{\text{Н}}$ – частота вращения, об/мин,

$\cos\varphi_{\text{Н}}$ – коэффициент мощности;

$\eta_{\text{Н}}$ – коэффициент полезного действия,

а также

$M_{\text{К}}$ – максимальный момент, Нм;

$n_{\text{макс}}$ – максимальная частота вращения, об/мин;

$J_{\text{ДВ}}$ – момент инерции ротора, кгм².

Для двигателя с фазным ротором:

E_{20} – напряжение на кольцах заторможенного разомкнутого ротора, В;

$I_{2\text{Н}}$ – номинальный ток ротора, А.

Для двигателя с короткозамкнутым ротором:

$M_{\text{П}}$ – пусковой момент, Нм;

$I_{\text{П}}$ – пусковой ток статора, А.

Кроме номинальных данных, в каталогах двигателей краново-металлургической серии $MTF(H)$ приводятся каталожные кривые – зависимости от скольжения S момента двигателя $M(S)$, тока статора $I_1(S)$ и $\cos\varphi(S)$, а также допускаемые нагрузки P , n , I при каталожных значениях продолжительности включения ПВ_{КАТ}.

Наиболее точной механической характеристикой асинхронного двигателя является каталожная зависимость $M(S)$, и лишь при отсутствии каталожной зависимости приходится обращаться к приближенным расчетам.

При известных сопротивлениях статора r_1, x_1 и ротора r_2, x_2 для расчета естественной механической характеристики используют уточненную формулу Клосса:

$$M = \frac{2M_K \cdot (1 + \alpha S_K)}{\frac{S_K}{S} + \frac{S}{S_K} + 2\alpha S_K}; \quad (8.14)$$

$$S_K = \pm \frac{r'_2}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x'_2)^2}}; \quad (8.15)$$

$$\alpha = \frac{r_1}{r'_2}; \quad (8.16)$$

$$M_K = \frac{3 \cdot U_{1\Phi H}^2}{2\omega_{0H} \left(r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x'_2)^2} \right)}; \quad (8.17)$$

$$r'_2 = k_B^2 \cdot r_2;$$

$$x'_2 = k_B^2 \cdot x_2;$$

$$k_B \cong \frac{0,95 \cdot U_{1H}}{E_{20}};$$

$$\omega_{0H} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}}{p_{\pi}}; \quad (8.18)$$

где S_K – критическое скольжение;

M_K – максимальный момент двигателя, Нм; обычно в каталогах приводится $M_{\text{МАКС}} = M_K$;

r'_2 – приведенное активное сопротивление ротора, Ом;

x'_2 – приведенное индуктивное сопротивление рассеяния ротора, Ом;

k_e – коэффициент трансформации;

ω_{0H} – синхронная скорость вращения поля статора, рад/с;

f_{1H} – номинальная частота напряжения статора, Гц;

p_{π} – число пар полюсов.

Если сопротивления цепей неизвестны, то используют формулу (8.14), в которой принимают $\alpha = 1$, а критическое скольжение рассчитывают по формуле:

$$S_K = S_H \cdot \frac{\mu_K \pm \sqrt{\mu_K^2 - 1 + 2\alpha \cdot S_H \cdot (\mu_K - 1)}}{1 - 2\alpha \cdot S_H \cdot (\mu_K - 1)}, \quad (8.19)$$

$$S_H = \frac{\omega_{0H} - \omega_H}{\omega_{0H}},$$

где μ_K – перегрузочная способность асинхронного двигателя;

S_H – номинальное относительное скольжение.

При увеличении номинальной мощности P_H двигателя величина активного сопротивления статора снижается, а при $P_H > 10$ кВт [7] можно пренебречь его величиной $r_1 \approx 0$. Тогда $\alpha = 0$, выражение механической характеристики (8.14) преобразуется к виду

$$M = \frac{2M_K}{\frac{S_K}{S} + \frac{S}{S_K}}, \quad (8.20)$$

а выражение критического скольжения (8.18) – к виду

$$S_k = S_H \cdot \left(\mu_k \pm \sqrt{\mu_k^2 - 1} \right). \quad (8.21)$$

Момент потерь холостого хода асинхронного двигателя M_x рассчитать довольно сложно из-за отсутствия каталожных данных по сопротивлениям статора и ротора. Поэтому в расчетах асинхронного электропривода можно не учитывать момент потерь холостого хода ($M_x \approx 0$), а электромагнитный момент в установившемся режиме принимать равным статическому моменту.

Электромеханические характеристики асинхронного двигателя – зависимости частоты вращения ротора ω от тока статора $\omega(I_1)$, от тока ротора $\omega(I_2)$, от тока намагничивания $\omega(I_\mu)$. Расчет этих зависимостей достаточно сложен, так как необходим учет сопротивлений статора и ротора и их изменений в зависимости от частоты токов ротора и статора. Также при расчете необходимо учитывать изменение сопротивления контура намагничивания с помощью кривой намагничивания. Чаще всего на стадии проектирования электропривода сопротивления обмоток и кривая намагничивания не известны.

С достаточной точностью для расчета электромеханических характеристик двигателя при питании от цеховой сети (напряжение постоянной амплитуды и частоты) можно использовать формулы профессора В.А.Шубенко. Эти формулы получены при не учете активного сопротивления статора ($r_1 = 0$) и используют только каталожные данные двигателя.

Ток холостого хода (ток намагничивания)

$$I_{\mu H} = I_{1H} \cdot \left(\sin \varphi_H - \frac{S_H}{S_k} \cdot \cos \varphi_H \right). \quad (8.22)$$

Ток ротора

$$I_2 = I_{2H} \cdot \sqrt{\frac{M \cdot S}{M_H \cdot S_H}}. \quad (8.23)$$

Ток статора

$$I_1 = \sqrt{I_{\mu H}^2 + (I_{1H}^2 - I_{\mu H}^2) \cdot \frac{M \cdot S}{M_H \cdot S_H}}. \quad (8.24)$$

При известных величинах сопротивлений статора и ротора расчет токов в этих цепях выполняется известными из ТОЭ методами расчета цепей переменного тока для Т – образной или Г – образной схем замещения асинхронного двигателя [7] или с помощью его круговой диаграммы [13]. Если сопротивления цепей статора и ротора неизвестны, их можно рассчитать (с довольно большой погрешностью) через каталожные данные двигателя.

Для двигателя с фазным ротором:

$$r_2 \cong \frac{E_{20}}{\sqrt{3} \cdot I_{2H}} \cdot S_H;$$

$$r'_2 \approx r_1;$$

$$x_K \approx \sqrt{\frac{r'^2_2}{S_k^2 - r_1^2}};$$

$$x_1 = x'_2 \cong \frac{x_K}{2};$$

$$x_\mu \cong \frac{U_{1H}}{I_{\mu H}} - x_1;$$

Для двигателя с короткозамкнутым ротором:

$$r'_2 \cong \frac{M_H \cdot \omega_{0H}}{3 \cdot I_H^2}.$$

8.3 Расчет параметров схем включения, обеспечивающих работу двигателя в заданных точках

8.3.1 Расчет параметров схем включения посредством специализированных программ

Для расчета статических и динамических характеристик электропривода сотрудниками кафедры под руководством Г.И. Драчева были разработаны специализированные программы для среды *Matlab*.

8.3.2 Расчет параметров схем включения графическим методом

– на одном графике (рисунок 8.1) строится естественная механическая характеристика и указываются координаты заданных точек M_C и ω_C ;

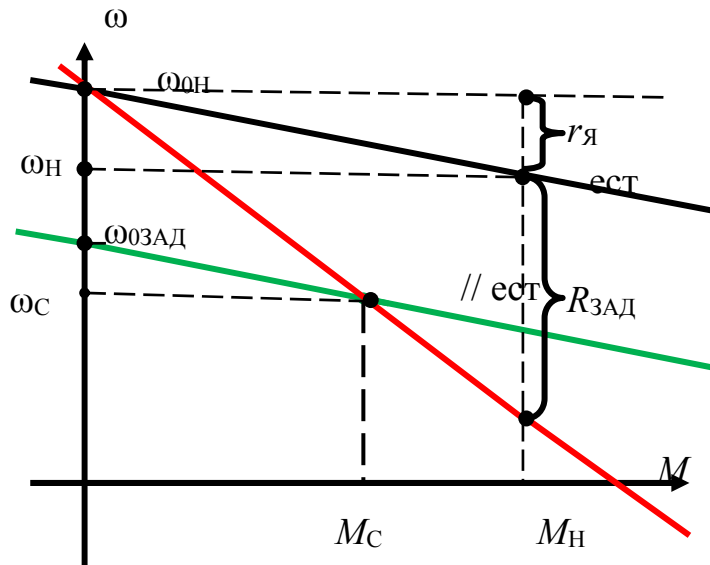


Рисунок 8.1 – Определение $\omega_{0зад}$ и $R_{зАд}$ графическим методом

- строятся желаемые механические характеристики, проходящие через заданные точки;
- параллельным переносом естественной характеристики (*// ест*), проходящей через заданную точку, определяется $\omega_{0зад}$ – заданная скорость идеального холостого хода (синхронная скорость);
- характеристика, проходящая через заданную точку M_c и ω_c и точку ω_{0H} , отсекает при M_H отрезок $(r + R_{зАд})$, позволяющий при известном невыключаемом сопротивлении двигателя графически определить добавочное сопротивление $R_{зАд}$ в силовой цепи двигателя.

8.3.3 Расчет параметров схем включения аналитическим методом

8.3.3.1 Расчет добавочных сопротивлений ДНВ при питании от сети

При питании двигателя постоянного тока независимого возбуждения от сети заданный режим работы в точках, не лежащих на естественной характеристике двигателя, обеспечивается введением добавочных сопротивлений в цепи двигателя.

Для двигателя независимого возбуждения при расчете сопротивлений используется выражение искусственной механической характеристики путем подстановки координат заданной точки $\omega = \omega_{зад}$ и $M = M_{зАд}$:

$$\omega = \frac{U_H}{k\Phi_H} - M \frac{R_{доб} + r_{я}}{(k\Phi_H)^2}. \quad (8.25)$$

Если заданная точка находится ниже естественной характеристики, принимают $k\Phi = k\Phi_H$ и решают уравнение (8.25) относительно $R_{доб}$ в цепи якоря.

Эту задачу можно решить и в относительных единицах, и графическим методом.

Для расчета режима ослабления поля, когда заданная точка лежит выше естественной характеристики, в уравнении (8.25) принимают $R_{доб} = 0$ и решают уравнение относительно $k\Phi$. Приняв приемлемое значение $k\Phi$, при котором искомая характеристика проходит через заданную точку, с помощью кривой намагничивания двигателя определяют значение тока возбуждения $I_{восл}$ при ослабленном поле. Кривая намагничивания иногда приводится в каталогах (для двигателей типа Д). При отсутствии «родной» кривой намагничивания используют универсальную кривую из справочников [3].

По полученному значению $I_{восл}$ рассчитывают добавочное сопротивление $R_{доб}$ в цепи обмотки возбуждения или напряжение на обмотке возбуждения при ослабленном поле, если обмотка получает питание от возбуждателя.

8.3.3.2 Расчет добавочных сопротивлений ДПВ при питании от сети

Для двигателя последовательного возбуждения расчет сопротивлений в цепи якоря для обеспечения работы в заданной точке выполняют по формуле искусственной характеристики:

$$\omega_{и} = \omega_{в} \frac{U_H - I \cdot (r_{я} + r_{ов} + R_{доб})}{U_H - I \cdot (r_{я} + r_{ов})}, \quad (8.26)$$

которую решают относительно $R_{доб}$ при $\omega_{и} = \omega_{зад}$, $I = I_{зад}$. При этом значения $I_{зад} = f(M_{зад})$ и $\omega_e = f(I_{зад})$ определяют графическим путем по каталожным кривым.

8.3.3.3 Расчет добавочных сопротивлений ротора асинхронного двигателя при питании от сети.

Для асинхронного двигателя с фазным ротором расчет добавочных сопротивлений в цепи ротора для обеспечения работы в заданной точке наиболее прост при использовании формулы соотношения скольжений и сопротивлений при постоянстве момента $M = \text{const}$:

$$\frac{S_E}{S_{и}} = \frac{r_2}{R_2}. \quad (8.27)$$

В этой формуле

$$S_{и} = \frac{\omega_0 - \omega_{и}}{\omega_0};$$

– скольжение на искусственной реостатной характеристике

$$R_2 = r_2 + R_{2\text{доб}};$$

– полное сопротивление фазы ротора.

Для расчета $R_{2\text{доб}}$ определяют скольжение S_E на естественной механической характеристике при $M = M_C$, принимают $\omega_{\text{и}} = \omega_{\text{зад}}$ и R_2 рассчитывают по (8.27).

Расчет искусственной характеристики выполняют по той же формуле (8.27), только при известном R_2 определяют $S_{\text{и}}$ и $\omega_{\text{и}}$ при различных моментах двигателя.

8.3.3.4 Расчет ЭДС преобразователя в системе ТП–Д при работе в заданной точке

При питании двигателя от преобразователя параметры электропривода регулируются плавно. Определение параметров, необходимых для работы двигателя в заданной точке, сводится к уточнению возможности обеспечения преобразователем уровня искомых параметров при различных нагрузках и колебаниях напряжения питающей сети.

При работе в системе ТП–Д в якорной цепи появляется дополнительное падение напряжения в силовой цепи за счет:

- дополнительных сопротивлений обмоток трансформатора (токоограничивающего реактора);
- возникновения провалов мгновенного значения ЭДС в периоды коммутации тиристоров;
- падения напряжения на тиристорах в открытом состоянии.

Эквивалентное активное сопротивление обмоток трансформатора, приведенное ко вторичной цепи, рассчитывают по формуле:

$$r_{\text{ТР}} = \frac{P_{\text{КЗ}}}{3I_{2\text{Н}}^2},$$

для трехфазной мостовой схемы выпрямления дополнительное сопротивление от обмоток трансформатора составляет

$$R_{\text{Т}} = 2R_{\text{ТР}}. \quad (8.28)$$

Снижение выпрямленной ЭДС за счет коммутационных провалов учитываемая сопротивлением

$$R_{\text{Э}} = \frac{m \cdot x_{\text{Т}}}{2\pi}, \quad (8.29)$$

в котором эквивалентное индуктивное сопротивление фазы трансформатора рассчитывают исходя из:

$$z_{\text{ТР}} = \frac{U_{2\text{Н}} \cdot U_{\text{К}}^{\%}}{I_{2\text{Н}} \cdot 100};$$

$$x_{\text{ТР}} = \sqrt{z_{\text{КЗ}}^2 - r_{\text{КЗ}}^2}.$$

Падение напряжения на открытых тиристорах для трехфазной мостовой схемы составляет

$$\Delta U_B = (1 \dots 2), \text{ В.}$$

Выражение электромеханической характеристики двигателя в системе ТП–Д имеет вид:

$$\omega = \frac{E_{d0} \cos \alpha - \Delta U_B - I(r_{\text{я}} + R_T + R_P)}{k\Phi_H}, \quad (8.30)$$

где значение максимальной выпрямленной ЭДС на выходе тиристорного преобразователя определяется выражением:

$$E_{d0} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{\sin(\pi/6)}{(\pi/6)} = 1.35 \cdot E_L = 2.34 \cdot E_\Phi. \quad (8.31)$$

После подстановки

$$\omega = \omega_{\text{ЗД}}, I = I_{\text{ЗД}} = \frac{M_C}{k\Phi_H}, \quad (8.32)$$

получают среднее значение выпрямленной ЭДС

$$E_d = E_{d0} \cos \alpha \quad (8.33)$$

и при необходимости – $\cos \alpha$ (см. рисунок 8.2).

Естественная электромеханическая характеристика системы ТП–Д проходит через точку (ω_H, I_H) при напряжении

$$U_H = E_{d0} \cdot \cos \alpha_H.$$

При этом угле α_H соответствует напряжение управления $U_{\text{УН}}$ преобразователем. В документации на тиристорные преобразователи зачастую не приводится его регулировочная характеристика, однако можно установить базовое напряжение U_B на аналоговом входе, при котором на выходе преобразователя устанавливается номинальное напряжение. Коэффициент усиления ТП определяют

$$k_{\text{ТП}} = \frac{U_H}{U_B}. \quad (8.34)$$

Различные скорости вращения двигателя могут быть получены параллельным переносом характеристики системы ТП–Д вниз от естественной.

Полученные зависимости не учитывают режим прерывистых токов, поэтому в зоне малых нагрузок рассчитывать скорости по (8.30) не рекомендуется. «Граничные» значения зоны прерывистых токов зависят от угла регулирования α и параметров схемы выпрямления. Величина граничного тока для трехфазной мостовой схемы ($m=6$) определяется по приближенной формуле

$$I_{\text{ГР}} = \frac{E_{d0} \cdot \sin \alpha}{2\pi \cdot f_{1H} \cdot (2L_T + L_{\text{я}} + L_P)} \cdot \left(1 - \frac{\pi}{m} \cdot \text{ctg} \frac{\pi}{m}\right). \quad (8.35)$$

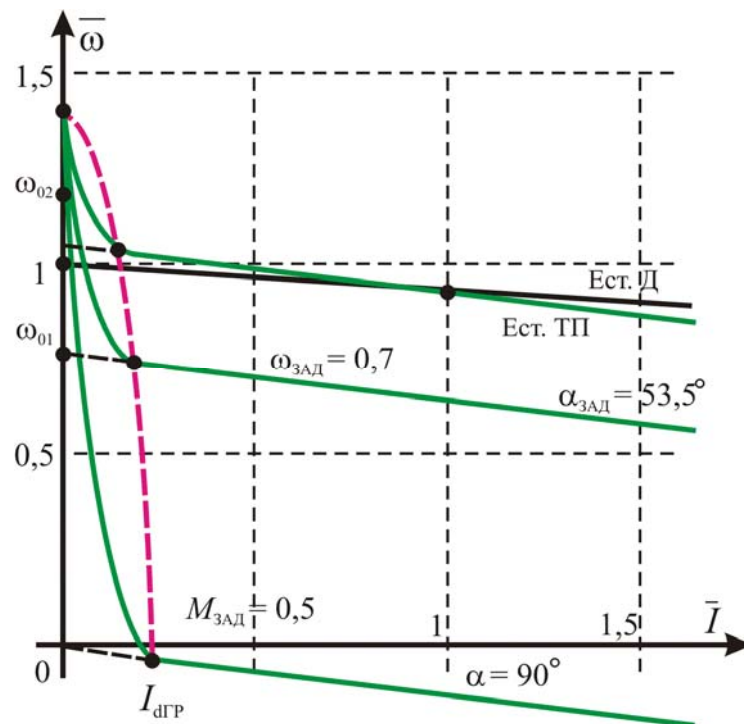


Рисунок 8.2 – Расчет искусственных характеристик в системе ТП–Д

Для заданной скорости ω_{3AD} определяют значение напряжения и угол α , и проверяют режим работы преобразователя.

Если $I_{3AD} < I_{ГР}$, то преобразователь работает в режиме прерывистого тока и необходимо уточнение вида характеристик. Методика расчета характеристик приведена в [5].

8.3.3.5 Расчет частоты и напряжения двигателя в системе ПЧ–АД при работе в заданной точке

При питании асинхронного двигателя от преобразователя частоты в процессе преобразования напряжения промышленной частоты в напряжение регулируемой амплитуды и регулируемой частоты возникают потери напряжения и мощности в преобразователе. Обычно такие преобразователи имеют внутренние обратные связи, и при изменении нагрузки двигателя выходное напряжение и частота практически не изменяются. Поэтому в дальнейшем напряжение и частоту на статоре двигателя будем считать независимыми от нагрузки.

Синхронная скорость двигателя ω_0 зависит от частоты питающей сети f_1 и числа пар полюсов p_n и рассчитывается по формуле 8.18.

Для устойчивой работы двигателя необходимо при изменении частоты поддерживать перегрузочную способность двигателя, что обеспечивается регулированием напряжения на статоре по различным законам в зависимости от частоты и от характера изменения статического момента. Эти осо-

бенности необходимо учитывать при расчете частоты и амплитуды напряжения.

Наиболее распространен закон изменения амплитуды напряжения пропорционально частоте $\frac{U}{f} = const$. При таком законе (если принять $r_1 = 0$) максимальный момент постоянен $M_K \cong const$ и не зависит от частоты. Также не зависит от частоты

$$\Delta\omega_K = \omega_0 - \omega_K \approx const.$$

Это позволяет для приближенных расчетов (если принять $r_1=0$) использовать прием параллельного переноса естественной механической характеристики, при этом, естественная характеристика перемещается вдоль оси ω и устанавливается в точке $\omega_{3АД}, M_{3АД}$. В этом случае синхронная скорость, соответствующая заданной точке,

$$\omega_{03АД} = \omega_{3АД} + \Delta\omega_e, \quad (8.36)$$

где $\Delta\omega_e$ – отклонение скорости от синхронной на естественной характеристике при заданном моменте $M_{3АД}$.

Частота напряжения в заданной точке

$$f_{13АД} = \frac{\omega_{03АД}}{\omega_{0Н}} \cdot f_{1Н} = \alpha \cdot f_{1Н}, \quad (8.37)$$

где $f_{1Н} = 50$ Гц – номинальная частота напряжения на статоре;

$\omega_{0Н}$ – синхронная частота вращения двигателя при номинальной частоте $f_{1Н}$.

Напряжение на статоре можно определить из формулы (8.17)

$$U_{13АД} = \sqrt{\frac{2M_K \cdot \alpha \cdot \omega_{0Н} \cdot (r_1 + \sqrt{r_1^2 + (\alpha x_k)^2})}{3}}, \quad (8.38)$$

принимая для обеспечения перегрузочной способности двигателя

$$M_K = (2 \div 3) \cdot M_{3АД}. \quad (8.39)$$

Относительное напряжение

$$\gamma = \frac{U_{13АД}}{U_{ФН}}. \quad (8.40)$$

При законе регулирования амплитуды напряжения пропорционально частоте $\frac{U}{f} = const$, относительное значение напряжения на статоре γ равно относительному значению частоты напряжения на статоре $\alpha = \gamma$.

Используя Т – образную схему замещения асинхронного двигателя, рассчитывают механическую и электромеханические характеристики, обеспечивающие работу двигателя в заданной точке.

Для расчета характеристик можно использовать основные соотношения для асинхронного двигателя при частотном управлении $M, I_1, I_2' = f(\alpha, \gamma)$,

полученные для Т – образной схемы замещения. В связи с тем, что $f_{13\text{АД}}$ и $U_{13\text{АД}}$ были определены приближенно ($r_1 \approx 0$), в процессе расчета приходится уточнять значения частоты и напряжения, чтобы механическая характеристика проходила через заданную точку.

Существенно облегчает расчет применение программы *harad* из каталогов вычислительного центра кафедры электропривода ЮУрГУ. Программа позволяет уточнить значения частоты и напряжения, так как учитывает активные сопротивления обмоток фаз статора r_1 . В результате расчета добиваются прохождения механической характеристики через заданную точку. Характеристики двигателя для скорректированных значений частоты и напряжения выводятся на дисплей и на печать в виде таблицы или графиков.

Для расчета используется Т – образная схема замещения асинхронного двигателя. Приведенные выражения получены путем решения комплексных уравнений, записанных для Т – образной схемы. (В программе «*harad*» эти уравнения решаются программой).

Относительная частота статора:

$$\alpha = \frac{f_1}{f_{1\text{H}}}.$$

Относительное напряжение:

$$\gamma = \frac{U_\Phi}{U_{\Phi\text{H}}}.$$

Абсолютное скольжение или относительная частота тока ротора

$$\alpha\text{S} = \frac{f_2}{f_{1\text{H}}} = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_{0\text{H}}};$$

$$b = r_1 \cdot (1 + \tau_2); c = x_\mu \cdot \tau; d = \frac{r_1}{x_\mu}; e = 1 + \tau_1.$$

Коэффициенты рассеяния

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \cdot \tau_2; \tau_1 = \frac{x_1}{x_\mu}; \tau_2 = \frac{x_2'}{x_\mu};$$

$$M = \frac{m_1 \cdot U_{\Phi\text{H}}^2}{\omega_{0\text{H}}} \cdot \gamma^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot r_{1\alpha} + (b^2 + c^2 \cdot \alpha^2) \cdot \frac{\alpha\text{S}}{r_2'} + (d^2 + e^2 \cdot \alpha^2) \cdot \frac{r_2'}{\alpha\text{S}}};$$

$$I_1 = U_{\Phi\text{H}} \cdot \gamma \cdot \sqrt{\frac{\frac{r_2'^2}{(\alpha\text{S})^2 \cdot x^2 \cdot \mu} + (1 + \tau_2)^2}{2 \cdot r_1 \cdot \frac{r_2' \cdot \alpha}{\alpha\text{S}} + (b^2 + c^2 \cdot \alpha^2) + (d^2 + e^2 \cdot \alpha^2) \cdot \frac{r_2'^2}{(\alpha\text{S})^2}}};$$

$$I'_2 = U_{\text{ФН}} \cdot \gamma \cdot \frac{1}{\sqrt{2 \cdot r_1 \cdot \frac{r'_2 \cdot \alpha}{\alpha s} + (b^2 + c^2 \cdot \alpha^2) + (d^2 + e^2 \cdot \alpha^2) \cdot \frac{r'^2_2}{(\alpha s)^2}}},$$

где m_1 – число фаз статора.

Пример 8.1 Расчет параметров схем включения, обеспечивающих работу двигателя в заданных точках

В примере 5.1 рассчитаны точки установившихся режимов работы M_C и ω_c при движении цепного транспортера с заготовкой и без заготовки на рабочей скорости.

В выбранной системе электропривода ПЧ–АД требуется определить частоту f_1 и напряжение на статоре U_1 , при которых механические характеристики будут проходить через точки установившихся режимов. Напряжение на статоре определяется законом $\frac{U_1}{f_1} = \text{const}$.

Кроме рабочих скоростей электропривод должен обеспечивать работу на пониженных скоростях. При разгоне электропривода нужно натянуть цепь и подойти к заготовке на пониженной скорости для исключения удара в кинематической цепи, и лишь после подхвата заготовки упорами разогнаться до рабочей скорости. Перед остановкой электропривода переход на пониженную скорость необходим для обеспечения точной остановки.

Механическая характеристика пониженной скорости проходят через заданную точку ($\omega_c \cong 0,2 \cdot \omega_{0H}, M_C$) и обеспечивается при пониженной частоте на выходе ПЧ. Значения пониженных скоростей могут быть скорректированы по условиям переходных процессов

Для использования в расчетах относительных единиц в таблицу 8.1 внесены базовые величины параметров двигателя (см. пример 5.1).

