

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Оренбургский государственный университет»

**А.А. КУВШИНОВ, В.М. ВАКУЛЮК, В.Б. ФАТЕЕВ**

# **ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

Рекомендовано Ученым советом государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Оренбургский государственный университет» в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по программам высшего профессионального образования по специальности 140604 Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов

Оренбург 2006

УДК 62-83(075.8)  
ББК 31.291-01я73  
К 88

Рецензент к.т.н., доцент Хрипко В.Л.

**Кувшинов А.А.**

К 88      **Теория электропривода: учебное пособие по курсовому проектированию/ А.А. Кувшинов, В.М. Вакулюк, В.Б. Фатеев. – Оренбург: ОГУ, 2006. – 126 с.**

Учебное пособие предназначено для студентов специальности 140604 Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов.

К 2202090000

ББК 31.291-01я73

© Кувшинов А.А., 2006  
Вакулюк В.М.,  
Фатеев В.Б.,  
© ГОУ ОГУ, 2006

## Содержание

Введение.....	4
<u>Цель курсового проекта и организация работы над ним.....</u>	<u>5</u>
<u>Содержание и объем курсового проекта.....</u>	<u>5</u>
<u>1 Введение.....</u>	<u>7</u>
<u>2 Кинематическая схема рабочей машины, ее описание и технические дан- ные.....</u>	<u>7</u>
<u>3 Расчет нагрузочной диаграммы рабочей машины.....</u>	<u>7</u>
<u>4 Предварительный расчет мощности электродвигателя и его выбор.....</u>	<u>11</u>
<u>5 Расчет приведенных статических моментов, моментов инерции и коэф- фициентов жесткости системы электрический двигатель – рабочая машина.....</u>	<u>13</u>
<u>6 Построение приближенной нагрузочной диаграммы электродвигателя.....</u>	<u>16</u>
<u>7 Предварительная проверка электродвигателя по нагреву и производи- тельности.....</u>	<u>22</u>
<u>8 Выбор системы электропривода и его структурная схема .....</u>	<u>23</u>
<u>9 Расчет и построение естественных механической и электро- механической характеристик выбранного электродвигателя .....</u>	<u>27</u>
<u>10 Расчет и построение искусственных характеристик электродвигателя.....</u>	<u>33</u>
<u>11 Расчет переходных режимов электропривода.....</u>	<u>68</u>
<u>12 Расчет и построение уточненной нагрузочной диаграммы электродви- гателя.....</u>	<u>79</u>
<u>13 Проверка электропривода на заданную производительность, по нагреву и перегрузочной способности электродвигателя.....</u>	<u>81</u>
<u>14 Принципиальная электрическая схема силовой части электропривода .....</u>	<u>85</u>
<u>15 Заключение .....</u>	<u>85</u>
Список использованных источников.....	86
Приложение А.....	87
Приложение Б.....	97
Приложение В.....	104

## **Введение**

Целью данного учебного пособия является облегчение самостоятельной работы студентов при выполнении курсового проекта по курсу «Теория электропривода».

Освоение методики и техники проектирования является неотъемлемой частью профессиональной подготовки инженера по специальности 140604 Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов.

В пособии приводятся варианты технического задания на курсовое проектирование, требования к оформлению и защите курсового проекта, его содержание и объем, а также теоретические обоснования выполнения технического задания на курсовое проектирование в различных вариантах.

В заключение приводится список литературы и данные электрических двигателей, которые могут быть использованы в курсовом проекте.

## **Цель курсового проекта и организация работы над ним**

Целью курсового проекта является систематизация и закрепление знаний по теории электропривода и развитие практических навыков самостоятельного решения инженерных задач, творческих способностей и умения пользоваться технической и справочной литературой.

Курсовой проект выполняется после изучения первой части курса «Теория электропривода». Задание на проектирование (приложение А) выдается студентам на первой неделе семестра. В задании указывается механизм, для которого необходимо спроектировать электропривод, кинематическая схема этого механизма, краткое описание его технологического процесса и основные технические данные, необходимые для проектирования.

Методы решения задач, возникающих по ходу проектирования, рассматриваются на практических занятиях и еженедельных консультациях, проводимых руководителем курсового проектирования.

При работе над проектом рекомендуется пользоваться данным учебным пособием, а также литературой, указанной в пособии и рекомендованной руководителем проектирования.

Курсовой проект состоит из пояснительной записки и графической части, которые должны быть оформлены в соответствии с требованиями ЕСКД и стандарта предприятия СТП ОГУ 110-01.

Выполненный студентом курсовой проект после проверки руководителем проектирования и исправления указанных ошибок и недостатков должен быть защищен в комиссии, состоящей из преподавателей кафедры. Защита проекта предусматривает краткое сообщение (доклад) исполнителя и его ответы на вопросы членов комиссии.

В докладе в краткой форме должны быть отражены все этапы проектирования и его результаты. Доклад должен быть рассчитан на 5-6 минут и иллюстрирован графической частью проекта.

Оценка курсового проекта комиссией учитывает правильность и обоснованность принятых решений и проведенных расчетов, качество оформления курсового проекта и качество ответов исполнителя на вопросы членов комиссии.

## **Содержание и объем курсового проекта**

Как было указано выше, курсовой проект состоит из пояснительной записки и графической части. Пояснительная записка включает в себя следующие разделы:

- 1) Введение.

2) Кинематическая схема рабочей машины, ее описание и технические данные.

3) Расчет нагрузочной диаграммы рабочей машины.

4) Предварительный расчет мощности электродвигателя и его выбор.

5) Расчет приведенных статических моментов, моментов инерции и коэффициентов жесткости системы электрический двигатель- рабочая машина.

6) Построение приближенной нагрузочной диаграммы