Таблица 8.1 – Базовые величины параметров двигателя

Базовая величина	Единица измерения	Значение
Синхронная скорость вращения ω_{0H}	рад/с	104,7
Номинальное фазное напряжение U_{1H}	В	220
Номинальная частота f_{1H}	Гц	50
Номинальный момент на валу M_H (или электромагнитный момент $M_{\text{ЭМН}}$)	Нм	115,4 (130,5)
Номинальный ток статора I_{1H}	А	29

При расчетах за базовый момент следует принимать электромагнитный номинальный момент

$$M_{\text{ЭМН}} = \frac{(3 \cdot U_{1H} \cdot I_{1H} \cdot \cos \varphi_H - 3 \cdot I_{1H}^2 \cdot r_1)}{\omega_{0H}} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220 \cdot 29 \cdot 0,76 - 3 \cdot 29^2 \cdot 0,35}{104,7} = 130,5 \text{ Нм},$$

но часто r_1 определяют приближенно, что влияет на точность расчетов:

Таблица 8.2 – Расчетные параметры для работы цепного транспортера в заданных точках

Расчетные параметры		Скорость при движении			
		с заготовкой		без заготовки	
		Пониженная 1	Рабочая 2	Рабочая 3	Пониженная 4
	Заданные точки				
$\omega_{зад}$	рад/с	21	83	–124,5	– 21
	о.е.	0,2	0,79	–1,19	– 0,2
$M_{ЗАД}$ на валу	Нм	96,1		–1,61	
	о.е	0,83		–0,014	
M_C	Нм	108,5		–14	
	о.е	0,94		– 0,12	
Расчетные данные					
$\omega_{0зад}$	о.е	0,285	0,875	–1,2	–0,21
	рад/с	28,8	91,57	–125,7	22
f_1	о.е	0,285	0,875	–1,2	–0,21
	Гц	14,25	43,75	–60	–10,5
U_1	о.е	0,285	0,875	1	–0,21
	В	62,7	192,5	220	46,2
$R_{1ДОБ}$	Ом	0	0	0	0

Номинальный момент на валу определяют по каталожным данным и его используют при построении графиков

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{11000 \cdot 9,55}{910} = 115,44 \text{ Нм}.$$

Заданные точки приведены в таблице 8.2 в абсолютных и относительных единицах.

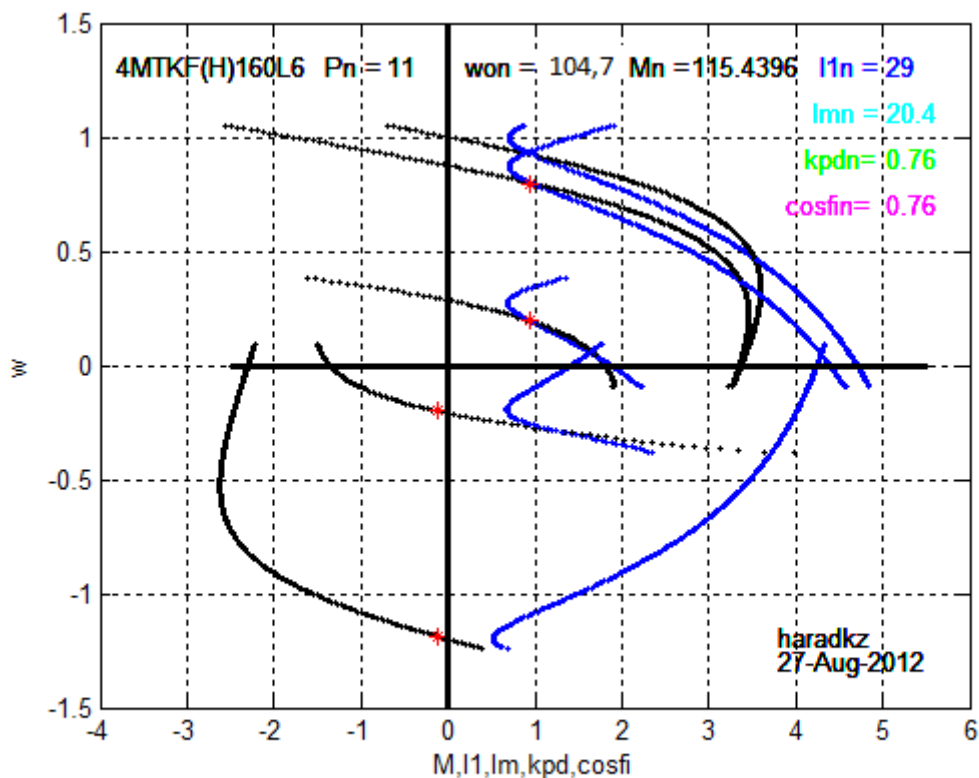


Рисунок 8.3 – Характеристики, проходящие через заданные точки

Для предварительного расчета частоты выполним параллельный перенос естественной механической характеристики в заданную точку 2 и получим расчетные параметры в точке 2

– синхронная скорость

$$\bar{\omega}_{0\text{зад}} = \bar{\omega}_{\text{зад}} + \Delta\bar{\omega}_{\text{ест}} = \bar{\omega}_{\text{зад}} + \bar{M}_{\text{Зад}} \cdot S_{\text{H}} = 0,79 + 0,94 \cdot 0,09 = 0,875;$$

$$\omega_{0\text{зад}} = \bar{\omega}_{0\text{зад}} \cdot \omega_{0\text{H}} = 0,875 \cdot 104,7 = 91,57;$$

– частота и напряжение на статоре при $\frac{U_1}{f_1} = \text{const}$

$$\alpha = \frac{f_1}{f_{1\text{H}}} = \omega_{0\text{зад}} = 0,875; f_1 = \alpha \cdot f_{1\text{H}} = 0,875 \cdot 50 = 43,75 \text{ Гц};$$

$$U_1 = \alpha \cdot U_{1\text{H}} = 0,875 \cdot 220 = 192,5 \text{ В}.$$

Аналогично определены расчетные параметры для других точек и приведены в таблице 8.2.

Полученные значения параметров схем включения позволяют рассчитать искусственные характеристики двигателя и проверить их прохождение через заданные точки.

Воспользуемся программой «haradkz.m». Вводя величины $f_{1\text{зад}}$ и $U_{1\text{Зад}}$ для каждой из характеристик, последовательно рассчитываем естествен-

ные и искусственные механические $\omega(M)$ и электромеханические $\omega(I_{1H})$ характеристики. Характеристики представлены на рисунке 8.3.

Как видно из построения, каждая из механических характеристик прошла через свою заданную точку.

9 РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

9.1 Общие положения

Расчёт переходных режимов необходим:

- для определения времени и характера их протекания;
- для оценки их соответствия требованиям технологического процесса рабочего органа;
- для оценки механических и электрических перегрузок;
- для правильного выбора мощности двигателей, преобразователей и аппаратуры управления.

Переходные процессы электропривода возникают при изменении управляющих и возмущающих воздействий. На характер переходного процесса оказывают существенное влияние механическая инерция электропривода, жесткость механической передачи, электромагнитная инерция обмоток двигателя и элементов преобразователя. Помимо этого, зачастую современные преобразователи снабжаются специальными устройствами, формирующими темп протекания переходных процессов, таковыми, например, являются задатчики интенсивности.

Поставленные задачи решаются при выполнении:

- расчетов механических и электромеханических переходных процессов момента $M(t)$, скорости $\omega(t)$, скорости идеального холостого хода $\omega_0(t)$ (пропорциональной задающему сигналу в относительных единицах), угла поворота вала двигателя $\alpha(t)$ за время цикла;
- проверки на заданную производительность электропривода;
- проверки на перегрузочную способность двигателя и преобразователя;
- расчета среднеквадратичного значения тока (момента) за цикл и проверки на нагрев двигателя, преобразователя и резисторов;
- расчетов энергетических показателей электропривода (механической работы, активной и реактивной энергии из сети за цикл, циклового КПД и $\cos\varphi$).

Расчёты переходных процессов, связанные с оценкой статических и динамических свойств электропривода, начинают с составления дифференциальных уравнений элементов системы электропривода.

9.2 Путь первый. Готовые аналитические решения

Если есть возможность использовать эти аналитические выражения для решения поставленных выше задач электропривода, то нужно идти этим легким путем.

В технической литературе приводятся аналитические выражения нагрузочных диаграмм, и требуемые расчеты можно получить при различных параметрах системы электропривода. Сложность заключается в том, что эти выражения оказываются достаточно сложными, и придется прибегать к составлению расчетных программ простого арифметического расчета. Но и для такого расчета потребуется определить начальные условия.

9.2.1 Механические переходные процессы электроприводов с прямолинейными механическими характеристиками и с идеально жесткими связями

Прямолинейные механические характеристики характерны для электродвигателей постоянного тока независимого и параллельного возбуждения и для асинхронных двигателей на участке механической характеристики с $M < 0,8 \cdot M_K$, где M_K – критический момент. При питании подобных двигателей от полупроводниковых преобразователей, когда переходные процессы формируются задатчиком интенсивности, при постоянном статическом моменте M_C , возможно построение нагрузочных диаграмм $\omega(t)$, $M(t)$, $\omega_0(t)$, $\alpha(t)$ по аналитическим выражениям [9]:

$$\omega_0(t) = \omega_{0\text{НАЧ}} + \varepsilon_0 \cdot t; \quad (9.1)$$

$$M(t) = M_C + J \cdot \varepsilon_0 + (M_{\text{НАЧ}} - M_C - J \cdot \varepsilon_0) \cdot e^{-\frac{1}{T_M}}; \quad (9.2)$$

$$\omega(t) = \omega_{\text{СНАЧ}} + \varepsilon_0 \cdot (t - T_M) + (\omega_{\text{НАЧ}} - \omega_{\text{СНАЧ}} + \varepsilon_0 \cdot T_M) \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}; \quad (9.3)$$

$$\alpha(t) = \alpha_{\text{НАЧ}} + t \cdot (\omega_{\text{СНАЧ}} - T_M) + \varepsilon_0 \frac{t^2}{2} + \frac{\omega_{\text{НАЧ}} + \varepsilon_0 T_M - \omega_{\text{СНАЧ}}}{T_M} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}}\right), \quad (9.4)$$

где $\omega_{0\text{НАЧ}}$ – скорость холостого хода при $t = 0$;

$\varepsilon_0 = \frac{\omega_{0\text{Н}}}{T_{\text{зи}}}$ – угловое ускорение скорости идеального холостого хода двигателя;

J – момент инерции электропривода;

$M_{\text{НАЧ}}$ – значение момента двигателя при $t = 0$;

β – жесткость механической характеристики электропривода;

$T_M = \frac{J}{\beta}$ – электромеханическая постоянная времени электропривода;

$\omega_{\text{снач}} = \omega_{\text{онач}} - \frac{M_{\text{с}}}{\beta}$ – скорость на характеристике $\omega_{\text{онач}}$, соответствующая статическому моменту $M_{\text{с}}$.

Переходный процесс обычно состоит из нескольких этапов, каждый этап соответствует своим значениям M и ε_0 . При использовании формул (9.1) – (9.4) каждый этап рассчитывают, полагая в начале этапа: $t = 0$, $\omega_0 = \omega_{\text{нач}}$, $M = M_{\text{нач}}$, $\omega = \omega_{\text{нач}}$.

Значения $\omega_{\text{онач}}$ и $M_{\text{нач}}$ определяются из расчёта предыдущего этапа.

При пуске электропривода с реактивным $M_{\text{с}}$ в условиях, когда $M_{\text{нач}} < M_{\text{с}}$ (например, при $\omega_{\text{онач}} = 0$ и $M_{\text{нач}} = 0$), двигатель остаётся неподвижным до тех пор, пока момент $M(t)$ не достигнет значения $M = M_{\text{с}}$. На этом этапе $\omega = 0$, момент изменяется по закону $M(t) = \varepsilon_0 \cdot \beta \cdot t$, время запаздывания

$$t_0 = \frac{M_{\text{с}}}{\varepsilon_0 \cdot \beta}.$$

При питании двигателя от цеховой сети (в схеме магнитного контроллера) начальные условия формулируются следующим образом: $\varepsilon_0 = 0$, $\omega_0(t) = \omega_{\text{он}} = \text{const}$.

Уравнения (9.2) – (9.4) принимают вид:

$$M(t) = M_{\text{с}} + (M_{\text{нач}} - M_{\text{с}}) \cdot e^{-\frac{t}{T_{\text{м}}}}; \quad (9.5)$$

$$\omega(t) = \omega_{\text{с}} + (\omega_{\text{нач}} - \omega_{\text{с}}) \cdot e^{-\frac{t}{T_{\text{м}}}}; \quad (9.6)$$

$$\alpha(t) = \alpha_{\text{нач}} + \left(\omega_{\text{с}} \cdot t + \frac{\omega_{\text{нач}} - \omega_{\text{с}}}{T_{\text{м}}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{м}}}} \right) \right). \quad (9.7)$$

Эти уравнения используются для расчёта переходных процессов пуска, наброса нагрузки, торможения, реверса.

9.2.2 Расчёт нагрузочных диаграмм при нелинейных механических характеристиках

Нелинейные механические характеристики характерны для двигателей постоянного тока последовательного или смешанного возбуждения и для асинхронных двигателей при работе их в зоне, близкой к критическому моменту. В этом случае расчет производится приближенными графическими или графоаналитическими методами [9].

Универсальным методом расчёта переходных режимов является метод кусочно-линейной аппроксимации. Он пригоден для электропривода, питающегося от сети и обладающего механической характеристикой любого вида. При этом пусковые и тормозные механические характеристики разбиваются на участки, позволяющие заменить их прямыми линиями. Каж-

дый участок характеризуется начальной скоростью $\omega_{\text{нач}i}$, начальным моментом $M_{\text{нач}i}$, конечной скоростью $\omega_{\text{кон}i}$ и конечным моментом $M_{\text{кон}i}$.

Электромеханическую постоянную времени электропривода на рассматриваемом участке механической характеристики рассчитывают по формуле

$$T_{Mi} = J_i \cdot \frac{\omega_{\text{кон}i} - \omega_{\text{нач}i}}{M_{\text{нач}i} - M_{\text{кон}i}}. \quad (9.8)$$

Время работы (разгона или торможения) электропривода на данном участке характеристики может быть рассчитано по формуле

$$\Delta t_i = T_{Mi} \cdot \ln \frac{M_{\text{нач}i} - M_{Ci}}{M_{\text{кон}i} - M_{Ci}}. \quad (9.9)$$

Время разгона электропривода от скорости $\omega_{\text{нач}i} = 0$ до скорости $\omega_{\text{кон}i}$ определяется суммированием времен работы на каждом из аппроксимированных участков характеристик:

$$t_i = \sum_{k=0}^i \Delta t_k. \quad (9.10)$$

Аналогично можно рассчитать время торможения от начальной скорости $\omega_{\text{нач}1}$ (скорости, при которой двигатель переключается на тормозной режим) до скорости в конце i -го участка торможения.

Для скоростей $\omega_{\text{нач}i}$ и $\omega_{\text{кон}i}$ – границ участков механических характеристик – по соответствующим электромеханическим характеристикам определяются значения тока в силовой цепи $I_{\text{нач}i}$ и $I_{\text{кон}i}$.

Таким образом, для каждого участка, на которые разбивается механические характеристики двигателя, определяются все величины, необходимые для построения нагрузочных диаграмм $\omega(t)$, $M(t)$, $I(t)$, $\alpha(t)$ переходных режимов электропривода.

Путь, проходимый электроприводом за время работы на рассматриваемом участке (угол поворота вала двигателя), может быть рассчитан по формуле

$$\Delta \alpha_i = \frac{\omega_{\text{нач}i} + \omega_{\text{кон}i}}{2} \cdot \Delta t_i. \quad (9.11)$$

Путь, проходимый электроприводом при пуске и торможении за время t_i (когда скорость изменяется от $\omega_{\text{нач}i}$ до $\omega_{\text{кон}i}$) определяется по соотношению

$$\alpha_i = \sum_{k=1}^i \Delta \alpha_k. \quad (9.12)$$

9.2.3 Электромеханический переходный процесс без учета упругости

Наличие индуктивностей обмоток двигателя вызывает появление дополнительной (по отношению к механическому переходному процессу) электромагнитной инерционности в системе электропривода, учёт данной составляющей заставляет анализировать изменение электромагнитной энергии в переходных процессах.

Электромеханический переходный процесс описывается (для жесткой механической системы) системой дифференциальных уравнений второго порядка. Нагрузочные диаграммы этого процесса могут быть рассчитаны по аналитическим выражениям или интегрированием этих дифференциальных уравнений с помощью ЭВМ.

При питании двигателя от цеховой сети, когда в переходных процессах в силовую цепь включаются добавочные резисторы, влияние электромагнитной инерции снижается. Необходимость учёта T_Σ возникает при расчёте переходных процессов, когда добавочные резисторы отсутствуют и двигатель работает на естественной характеристике.

Влияние электромагнитной инерции существенно проявляется при отношении $T_M/T_\Sigma < 2$ [9],

где $T_M = \frac{J}{\beta}$ – электромеханическая постоянная времени электропривода;

$T_\Sigma = \frac{L_\Sigma}{R_\Sigma}$ – электромагнитная постоянная времени силовой цепи.

Уравнения нагрузочных диаграмм в общем виде для $T_M/T_\Sigma < 4$ имеют вид

$$\begin{aligned}\omega(t) &= \omega_C + e^{-\alpha \cdot t} \times \\ &\times \left[(\omega_{\text{НАЧ}} - \omega_C) \cos \Omega_P t + \frac{(M_{\text{НАЧ}} - M_C) + J\alpha(\omega_{\text{НАЧ}} - \omega_C)}{J \cdot \Omega_P} \sin \Omega_P t \right]; \\ M(t) &= M_C + e^{-\alpha \cdot t} \left[(M_{\text{НАЧ}} - M_C) \cos \Omega_P t + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\beta(\omega_0 - \omega_{\text{НАЧ}}) - M_{\text{НАЧ}}(1 - \alpha T_\Sigma) - \alpha T_\Sigma \cdot M_C}{T_\Sigma \cdot \Omega_P} \sin \Omega_P t \right].\end{aligned}$$

С помощью приведенных уравнений можно рассчитать переходные процессы пуска, особенно переход на естественную характеристику, а также торможение.

Если переходный процесс начинается из установившегося режима, то уравнения значительно упрощаются (например, для наброса нагрузки).

При питании двигателя от преобразователя при линейном изменении напряжения (частоты) электромагнитная инерция создаёт задержку нарастания тока (момента) в начальный момент переходного процесса, когда электромагнитная энергия в силовой цепи запасается. Затем запасенная электромагнитная энергия начинает выделяться, вызывая более быстрое

нарастание тока, чем в механическом переходном процессе. При $T_M/T_\Sigma < 2$ возникает перерегулирование тока (момента), что приходится учитывать при проверке двигателя по перегрузочной способности.

Влияние электромагнитной инерции проявляется лишь в начале процесса, затем прекращаются колебания тока и момента, и влияние T_Σ на характер процесса уже не сказывается.

Нагрузочные диаграммы в общем виде при $T_M/T_\Sigma < 2$ для процесса с линейным изменением напряжения (частоты) для жесткой механической системы имеют вид

$$\omega(t) = \omega_{\text{СНАЧ}} + \xi_0 \cdot (t - T_M) + (\omega_{\text{НАЧ}} - \omega_{\text{СНАЧ}} + \xi_0 T_M) e^{-\alpha t} \times \\ \times \left[\cos \Omega_p t - \right. \\ \left. - \frac{M_{\text{НАЧ}} - M_C - \beta T_M \xi_0 + \beta T_M \alpha (\omega_{\text{НАЧ}} - \omega_{\text{СНАЧ}} + \xi_0 T_M)}{\beta T_M \cdot \Omega_p \cdot (\omega_{\text{СНАЧ}} + \xi_0 \cdot T_M - \omega_{\text{НАЧ}})} \sin \Omega_p t \right]; \quad (9.13)$$

$$M(t) = M_C + \beta T_M \xi_0 - (M_{\text{НАЧ}} - M_C - \beta T_M \xi_0) e^{-\alpha t} \times \\ \times \left[\cos \Omega_p t \right. \\ \left. - \frac{\beta (\omega_{0\text{НАЧ}} - \omega_{\text{НАЧ}}) - M_{\text{НАЧ}} + T_\Sigma \alpha (M_{\text{НАЧ}} - M_C - \beta T_M \xi_0)}{T_\Sigma \cdot \Omega_p \cdot (M_{\text{НАЧ}} - M_C - \beta T_M \xi_0)} \sin \Omega_p t \right]. \quad (9.14)$$

9.2.4 Электромеханический переходный процесс с учетом двухмассовой упругой системы

Расчет переходных процессов с учётом T_Σ для упругой системы затруднен. Для расчёта можно использовать специализированные программы, приведенные в [7]. В случае аналитического расчета необходимо подробнее рассматривать структурную схему механической части электропривода.

Механическая часть электропривода включает в себя движущиеся массы двигателя, передачи и рабочей машины. Структурные схемы механической части должны учитывать упругие связи и распределение моментов инерции между двигателем и рабочей машиной. Многомассовые упругие системы чаще всего сворачиваются в двухмассовые системы с присоединением малых маховых масс к звеньям механической части, обладающих большими маховыми массами, т.е. к ротору двигателя и рабочей машине \.

Дифференциальные уравнения, описывающие поведение двухмассовой упругой системы, без учёта диссипативных сил и зазоров в передаче, имеют вид [7]:

$$M - M_{12} - M_{C1} = J_1 \cdot \frac{d\omega_1}{dt};$$

$$\begin{aligned}
M_{12} - M_{C2} &= J_2 \cdot \frac{d\omega_2}{dt}; \\
M_{12} - M_{C2} &= J_2 \cdot \frac{d\omega_2}{dt}; \\
M_{12} &= c_{\text{пр}} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2).
\end{aligned} \tag{9.15}$$

Продифференцировав во времени последнее уравнение, перепишем систему дифференциальных уравнений. Положим, что

$$\begin{aligned}
M_{C1} &= \Delta M = \Delta M_{\text{ПЕР}} + M_X; \\
M_{C2} &= M_{\text{РС}}; \\
J_1 &= \delta J_{\text{ДВ}}; \\
J_2 &= J_{\text{ПР}}.
\end{aligned}$$

Оставим в левой части члены уравнений, содержащие производные

$$\begin{aligned}
\delta J_{\text{ДВ}} \cdot \frac{d\omega_1}{dt} &= M - M_{12} - \Delta M; \\
J_{\text{ПР}} \cdot \frac{d\omega_2}{dt} &= M_{12} - M_{\text{РС}}; \\
\frac{1}{c_{\text{ПР}}} \cdot \frac{dM_{12}}{dt} &= \omega_1 - \omega_2.
\end{aligned} \tag{9.16}$$

Принимаем в качестве базовых величин номинальные данные двигателя:

$$\begin{aligned}
\omega_6 &= \omega_{0\text{Н}}; \\
M_{\text{Б}} &= M_{\text{Н}}.
\end{aligned}$$

Получим систему дифференциальных уравнений в о.е.

$$\begin{aligned}
\delta J_{\text{ДВ}} \cdot \frac{\omega_{0\text{Н}}}{M_{\text{Н}}} \cdot \frac{d\bar{\omega}}{dt} &= \bar{M} - \bar{M}_{12} - \Delta \bar{M}; \\
\frac{1}{c_{\text{ПР}}} \cdot \frac{M_{\text{Н}}}{\omega_{0\text{Н}}} \cdot \frac{dM_{12}}{dt} &= \bar{\omega}_1 - \bar{\omega}_2; \\
J_{\text{ПР}} \cdot \frac{\omega_{0\text{Н}}}{M_{\text{Н}}} \cdot \frac{d\bar{\omega}_2}{dt} &= \bar{M}_{12} - \bar{M}_{\text{РС}}.
\end{aligned} \tag{9.17}$$

Коэффициенты при производных представляют собой постоянные времени:

двигателя

$$T_{\text{ДВ}} = \delta J_{\text{ДВ}} \cdot \frac{\omega_{0\text{Н}}}{M_{\text{Н}}}; \tag{9.18}$$

упругого звена

$$T_c = \frac{M_H}{C_{\text{ПР}} \cdot \omega_{0H}}; \quad (9.19)$$

рабочего органа

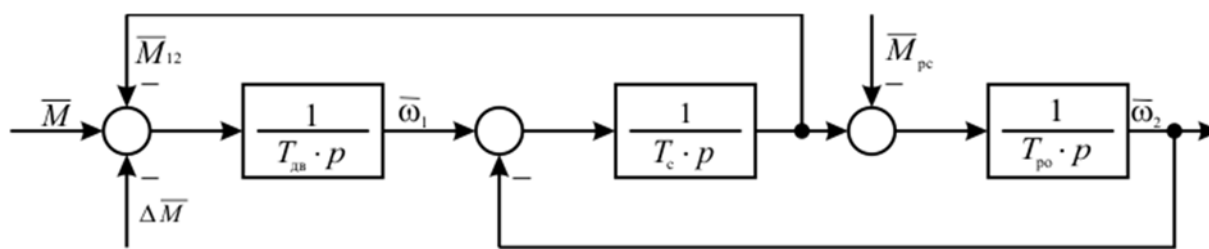
$$T_{\text{PO}} = J_{\text{PO}} \cdot \frac{\omega_{0H}}{M_H}. \quad (9.20)$$

Структурная схема двухмассовой упругой системы представлена на рисунке 9.1а. Главные инерционные массы, представленные интегрирующими звеньями с постоянными времени $T_{\text{ДВ}}$ и $T_{\text{РО}}$, разделены интегрирующим звеном с постоянной времени T_c .

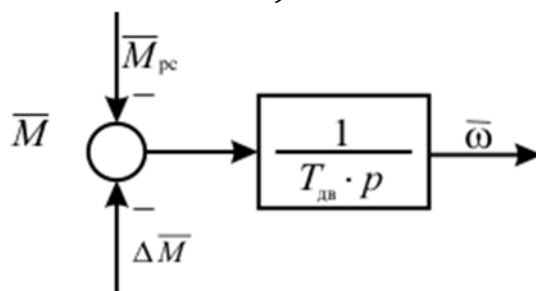
В идеально жесткой механической системе $T_c = 0$ и структурная схема механической части преобразуется в интегрирующее звено (см. рис. 9.1б) с механической постоянной времени

$$T_{\text{ДВ}} = (\delta J_{\text{ДВ}} + J_{\text{ПР}}) \cdot \frac{\omega_{0H}}{M_H} = T_{\text{ДВ}} + T_{\text{РО}}. \quad (9.21)$$

Учёт упругих связей в механической части электропривода приводит к разделению вращающихся инерционных масс двигателя и рабочей машины включением между ними упругого элемента. В результате переходный процесс упругой системы описывается системой дифференциальных уравнений третьего порядка (для двухмассовой упругой системы) и уравнением механической характеристики двигателя.



а)



б)

Рисунок 9.1 – Структурные схемы: а) двухмассовой упругой системы; б) идеально жёсткой механической системы

Переходный процесс в электроприводе с упругой связью может быть рассчитан по аналитическим выражениям [7].

Если принять момент двигателя $M = \text{const}$ и статический момент $M_{pc} = \text{const}$, а также не учитывать коэффициент затухания системы от действия диссипативных сил (типа вязкого трения), уравнения нагрузочных диаграмм при нулевых начальных условиях примут вид:

$$\omega_1(t) = \xi_{cp} \cdot t + \frac{J_{пр} \cdot \xi_{cp}}{\delta J_{дв} \cdot \Omega_{12}} \cdot \sin(\Omega_{12} \cdot t); \quad (9.22)$$

$$\omega_2(t) = \xi_{cp} \cdot t - \frac{\xi_{cp}}{\Omega_{12}} \cdot \sin(\Omega_{12} \cdot t); \quad (9.23)$$

$$M_{12}(t) = J_{пр} \cdot \xi_{cp} \cdot (1 - \cos(\Omega_{12}t)) + M_{pc}. \quad (9.24)$$

В этих формулах

$$\xi_{cp} = \frac{M - \Delta M - M_{pc}}{\delta J_{дв} + J_{пр}}; \quad (9.25)$$

$$\Omega_{12} = \sqrt{\frac{c_{12} \cdot (\delta J_{дв} + J_{пр})}{\delta J_{дв} \cdot J_{пр}}}. \quad (9.26)$$

За счёт колебаний упругого момента M_{12} максимальная нагрузка передач увеличивается и может существенно превысить среднюю нагрузку, соответствующую жесткому приведенному звену

$$M_{12cp} = J_{пр} \cdot \xi_{cp} + M_{pc}.$$

Это превышение нагрузки оценивается динамическим коэффициентом

$$k_d = \frac{M_{12max}}{M_{12cp}} = \frac{2 \cdot J_{пр} \cdot \xi_{cp} + M_{cp}}{J_{пр} \cdot \xi_{cp} + M_{cp}}. \quad (9.27)$$

Динамический коэффициент k_d является важной характеристикой условий работы механического оборудования и одним из основных показателей динамических качеств системы электропривода.

Естественное демпфирование колебаний механической части электропривода, создаваемое диссипативными силами (типа сил вязкого трения), весьма невелико и максимум динамической нагрузки снижается при наибольшем коэффициенте затухания всего на 15 % [9]. Это позволяет не учитывать его влияние при расчёте максимальных динамических нагрузок в переходных процессах.

Значительно увеличивают динамический коэффициент k_d и зазоры в передаче. Однако на стадии проектирования электропривода их величины не известны, поэтому в данном пособии их влияние на переходные процессы не рассматриваются.

В реальном переходном процессе момент двигателя изменяется во времени $M(t)$ и описывается уравнениями электромеханического преобразования энергии. В уравнении (9.24) появится $M = M(t)$, ускорение $\xi_{\text{ср}}$ в уравнениях (9.25) – (9.27) также будет переменной величиной, расчёт переходного процесса приходится выполнять совместным решением уравнений двухмассовой системы и электромеханического преобразования энергии. Такой расчёт выполняется на ЭВМ. Программы расчётов позволяют рассчитать такие переходные процессы.

Динамический коэффициент k_d можно рассчитать при сравнении переходных процессов, построенных для жесткой приведенной системы при $T_c = 0$ и для двухмассовой упругой системы с конечным значением жесткости $T_c \neq 0$.

В результате расчёта определяют влияние упругих связей на время переходного процесса, на нагрев двигателя, на величину дополнительной нагрузки механической части, на величины ускорений и точность выполнения технологических требований рабочей машины.

9.2.5 Среднеквадратичное значение тока (момента)

Для проверки по нагреву двигателя, пусковых и тормозных резисторов одновременно с расчётом нагрузочных диаграмм целесообразно определить величину, характеризующую нагрев за время t_i ,

$$\int_0^{t_i} I^2 dt \cong \sum_{i=1}^k I_{\text{CK}i}^2 \cdot \Delta t_i. \quad (9.28)$$

где $I_{\text{CK}k}$ – среднеквадратичный ток на участке интегрирования за время Δt_k .

Если кривая $I(t)$ имеет в пределах интервала Δt_i аналитическое выражение, можно определить среднеквадратичный ток $I_{\text{CK}i}$ на участке по формулам:

– при линейной зависимости $I(t)$

$$I_{\text{CK}i} = \sqrt{\frac{1}{3} (I_{\text{НАЧ}i}^2 + I_{\text{НАЧ}i} \cdot I_{\text{КОН}i} + I_{\text{КОН}i}^2)}; \quad (9.29)$$

– при экспоненциальной зависимости $I(t)$

$$I_{\text{CK}i} = \sqrt{I_y^2 - \frac{T_M}{\Delta t_i} (I_{\text{КОН}i} - I_{\text{НАЧ}i}) \cdot \left(\frac{I_{\text{КОН}i} + I_{\text{НАЧ}i}}{2} + I_y \right)}; \quad (9.30)$$

где I_y – установившееся значение, к которому стремится экспонента $I(t)$, T_M – электромеханическая постоянная времени электропривода.

9.3 Путь второй. Частотный анализ

Готовые решения часто не позволяют выполнить **анализ влияния различных параметров** электропривода на конечный результат, приводить результаты расчета к выполнению реальных задач проектирования, в конечном итоге к доступному пониманию переходных процессов в электроприводе. Для изучения работы систем широко используется **частотный анализ** с помощью логарифмических частотных характеристик. Используются особая форма записи дифференциальных уравнений – структурные схемы электропривода. Анализ работы электропривода выполняется с помощью ЛАЧХ, обеспечивается исследование только **качества** переходных процессов.

Структурная схема электропривода включает в себя структурные схемы составных частей: механической части, электромеханического преобразователя энергии, электрического преобразователя и задающего устройства.

9.3.1 Механическая часть электропривода

Механическая часть электропривода включает в себя движущиеся массы двигателя, передачи и рабочей машины и одинакова для различных систем электропривода.

Переходный процесс в механической части электропривода с идеально жесткими связями сводится к решению дифференциального уравнения движения (при постоянном моменте инерции $J = \delta J_{\text{ДВ}} + J_{\text{ПР}}$ и угла поворота):

$$M = M_{\text{C}} + J \cdot \frac{d\omega}{dt}; \quad \frac{d\alpha}{dt} = \omega \quad (9.31)$$

Уравнения движения и угла поворота (пути) в о.е.

$$J \cdot \frac{\omega_{0\text{H}}}{M_{\text{H}}} \cdot \frac{d\bar{\omega}}{dt} = \bar{M} - \bar{M}_{\text{C}};$$

$$T_{\text{Д}} = J \cdot \frac{\omega_{0\text{H}}}{M_{\text{H}}};$$

$$T_{\alpha} = \frac{d\bar{\alpha}}{dt} = \bar{\omega};$$

$$T_{\alpha} = \frac{\alpha_{\text{Б}}}{\omega_{0\text{H}}} = \frac{L_{\text{Б}}}{v_{\text{Б}}},$$

где $T_{\text{Д}}$ – механическая постоянная времени электропривода, с;

T_{α} – постоянная времени угла поворота, численно равная времени отработки базового угла поворота α_{Σ} (заданного пути $L_{\text{Б}}$) с базовой угловой скоростью $\omega_{0\text{H}}$ (линейной скоростью $v_{\text{Б}}$), с.

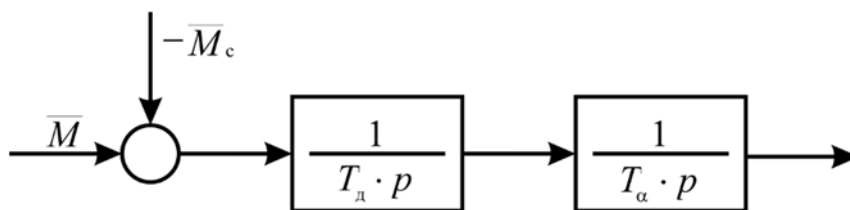


Рисунок 9.2 – Структурная схема механической части электропривода с идеально жесткими связями

Записав уравнения (9.31) в операторной форме, получим возможность построить на рисунке 9.2 структурную схему механической части электропривода с идеально жесткими связями.

При необходимости учета упругих связей (например, упругости канатов в механизмах подъема, в лифтах, тяговых органов конвейеров и т.п.) дифференциальные уравнения, описывающие поведение двухмассовой упругой системы, приведены в п. 9.2.4.

Если двигатель получает питание от цеховой сети и управление осуществляется релейно-контакторной системой, процессы пуска и торможения обеспечиваются введением в силовую цепь двигателя добавочных сопротивлений. Изменение сопротивлений в цепи двигателя обычно выполняется с помощью электромагнитных контакторов, включение и отключение которых производят автоматически реле тока, времени, скорости, настроенные на требуемые значения координат электропривода, или вручную оператором.

Электрическое преобразование при реостатном регулировании находит полное отражение в дифференциальных и алгебраических уравнениях двигателей, коэффициенты и постоянные времени: $K_{яц}$, $T_{яц}$, $T_{э}$, S_K которых зависят от величины сопротивления силовой цепи двигателя.

В переходных процессах пуска и торможения, когда двигатель при переключении сопротивлений переходит с одной характеристики на другую, работа на этих характеристиках описывается параметрами ($K_{яц}$ и $T_{я}$ или S_H и $T_{э}$), отличающимися друг от друга на различных характеристиках.

9.3.2 Структурная схема электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения

Структурная схема электропривода при питании двигателя независимого возбуждения от цеховой сети представлена на рисунок 9.3 и включает в себя структурную схему механической части электропривода и структурную схему электромеханического преобразования, в которой изменяются параметры $T_{я}$, $K_{я}$ структурной схемы при реостатном регулировании.

Дифференциальные и алгебраические уравнения двигателя постоянного тока независимого возбуждения (ДНВ) учитывают электромагнитную

инерцию якоря и обмотки возбуждения и падение напряжения на сопротивлениях машины:

$$\begin{aligned}
 U &= E + I \cdot r_{яц} + L_{яц} \frac{dI}{dt}; \\
 u_B &= i_B \cdot r_B + w_B \frac{d\Phi}{dt}; \\
 E &= k\Phi \cdot \omega; \quad M = k\Phi \cdot I; \\
 U &= k\Phi \cdot \omega_0;
 \end{aligned}
 \tag{9.32}$$

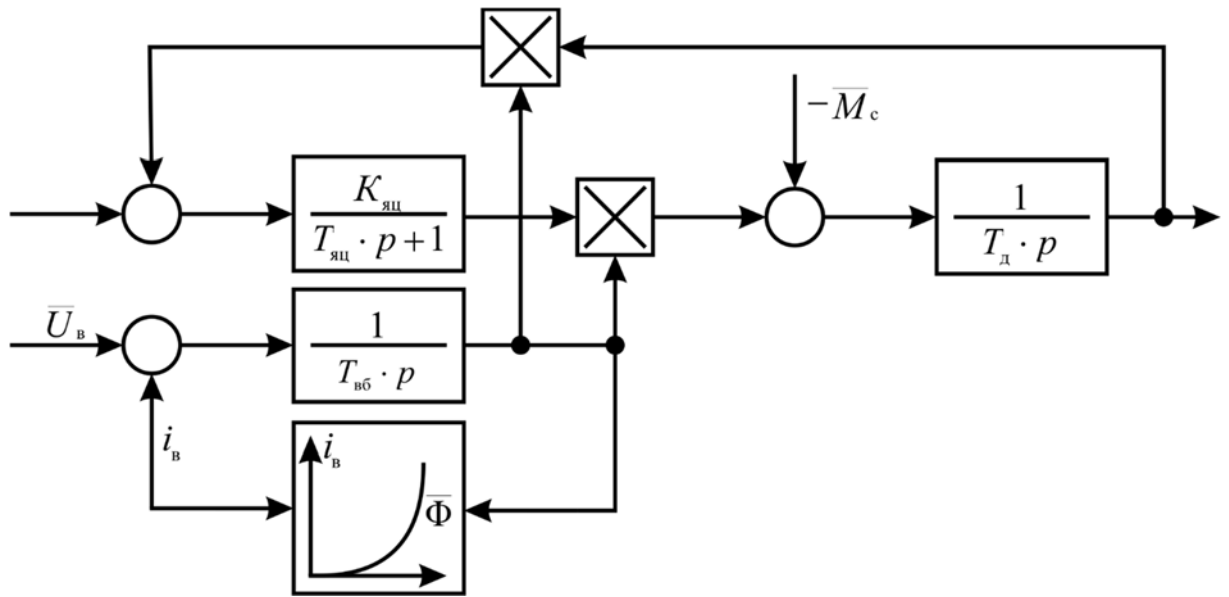


Рисунок 9.3 – Структурная схема ДНВ

Принимая в качестве базовых величин номинальные данные двигателя, получим уравнения в относительных единицах (9.33). Коэффициенты при производных представляют собой постоянные времени, коэффициент $K_{яц}$ – кратность тока короткого замыкания.

$$\begin{aligned}
 \frac{L_{яц}}{r_{яц}} \cdot \frac{d\bar{I}}{dt} &= \bar{\Phi} \cdot K_{яц} (\bar{\omega}_0 - \bar{\omega}) - \bar{I}; \\
 \frac{w_B \cdot \Phi_H}{r_B \cdot i_B} \cdot \frac{d\bar{\Phi}}{dt} &= \bar{u}_B - \bar{i}_B; \\
 T_B &= \frac{w_B \cdot \Phi_H}{r_B \cdot i_B}; \\
 T_{яц} &= \frac{L_{яц}}{r_{яц}}; \\
 K_{яц} &= \frac{U_H}{r_{яц} \cdot I_H}.
 \end{aligned}
 \tag{9.33}$$

В структурной схеме используется режим ослабления поля при работе двигателя независимого возбуждения

$$\bar{\Phi} = f(\bar{u}_B).$$

Как видно из структурной схемы, изменение потока вносит существенную нелинейность в виде блоков произведения в математическое описание процессов в цепи якоря, так как

$$\bar{M} = \bar{\Phi} \cdot \bar{I}; \bar{E} = \bar{\Phi} \cdot \bar{\omega}.$$

Если режим ослабления поля отсутствует, то в схеме отсутствует контур возбуждения, поток $\Phi = \Phi_H$ и исчезают блоки произведения, в результате:

$$\bar{M} = \bar{I}; \bar{E} = \bar{\omega}_1.$$

На входе структурной схемы на рисунке 9.3 $\bar{U} = \bar{\omega}_0$.

9.3.3 Структурная схема асинхронного двигателя

Структурная схема для рабочего участка механической характеристики асинхронного двигателя при работе от цеховой сети (см. рисунок 9.4) также включает в себя структурные схемы механической части и электромеханического преобразования энергии. Параметры β и T_Σ рассчитываются для каждой характеристики.

Математическое описание асинхронного двигателя при наличии шести обмоток на статоре и роторе с учётом их взаимного расположения, множества связей между ними, блоков произведения и нелинейностей достаточно сложно. В практике электропривода находят применение методы, в которых математическое описание упрощается за счёт различных допущений. Представление двигателя в виде двухфазной обобщенной машины [7] позволяет несколько упростить математическое описание и структурную схему асинхронного двигателя.

Для рассмотрения переходных процессов на рабочем участке механической характеристики возможно применение более простого соотношения между моментом и скоростью двигателя [7] – формулы Пинчука И.С.

$$\begin{aligned} T_\Sigma \cdot \frac{dM}{dt} + M &= \frac{2 \cdot M_K}{s_K} \cdot \frac{(\omega_0 - \omega)}{\omega_0} = \beta \cdot (\omega_0 - \omega); \\ T_\Sigma &\approx \frac{1}{p_n \cdot \omega_{0H} \cdot s_K}; \\ s_K &= \pm \frac{r'_2}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x'_2)^2}}, \end{aligned} \quad (9.34)$$

где T_Σ – электромагнитная постоянная времени, s_K – критическое скольжение.

Значение жесткости β для линеаризованной характеристики, проходящей через номинальную точку (M_H, ω_H), определяется по формуле

$$\beta = \frac{M_H}{\omega_{0H} - \omega_H};$$

$$\bar{\beta} = \frac{1}{S_H}.$$

Выражение (9.34) справедливо и в относительных единицах

$$(1 + T_{\Sigma} \cdot p) \cdot \bar{M} = \frac{1}{S_H} (\bar{\omega}_0 - \bar{\omega}); \quad (9.35)$$

Структурная схема для рабочего участка механической характеристики приведена на рисунке 9.4.

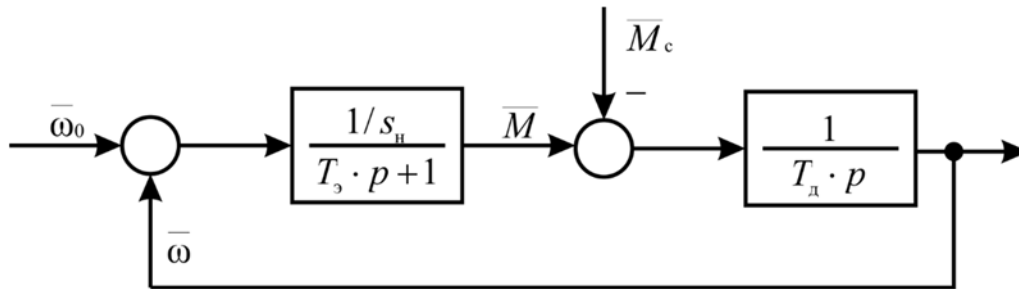


Рисунок 9.4 – Структурная схема АД для рабочего участка механической характеристики

9.3.4 Структурная схема системы ТП–Д

При пуске электроприводов по системе ТП–Д, производится изменение (увеличение) управляющего воздействия, обуславливающее соответствующее изменение напряжения на якорной обмотке двигателя постоянного тока.

Структурная схема системы ТП–Д приведена на рисунке 9.5. Использование относительных единиц позволило принять $K_{ТП} = 1$ и управляющее воздействие выразить через $\bar{\omega}_0 = \bar{E}_d = \bar{U}_y$.

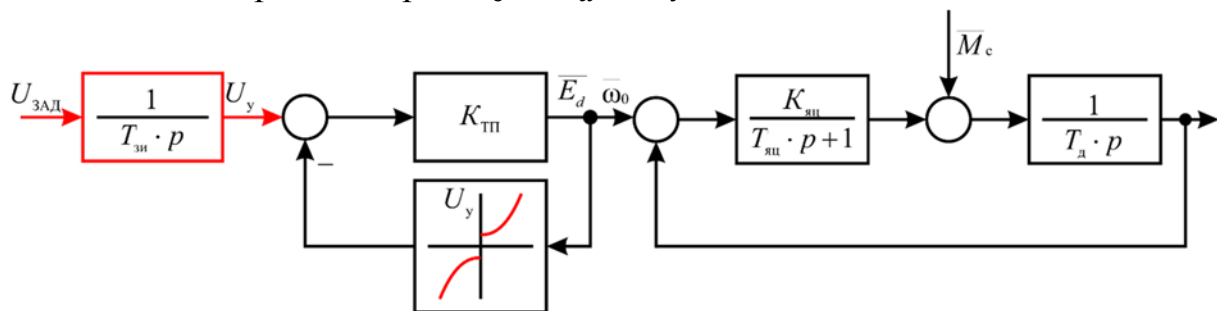


Рисунок 9.5 – Структурная схема ТП–Д при номинальном потоке

При торможении таких электроприводов управляющее воздействие снижается, при этом происходит снижение напряжения. Управляющим воздействием в электроприводах по системе УП – Д является задающее напряжение. При изменении знака (полярности) задающего напряжения

изменяется полярность напряжения на якорной обмотке или порядок следования фаз напряжения на статорной обмотке, вызывая реверсирование двигателя.

Уравнение преобразователя для линейного участка регулировочной характеристики $E_d = K_{ТП} \cdot U_y$.

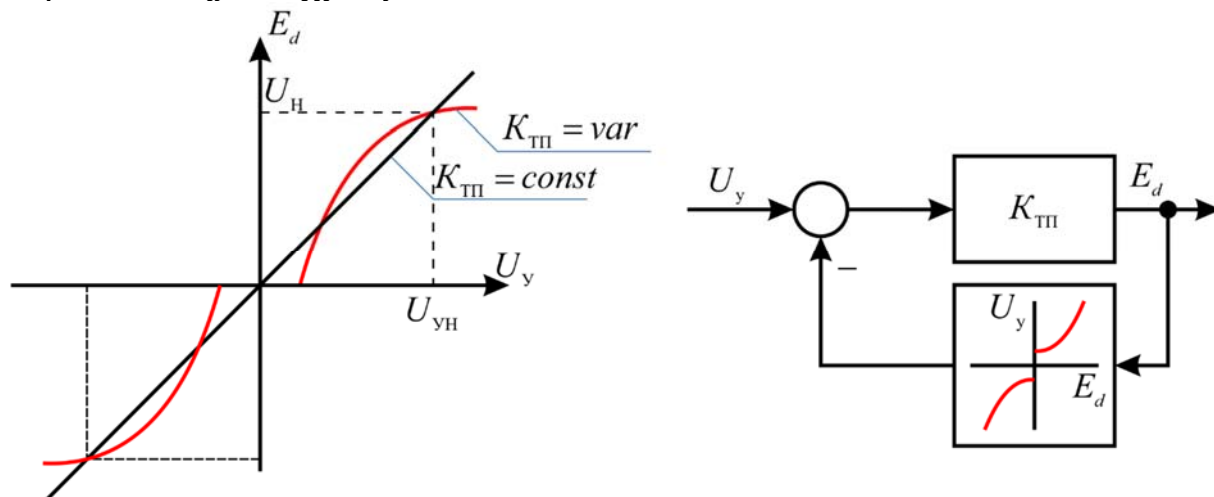


Рисунок 9.6 – Регулировочная характеристика и структурная схема тиристорного преобразователя

На рисунке 9.6 приведена регулировочная характеристика и структурная схема ТП. При необходимости учета нелинейности характеристики при более точных расчетах преобразователь следует охватить нелинейной обратной связью (см. рисунок 9.5).

Силовая часть тиристорного преобразователя системы ТП–Д относительно мгновенных значений входной и выходной координат представляет собой нелинейную импульсную систему, которая в полосе пропускания частот, ограниченной практически частотой сети, может рассматриваться как безынерционное звено с косинусоидальной зависимостью средней ЭДС E_d от угла открывания α . Фазовые сдвиги угла α относительно напряжения управления U_y вносятся системой импульсно-фазового управления. С целью упрощения расчётов на стадии выбора и расчёта элементов силовой части электропривода появляется возможность не учитывать инерционность ТП и представлять ТП безынерционным звеном с коэффициентом усиления $K_{ТП}$. Учёт падения напряжения в элементах преобразователя при изменении нагрузки учитывается изменением параметров $K_{яЦ}$ и $T_{я}$.

9.3.5 Структурная схема системы ПЧ–АД

Структурная схема системы ПЧ – АД в общем виде сложна. Если допустить определённые ограничения ($\beta = \text{const}$, $M_K = \text{const}$ и др.), то для настройки систем управления можно составить структурную схему для рабочего участка механической характеристики (см. рисунок 9.7). Однако

при таких допущениях возникают погрешности в расчётах электромеханического преобразования энергии. Отсутствуют способы расчета токов в цепях двигателя. Существенно искажаются показатели нагрева, так как для расчета приходится использовать метод эквивалентного момента, также искажаются энергетические показатели системы электропривода. Поэтому сложность структурной схемы ПЧ – АД зависит от задач, которые с её помощью нужно решать.

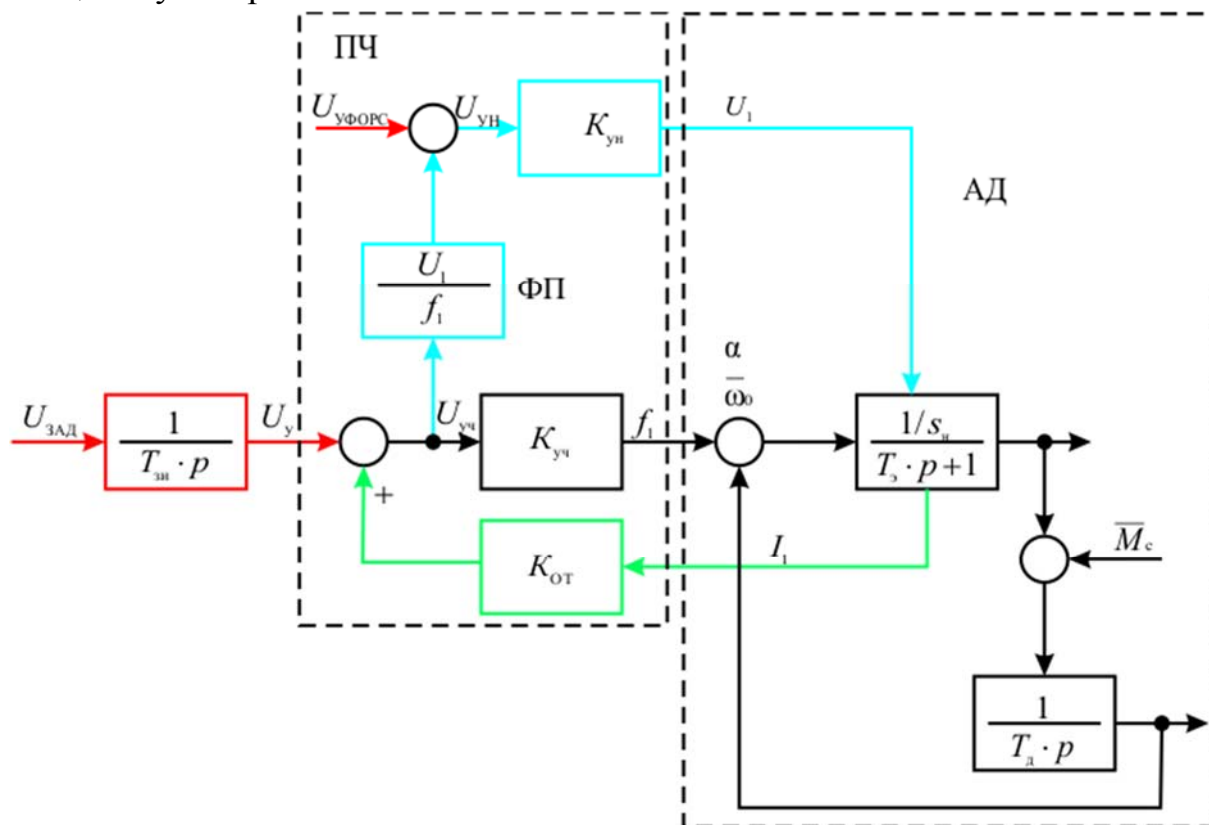


Рисунок 9.7 – Структурная схема ПЧ–АД

В схеме ПЧ в контуре протекания токов включено большее число элементов (тиристоров, дросселей и т.п.), электрические данные которых на стадии проектирования неизвестны. Внутренние обратные связи в преобразователе обеспечивают поддержание заданного напряжения на выходе при изменении нагрузки. В этих условиях появляется возможность не учитывать падение напряжения внутри преобразователя (считать его внутреннее сопротивление равным нулю).

Уравнение преобразователя частоты для линейного участка регулировочной характеристики с выходом по частоте $f_1 = K_{ПЧ} \cdot U_{уч}$.

Выходное напряжение ПЧ U_1 обеспечивается функциональным преобразователем ФП (см. рисунок 9.7) в функции напряжения управления по частоте $U_{уч}$. Настройкой преобразователя можно обеспечивать желаемый закон управления по напряжению. Традиционный закон управления напряжением

$$\frac{U_1}{f_1} = \text{const} = \frac{U_{1H}}{f_{1H}}$$

можно скорректировать введением форсировки напряжения $U_{1\text{ФОРС}}$ на малых частотах и другими способами в режиме микропроцессорного управления.

Таким образом, тиристорный преобразователь электрической энергии является безынерционным звеном с коэффициентами усиления по частоте и по напряжению. На рисунке 9.8 приведены регулировочная характеристика преобразователя частоты и структурная схема ПЧ.

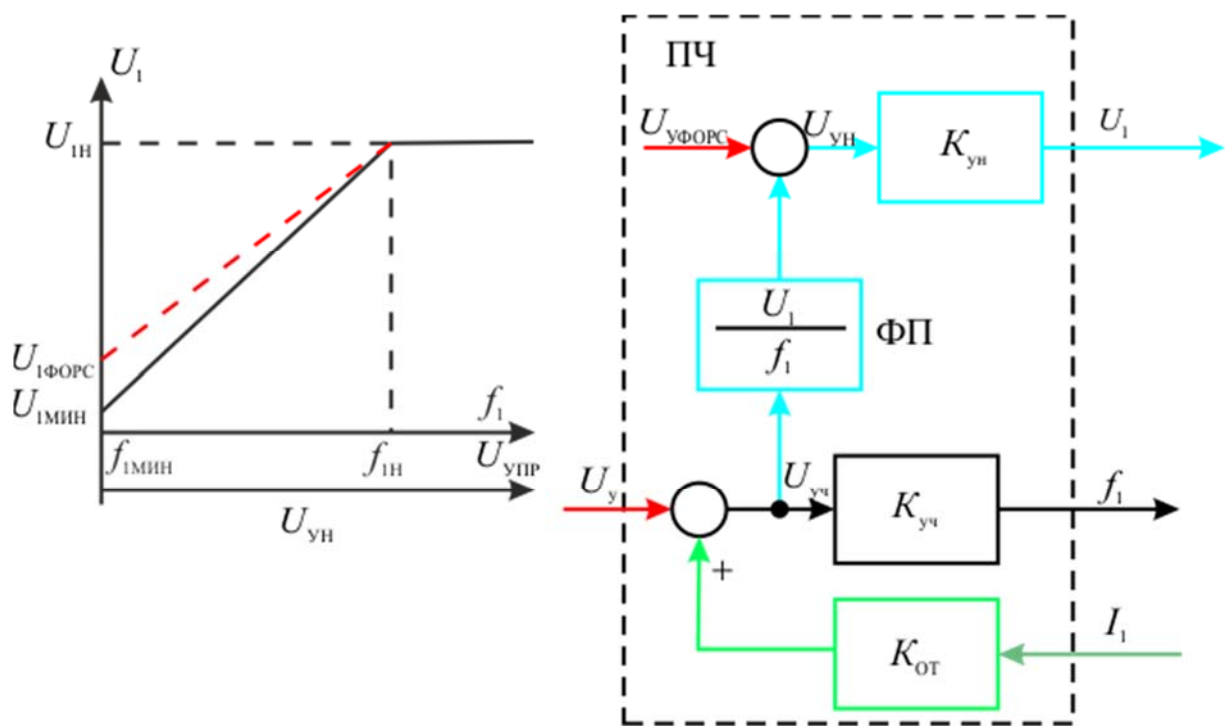


Рисунок 9.8 – Регулировочная характеристика и структурная схема преобразователя частоты

В настоящее время практически все преобразователи укомплектованы **задатчиками интенсивности** с различными законами изменения управляющего напряжения. Для формирования линейного закона изменения напряжения управления на вход преобразователя подключают интегральный задатчик интенсивности ЗИ, выходное напряжение которого при подаче на его вход скачка задающего напряжения $U_{\text{ЗД}}$ изменяется по линейному закону.

Законы изменения напряжения управления $U_y(t)$ для участка ускорения

$$U_y(t) = U_{\text{УНАЧ}} + \frac{U_{\text{УН}}}{T_{\text{ЗИ}}} \cdot t.$$

Темп нарастания скорости определяется величиной базовой постоянной времени ЗИ $T_{\text{ЗИ}}$ (см. рисунок 9.9), численно равной времени достижения

выходного напряжения преобразователя от нуля до базового значения U_H (от нуля до базового значения скорости идеального холостого хода ω_{0H}).

Выходное напряжение ЗИ, таким образом, является управляющим напряжением U_y , которое в о.е. равно напряжению и скорости идеального холостого хода

$$\bar{U}_y = \bar{E}_d = \bar{\omega}_0.$$

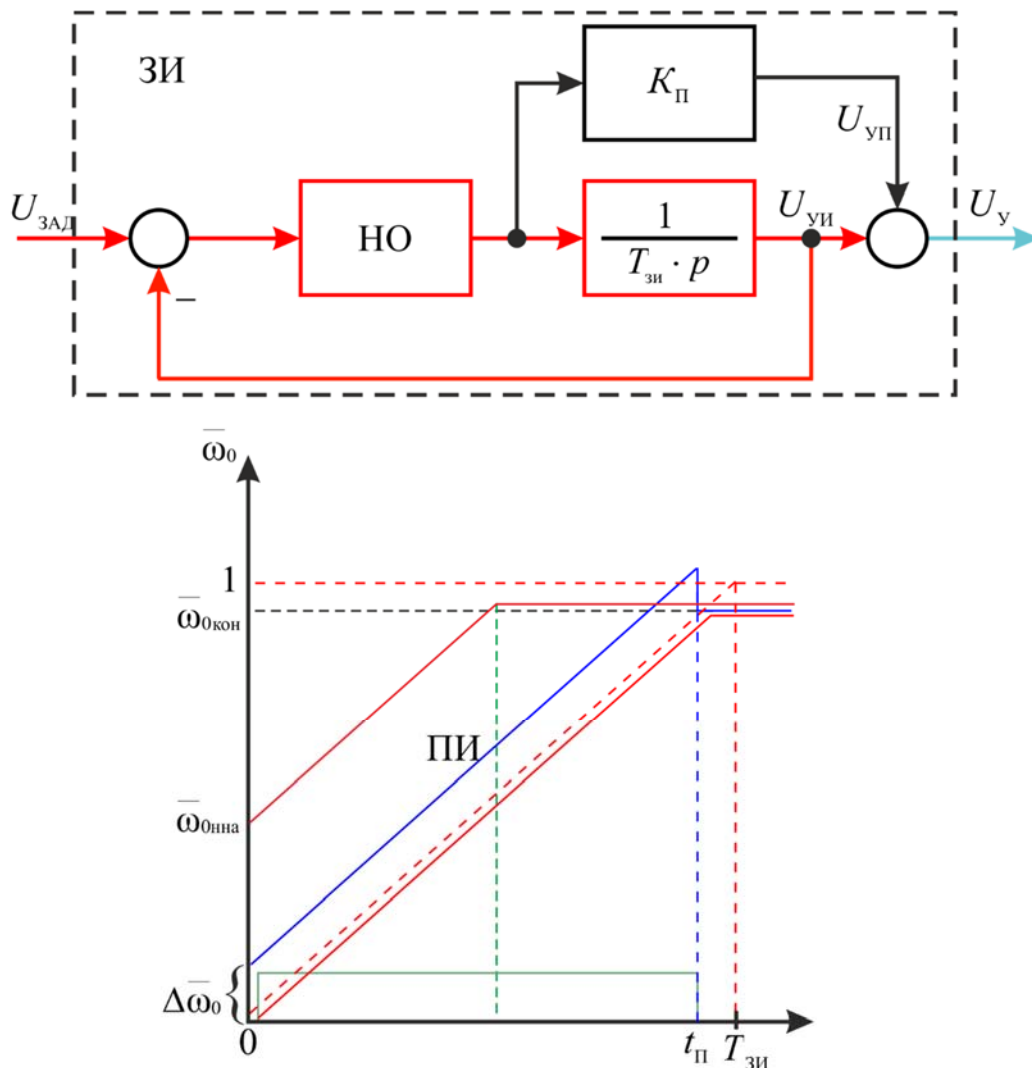


Рисунок 9.9 – Структурная схема и выходное напряжение ЗИ

Величина $U_{ЗАД}$ определяет установившуюся скорость ω двигателя. При достижении величины $U_{ЗАД}$ нарастание напряжения на выходе ЗИ прекращается.

Задатчик интенсивности как объект управления может быть представлен интегрирующим звеном с постоянной времени $T_{ЗИ}$, отдавая себе отчет в том, что структурная схема на рисунке 9.8 позволит рассматривать лишь

процессы линейного изменения U_y до момента времени t_n перехода на участок постоянного напряжения.

Кроме интегральных ЗИ иногда применяют пропорционально-интегральные ПИ задатчики, в которых совместно с интегральным И каналом работает пропорциональный П канал (см. рисунок 9.9).

9.4 Путь третий. Интегрирование уравнений

При современном состоянии вычислительной техники и разработанных численных методах – непосредственное решение системы дифференциальных уравнений с подстановкой необходимых параметров. Остается научиться составлять программы расчета переходных процессов для решения конкретных задач исследования.

Используя дифференциальные и алгебраические уравнения элементов систем электропривода, приведенные в разделе 9.3, и какой – либо из численных методов решения дифференциальных уравнений, составляется программа расчета. В этой программе должны быть решены вопросы, сформулированные в п. 9.1.

Однако в начале расчета придется определить начальные условия, вытекающие из требований к электроприводу.

10 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СХЕМ ПУСКА И ТОРМОЖЕНИЯ

10.1 Общие положения

В зависимости от требований, предъявляемых к электроприводу, различают режимы пуска:

- форсированный, при котором время пуска минимально, а максимальный момент двигателя при пуске принимают равным максимально допустимому $M_{\text{МАКС.ДОП}}$ (для двигателей постоянного тока – предельно допустимому по условиям коммутации, для асинхронных двигателей – критическому моменту с учетом допустимого снижения напряжения питающей сети – $0,8 \cdot M_K$);

- обеспечивающий заданное допустимое ускорение $a_{\text{доп}}$ при пуске, при котором ограничивается динамический момент двигателя;

- нормальный, при котором время пуска не ограничивается, а величина момента двигателя на всех этапах пуска не должна быть ниже момента сопротивления движения – $M_2 \geq 1,2 \cdot M_C$. Ускорение электропривода не должно превышать допустимых значений.

Из рассмотренных режимов будем использовать режим пуска с ограничением ускорения электропривода, так как два других режима являются граничными.

При питании двигателя от цеховой сети обычно применяют реостатные схемы пуска и торможения с постепенным выводом ступеней сопротивлений из работы. В системах электропривода с питанием двигателя от преобразователя (ТП–Д, ПЧ–АД и др.) пусковые режимы обеспечиваются системой управления путем формирования выходного напряжения (тока) преобразователя.

10.2 Система преобразователь – двигатель

При питании двигателя от индивидуального преобразователя появляется возможность плавного регулирования напряжения (частоты), поэтому переходные процессы пуска и торможения обеспечиваются формированием напряжения управления преобразователем. В разомкнутой системе преобразователь – двигатель чаще всего применяют линейное нарастание напряжения управления, что определяет линейное нарастание напряжения (частоты) питания двигателя. В этом случае величина динамического момента двигателя определяется темпом нарастания напряжения, и, в конечном итоге, производной скорости идеального холостого хода двигателя во времени $\frac{d\omega_0}{dt}$.

В установившемся режиме нарастания скорости двигателя, когда затухают свободные составляющие переходного процесса

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{d\omega_0}{dt} = \varepsilon_0 = \text{const},$$

а величина установившегося значения динамического момента двигателя

$$M_{\text{дин}} = J \cdot \varepsilon_0 \quad (10.1)$$

Для формирования линейного закона изменения напряжения управления на вход преобразователя подключают интегральный задатчик интенсивности ЗИ, выходное напряжение которого при подаче на его вход скачка задающего напряжения $U_{\text{ЗАД}}$ изменяется по линейному закону. При достижении величины $U_{\text{ЗАД}}$ нарастание напряжения на выходе ЗИ прекращается. Выходное напряжение ЗИ, таким образом, является управляющим напряжением преобразователя, а величина $U_{\text{ЗАД}}$ определяет установившуюся величину скорости ω_0 двигателя. Темп нарастания скорости определяется величиной базовой постоянной времени ЗИ $T_{\text{ЗИ}}$, численно равной времени достижения выходного напряжения преобразователя от нуля до базового значения $U_{\text{Н}}$ (от нуля до базового значения скорости идеального холостого хода $\omega_{0\text{Н}}$).

Таким образом, базовая постоянная задатчика интенсивности определяется по формуле

$$T_{\text{ЗИ}} = \frac{\omega_{0\text{Н}}}{\varepsilon_0} = \frac{J \cdot \omega_{0\text{Н}}}{J \cdot \varepsilon_0} = \frac{J \cdot \omega_{0\text{Н}}}{M_{\text{дин}}} \cdot \frac{M_{\text{Н}}}{M_{\text{Н}}} = \frac{J \cdot \omega_{0\text{Н}}}{M_{\text{Н}}} \cdot \frac{M_{\text{Н}}}{M_{\text{дин}}} = \frac{T_{\text{Д}}}{\bar{M}_{\text{дин}}}; \quad (10.2)$$

$$T_{\text{д}} = J \cdot \frac{\omega_{0\text{н}}}{M_{\text{н}}}, \quad (10.3)$$

где $T_{\text{д}}$ – механическая постоянная времени, с;

$M_{\text{дин}}$ – относительное значение динамического момента двигателя.

Динамические моменты, ограничивающие ускорение допустимыми значениями, рассчитаны ранее и приведены в табл.5.1, а значения механической постоянной времени двигателя $T_{\text{д}}$ рассчитываются по формуле (10.3).

Из полученных соотношений видно, что при различных моментах инерции J величина $T_{\text{зи}} = \text{const}$, а динамические моменты изменяются. Поэтому значение $T_{\text{зи}}$ рассчитывают по любому сочетанию J и $M_{\text{дин}}$ (грузовой режим или режим холостого хода), но обязательно проверяют величину момента двигателя

$$M = M_{\text{с}} + M_{\text{дин}} \leq M_{\text{с}} + M_{\text{максдин}}.$$

С целью снижения времени пуска и торможения возможно применение пропорционально–интегрального (ПИ) задатчика интенсивности. ПИ задатчик при подаче скачка $U_{\text{зАд}}$ обеспечивает за счет пропорционального канала скачок напряжения на выходе преобразователя (скачок $\Delta\omega_0$), затем выполняет линейное нарастание напряжения с помощью интегрального канала с темпом, определяемым $T_{\text{зи}}$, до величины, превышающей заданное значение $\bar{\omega}_{0\text{кон}}$ на $\Delta\bar{\omega}_0$.

По достижении значения $(\bar{\omega}_{0\text{кон}} + \Delta\bar{\omega}_0)$ пропорциональный канал снижает скачком выходное значение напряжения (скорости $\bar{\omega}_0$) до величины $\bar{\omega}_{0\text{кон}}$, соответствующей напряжению задания $U_{\text{зАд}}$. Использование ПИ задатчика позволяет обеспечить начальный бросок момента двигателя (при неучете электромагнитной инерции силовой цепи), соответствующий допустимому по условиям ускорения. Для прямолинейной механической характеристики величина скачка $\Delta\omega_0$ определяется по формуле:

$$\Delta\omega_0 = \frac{M_{\text{доп.пуск}}}{\beta}; \quad (10.4)$$

$$\beta = K_{\text{яц}} \frac{M_{\text{н}}}{\omega_{0\text{н}}},$$

где β – жесткость механической характеристики системы преобразователь – двигатель.

ПИ задатчик интенсивности определяет начальную пусковую механическую характеристику, проходящую через точки $\omega_0 = \Delta\omega_0$ и $M = M_{\text{доп.пуск}}$.

В системе преобразователь частоты – асинхронный двигатель начальная пусковая характеристика определяется минимальной частотой преобразователя, а величина пускового момента при этой минимальной частоте

существенно снижена из-за значительного влияния активного сопротивления статорной цепи двигателя.

Пусковую характеристику этой системы, в которой пусковой момент был бы равен моменту, допустимому по ускорению, приходится рассчитывать методом подбора. В первом приближении – это параллельный перенос естественной механической характеристики (см. рисунок 8.1). Последующий подбор проще выполнить с помощью программы *harad*.

Пример 10 Расчёт переходных режимов работы электропривода цепного транспортера

В системе электропривода ПЧ–АД цепного транспортера двигатель питается от преобразователя частоты.

Структурная схема системы (см. рисунок 9.2) учитывает механическую инерцию электропривода, жесткость механической передачи, электромагнитную инерцию обмоток двигателя и элементов преобразователя.

Для анализа работы системы предстоит выполнить расчеты механических и электромеханических переходных процессов момента $M(t)$, скорости $\omega(t)$, скорости идеального холостого хода $\omega_0(t)$, угла поворота вала двигателя $\alpha(t)$.

Переходные режимы обеспечиваются системой управления путем формирования выходного напряжения преобразователя.

По требованиям к электроприводу в переходных режимах следует ограничивать ускорение допустимой величиной $a_{\text{доп}}$.

Темп изменения скорости определяется величиной базовой постоянной времени задатчика интенсивности ЗИ

$$T_{\text{ЗИ}} = \frac{T_{\text{Д}}}{\bar{M}_{\text{дин}}}$$

При движении с заготовкой:

$$T_{\text{Д1}} = J_1 \cdot \frac{\omega_{0\text{н}}}{M_{\text{Н}}} = 0,64 \cdot \frac{104,7}{115,44} = 0,58 \text{ с};$$

$$\bar{M}_{\text{дин1}} = \frac{M_{\text{дин1}}}{M_{\text{Н}}} = \frac{106,2}{115,44} = 0,92;$$

$$\bar{T}_{\text{Д}} = \frac{T_{\text{Д1}}}{\bar{M}_{\text{дин1}}} = \frac{0,58}{0,92} = 0,63 \text{ с}.$$

При движении без заготовки динамический момент и механическая постоянная времени изменяются одновременно пропорционально моменту инерции электропривода, постоянная задатчика интенсивности не изменяется и темп разгона (торможения) остается неизменным, ускорение электропривода не зависит от нагрузки.

Для расчета переходных процессов (при отсутствии дополнительных условий) используем готовую программу «*zipchad.m*» «Расчет переходных процессов в системе ПЧ – АД», в которой расчет ведется по средним значениям токов, момента, скорости по Т-образной схеме замещения АД. (В программе «*zipch2fad.m*» расчет выполняется по мгновенным значениям параметров).

В программу «*zipchad.m*» вводят те же каталожные данные двигателя 4МТКF(H)160L6, что и в примере 8.1. Дополнительно к ним вводится только момент инерции двигателя J_d .

Результаты расчета $\omega_0, \omega, I_1, M, k_{pd}, k_m = f(t)$ выводятся на экран дисплея в виде нагрузочных диаграмм работы электропривода. На рисунке 10.1 приведены диаграммы при пуске и торможении с заготовкой.

Анализ нагрузочных диаграмм работы с заготовкой позволяет сделать вывод:

время пуска до установившегося режима $t_n \cong 0,7$ с (в предварительном расчете $t_{n1} = 0,5$ с) близко к расчетному;

ускорение

$$\varepsilon = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{0,8 \cdot 104,7}{1,1 - 0,2} = 93 \text{ рад/с}^2;$$

$$a = \frac{\varepsilon \cdot D}{2 \cdot j_p} = \frac{93 \cdot 0,3}{2 \cdot 24,9} = 0,56 \text{ м/с}^2 < a_{\text{доп}} = 1 \text{ м/с}^2 -$$

– не превосходит допустимое значение;

максимальный момент двигателя $M_{\text{МАКС}} \cong 1,8 \cdot M_H$ (в расчете $M_{\text{СР}} = \frac{214,5}{115,44} = 1,86$) почти совпадает с расчетным;

– максимальный ток статора $I_{1\text{МАКС}} \cong 1,7 \cdot I_1$;

– механическая постоянная времени T_d совпала с расчетной.

Параметры установившегося режима движения с заготовкой указываются над диаграммами после окончания пуска (сравним с расчетом):

– синхронная скорость двигателя $\omega_{0y} = 0,875$ (в расчете 0,875);

– скорость двигателя $\omega_y = 83$ рад/с (84,1 рад/с);

– ток статора $I_{1y} = 24,3$ А;

– момент двигателя $M_y = 105,5$ Нм (108,5 Нм);

– кпд $k_{pddy} = 0,72$;

– коэффициент мощности $k_{\text{мy}} = 0,95$.

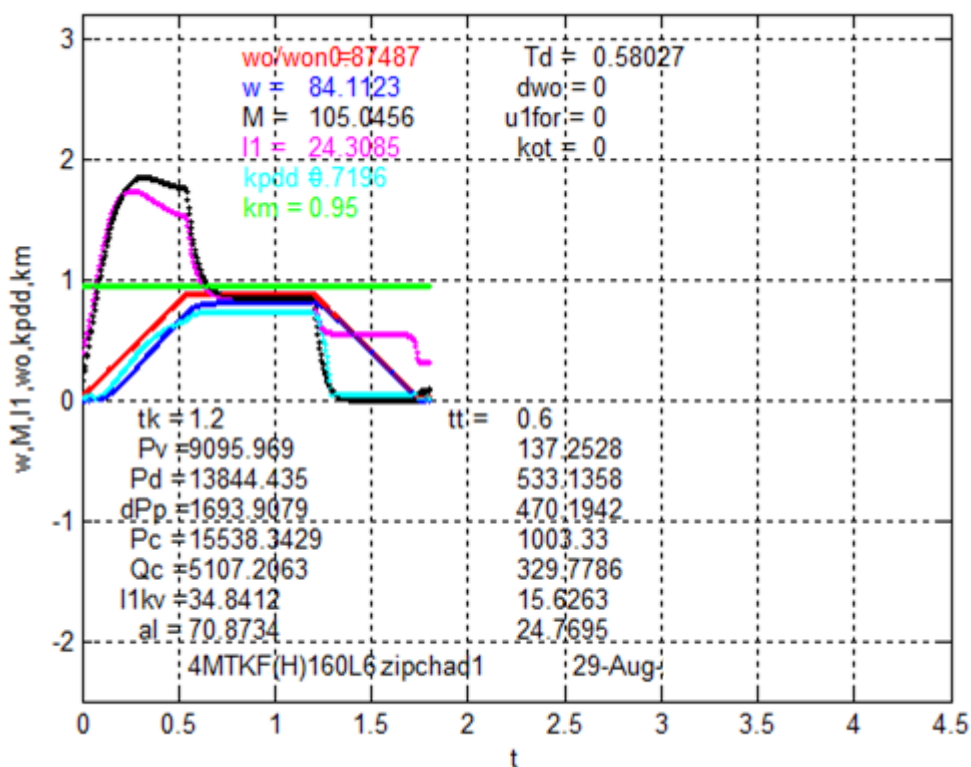


Рисунок 10.1 – Нагрузочные диаграммы работы с заготовкой

В нижней части графика приводятся интегральные показатели пуска за расчетное время пуска t_k , включая начальный участок установившегося режима (см. рисунок 10.1):

- механическая энергия на валу двигателя $P_v = 9095,97 \text{ Вт} \cdot \text{с}$;
- электрическая энергия на статоре двигателя $P_d = 13844,4 \text{ Вт} \cdot \text{с}$;
- потери энергии в преобразователе $dP_p = 1693,9 \text{ Вт} \cdot \text{с}$;
- активная электрическая энергия из сети $P_c = 15538,34 \text{ Вт} \cdot \text{с}$;
- реактивная электрическая энергия из сети $Q_c = 5107,2 \text{ Вар} \cdot \text{с}$;
- среднеквадратичный ток статора $I_{1kv} = 34,84 \text{ А}$;
- угол поворота вала двигателя $al(\alpha) = 70,87 \text{ рад}$.

Такие же показатели выводятся на график и за время торможения tt . Они располагаются в одной строке с пусковыми.

11 ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

11.1 Общие положения

После расчета нагрузочных диаграмм переходных процессов по любому из трех путей (по аналитическим выражениям, анализом ЛАЧХ, интегрированием дифференциальных уравнений) необходимо выполнить ряд дополнительных расчетов с целью получения ответов на вопросы техниче-

ского задания на проектирование – соответствие результатов расчетов выданному заданию и современному состоянию электропривода, в том числе и мировому.

Источником информации по проекту являются нагрузочные диаграммы электропривода. К примеру, получены нагрузочные диаграммы пуска и торможения двигателя в системе ПЧ – АД (рисунок 11.1).

Выше были поставлены следующие задачи:

- рассчитать механические и электромеханические переходные процессы момента $M(t)$, скорости $\omega(t)$, скорости идеального холостого хода $\omega_0(t)$, угла поворота вала двигателя $\alpha(t)$ за время цикла;
- проверить двигатель и преобразователь на перегрузочную способность;
- проверить электропривод на заданную производительность;
- расчета среднеквадратичного значения тока (момента) за цикл и проверки на нагрев двигателя, преобразователя и резисторов;
- расчета энергетических показателей электропривода (механической работы, активной и реактивной энергии из сети за цикл, цикловых КПД и коэффициента мощности $\cos\varphi$).

На рисунке 11.1 приведены нагрузочные диаграммы пуска и торможения момента $M(t)$, скорости $\omega(t)$, тока статора $I_1(t)$, скорости идеального холостого хода $\omega_0(t)$, $kpd(t)$ и $\cos\varphi(t)$ за время движения рабочего органа в одну сторону. Для оценки работы электропривода следует рассмотреть все нагрузочные диаграммы за время цикла.

11.2 Проверка на перегрузочную способность

В процессе изучения нагрузочных диаграмм отмечают максимальные значения тока и момента двигателя и сравнивают эти значения с допустимыми для выбранного двигателя и преобразователя. Прошедшими **проверку на перегрузочную способность** считается двигатель постоянного тока, если максимальный ток нагрузочной диаграммы меньше предельно допустимого тока двигателя по условиям коммутации; асинхронный двигатель, если максимальный момент двигателя нагрузочной диаграммы (на рис. 11.1 – $M_{\text{МАКС}} = 2,2 \cdot M_{\text{Н}}$) меньше максимального (критического) момента двигателя, тиристорный (транзисторный) преобразователь напряжения (частоты), если максимальный ток двигателя (на рисунке 11.1 – $I_{\text{МАКС}} = 1,8 \cdot I_{\text{Н}}$) не превышает максимально допустимый ток, который указан в паспорте преобразователя.

Остальные данные о работе электропривода получают в виде интегральных показателей.

11.3 Проверка на заданную производительность

Угол поворота вала двигателя

$$\alpha(t) = \int_0^t \omega(t) dt, \quad (11.1)$$

показан на рисунке 11.1 в виде интегрального показателя al для каждого участка расчета (α_n – за время пуска t_k , α_T – за время торможения tt).

Время работы в установившемся режиме определяют по соотношению

$$t_y = \frac{\alpha_\Sigma - (\alpha_n + \alpha_T)}{\omega_c}, \quad (11.2)$$

где $\alpha_\Sigma = i_{\text{пер}} \cdot \alpha_{\text{ро}} = i_{\text{пер}} \cdot \frac{2 \cdot L}{D}$ – угловой путь, проходимый валом двигателя на участке движения, рад;

D, L – диаметр шестерни и длина перемещения рабочего органа, м;

ω_c – скорость вращения двигателя в установившемся режиме, соответствующая статическому моменту на участке движения, рад/с.

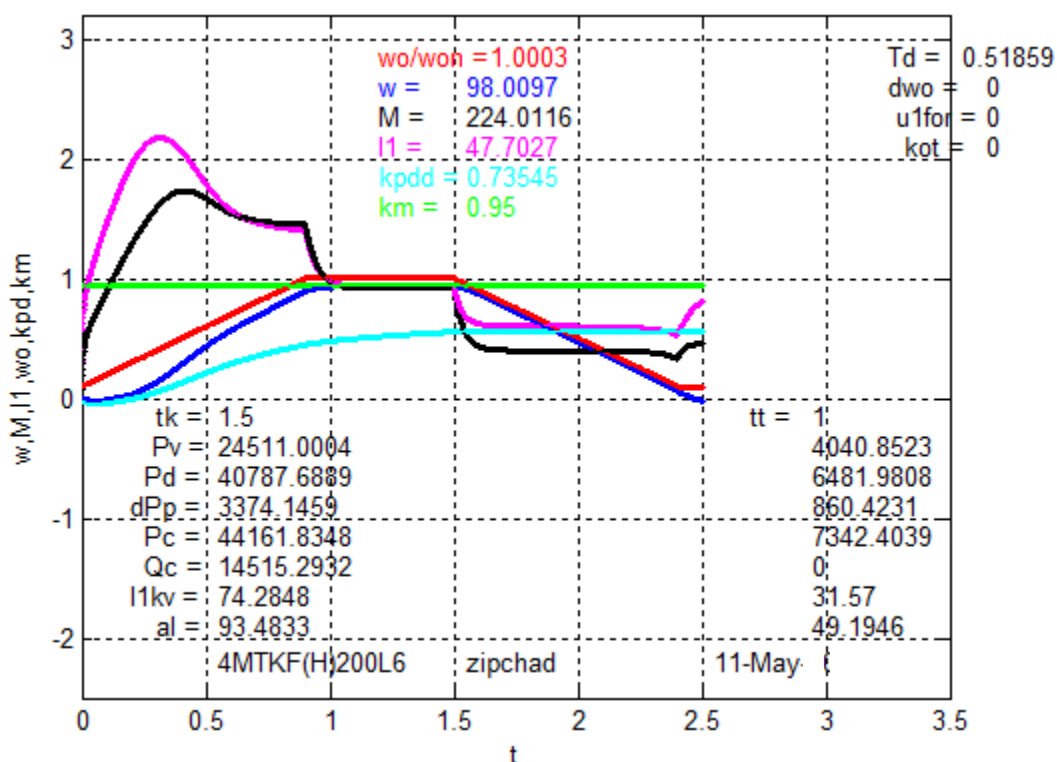


Рисунок 11.1 – Нагрузочные диаграммы пуска и торможения двигателя в системе ПЧ–АД

При небольших α_Σ может оказаться, что $\alpha_\Sigma < \alpha_n + \alpha_T$ и по формуле (11.2) получится, что $t_y < 0$. Это означает, что при заданном пути α_Σ и принятых значениях пускового и тормозного моментов двигатель должен

переключаться на торможение, не достигнув установившегося режима работы. В этом случае приходится определять скорость, при которой двигатель должен быть переключен на торможение, чтобы к моменту времени, когда закончится торможение и двигатель остановится, был бы пройден заданный путь α_{Σ} . Скорость переключения обычно определяют графически, как точку пересечения заданного пути α_{Σ} с кривой $(\alpha_n + \alpha_r) = f(\omega)$, представляющую собой суммарный путь, проходимый двигателем при разгоне и торможении в зависимости от скорости вращения двигателя.

После расчета времени переходных процессов на всех участках движения и расчета времени установившегося движения в течение цикла работы определяется фактическое время работы электропривода в цикле

$$t_{\text{рфакт}} = \Sigma(t_k + tt + t_y).$$

Проверка на заданную производительность состоит в сравнении рассчитанного времени работы электропривода $t_{\text{рфакт}}$ в цикле с временем t_p , заданным в техническом задании на проектирование

$$t_{\text{рфакт}} \leq t_p. \quad (11.3)$$

Если электропривод не прошел проверку, следует пересмотреть его режимы работы с целью повышения быстродействия в переходных процессах и увеличения скорости установившихся режимов работы.

11.4 Проверка по нагреву двигателя и преобразователя

11.4.1 Проверка выбранного двигателя по нагреву

Проверку выбранного двигателя по нагреву следует выполнять, как правило, методом эквивалентного тока:

$$I_{\Theta} = \sqrt{\sum_{i=1}^n I_i^2 \cdot \Delta t_i / \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot \Delta t_i} \leq I_{\text{доп}}, \quad (11.4)$$

где I_i – среднеквадратичное значение тока на i -м участке;

Δt_i – длительность i -го участка работы;

β_i – коэффициент ухудшения теплоотдачи двигателя;

$I_{\text{доп}}$ – допустимый по нагреву ток.

Среднеквадратичный ток на участке интегрирования за время t_n .

$$I_{kv} = \sqrt{\frac{1}{t_n} \cdot \int_0^{t_i} I_i^2 \cdot dt} = \sqrt{\frac{1}{t_n} \cdot \sum_{i=1}^n I_i^2 \cdot \Delta t_i} \leq I_{\text{ндв}}, \quad (11.5)$$

здесь $I_{\text{ндв}}$ – номинальный продолжительный ток электродвигателя.

На рисунке 11.1 приведены значения среднеквадратичного тока статора I_{1kv} за время пуска t_k , за время торможения tt и за время установившегося

режима I_{1y} для одного участка движения. Время работы в установившемся режиме рассчитано по (11.2). Рассчитав переходные процессы и установившиеся режимы для всех участков работы электропривода в цикле, можно получить аналогичные рассмотренным выше значения среднеквадратичных токов и времен работы и вернуться в числитель формулы (11.4).

Коэффициент ухудшения теплоотдачи **остановленного** двигателя β_0 зависит от его конструктивного исполнения и условий вентиляции. Примерные значения коэффициента β_0 для двигателей различного конструктивного исполнения приведены ниже.

Исполнение двигателя	β_0
Закрытый с независимой вентиляцией	1
Закрытый без принудительного охлаждения	0,95...0,98
Закрытый с самовентиляцией	0,45...0,55
Защищенный с самовентиляцией	0,25...0,35

Ухудшение условий охлаждения двигателя в переходных режимах или на участках работы при повторно-кратковременном режиме учитывают коэффициентом ухудшения теплоотдачи β_i которому в зависимости от скорости вращения можно присвоить значения (см. таблицу 11.1).

Нагрузочные диаграммы скорости $\omega(t)$ каждого из вариантов работы в цикле разбиваются на участки движения с разными скоростями по таблице 11.1, рассчитываются времена t_{02}, t_{08}, t_{10} работы в цикле с такими скоростями и подставляются в знаменатель формулы (11.4).

Таблица 11.1 – Рекомендуемые значения коэффициента ухудшение условий охлаждения двигателя

ω	$\leq 0,2 \cdot \omega_n$	$0,2 \cdot \omega_n \leq \omega \leq 0,8 \cdot \omega_n$	$\omega \geq 0,8 \cdot \omega_n$
β_i	β_0	$\frac{1 + \beta_0}{2}$	1
t	t_{02}	t_{08}	t_{10}

Эквивалентный ток двигателя, предназначенного для повторно-кратковременного режима работы, рассчитывают только за время работы, полученное по результатам расчета нагрузочных диаграмм

$$ПВ_{ФАКТ} = \frac{t_{рфакт}}{t_{ц}}.$$

Время паузы в формулу (11.4) не включается.

Допустимый по нагреву ток двигателя рассчитывают через каталожный ток $I_{КАТ}$ при каталожной $ПВ_{КАТ}$, ближайшей к фактической

$$I_{ДОП} = I_{КАТ} \sqrt{\frac{ПВ_{КАТ}}{ПВ_{ФАКТ}}}. \quad (11.6)$$

При проверке **двигателя по нагреву** эквивалентный ток I_{Σ} сравнивают с допустимым током $I_{\text{доп}}$

$$I_{\Sigma} = (0,85 \dots 0,9)I_{\text{доп}}.$$

Превышение эквивалентного тока над допустимым является неприемлемым, а недогрузка двигателя в пределах 10...15% считается нормальной.

Для двигателей, у которых момент и ток пропорциональны (двигатели постоянного тока параллельного и независимого возбуждения, асинхронные двигатели – при небольших отклонениях нагрузки от номинальной), проверку по нагреву можно производить методом эквивалентного момента.

Если выбранный двигатель не проходит по условиям нагрева, т.е. $I_{\Sigma} > I_{\text{доп}}$ или $I_{\Sigma} \ll I_{\text{доп}}$, то производят ориентировочный выбор другого двигателя, используя соотношение

$$P_{\text{H}} \cong P_{\text{НВЫБ}} \cdot \frac{I_{\Sigma}}{I_{\text{доп}}}, \quad (11.7)$$

где $P_{\text{НВЫБ}}$ – номинальная мощность первоначально выбранного двигателя.

В этом случае расчёт проекта выполняют заново (по согласованию с руководителем проекта). Аналогично поступают, если первоначально выбранный двигатель не проходит по условиям кратковременной перегрузки.

11.4.2 Проверка по нагреву преобразователя

Проверка по нагреву преобразователя выполняется сравнением среднеквадратичного тока двигателя за время работы

$$I_{\text{СРКВ}} = \sqrt{\frac{1}{t_p} \cdot \sum_{i=1}^n I_i^2 \cdot \Delta t_i} \leq I_{\text{НПР}}, \quad (11.8)$$

с номинальным выходным током преобразователя. На рисунке 11.1 приведены значения среднеквадратичного тока статора I_{1kv} за время пуска t_k , за время торможения tt и за время установившегося режима I_{1y} для одного участка движения.

Время работы в установившемся режиме рассчитано по (11.2). Для расчёта $I_{\text{СРКВ}}$ за цикл в формулу (11.8) нужно включить значения среднеквадратичных токов и времена всех участков работы.

11.5 Расчёт энергетических показателей электропривода

Энергетические показатели электропривода характеризуют экономичность преобразования энергии системой электропривода (коэффициент полезного действия) и экономичность потребления энергии от сети (коэффициент мощности k_m). Для электропривода, работающего в повторно-

кратковременном режиме работы, универсальной оценкой энергетических показателей является их средневзвешенные значения за цикл работы (цикловые значения). Мгновенные значения η и k_m могут характеризовать экономичность работы электропривода только в установившихся режимах работы.

КПД на участке представляет собой отношение произведенной механической работы на участке P_v к потребленной за это время электроэнергии (активной энергии) из сети P_c [7].

$$\eta = \frac{P_v}{P_c} = \frac{\int_0^{t_{ц}} M_{PO}(t) \cdot \omega_{PO}(t) \cdot dt}{\int_0^{t_{ц}} P_c dt}. \quad (11.9)$$

Для расчета энергетических показателей в данном проекте могут быть использованы результаты расчета переходных процессов на ЭВМ в тех программах, где выводятся значения механической P_v , активной P_c и реактивной Q энергий [13].

Механическая энергия за время одного переходного процесса определяется по соотношению

$$P_v = \int_0^t M(t) \cdot \omega(t) \cdot dt \cong \sum_{i=1}^n M_{pi} \cdot \omega_{2i} \cdot \Delta t_i, \quad (11.10)$$

Активная энергия из сети

$$P_c = \int_0^t 3 \cdot U(t) \cdot (I \cdot \cos \varphi) \cdot t dt \cong \sum_{i=0}^n 3 \cdot U_i \cdot (I \cdot \cos \varphi)_i \cdot \Delta t. \quad (11.11)$$

Реактивная энергия из сети

$$Q_c = \int_0^t 3 \cdot U(t) \cdot (I \cdot \sin \varphi) \cdot t dt \cong \sum_{i=0}^n 3 \cdot U_i \cdot (I \cdot \sin \varphi)_i \cdot \Delta t. \quad (11.12)$$

Значения КПД и $\cos \varphi$ за время одного процесса определяются по формулам:

$$\eta = \frac{P_v}{P_c}; \quad (11.13)$$

$$\cos \varphi = \frac{P_c}{\sqrt{P_c^2 + Q_c^2}}. \quad (11.14)$$

Значения КПД и $\cos \varphi$ в установившемся режиме можно получить непосредственно (там, где эти показатели рассчитываются по программе) или расчётом по координатам и параметрам установившихся режимов.

За время цикла знаки энергий могут быть различными и сложение энергий может привести к ошибочным показателям.

Для определения цикловых энергетических показателей используем средневзвешенные значения, вводя в расчет показатели η и km каждого участка

$$\eta_{\text{ц}} = \frac{\sum_{k=1}^m \eta_k \cdot t_k}{\sum_{k=1}^m t_k}; \quad k_{m\text{ц}} = \frac{\sum_{k=1}^m k_{mk} \cdot t_k}{\sum_{k=1}^m t_k}.$$

Пример 11 Расчет интегральных показателей системы ПЧ–АД ценно-го транспорта

Проверка на перегрузочную способность двигателя заключается в сравнении максимальных значений момента по нагрузочным диаграммам за время работы с допустимым значением момента по каталожным данным.

Максимальный момент двигателя 4МТКF(H)160L6 (см. рисунок 10.1, 11.1, пример 10):

$$M_{\text{МАКС}} \cong 1,8 \cdot M_{\text{Н}} < 0,8 \cdot M_{\text{К}} = 0,8 \cdot 395 = 2,74 \cdot M_{\text{Н}} -$$

– допускает возникающие перегрузки.

Максимальный ток статора:

$I_{\text{МАКС}} \cong 1,7 \cdot I_{1\text{Н}} = 1,65 \cdot 29 = 47,8 \text{ А}$ – в течение 0,3 с (см. рисунок 10.1) при времени цикла $t_{\text{ц}} = 70 \text{ с}$.

Перегрузочную способность преобразователя частоты VFD110B43A:

– в течение 1 мин $I_{\text{МАКСПР}} \cong 1,5 \cdot I_{\text{НПР}} = 1,5 \cdot 32 = 48 \text{ А}$;

– в течение 2 с – $2 \cdot I_{\text{Н}} = 64 \text{ А}$.

Максимальный ток двигателя не превышает максимально допустимый ток, который указан в паспорте преобразователя. Преобразователь проходит по перегрузочной способности.

Проверка на заданную производительность заключается в сравнении фактического времени работы $t_{\text{факт}}$ с заданным $t_{\text{р}} = 25 \text{ с}$ (см. таблицу 1.2).

Фактическое время работы (см. пример 10)

$$\begin{aligned} t_{\text{факт}} &= t_{k1} + t_{y2} + t_{t3} + t_{k4} + t_{y5} + t_{t6} = \\ &= 1,2 + 8,67 + 0,6 + 1,2 + 5,5 + 0,9 = 18,07 \text{ с} < t_{\text{р}}. \end{aligned}$$

Электропривод по производительности проходит.

Проверка двигателя по нагреву для асинхронного двигателя выполняется методом эквивалентного тока. Эквивалентный ток двигателя рассчитывают только за время работы, полученное по результатам расчета нагрузочных диаграмм.

На рисунке 10.1 приведены для времени работы на каждом участке пуска, торможения, установившегося режима) значения среднеквадратичного тока статора I_{1kv} . Времена работы на каждом участке приведены выше при расчете $t_{\text{факт}}$.

Двигатели краново-металлургической серии МТФ(Н) выполняют закрытого исполнения с коэффициентом ухудшения теплоотдачи **остановленного** двигателя $\beta_0 = 0,45 \dots 0,55$. В зависимости от скорости вращения изменяется коэффициент β (см. таблицу 11.2).

Таблица 11.2 – Времена работы при ухудшении условий охлаждения двигателя

$\bar{\omega}$	$<0,02$	$0,2 \dots 0,8$	$>0,8$
β_i	$\beta_0 = 0,5$	$0,75$	1
t_{13}	$t_{02} = 0,1 + 0,15 = 0,25$	$t_{08} = 0,35 + 0,35 = 0,7$	$t_{10} = 8,37 - 0,95 = 7,42$
t_{46}	$t_{02} = 0,23 + 0,23 = 0,46$	$t_{08} = 0,77 + 0,77 = 1,54$	$t_{10} = 5,5 - 2,2 = 3,5$

Нагрузочные диаграммы скорости $\omega(t)$ каждого из режимов работы в цикле (см. рисунок 10.1 и 11.1) разбиваются на участки, ограниченные скоростями $0,2 \cdot \omega_{0H}$ и $0,8 \cdot \omega_{0H}$. Времена работы в интервалах этих скоростей t_{02}, t_{08}, t_{10} измерены на рисунке 10.1 и 11.1 и приведены в таблице 11.2.

Перечисленные величины вводятся в формулу эквивалентного тока.

$$M_{\text{СРКВ}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n I_i^2 \cdot \Delta t_i}{\sum_{i=1}^n \beta_i \cdot \Delta t_i}} =$$

$$= \sqrt{\frac{34,84^2 \cdot 1,2 + 24,31^2 \cdot 8,37 + 15,63^2 \cdot 0,6 + 19,4^2 \cdot 1,2 + 13,43^2 \cdot 5,5 + 18,74^2 \cdot 0,9}{0,2 \cdot (0,25 + 0,46) + 0,75 \cdot (0,7 + 0,54) + 7,42 + 3,5}} =$$

$$= \sqrt{\frac{8327,34}{12}} = 26,34 \text{ A} \leq I_{\text{доп.}}$$

Фактическая

$$\text{ПВ}_{\text{ФАКТ}} = \frac{t_{\text{факт}}}{t_{\text{ц}}} \cdot 100 \% = \frac{18,07}{70} \cdot 100 \% = 25,8 \%$$

Ближайшая каталожная $\text{ПВ}_{\text{КАТ}} = 25 \%$.ПВ

При этой $\text{ПВ}_{\text{КАТ}}$ отсутствуют каталожные данные двигателя, кроме мощности, и нет возможности получить каталожный ток. Принимаем за $\text{ПВ}_{\text{КАТ}} = 40 \%$ и определим допустимый по нагреву ток двигателя через каталожный ток $I_{\text{КАТ}}$ при $\text{ПВ}_{\text{КАТ}} = 40 \%$.

$$I_{\text{доп}} = I_{\text{КАТ}} \cdot \sqrt{\frac{\text{ПВ}_{\text{КАТ}}}{\text{ПВ}_{\text{ФАКТ}}}} = 29 \cdot \sqrt{\frac{40}{25,8}} = 29 \cdot 1,25 = 36,1 \text{ A}.$$

При проверке **двигателя по нагреву** эквивалентный ток I_{Σ} сравнивают с допустимым током $I_{\text{доп}}$

$$I_{\Sigma} = 26,34 \text{ A} = 0,73 \cdot I_{\text{доп.}}$$

Недогрузка двигателя велика – 27%.

Ориентировочный выбор другого двигателя

$$P_H \cong P_{H\text{выб}} \cdot \frac{I_3}{I_{\text{доп}}} = 11 \cdot \frac{26,34}{36,1} = 8 \text{ кВт},$$

где $P_{H\text{выб}}$ – номинальная мощность первоначально выбранного двигателя.

Ближайшая меньшая мощность двигателя типа 4МТКF(H)132LB6 составляет 7,5 кВт. Применение этого двигателя приведет к его перегреву при работе цепного транспортера в заданном режиме. Оставляем в работе двигатель 4МТКF(H)160L6 мощностью 11 кВт.

11.6 Расчёт энергетических показателей электропривода

В данном проекте использует результаты расчета переходных процессов механической P_v , активной P_c и реактивной Q_c энергий. Выше выполнен расчет энергетических показателей по участкам работы.

Для электропривода, работающего в повторно-кратковременном режиме работы, универсальной оценкой энергетических показателей (кпд, $\cos \varphi$) является их средневзвешенные значения за цикл работы (цикловые значения).

Выше рассчитаны (см. пример 11) средневзвешенные значения для движения с заготовкой и для движения без заготовки.

Средневзвешенные (цикловые) значения для системы электропривода

$$\begin{aligned} \eta_{\text{ц}} &= \frac{\sum_{k=1}^m \eta_k \cdot t_k}{\sum_{k=1}^m t_k} = \frac{\eta_k \cdot t_{13} + \eta_{\text{срвзв46}} \cdot t_{46}}{t_{13} + t_{46}} = \frac{0,67 \cdot 10,53 + 0,149 \cdot 7,6}{10,53 + 7,6} = \\ &= \frac{8,188}{18,13} = 0,45. \\ k_{m\text{ц}} &= 0,95. \end{aligned}$$

12 ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ЭЛЕКТРОПРИВОДА. ВЫБОР АППАРАТОВ

Принципиальная схема электропривода должна включать в себя главные (силовые) цепи, цепи управления, защиты, сигнализации.

Для комплектного тиристорного электропривода постоянного тока или асинхронного электропривода по схеме «ПЧ-АД» силовые цепи вычерчиваются в развернутом виде, позволяющем показать силовые цепи тока, а цепи управления допускается вычерчивать в виде функциональных блоков с обязательным указанием аппаратов управления электроприводом (задающие потенциометры, универсальные переключатели, конечные выключатели и т.п.).

12.1 Выбор фильтров и коммутирующей аппаратуры для преобразователя частоты

Выбор фильтров и коммутирующей аппаратуры для преобразователя частоты выполняется по рекомендациям изготовителя, который поставляет необходимые комплектующие (за отдельную плату).

На рис. 12.1 приведена схема подключения коммутационной и защитной аппаратуры преобразователя частоты. Коммутационная и защитная аппаратура, дроссели и фильтры предназначены для устранения нежелательного влияния преобразователя частоты на двигатель и питающую сеть, защиты преобразователя и питающих кабелей, аварийного отключения преобразователя и двигателя от силового питания.

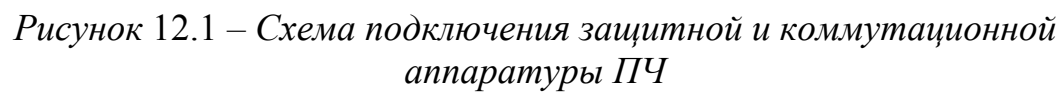
Выбор аппаратов защиты для преобразователей частоты определяется их номинальным входным током, указанным в каталоге.

Подключение преобразователя к сети осуществляется **автоматическим выключателем QF** , выбор которого определяется максимально возможной перегрузкой преобразователя ($1,5 \cdot I_N$ в течение 60 с). Данные по автоматическим выключателям приведены в приложении В.

Сетевой контактор $KM1$ во входной цепи ПЧ обеспечивает функцию аварийного останова электропривода и может использоваться для безопасного его отключения.

На объектах эксплуатации с использованием чувствительных к радиопомехам устройств автоматики, телеметрии, связи для снижения уровня радиопомех, генерируемых силовым преобразователем, устанавливают блок БФ1 входного фильтра из дросселя $L1$ и помехоподавляющего фильтра $Z1$.

Сетевой коммутационный дроссель $L1$ снижает гармоники тока, которые вырабатывает в преобразователе блок выпрямления/рекуперации. Эффект применения дросселя зависит от отношения мощности короткого замыкания питающей сети к мощности привода. Рекомендуемое значение этого отношения более 33:1, используются 2...4% – ные дроссели (2...4% – падение напряжения при номинальном токе). Сетевой коммутационный дроссель $L1$ также снижает выбросы тока, вызванные скачками напряжения в сети (при работе компенсирующих устройств или переключениями на подстанции).



Следует учитывать следующие условия:

- номинальный длительный ток дросселя был равен или больше, чем максимальный длительный ток, потребляемый ПЧ от сети;
- при рабочих и аварийных режимах магнитопровод дросселя не должен входить в насыщение;
- на обмотках дросселя падает напряжение и при неправильном выборе дросселя (слишком высокое сопротивление на частоте 50 Гц) напряжение на входе ПЧ может быть меньше допустимого для его нормальной работы. А при маленькой индуктивности дросселя его полезные свойства могут быть сведены до нуля;
- дроссель должен быть рассчитан на соответствующее напряжение сети.

Выбор сетевого дросселя $L1$ типа $ED3N$ в зависимости от мощности двигателя – в приложении В.

Для ограничения перенапряжений на зажимах приводного двигателя и защиты изоляции его обмоток от пробоя, если длина силового кабеля превышает 10...15 м, в непосредственной близости от двигателя рекомендуется подключать выходной $\frac{du}{dt}$ – фильтр $Z2$ и дроссель $L2$.

Выходные моторные дроссели $L2$ устанавливаются на выходе ПЧ и обеспечивают:

- **подавление высокочастотных гармоник** в токе двигателя. Формирование синусоидального тока в обмотках двигателя осуществляется ПЧ с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) напряжения по синусоидальному закону. При низких частотах ШИМ высокочастотные пульсации моторного тока могут достигать до 5–10%. Высокочастотные гармоники тока вызывают дополнительный нагрев двигателя.

- **ограничение амплитуды тока короткого замыкания**. При внезапном коротком замыкании на выходе ПЧ ток короткого замыкания увеличивается не внезапно, так как в контуре тока к.з. есть индуктивности (L моторного дросселя + паразитные индуктивности моторного кабеля). При достижении током к.з. порога срабатывания защиты ПЧ двигатель обесточивается. Так как время срабатывания защиты отлично от нуля, то максимальное значение тока к.з. при использовании моторного дросселя реально намного меньше максимального значения тока без дросселя. Без моторного дросселя многие ПЧ не способны защитить транзисторы ПЧ от одного или нескольких внезапных к.з. на выходе ПЧ.

- **снижают скорость нарастания аварийных токов** короткого замыкания и задерживают момент достижения максимума тока короткого замыкания, тем самым обеспечивают необходимое время для срабатывания цепей электронной защиты ПЧ;

– **компенсируют емкостные токи длинных моторных кабелей**, то есть не дают развиваться большим емкостным токам и соответственно препятствуют ложным срабатываниям защиты ПЧ от сверхтоков;

– **снижают выбросы напряжения на обмотках двигателя**. При питании асинхронного двигателя от преобразователя частоты к обмоткам двигателя прикладывается импульсное напряжение со значительными пиками перенапряжений, суммарная величина которых превышает амплитуду номинального напряжения питания асинхронного двигателя. Это может вызвать пробой изоляции обмоток двигателя, особенно при его длительной эксплуатации, когда изоляция обмоточных проводов и обмоток теряет свои первоначальные изоляционные свойства.

Выходные моторные дроссели компенсируют емкостные токи в длинных кабелях, и совместно с емкостью кабеля ограничивают производную напряжения на обмотке статора на уровне $\frac{du}{dt} \cong 500 \text{ В В/мкс}$.

Выбор моторного дросселя $L2$ типа $ED3S$ в зависимости от мощности двигателя – в приложении В.

Радиочастотные фильтры РЧ $Z1$, $Z2$ используются для снижения уровня радиочастотных помех, излучаемых преобразователем в питающую сеть.

Для выполнения требований стандарта электромагнитной совместимости, описанных в европейских директивах ЕМС, для преобразователей частоты разработаны специальные фильтры. Однако для полного удовлетворения требований ЕМС установка данных фильтров должна сопровождаться соответствующим правильным монтажом и подключением преобразователя частоты. При использовании внешнего РЧ фильтра класса В совместно с преобразователем достигается снижение помех до уровня, соответствующего категории непромышленных помещений.

Для обеспечения правильного и надежного функционирования необходимо при выборе защитных устройств учитывать токи утечки и обеспечить надежное заземление фильтра.

Рекомендации по выбору (размеры РЧ) фильтров для конкретных моделей ПЧ даны в руководствах по эксплуатации на преобразователи.

Выбор **радиочастотных фильтров $Z1$, $Z2$** в зависимости от мощности двигателя – в приложении В.

12.2 Выбор блоков тормозных резисторов системы ПЧ–АД

При переводе двигателя в генераторный режим энергия возвращается в звено постоянного тока преобразователя через обратные диоды транзисторного инвертора, заряжая конденсаторы силового фильтра до напряжения, запирающего диоды силового выпрямителя. При превышении напряжения звена постоянного тока до уровня около 750 В большинство про-

мышленных преобразователей отключается и переходит в режим аварии. Обеспечить стабильный темп торможения можно посредством замены диодного выпрямителя на транзисторный (т.н. активный выпрямитель) или же посредством применения тормозного (сливного) сопротивления.

АД можно тормозить с мощностью около 20 % от номинальной за счет собственных потерь двигателя и преобразователя. Этого обычно достаточно для небольших неинерционных нагрузок, т.е. там, где кинетическая энергия невелика или время торможения не критично.

За коммутацию цепей тормозного сопротивления отвечает специальный тормозной ключ, который встраивается в большинство современных промышленных преобразователей. При включении тормозного ключа тормозной резистор разряжает конденсаторы звена постоянного тока и рассеивают избыточную энергию торможения. Блоки торможения используются как при редких и кратковременных торможениях механизма, например, при аварийном торможении.

Выделяемая мощность, определяющаяся изменением кинетической энергии приводного механизма при уменьшении скорости двигателя, зависит от интенсивности этого изменения. Выражение для мощности, обусловленное уменьшением кинетической энергии механизма и возвращаемой в звено постоянного тока, имеет вид [6]:

$$P_{\Sigma} = \frac{W_{\text{кин}}}{t_1} - P_{\text{с}} = J_{\Sigma} \cdot \frac{\omega^2}{2 \cdot t_1} - P_{\text{с}},$$

где $P_{\text{с}}$ – мощность на выполнение полезной работы, преодоление сил трения в механизме и потерь в двигателе и инверторе, Вт;

ω – угловая скорость двигателя, 1/с;

t_1 – время торможения, с.

Сопротивление R и рассеиваемая мощность P тормозного резистора выбирается из соотношений

$$P = P_{\text{ТМАКС}} = J_{\Sigma} \cdot \frac{\omega^2}{2 \cdot t_1}.$$

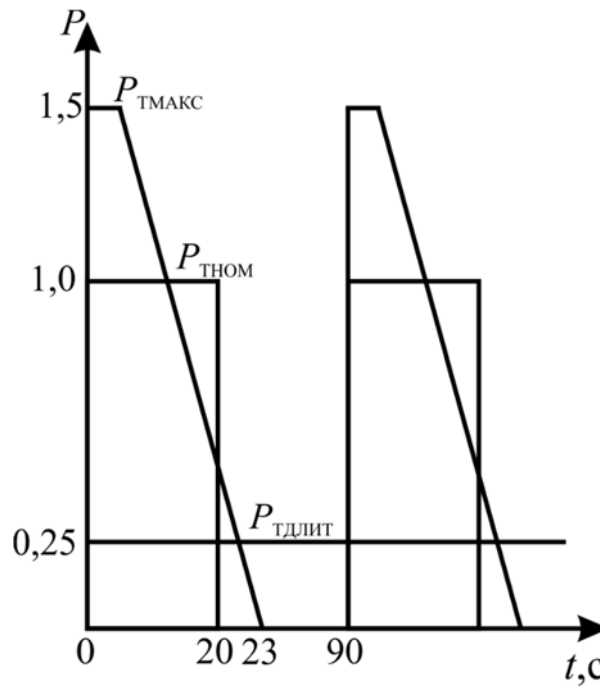


Рисунок 12.2 – Нагрузочная диаграмма для выбора тормозного резистора

Максимальный ток, коммутируемый ключом тормозного резистора,

$$I_{\text{ДМАКС}} = \frac{U_d}{R},$$

где U_d – порог срабатывания тормозного прерывателя преобразователя частоты.

Тормозные резисторы поставляются производителями преобразовательной техники и выбираются исходя из конкретных режимов торможения по каталожным данным. Как правило, табличные данные:

- номинальное сопротивление R ;
- продолжительность включения в процентах от общего времени цикла;
- пиковой мощности торможения $P_{\text{ТМАКС}}$ в течение определенного времени;

– мощности торможения в продолжительном режиме $P_{\text{ТДЛИТ}}$ указываются производителями для конкретных преобразователей частоты с учетом порога срабатывания тормозного прерывателя, настроенного по умолчанию. Однако в некоторых случаях значение порога срабатывания может настраиваться пользователем.

Например, параметры тормозных резисторов для приводов серии **Simovert VC** указываются из расчета цикличности торможения 90 с. Величина $P_{\text{ТНОМ}}$ характеризует номинальную мощность торможения в течение 20 с с цикличностью 90 с, $P_{\text{ТМАКС}}$ – максимальную (пиковую) мощность торможения в течение 3 с с последующим ее снижением в течение 20 с, а $P_{\text{ТДЛИТ}}$ – это максимально допустимая длительная мощность торможения. При этом $P_{\text{ТНОМ}} = 4 \cdot P_{\text{ТДЛИТ}}$; $P_{\text{ТМАКС}} = 6 \cdot P_{\text{ТДЛИТ}}$.

При выборе тормозного резистора необходимо учитывать цикличность и параметры режима торможения привода.

Порядок выбора:

Построить диаграмму изменения мощности торможения в течение рабочего цикла электропривода $P_T = f(t)$.

Рассчитать среднее значение мощности торможения $P_{ТСР}$ в течение рабочего цикла.

Выбрать тормозное сопротивление из условия $P_{ТНОМ} > P_{ТСР}$.

Определить максимальную мощность торможения и проверить выполнение условия $P_{ТМАКС} > 1.5 \cdot P_{ТНОМ}$. Если это условие не выполняется, необходимо выбрать тормозной резистор большей мощности.

Если реальное время цикла не равно 90 с и если торможение привода происходит нерегулярно, процедура выбора тормозного резистора сводится к выбору на диаграмме мощности торможения отрезка времени $t = 90$ с, где значение $P_{ТСР}$ максимально.

Дальнейшие действия в соответствии с п. 3 и 4 описанной методики.

Тормозные модули и тормозные резисторы. Преобразователи до 11...15 кВт имеют **встроенные тормозные ключи**. При необходимости принудительного торможения двигателя для преобразователей от 15 кВт и выше требуются внешний тормозной модуль и тормозные резисторы.

Рекомендуемые тормозные модули и резисторы при 10% цикле торможения (максимальное время торможения в цикле – 10 с) приведены в таблице.

При предельной температуре тормозного сопротивления контактор КМ2 отключает двигатель.

Выбор тормозных модулей и тормозных резисторов по рекомендации производителя в зависимости от мощности двигателя – в приложении В.

Для **проверки тормозных резисторов по нагреву** из интегральных показателей торможения (см. рисунок 11.1) определяется избыточная электрическая энергия при торможении dP_d . Когда энергия сети $P_c = 0$, а энергия двигателя P_d больше потерь dP_p в преобразователе, избыточная энергия $dP_d = P_d - dP_p > 0$ и идет на нагрев резисторов (на рисунке 11.1 двигатель тормозится в двигательном режиме и $dP_d = 0$).

По известным тормозному сопротивлению $R_T R_m$, времени торможения tt и энергии dP_d можно определить среднеквадратичный I_{kv} ток резистора за одно торможение. Далее при известном времени работы в цикле рассчитывают среднеквадратичный ток I_p за время работы резисторов и эквивалентный по нагреву ток резисторов $I_{ЭП}$.

Проверка по нагреву выполняется сравнением эквивалентного по нагреву тока резисторов $I_{ЭП}$ с продолжительным током резистора $I_{пр} > I_{ЭП}$.

Пример 12 Выбор блоков тормозных резисторов и проверка по нагреву

Необходимость применения тормозного резистора (см. рисунок 12.2) определяется при рассмотрении нагрузочных диаграмм (см. рисунок 10.1 и 11.1), полученных для неуправляемого преобразователя частоты.

При работе с заготовкой в режиме торможения (см. рисунок 10.1) энергия потребляется из сети ($P_c > 0$), двигатель тормозится под действием статического момента. Избыточная электрическая энергия при торможении $dP_d = 0$, тормозной резистор не нужен.

При работе без заготовки в режиме торможения (см. рисунок 11.1) энергия из сети не потребляется ($P_c = 0$), а избыточная электрическая энергия составляет $dP_d = P_d - dP_p = -2732,51 + 744,56 = -1987,95 \text{ Вт} \cdot \text{с}$ за время $tt = 0,9 \text{ с}$.

Для обеспечения тормозного момента избыточную тормозную энергию следует погасить на тормозном сопротивлении.

Фирма – производитель преобразователя частоты *VFD110B43A*, выбранного в проекте, рекомендует использовать при мощности двигателя 11 кВт выпускаемые этой фирмой тормозной резистор и тормозной модуль, показанные в таблице 11.2.

Таблица 11.2 – Параметры тормозных резисторов и тормозных модулей

$P_{\text{дв}}$	Параметры тормозных резисторов		Тормозные модули		Перегрузка
кВт	тип	P, R	тип	кол-во	%
11	BR1K0W050	1000 Вт, 50 Ом	VFDB2015	1	125

При времени работы $t_p = 10 \text{ с}$ и $\text{ПВ}_{\text{доп}} = 10 \%$ значение мощности, рассеиваемой тормозным резистором $R = 50 \text{ Ом}$, составляет $P_{\text{доп}} = 1500 \text{ Вт}$.

Мощность избыточной энергии в схеме цепного транспортера

$$dP_R = \frac{dP_d}{tt} = \frac{1987,95}{0,9} = 2209 \text{ Вт}.$$

При ПВ работы тормозного резистора

$$\text{ПВ}_{R,\%} = 100 \cdot \frac{tt}{t_{\text{ц}}} = 100 \cdot \frac{0,9}{51,4} = 1,75 \%,$$

его допускаемая рассеиваемая мощность

$$P_{\text{ЭП}} = P_{\text{доп}} \cdot \sqrt{\frac{\text{ПВ}_{\text{доп}}}{\text{ПВ}_R}} = 1500 \cdot \sqrt{\frac{10}{1,75}} = 1500 \cdot 2,39 = 3585 \text{ Вт}.$$

Тормозной резистор по нагреву проходит.

12.3 Система управления пуском и торможением электропривода

Система управления пуском и торможением электропривода показана на рис. 12.2 (только её релейный аналог, в последующих курсовых проектах он будет заменен системой микропроцессорного управления). Установка напряжения задания скорости $U_{\text{ЗДВ}}$ выполняется при наладке электропривода потенциометром R_1 при включении кнопки «ВПЕРЕД». Для обратного направления движения – потенциометром R_2 . При отключении электропривода кнопкой «СТОП» напряжение задания $U_{\text{ЗД}} = 0$. При выходе рабочего органа за пределы рабочей зоны конечные выключатели $SQ1$ и $SQ2$ отключают напряжение задания данного направления движения.

Для плавного управления скоростью используется командоаппарат КА типа «Джойстик», выходное напряжение которого зависит от угла поворота его рукоятки, задаваемого оператором (рисунок 12.3).

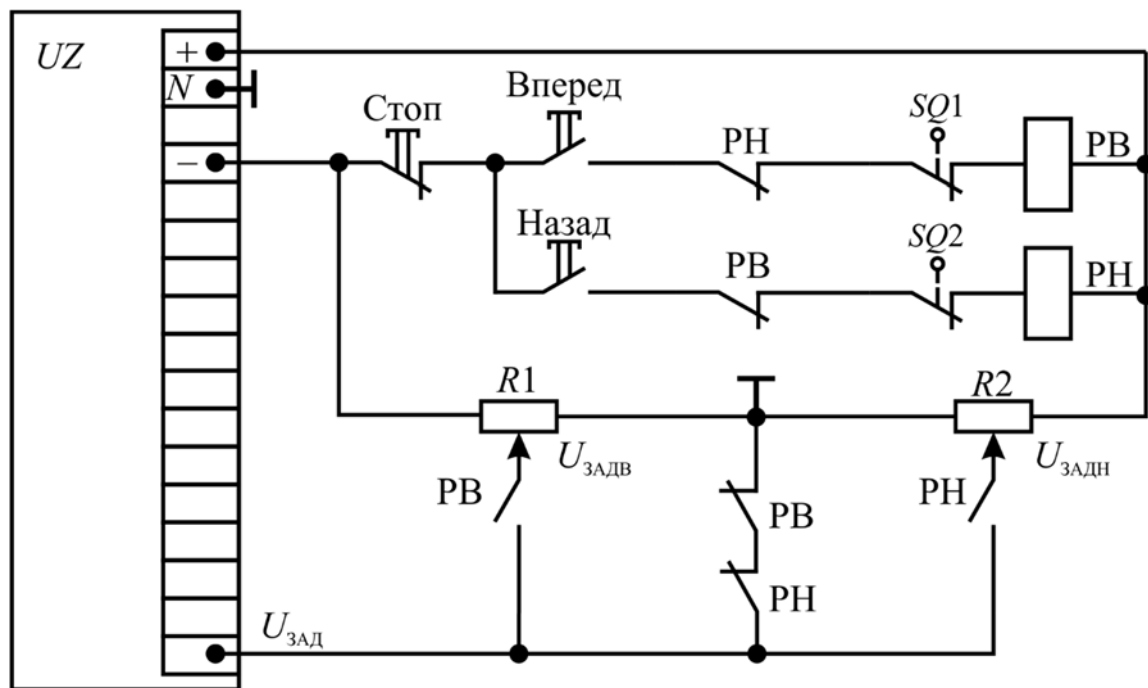


Рисунок 12.3 – Релейный аналог управления пуском и торможением электропривода

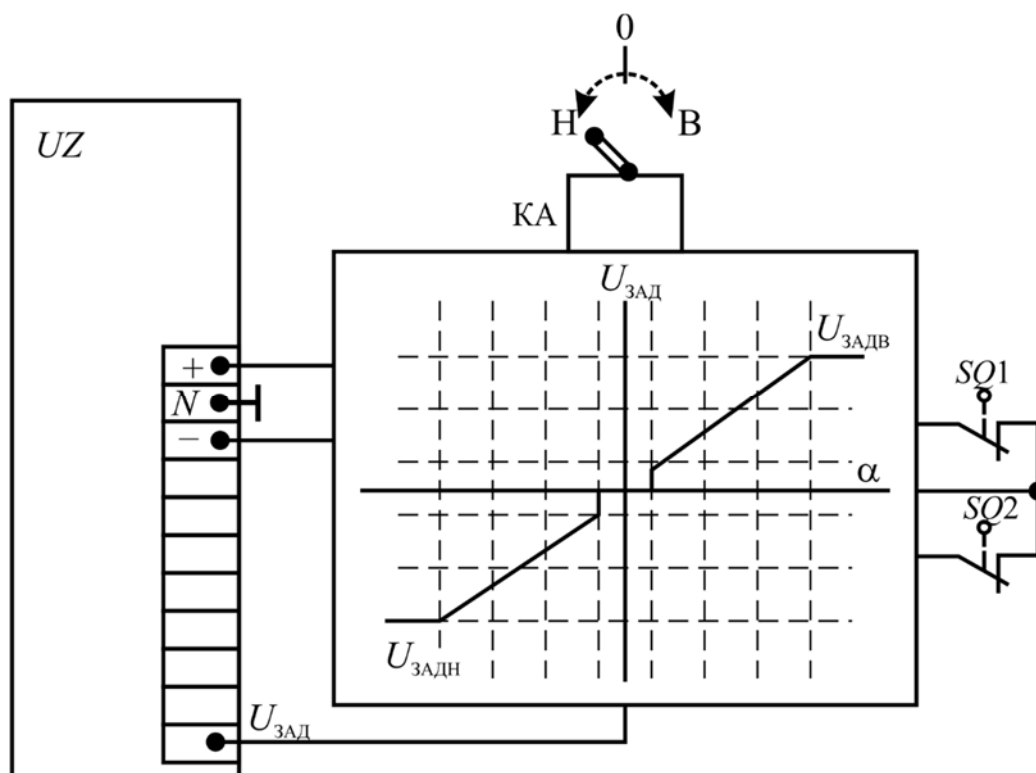


Рисунок 12.4 – Релейный аналог плавного управления электроприводом

При питании двигателя от сети допускается при составлении принципиальной схемы изображать только силовые цепи электропривода. Схема должна учитывать параметры и режим работы проектируемого электропривода (тип двигателя, его мощность, ток, напряжение, вид торможения, количество пусковых ступеней, принцип пуска, график работы механизма и т.п.).

При составлении схемы электропривода в проекте должны быть выбраны электрические аппараты силовой цепи, осуществляющие управление электроприводом (автоматические выключатели, контакторы, предохранители) по результатам расчета токов и напряжений в приложении В. Все электрические аппараты должны выбираться по действующим каталогам.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А Кинематические схемы рабочих машин

А1. Электропривод механизма подъема

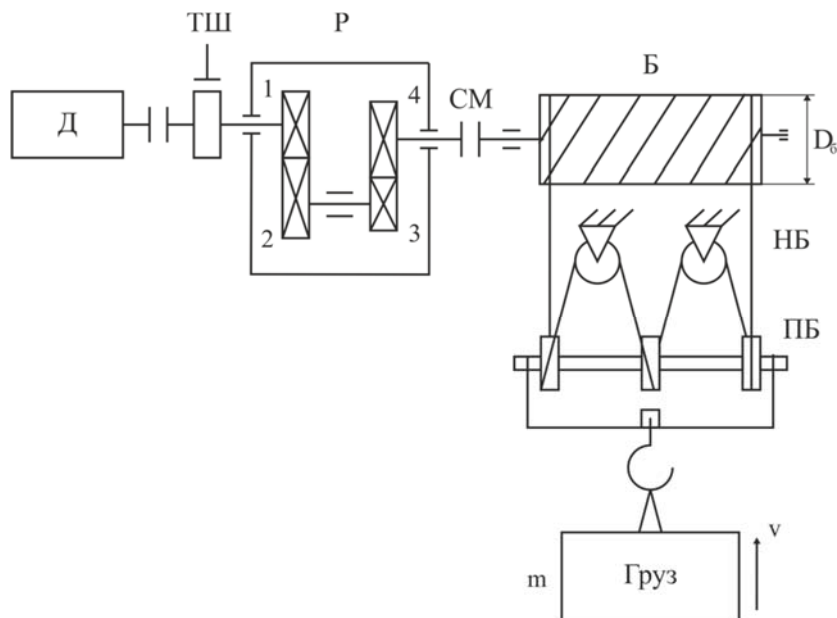


Рисунок А1 – Кинематическая схема механизма подъема

Кинематическая схема барабанной лебедки механизма подъема мостового крана приведена на рисунке А7. Двигатель Д через редуктор Р приводит во вращение барабан Б лебедки, на который канат наматывается при подъеме и сматывается при опускании груза m . Грузозахватное приспособление подвешивается на подвижных блоках ПБ, которые образуют с неподвижными относительно лебедки блоками НБ полиспаст.

Двигатель включается в работу после строповки груза, на скорости $0,2 \cdot v_T$ выбирается слабина каната. Далее выполняется разгон с ускорением не выше допустимого до рабочей скорости и обеспечивается подъем груза. При достижении заданной высоты h двигатель тормозится, на вал двигателя накладывается тормоз ТШ. Удержание груза в подвешенном состоянии осуществляется тормозом ТШ.

При спуске груза выдерживается ускорение не выше допустимого, двигатель работает в тормозном режиме. При подходе груза к площадке выгрузки скорость спуска снижается до $0,2 \cdot v_T$ груз плавно устанавливается на площадку. Ослабляется натяжение канатов для расстроповки груза, крюк отцепляется. На пониженной скорости крюк поднимается на высоту h , двигатель тормозится. По прибытии к месту погрузки порожний крюк спускается на площадку погрузки и цикл работы повторяется.

Расчетные соотношения приводятся в литературе [6, 7].

Технологические параметры механизма приведены в таблице А1

Таблица А1 – Технологические данные механизма подъема

Вариант	Масса груза	Диаметр барабана	Масса барабана	Высота подъема	Скорость подъема	Время работы	Число циклов
	m	D_B	m_B	h	v_r	t_p	z
	т	м	кг	м	м/с	с	1/час
101	10	0,4	100	5	0,2	120	12
102	10	0,4	100	6	0,25	100	14
103	10	0,4	100	7	0,3	110	13
104	10	0,4	100	7	0,35	100	14
105	10	0,4	120	8	0,4	100	14
106	15	0,4	120	5	0,15	150	10
107	15	0,4	120	5	0,2	120	12
108	15	0,4	120	6	0,25	120	12
109	15	0,4	140	7	0,3	120	12
110	15	0,4	140	7	0,35	110	13
111	20	0,5	140	5	0,2	120	12
112	20	0,5	160	5	0,25	110	13
113	20	0,5	160	6	0,35	100	14
114	20	0,5	160	7	0,4	100	14
115	20	0,5	180	5	0,15	150	10
116	25	0,5	200	5	0,15	150	10
117	25	0,5	200	5	0,2	120	12
118	25	0,5	200	7	0,35	150	13
119	25	0,5	200	7	0,4	110	14

Принять:

$D_{\Pi} = 0,4 \cdot D_B$ – диаметр подшипников барабана;

$\mu_{\Pi} = 0,05 \dots 0,08$ – коэффициент трения в подшипниках барабана;

$J_{\Pi} = 0,4 \text{ кгм}^2$ – момент инерции тормозного шкива;

$i_{\Pi} = 3$ – коэффициент полиспаста;

$a_{\text{доп}} = 0,4 \text{ м/с}^2$ – допустимое ускорение;

$v_{\Pi} = 1,2 \cdot v_r$ – скорость без груза;

$h_{\text{сл}} = 0,5 \text{ м}$ – высота подъема при выборе слабины канатов;

$m_0 = 0,5 \text{ т}$ – масса грузозахватного приспособления (ПБ и крюка),

$C_{\text{л}} = 50 \text{ МН/м}$ – линейная жесткость канатов.

Массой канатов можно пренебречь

А2. Электропривод тележки мостового крана

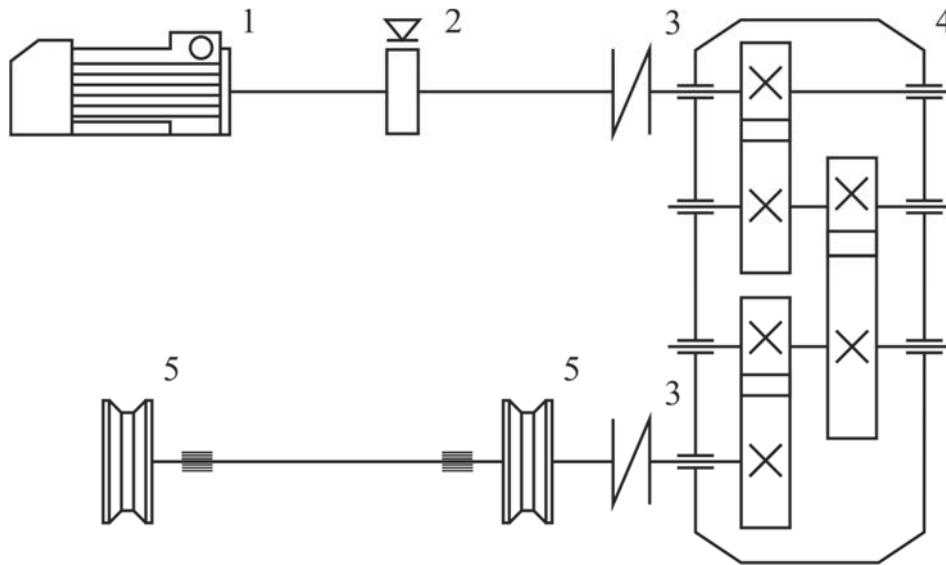


Рисунок А2 – Кинематическая схема механизма передвижения тележки: 1 – электродвигатель; 2 – тормозной шкив; 3 – муфта; 4 – редуктор; 5 – ходовые колеса

Тележка мостового крана выполняет операцию перемещения поднятого груза вдоль фермы крана с площадки загрузки на площадку выгрузки. На площадке загрузки груз зацепляется, механизм подъема обеспечивает подъем груза. Включается двигатель тележки, осуществляется перемещение тележки с грузом с установившейся рабочей скоростью V_p . По прибытии к площадке выгрузки двигатель затормаживается, переключается на пониженную скорость с целью обеспечения точности остановки, тележка останавливается в заданном месте, переместившись на длину L . Переход тележки на пониженную скорость происходит на расстоянии $L/4$ от площадки выгрузки.

Происходит опускание груза, его отцепляют, пустой крюк поднимается. Включается двигатель для движения в обратную сторону с установившейся скоростью V_b , тележка возвращается в зону загрузки, пройдя вновь расстояние L .

Таким образом, тележка совершает возвратно-поступательное движение на длину L от одного крайнего положения до другого. В цикл работы тележки входит время пауз, когда тележка стоит, производятся зацепление груза, его подъем, опускание, расцепление, подъем и опускание пустого крюка.

Расчетные соотношения приводятся в литературе [13].

Технологические параметры механизма приведены в таблице А2.

Таблица А2 – Технические данные механизма передвижения тележки

Вариант	Масса тележки	Масса груза	Диаметр колеса	Путь	Рабочая скорость	Скорость возврата	Среднее ускорение	Время работы	Число циклов
	m	m_{Γ}	D_K	L	V_p	V_v	$a_{доп}$	t_p	z
	т	т	м	м	м/с	м/с	м/с ²	с	1/час
121	5	10	0,2	5	0,5	0,6	0,5	23	75
122	4	12	0,25	5	0,5	0,5	0,5	24	75
123	3	8	0,25	4,5	0,5	0,6	0,45	23	70
124	3	10	0,25	5	0,45	0,5	0,45	25	70
125	3	22	0,32	5	0,45	0,6	0,45	25	70
126	3	10	0,32	4	0,45	0,5	0,45	24	65
127	3	10	0,32	5	0,4	0,6	0,4	28	65
128	4	10	0,32	4	0,4	0,5	0,4	25	50
129	4	22	0,4	6	0,4	0,6	0,4	32	50
130	4	16	0,4	4,5	0,35	0,5	0,4	33	50
131	7,5	16	0,2	4	0,6	0,6	0,5	16	80
132	7,5	20	0,2	4	0,6	0,5	0,5	18	80
133	6	8	0,2	6	0,6	0,6	0,5	22	75
134	3	12	0,32	5	0,45	0,5	0,45	25	70
135	4	16	0,4	4,5	0,35	0,6	0,4	33	50
136	5	20	0,35	4	0,6	0,5	0,4	30	65
137	5	12	0,35	4,5	0,35	0,6	0,4	29	65
138	5	16	0,35	5	0,45	0,5	0,45	28	70
139	4	10	0,35	6	0,5	0,6	0,45	27	75

Принять:

$d_{ст} = 0,25 \cdot D_K$ – диаметр ступицы колеса моста;

$\mu = 0,015...0,02$ – коэффициент трения скольжения;

$J_{ш} = 0,4 \text{ кгм}^2$ – момент инерции тормозного шкива;

$f = 0,5 \text{ мм}$ – коэффициент трения качения;

$v_{п} = 0,2 \cdot v_{\Gamma}$ – пониженная скорость;

$m_0 = 0,5 \text{ т}$ – масса грузозахватного приспособления;

$C_K = 50 \text{ МН} \cdot \text{м/рад}$ – крутильная жесткость;

$K_{РБ} = 1,3$ – коэффициент, учитывающий трение реборд колес;

$\alpha = 0,5$ – коэффициент сцепной массы, отношение числа приводных колес-опор к общему числу колес-опор.

А3. Электропривод моста

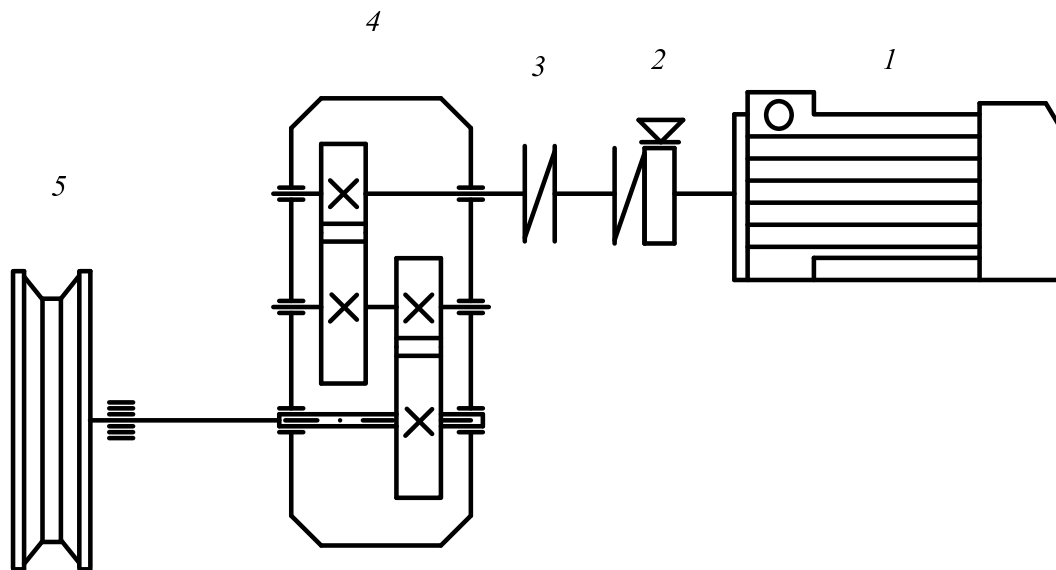


Рисунок А3 – Кинематическая схема механизма передвижения моста:
1 – двигатель, 2 – тормоз, 3 – муфта, 4 – редуктор, 5 – ходовое колесо

Мост крана выполняет операцию перемещения поднятого груза с площадки загрузки на площадку выгрузки. На площадке загрузки груз зацепляется, механизм подъема обеспечивает подъем груза. Включается двигатель моста, осуществляется перемещение моста с грузом с установившейся рабочей скоростью V_p . По прибытии к площадке выгрузки двигатель затормаживается, переключается на пониженную скорость с целью обеспечения точности остановки, мост останавливается в заданном месте, переместившись на длину L . Происходит опускание груза, его отцепляют, пустой крюк поднимается. Включается двигатель для движения в обратную сторону с установившейся скоростью V_b , мост возвращается на площадку загрузки, пройдя вновь расстояние L .

Таким образом, мост совершает возвратно-поступательное движение на длину L от одного крайнего положения до другого. В цикл работы моста входит время пауз, когда мост стоит, производятся зацепление груза, его подъем, опускание, расцепление, подъем и опускание пустого крюка.

Расчетные соотношения приводятся в литературе [13].

Технологические параметры механизма приведены в таблице А3.

Таблица А3 – Технические данные механизма передвижения моста

Варианты	Масса груза,	Масса моста	Масса тележки	Скорость передвижения	Перемещение моста	Диаметр колеса	Ускорение моста	Время работы	Число циклов
	т	т	т	М/с	м	м	М/с ²	с	1/час
	m	m	m_T	V_M	L	D_K	$a_{доп}$	t_p	z
141	10	30	5	2	15	0.56	0,4	25	60
142	10	28	4.8	2.1	30	0.56	0,4	40	35
143	10	26	4.6	2.2	20	0.56	0,4	30	45
144	15	35	6	1.8	25	0.63	0,35	35	40
145	15	37	6	1.7	15	0.63	0,35	30	45
146	15	39	6	1.6	20	0.63	0,35	35	40
147	20	41	7	2	25	0.71	0,3	30	45
148	20	43	7	2.1	30	0.71	0,3	35	40
149	20	45	7	2.2	25	0.71	0,25	30	45
150	20	47	7	2	20	0.71	0,25	35	50
151	25	49	7,5	1,7	15	0,88	0,25	30	35
152	25	51	7,5	1,8	20	0,88	0,2	35	40
153	25	53	7,5	1,9	25	0,88	0,2	25	45
154	25	55	7,5	2	30	0,88	0,2	20	50
155	25	57	8	2,1	35	0,75	0,35	25	35
156	30	59	8	2,2	30	0,75	0,3	30	40
157	30	57	8	2,1	25	0,75	0,25	35	45
158	30	55	8	2	20	0,75	0,2	25	50
159	30	53	9	1,9	15	0,84	0,2	40	35

Принять:

$d_{ст} = 0,25 \cdot D_K$ – диаметр ступицы колеса моста;

$\mu = 0,015...0,02$ – коэффициент трения скольжения;

$J_{ш} = 0,4 \text{ кгм}^2$ – момент инерции тормозного шкива;

$f = 0,5 \text{ мм}$ – коэффициент трения качения;

$v_{п} = 0.2 \cdot v_{г}$ – пониженная скорость перед точной остановкой;

$m_0 = 0,5 \text{ т}$ – масса грузозахватного приспособления;

$C_K = 50 \text{ МН} \cdot \text{м/рад}$ – крутильная жесткость;

$K_{РБ} = 1,3$ – коэффициент, учитывающий трение реборд колес;

$\alpha = 0,5$ – коэффициент сцепной массы, отношение числа приводных колес-опор к общему числу колес-опор.

А.4 Электропривод грузового лифта

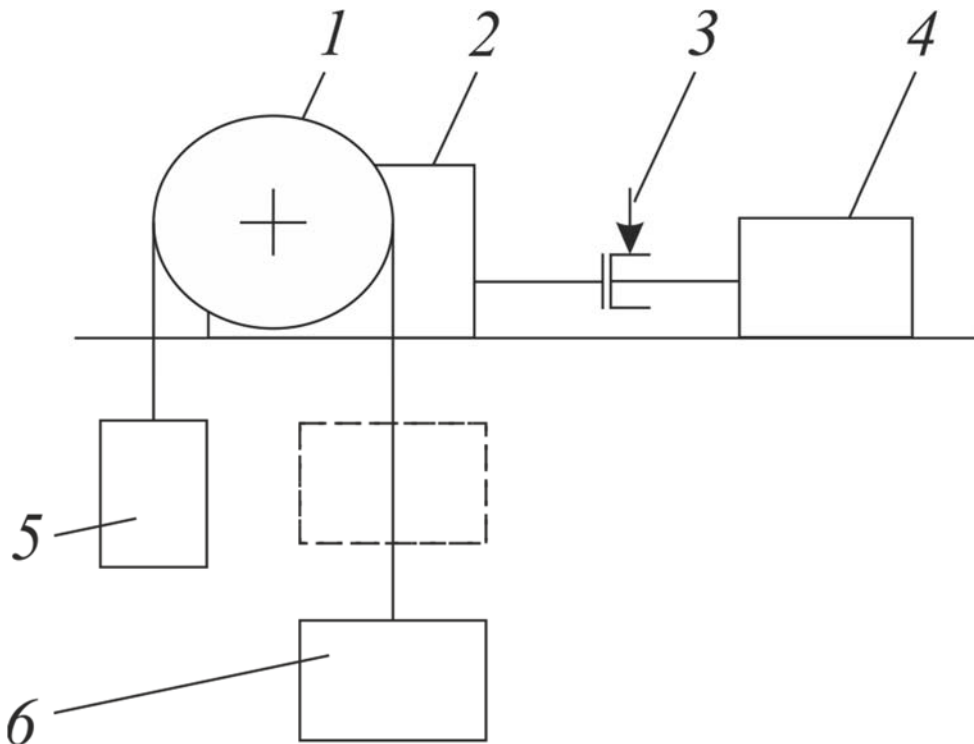


Рисунок А4 – Кинематическая схема лифта: 1 – канатопроводящий шкив;
2 – редуктор; 3 – тормозной шкив; 4 – двигатель;
5 – клетка; 6 – противовес

Грузовой лифт предназначен для подъема груза с нижней площадки на верхнюю. Вниз клетка может спускаться как без груза, так и с грузом.

После загрузки лифта на нижней площадке лифт включается для движения вверх. При пуске необходимо ограничивать ускорение на уровне допустимого. Подъем клетки происходит с установившейся скоростью v_p . Перед остановкой лифта электропривод следует перевести на пониженную скорость движения с целью обеспечения точной его остановки. При достижении верхней площадки электродвигатель отключается, на вал двигателя накладывается тормозной шкив.

После разгрузки лифта (и его загрузки – при необходимости) электропривод включается на спуск с заданным ускорением. На подходе к нижней площадке двигатель переводится на пониженную скорость, обеспечивая точную остановку.

Цикл работы лифта включает в себя времена подъема и опускания клетки, а также времена загрузки и выгрузки

В процессе расчета необходимо определить наиболее загруженный для двигателя режим работы, обеспечить выполнение требований по ускоре-

нию лифта и возможность его работы с разными грузами на подъем и на спуск.

Технологические параметры механизма приведены в таблице А4.

Таблица А4 – Технические данные грузового лифта

Вариант	Масса груза	Масса клетки	Масса противовеса	Диаметр шкива	Высота подъема	Скорость подъема	Время работы	Число циклов
	m_{Γ}	m_{Π}	$m_{\text{К}}$	D	h	v_{Γ}	$t_{\text{р}}$	z
	т	т	т	м	м	м/с	с	1/час
161	5	7,5	10	0,3	6	0,2	80	30
162	5	6	9,5	0,4	8	0,25	85	30
163	4	6	9	0,4	7	0,2	90	30
164	4	6,5	8,5	0,35	9	0,25	90	30
165	3,5	6	8	0,25	4	0,2	60	50
166	3	5	6,5	0,25	5	0,2	50	50
167	3,2	5,5	7	0,25	7	0,25	70	40
168	2,5	4	5,2	0,3	5	0,2	50	40
169	2	3	4	0,3	9	0,25	70	30
170	1,5	2,3	3	0,3	8	0,25	60	40
171	2	3	4	0,35	7	0,2	65	30
172	2,5	3,5	4,5	0,35	6	0,25	70	40
173	3	4	5	0,45	5	0,2	75	50
174	3,5	4,5	5,5	0,45	6	0,25	80	30
175	4	5	6	0,45	8	0,2	85	40
176	4,5	5,5	6,5	0,45	9	0,25	90	50
177	5	6	7	0,3	7	0,2	85	50
178	5,5	6,5	7,5	0,3	5	0,25	80	40
179	6	7	8	0,25	9	0,2	75	40

Принять:

$a_{\text{доп}} = 0,5 \text{ м/с}^2$ – допустимое ускорение;

$d_{\text{СТ}} = 0,25 \cdot D_{\text{К}}$ – диаметр ступицы шкива;

$\mu = 0,015 \dots 0,02$ – коэффициент трения скольжения ;

$J_{\text{Ш}} = 0,4 \text{ кгм}^2$ – момент инерции тормозного шкива;

$v_{\Pi} = 0,2 \cdot v_{\Gamma}$ – пониженная скорость;

$C_{\text{К}} = 50 \text{ МН} \cdot \text{м/рад}$ – крутильная жесткость;

$K_{\text{ТР}} = 1,3$ – коэффициент, учитывающий трение кабины при движении по направляющим.

А5. Электропривод рольганга перед ножницами

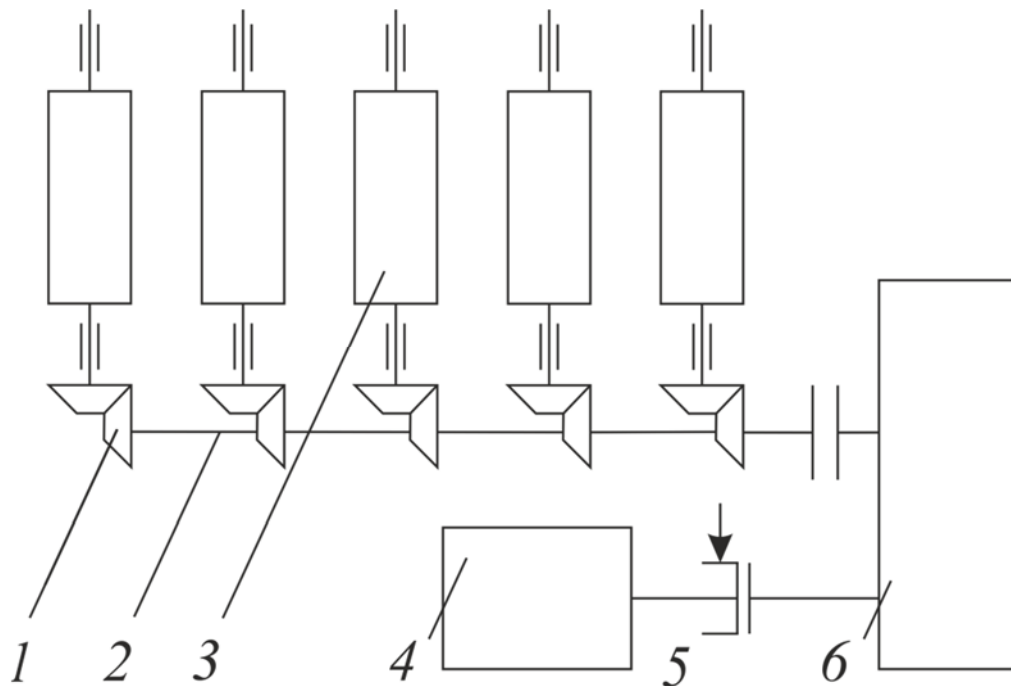


Рисунок А.5 – Кинематическая схема рольганга:

1 – коническая шестерня; 2 – продольный вал; 3 – ролик;
4 – электродвигатель; 5 – тормозной шкив; 6 – редуктор

Рольганг перед ножницами служит для перемещения заготовки, установки её для пореза на заданной отметке.

Заготовка длиной L подается на рольганг транспортером. Рольганг запускается, перемещает заготовку на длину $L/2$ и останавливается. Рез заготовки ножницами происходит при неподвижном рольганге, отрезанная часть заготовки снимается с рольганга отводящим транспортером. После этого рольганг запускается вторично, перемещая оставшуюся часть заготовки (длиной $L/2$) за ножницы, откуда она снимается с рольганга. Затем цикл повторяется.

Для точной установки заготовки перед порезом перемещение полной заготовки (рабочий ход рольганга) производят при рабочей скорости v_p , а транспортирование оставшейся части – при повышенной скорости возвратного движения скорости $v_v = 1,2 \cdot v_p$.

При расчете мощности двигателя рольганга необходимо учитывать возможность буксования роликов по заготовке, которое может возникнуть

при кратковременной остановке заготовки (вследствие удара по боковым линейкам рольганга и по другим причинам).

Технологические параметры механизма приведены в таблице А5.

Таблица А5 – Технические данные рольганга перед ножницами

Вариант	Масса ролика	Диаметр ролика	Момент инерции ролика	Число роликов	Масса заготовки	Длина заготовки	Скорость рабочего хода	Время работы	Число циклов
	m_p	D	J_p	N	m_3	L	v_p	t_p	z
	т	м	кгм ²	—	т	м	м/с	с	1/час
181	1,2	0,5	36	16	7,5	20	0,5	45	70
182	1	0,4	20	15	7	16	0,4	45	70
183	1	0,4	20	15	7,5	20	0,3	40	70
184	1,2	0,5	36	20	8	24	0,6	45	70
185	0,8	0,3	10	15	7,5	20	0,3	45	70
186	1	0,4	20	12	7,3	18	0,5	40	70
187	1	0,4	20	20	7	24	0,6	45	70
188	0,8	0,3	10	15	7	24	0,7	40	80
189	0,8	0,3	10	20	6,5	20	0,5	35	80
190	0,8	0,3	10	12	7	16	0,5	35	80
191	1,2	0,5	36	15	6	16	0,5	35	80
192	1	0,2	20	16	8	14	0,4	40	80
193	1,1	0,4	20	15	7,5	20	0,5	36	80
194	1	0,5	20	12	7	14	0,3	38	80
195	1,2	0,5	16	15	9	24	0,7	40	70
196	1,2	0,2	9	16	8,5	22	0,4	45	80
197	1	0,4	16	18	8	20	0,4	35	70
198	1,1	0,2	20	20	7,5	18	0,5	38	80
199	0,8	0,5	10	16	7	16	0,3	36	70

Принять:

$a_{\text{доп}} = 1 \text{ м/с}^2$ – допустимое ускорение;

$d_{\text{ст}} = 0,25 \cdot D_k$ – диаметр шейки ролика;

$f = 5 \text{ мм}$ – коэффициент трения качения;

$\mu_{\text{п}} = 0,015 \dots 0,02$ – коэффициент трения скольжения;

$J_{\text{ш}} = 0,4 \text{ кгм}^2$ – момент инерции тормозного шкива;

$v_{\text{ПВ}} = 1,2 \cdot V_{\text{р}}$ – скорость возвратного движения;

$v_{\text{П}} = 0,2 \cdot V_{\text{р}}$ – пониженная скорость;

$C_{\text{К}} = 50 \text{ МН} \cdot \text{м/рад}$ – крутильная жесткость;

$J_{\text{В}} = 5 \text{ кгм}^2$ – момент инерции продольного вала.

А6. Электропривод цепного транспортера

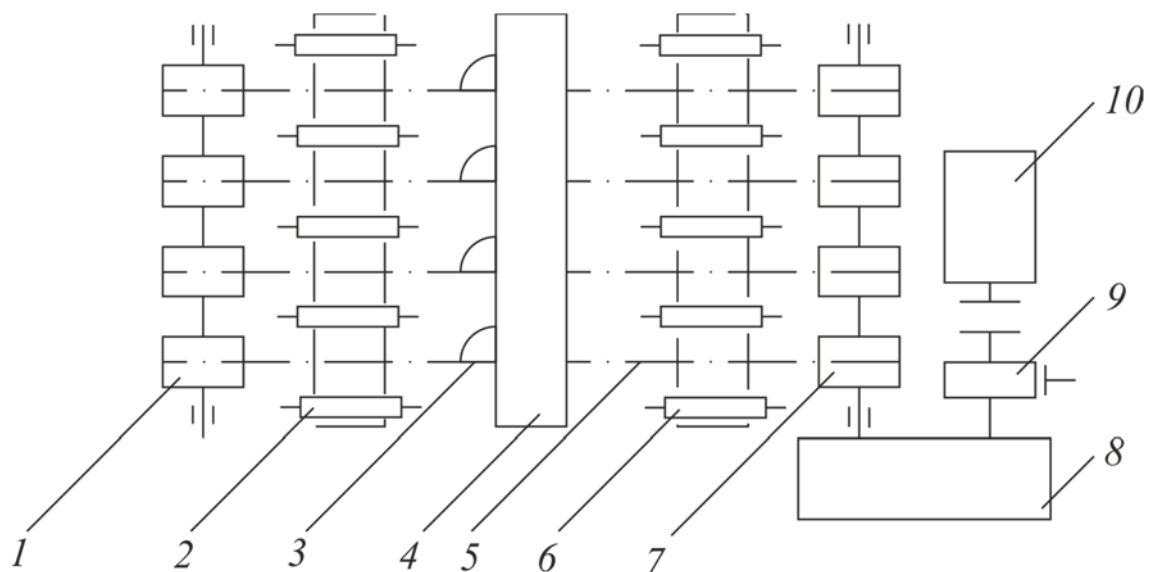


Рисунок А6 – Кинематическая схема цепного транспортера:

1 – ведомый вал со звездочками; 2 и 6 – рольганги;
3 – упор; 4 – заготовка; 5 – цепь; 7 – ведущий вал со звездочками;
8 – тормозной шкив; 9 – редуктор; 10 – электродвигатель

Цепной транспортер служит для передачи заготовки по направляющим с рольганга 2 на рольганг 6. Движение заготовки обеспечивается с помощью упоров, закрепленных на цепях, натянутых между звездочками ведущего и ведомого валов.

В исходном положении транспортера упоры располагаются за рольгангом 2. После подачи заготовки и остановки рольганга транспортер разгоняется, через 0,2 м зацепляет заготовку и перемещает её на рабочей скорости v_p к рольгангу 6. После достижения заготовкой требуемого положения транспортер реверсируется и на скорости $v_B > v_p$ возвращается в исходное положение.

Следующий цикл начинается с момента подачи на рольганг 2 новой заготовки и ее полной остановки на рольганге.

Расчетные соотношения приводятся в литературе [13].

Технологические параметры механизма приведены в таблице А6.

Таблица А6 – Технологические параметры цепного транспортера

Вариант	Масса вала со звездочками	Диаметр звездочки	Момент инерции вала со звездочками	Масса заготовки	Длина перемещения заготовки	Скорость рабочего хода	Время работы	Число циклов
	m_B	D	J_P	m_3	L	v_P	t_P	z
	т	м	кгм ²	т	м	м/с	с	1/час
200	2	0,3	60	7,5	5	0,5	22	60
201	2,4	0,3	60	7	5	0,4	25	70
202	2,8	0,3	60	7,5	6	0,6	25	80
203	3,2	0,4	75	8	6	0,6	28	90
204	3,6	0,4	75	7,5	7	0,5	25	100
205	4	0,4	75	7,3	7	0,5	28	90
206	4,4	0,5	90	7	8	0,6	28	90
207	4,8	0,5	90	7	8	0,7	28	80
208	5,2	0,5	90	6,5	7	0,5	25	100
209	5,6	0,5	90	7	7	0,5	28	90
210	6	0,6	100	6	8	0,5	30	80
211	6,4	0,6	100	8	8	0,4	30	70
212	6,8	0,6	100	7,5	7	0,5	30	60
213	7,2	0,6	100	7	6	0,4	30	70
214	7,4	0,6	100	7,5	8	0,5	22	80
215	7,6	0,7	110	7	9	0,6	25	90
216	7,8	0,7	110	7,5	9	0,7	25	100
217	8	0,7	110	8	7	0,6	28	90
218	8,2	0,7	110	7,5	8	0,5	28	80
219	8,4	0,7	110	6,5	9	0,4	28	70

Принять:

$a_{\text{доп}} = 1 \text{ м/с}^2$ – допустимое ускорение;

$d_{\text{ст}} = 0,25 \cdot D_K$ – диаметр шейки ролика;

$\mu_{\text{п}} = 0,015 \dots 0,02$ – коэффициент трения скольжения;

$\mu_{\text{с}} = 0,015 \dots 0,02$ – коэффициент трения скольжения по направляющим;

$J_{\text{ш}} = 0,4 \text{ кгм}^2$ – момент инерции тормозного шкива;

$v_B = 1,5 \cdot V_P$ – скорость возвратного движения, м/с;

$C_K = 50 \text{ МН} \cdot \text{м/рад}$ – крутильная жесткость.

А7. Электропривод толкателя методической печи

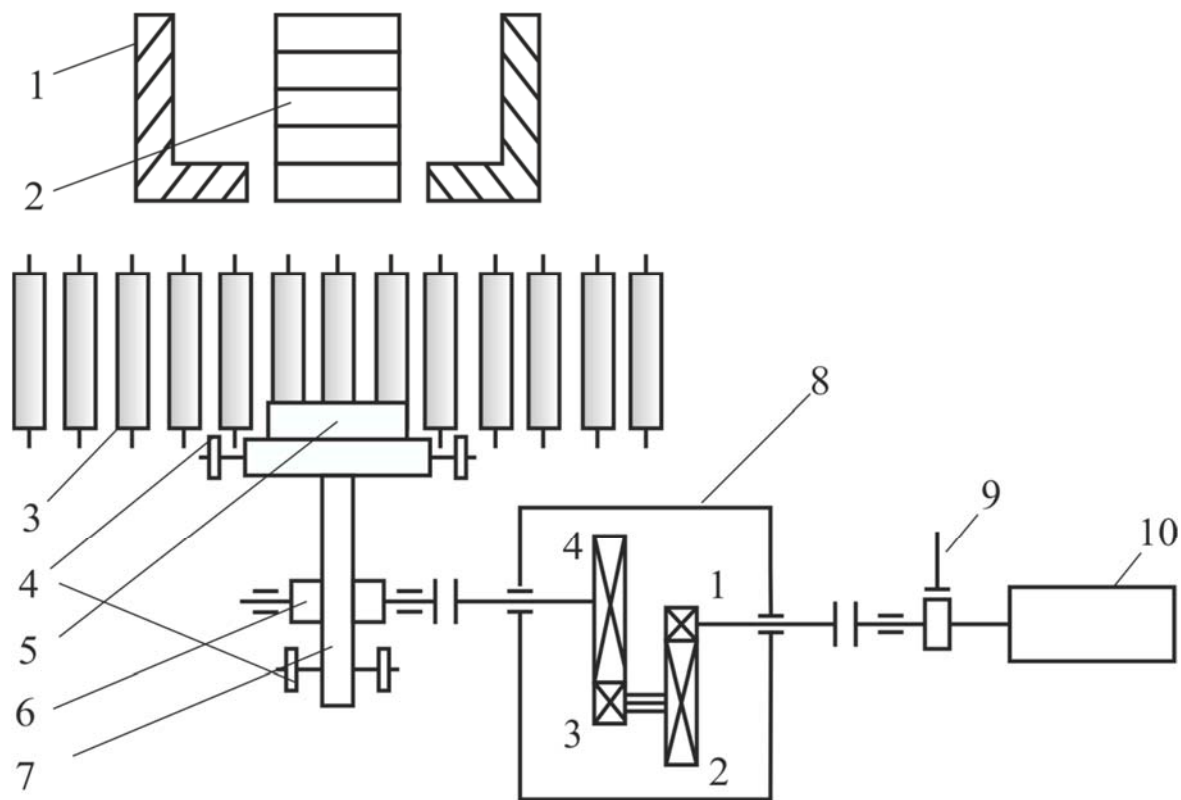


Рисунок А7 – Кинематическая схема толкателя:

1 – печь; 2 – заготовки в печи; 3 – подающий рольганг; 4 – опорный ролик;
5 – заготовка; 6 – реечная шестерня; 7 – толкатель;
8 – редуктор; 9 – тормозной шкив; 10 – электродвигатель

Толкатель служит для подачи очередной заготовки с рольганга в печь и для продвижения по поду печи всех лежащих в ней заготовок.

После подачи рольгангом заготовки толкатель находится на расстоянии b от заготовки. Включается двигатель, толкатель подходит к заготовке и под нагрузкой на рабочей скорости v_p перемещает заготовку на расстояние L до соприкосновения её с заготовками, лежащими в печи, а затем перемещает все заготовки вместе на ширину b одной заготовки. Последняя заготовка выталкивается из печи. После этого толкатель реверсируется и на скорости $v_B > v_p$ возвращается в исходное положение.

Расчетные соотношения приводятся в литературе [13].

Технологические параметры механизма приведены в таблице А7.

Таблица А7 –Технические данные толкателя

Вариант	Масса штанги с рейкой	Диаметр реечной шестерни	Момент инерции вала со звездочками	Масса одной заготовки	Ширина одной заготовки	Длина перемещения заготовки	Скорость рабочего хода	Время работы	Число циклов
	$m_{ш}$	D	J_p	m_3	b	L	v_p	t_p	z
	т	м	кгм ²	т	мм	м	м/с	с	1/час
221	5,4	0,3	60	0,9	200	5	0,2	22	60
222	6	0,3	60	1	300	5	0,3	18	45
223	5	0,3	60	0,8	200	6	0,2	22	40
224	6	0,4	75	0,9	200	6	0,2	22	30
225	4	0,4	75	0,6	300	7	0,3	20	40
226	3	0,4	75	0,4	200	7	0,3	20	45
227	6	0,5	90	1,5	250	8	0,25	19	50
228	5	0,5	90	0,8	150	8	0,3	20	55
229	5	0,5	90	0,8	200	7	0,25	19	60
230	6	0,5	90	0,9	250	7	0,25	20	65
231	8	0,6	100	1,5	300	8	0,2	21	60
232	6	0,6	100	1	150	8	0,3	18	55
233	2,5	0,6	100	0,3	200	7	0,45	18	50
234	2,5	0,6	100	0,3	250	6	0,4	20	45
235	3	0,6	80	1,5	300	5	0,4	18	55
236	4	0,5	75	2	250	5	0,45	18	50
237	5	0,4	60	1,5	150	6	0,4	21	45
238	6	0,3	90	2	200	7	0,4	20	60
239	5,5	0,3	100	2	300	8	0,3	19	50

Принять:

$a_{доп} = 1 \text{ м/с}^2$ – допустимое ускорение;

$d_{ст} = 0,25 \cdot D_K$ – диаметр шейки ролика;

$\mu_{п} = 0,015...0,02$ – коэффициент трения скольжения;

$f = 2 \text{ мм}$ – коэффициент трения качения опорных роликов;

$\mu_c = 0,15...0,2$ – коэффициент трения скольжения заготовок по поду печи;

$J_{ш} = 0,4 \text{ кгм}^2$ – момент инерции тормозного шкива;

$v_B = 1,5 \cdot v_p$ – скорость возвратного движения, м/с;

$C_K = 50 \text{ МН} \cdot \text{м/рад}$ – крутильная жесткость;

$N = 5$ – количество заготовок в печи.

А8. Электропривод штабелирующего стола

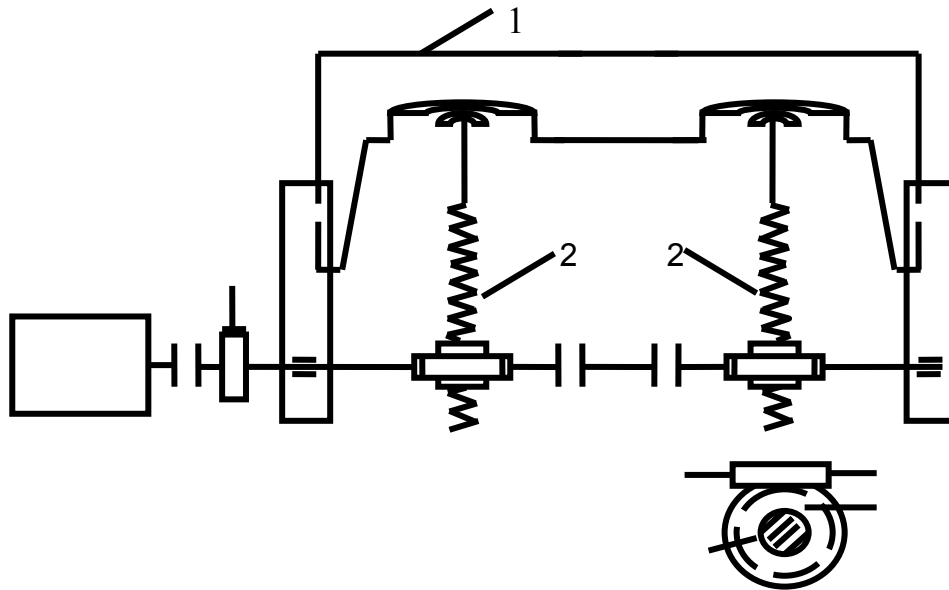


Рисунок А8 – Кинематическая схема штабелирующего стола: 1 – подъемный стол; 2 – винты; 3 – червяк; 4 – червячное колесо; 5 – тормоз; 6 – двигатель

Двигатель 6 вращает червяки 3, создавая вращение червячных колес 4. Червячные колеса осуществляют преобразование вращательного движения в поступательное движение винтов 2, на которые опирается подъемный стол 1.

После каждой подачи сляба включается двигатель, и стол опускается на высоту сляба. Когда на столе набирается заданное число слябов, двигатель включается на подъем всей стопы слябов до верхнего крайнего положения.

Расчетные соотношения приводятся в литературе [13].

Технологические параметры механизма приведены в таблице А8.

Принять:

$h_{сл} = 0,2$ м – высота сляба;

$v_{п} = 0,04$ м/с – скорость подъема;

$h_{в} = 0,05$ м, – шаг винта;

$a_{доп} = 0,2$ м/с² – допустимое ускорение рабочего органа;

$J_{м} = 1,2$ кгм² – момент инерции муфты;

$m_3 = 3$ – число заходов червяка;

$\eta_{чп} = 0,7$ – КПД червячной пары

$k_p = 1,2$ – коэффициент трения штабелирующего стола при движении по направляющим вследствие возможного перекоса;

$J_{ш} = 0,4$ кгм² – момент инерции тормозного шкива.

Таблица А8 – Технические данные штабелирующего стола

Вариант		241	242	243	244	245	246	247	248	249	250
m_c	Масса стола, т	33	34	35	34	35	36	37	38	38	40
m_{Γ}	Грузоподъемность, т	25	25,5	26	25,5	25	25,5	26	25,5	25	25,5
m_c	Масса сляба, т	5	5,1	5,2	5,1	5	5,1	5,2	5,1	5	5,1
m_B	Масса двух винтов с шаровыми пятами, т	3,5	4	5	4	4,5	4	3,5	3	4	4,5
J_D	Момент инерции винта, кгм ²	500	510	505	500	510	505	500	510	505	500
$J_{\text{ч}}$	Момент инерции червяка, кгм ²	9,5	9,4	9,3	9,2	9,51	9,52	9,53	9,55	9,58	9,45
$J_{\text{чк}}$	Момент инерции червячного колеса, кгм ²	100	105	110	115	110	105	100	105	110	105
$Z_{\text{чк}}$	Число зубцов червячного колеса	72	84	85	89	75	70	83	79	77	75
	Число слябов в мин	6	5	7	8	6	6	7	8	5	3

А9. Электропривод сталкивателя слябов

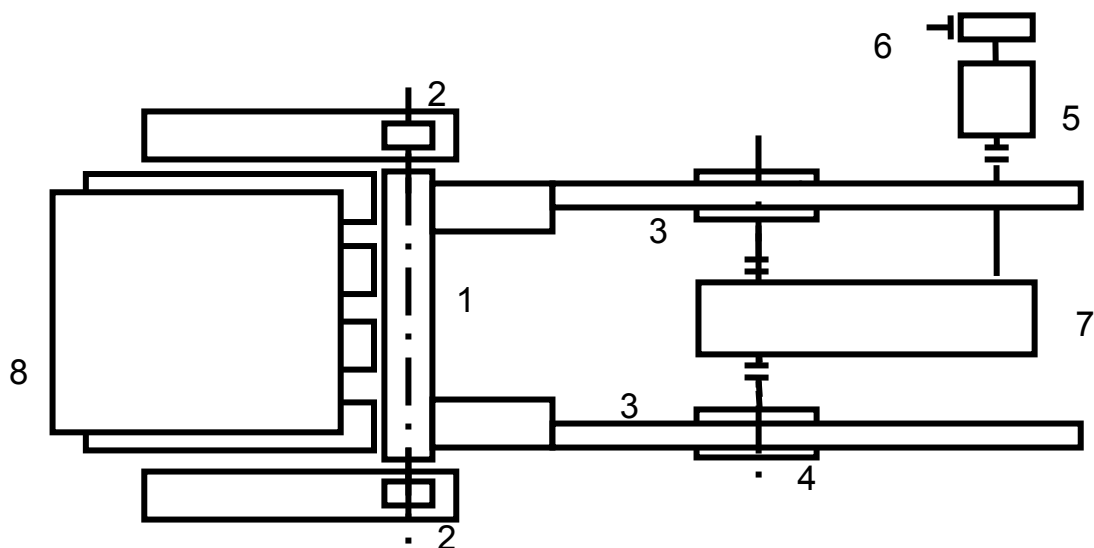


Рисунок А9 – Кинематическая схема сталкивателя слябов:

1 – толкатель; 2 – опорные ролики; 3 – зубчатая рейка;
4 – ведущее колесо; 5 – двигатель; 6 – тормоз; 7 – редуктор

Двигатель 5 через редуктор 7 вращает ведущие колеса 4. Толкатель 1 опорными роликами 2 располагается на раме и перемещается за счет зубчатых реек 3, приводимых в поступательное движение ведущими колесами 4.

Сталкиватель включается в работу при подходе очередного сляба 8 и сталкивает его по роликам на штабелирующий стол, после чего возвращается в исходное положение. После набора стопы слябов сталкиватель проталкивает ее в холодильник.

Одиночный сляб проталкивается с рабочей скоростью. При проталкивании стопы скорость движения понижается, при возврате в исходное положение – скорость повышается.

Кинематическая схема сталкивателя слябов приведена на рисунке А9.

Технические данные – в таблице А9.

Принять:

$a_{\text{доп}} = 0,5 \text{ м/с}^2$ – допустимое ускорение рабочего органа;

$J_{\text{ш}} = 0,4 \text{ кгм}^2$ – момент инерции тормозного шкива;

$v_{\text{в}} = 1,5 \cdot v_{\text{вр}}$ – скорость обратного хода, м/с;

$\mu_{\text{с}} = 0,05$ – коэффициент трения при движении сляба по роликам;

$D_{\text{ц}} = 0,14$ – диаметр цапф опорного ролика, м.

Таблица А9 – Технические данные сталкивателя слябов

Вариант	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265
Масса одного сляба, кг	550	500	550	450	500	550	500	450	500	600	600	650	450	600	550
Число слябов в стопе	5	5	5	6	6	6	4	4	4	6	4	5	6	4	5
Скорость сталкивания, м/с: одного сляба стопы слябов	0,55 0,25	0,5 0,2	0,52 0,22	0,51 0,21	0,5 0,21	0,55 0,24	0,54 0,2	0,53 0,21	0,54 0,2	0,56 0,23	0,5 0,25	0,51 0,24	0,52 0,23	0,53 0,22	0,54 0,21
Ход штанги, м: при сталкивании одного сляба стопы слябов	8 5	7 4	8 5	9 5	8 5	7 4	6 4	7 4	8 5	9 6	9 6	9 6	9 6	9 6	9 6
Частота подачи слябов в мин.	3	4	4	4	4	3	3	3	4	3	3	4	3	4	3
Диаметр опорного ролика, м	0,28	0,27	0,26	0,27	0,28	0,27	0,26	0,27	0,28	0,29	0,26	0,27	0,28	0,29	0,28
Масса толкателя, кг	600	610	620	630	640	650	650	640	630	620	650	640	630	640	620
Масса штанги с рейкой, кг	650	660	670	680	700	700	710	690	680	670	670	680	700	690	710
Диаметр ведущего колеса, м	0,36	0,4	0,41	0,42	0,41	0,4	0,39	0,38	0,37	0,36	0,37	0,38	0,39	0,4	0,42
Момент инерции, ведущего колеса, кгм ²	9	10	9,5	9,4	9,3	9,2	9,6	9,7	9,8	10	9,8	9,6	9,4	9,2	9

А10. Электропривод подъемника

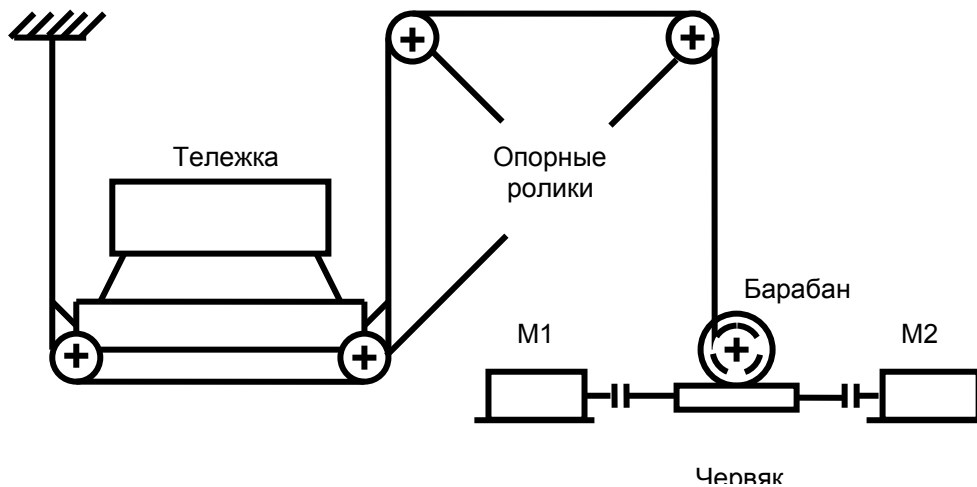


Рисунок А10 – Кинематическая схема подъемника

Подъемник производит подъем груза и опускание тележки с грузом (г) и без груза (п). Для привода подъемника используются два двигателя. При выходе из строя одного из двигателей другой должен обеспечить кратковременную работу подъемника.

Перед остановкой привод подъемника должен быть переведен на пониженную скорость порядка 10 – 15% от номинальной, обеспечивающую точный останов.

Кинематическая схема подъемника приведена на рисунке А10. Технические данные – в табл. А10.

Принять:

$a_{\text{доп}} = 0,2 \text{ м/с}^2$ – допустимое ускорение рабочего органа;

$\mu_{\text{п}} = 0,05$ – коэффициент трения в подшипниках;

$d_{\text{сб}} = d_{\text{ср}} = 0,15 \text{ м}$ – диаметр ступицы барабана и ролика;

$\eta_{\text{п}} = 0,7$ – КПД червячной пары.

Таблица А10 – Технические данные подъемника

Вариант	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279
Масса тележки, т	m_T	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.8	1.9	2	2.1	2.2	2.3
Масса груза, т	m_r	0,7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.0	1.1	1.2	1.3	1,4	1,3	1,2	1,1
Высота подъема, м	h	16	16	16	16	14	14	14	15	15	14	15	16	17
Диаметр барабана, м	D_B	0,58	0.6	0.62	0.63	0.65	0.6	0.62	0.65	0.7	0,66	0,64	0,62	0,6
Скорость подъема, м/с	v_n	0,7	0.6	0.62	0.63	0.65	0.6	0.62	0.65	0.7	0,68	0,64	0,62	0,6
Скорость спуска, м/с	v_0	0,7г	0.6п	0.62г	0.63п	0.65г	0.6п	0.62г	0.65г	0.7п	0,6п	0,65г	0,7г	0,7п
Момент инерции роликов и троса, кгм ²	J_{PT}	20	21	22	22	23	23	24	25	25	24	23	22	21
Момент инерции барабана с червячным колесом, кгм ²	J_{BK}	250	255	260	265	270	275	275	280	290	280	275	270	265
Момент инерции червяка и муфт, кгм ²	$J_{чм}$	0,2	0.2	0.2	0.2	0.25	0.25	0.25	0.3	0.3	0,3	0,25	0,2	0,25
Передаточное число червячной пары	$i_{ч}$	15	15	15	15	15	20	20	20	20	25	25	25	25

А.11. Электропривод механизма захватов манипулятора

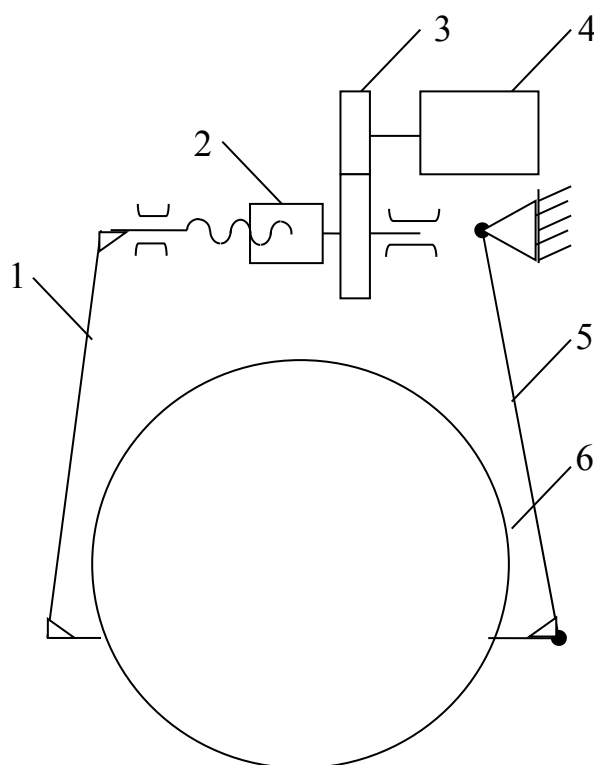


Рисунок А.11 – Кинематическая схема механизма захвата:
1 и 5 – захваты; 2 – винтовая передача; 3 – редуктор;
4 – электродвигатель; 6 – труба

Механизм захвата манипулятора служит для подхвата труб, которые транспортируются в пределах участка цеха.

При подхвате включается двигатель и с помощью редуктора и винтовой передачи захваты подводятся к трубе с установившейся скоростью V_c . Пройдя расстояние, равное половине длины выдвижения винта L , захваты приподнимают и зажимают трубу. После перемещения трубы (специальным механизмом) на нужную позицию происходит реверсирование механизма, захваты разводятся и при половине длины выдвижения винта L отпускают трубу. Скорость поступательного движения винта при разведении захватов $v_p > v_c$.

В расчетах принять массу захватов равной $0,1 \cdot m$ – приведенной массы, а противодействующую силу, создаваемую захватами, равной $0,1 \cdot Q$ – приведенной силы. В таблице А11 приведены значения m и Q с учетом захватов.

Таблица А11 – Технические данные механизма захвата манипулятора

Вариант	Противодействующая сила	Средний диаметр нарезки винта	Приведенная масса	Длина выдвижения винта	Скорость винта при сведении захватов	Скорость винта при разведении захватов	Время работы	Число циклов
	Q	d_B	m	L	v_C	v_P	t_P	z
	кН	мм	т	мм	мм/с	мм/с	с	1/ч
281	15	90	160	150	55	90	10	50
282	20	92	180	150	50	80	11	50
283	20	95	180	150	60	100	10	60
284	20	95	160	130	50	80	10	60
285	15	90	150	130	50	80	10	70
286	15	90	150	140	55	90	10	70
287	15	90	150	140	50	80	11	65
288	18	92	160	150	50	80	11	65
289	18	92	170	150	55	90	10	55
290	18	92	180	160	55	90	11	55
291	15	90	180	160	60	100	10	45
292	16	91	170	155	60	100	10	45
293	17	91	160	155	65	110	10	50
294	18	92	160	150	45	80	11	55
295	20	94	170	140	65	90	10	45
296	19	94	180	150	60	100	11	55

Принять:

$\varphi = 5^\circ$ – угол трения в нарезке винта;

$\alpha = 6^\circ$ – угол подъема нарезки винта;

$a_{\text{доп}} = 100 \text{ мм/с}^2$ – допустимое ускорение;

$d_{\text{ст}} = 0,5 \cdot d_B$ – диаметр шейки ролика;

$\mu_{\text{п}} = 0,015 \dots 0,02$ – коэффициент трения скольжения;

$J_{\text{ш}} = 0,4 \text{ кгм}^2$ – момент инерции тормозного шкива;

$C_{\text{л}} = 50 \text{ МН/м}$ – линейная жесткость;

$J_B = 5 \text{ кгм}^2$ – момент инерции продольного вала.

Приложение В Технические данные трансформаторов, реакторов, автоматических выключателей

Таблица В1 – Основные параметры трансформаторов средней мощности

№ п.п	Тип трансформатора	S_H , кВА	U_{1H} , В	U_{2H} , В	I_{2H} , А	U_{dH} , В	I_{dH} , А	P_{XX} , Вт	P_{K3} , Вт	U_{K3} , %	I_{XX} , %
1	ТСП–10/0,7	7,3	380	205	20,5	230	25	115	230	4,7	14
2	ТСП– 16/0,7	14,6	380	205	41,0	230	50	120	550	5,2	8
3	ТСП–16/0,7	14,6	380	410	40,5	460	25	120	550	5,2	8
4	ТСП–25/0,7	29,1	380	205	82,0	230	100	190	1100	5,5	6
5	ТСП–25/0,7	29,1	380	410	41,0	460	50	190	1100	5,5	6
6	ТСП–63/0,7	58	380	205	164	230	200	300	1900	5,5	5
7	ТСП–63/0,7	58	380	410	82	460	100	300	1900	5,5	5
8	ТСП–100/0,7	93	380	205	262	230	320	400	2300	5,8	4
9	ТСП–125/0,7	117	380	410	164	460	200	470	2700	5,8	3
10	ТСПМ–160/0,7	143	380	202	408	230	500	625	2550	4,7	5,2
11	ТСПМ–160/0,7	147	380	416	204	460	250	625	2550	4,7	5,2
12	ТСЗПМ–200/0,7	182	380	205	514	230	630	800	3100	5,5	1,5
13	ТСЗПМ–200/0,7	206	380	410	290	460	350	800	3200	5,75	1,5
14	ТСПМ–250/0,7	235	380	208	653	230	800	750	3800	4,5	3,4
15	ТСПМ–250/0,7	235	380	416	326	460	400	750	3700	4,5	3,4

Таблица В2 – Основные параметры токоограничивающих реакторов

№ п.п	Тип реактора	U_{1H} , В	I_{1H} , А	L_Φ , мГн	r_Φ , МОм
1	РТСТ – 20,5 – 2,02У3	410	20,5	2,02	265
2	РТСТ – 41 – 1,01 У3	410	41	1,01	102
3	РТСТ – 82 – 0,505 У3	410	82	0,505	37
4	РТСТ – 165 – 0,25 У3	410	165	0,25	13
5	РТСТ – 265 – 0,156 У3	410	265	0,156	7,2
6	РТСТ – 410 – 0,101 У3	410	410	0,101	3,8
7	РТСТ – 660 – 0,064 У3	410	660	0,064	2,1
8	РТСТ – 820 – 0,0505 У3	410	820	0,0505	1,4

Таблица В3 – Технические данные сглаживающих реакторов

Тип реактора	I_H , А	L_Φ , мГн	r_Φ , МОм	Масса, кг
ФРОС-65/0,5У3	250	1,5	6,8	85
ФРОС-65/0,5У3	320	1	4,5	84
ФРОС-125/0,5У3	500	0,75	3	120
ФРОС-250/0,5У3	250	6,5	17,6	216
ФРОС-250/0,5У3	320	4,2	11,5	220
ФРОС-250/0,5У3	800	0,6	1,7	215
ФРОС-500/0,5У3	500	3,25	7,5	340

Примечание: трансформаторы и реакторы для электропривода выдерживают перегрузки 75% в течение 60 с, 100% – 15 с, 150% – 10 с.

Среднеквадратичное значение тока за время цикла до 10 мин не должно превышать номинальный ток.

Таблица В4 – Технические данные автоматических выключателей

Тип выключателя	U_{1H} , В	I_{1H} , А	Фирма производитель
A0246 C60N 24345	2	220	<i>Schneider Electric</i>
A0248 C60N 24347	4	220	<i>Schneider Electric</i>
A0249 C60N 24348	6	220	<i>Schneider Electric</i>
A0251 C60N 24349	10	220	<i>Schneider Electric</i>
A0253 C60N 24350	16	220	<i>Schneider Electric</i>
A0255 C60N 24351	20	220	<i>Schneider Electric</i>
A0257 C60N 24352	25	220	<i>Schneider Electric</i>
A0259 C60N 24353	32	220	<i>Schneider Electric</i>
A0261 C60N 24354	40	220	<i>Schneider Electric</i>
A0263 C60N 24355	50	220	<i>Schneider Electric</i>
A0265 C60N 24356	63	220	<i>Schneider Electric</i>
A0290 C120N 18365	80	220	<i>Schneider Electric</i>
A0291 C120N 18367	100	220	<i>Schneider Electric</i>
A0292 C120N 18369	125	220	<i>Schneider Electric</i>
A0330 NSX160F	160	440	<i>Schneider Electric</i>
A0331 NSX250F	250	440	<i>Schneider Electric</i>
A0315 32678 NB400N	300	440	<i>Schneider Electric</i>
A0317 32676 NB400N	400	440	<i>Schneider Electric</i>
A0320 32876 NB600N	600	440	<i>Schneider Electric</i>

Таблица В5 – Сетевые, моторные дроссели и радиочастотные фильтры трехфазные

Мощность двигателя, кВт	Сетевые 3N моторные 3S дроссели 7,7 /4,2 (индуктивность, мГн/ ток, А)		Радиочастотные фильтры
1,5	ED3N-7,7//4,2	ED3S-16,3/3,8	
2,2	ED3N-3,5/9,0	ED3S-11,8/5,3	VFD022S43E
3,7	ED3N-3,5/9,0	ED3S-7,3/8,0	VFD037V43A
5,5	ED3N-1,3/17	ED3S-4,6/11	VFD055M43A
7,5	ED3N-1,3/17	ED3S-3,8/16	VFD075M43A
11	ED3N-0,74/33,5	ED3S-2,5/22	VFD110V43A
15	ED3N-0,74/33,5	ED3S-2,0/32	VFD150B(F)43A
18,5			VFD185B(F)43A
22	ED3N-0,36/50	ED3S-1,3/48	VFD220B(F)43A
30	ED3N-0,29/78	ED3S-1,03/58	VFD300B(F)43A
37	ED3N-0,29/78	ED3S-0,8/72	VFD370V43A
45	ED3N-0,19/115	ED3S-0,68/87	VFD450V43A
55	ED3N-0,19/115	ED3S-0,53/101	VFD550B(F)43A
75	ED3N-0,11/185	ED3S-0,4/144	VFD750B(F)43A
90	ED3N-0,11/185	ED3S-0,33/173	

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анфимов, М.И. Редукторы: конструкция и расчёт: альбом / М.И. Анфимов. – М.: Машиностроение, 1993. – 432 с.
2. Асинхронные электродвигатели серии 4А: справочник / А.Э. Кравчик, М.Н. Шлаф, В.И. Афонин и др. – М.: Энергоатомиздат, 1982.
3. Вешеневский, С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. – С.Н. Вешеневский. – М.: Энергия, 1977. – 432 с.
4. Гельман, М.В. Преобразовательная техника: учебное пособие / М.В. Гельман, М.М. Дудкин, К.А. Преображенский. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 425 с.
5. Драчев, Г.И. Теория электропривода: учебное пособие в 2 ч. / Г.И. Драчев. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. – Ч.1. – 207 с; Ч.2. – 203 с.
6. Инжиниринг электроприводов и систем автоматизации: учеб. пособие / под ред. В.А. Новикова, Л.М. Чернигова. – М: Изд. Академия, 2006. – 368 с.
7. Ключев, В.И. Теория электропривода: учебник для вузов / В.И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
8. Крановое электрооборудование: справочник / под ред. А.А. Рабиновича. – М.: Энергия, 1979. – 238 с.
9. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод: учебник для вузов. / В.В. Москаленко. – М.: Академия, 2007. – 416 с.
10. Стандарт предприятия: курсовые и дипломные проекты. Общие требования к содержанию и оформлению. СТО ЮУрГУ 04 – 2008. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2008. – 56 с.
11. Электродвигатели постоянного тока металлургического и кранового типов Д810-Д818. ОК 01.31.10-94.ЭТ. – М.; ИЭ, 1994. – 12 с
12. Электротехнический справочник. – М.: Академия, 2008. – Т. 4 – 700 с.
13. Яуре, А.Г. Крановый электропривод: справочник / Яуре А.Г., Певзнер Е.М. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 344 с.

Учебное издание

Драчев Геннадий Иванович,
Шишков Александр Николаевич,
Бычков Антон Евгеньевич,
Брылина Олеся Геннадьевна

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Учебное пособие к курсовому проектированию

Техн. редактор *А.В. Миних*

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 27.12.2017. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 7,67. Тираж 30 экз. Заказ 513/298.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.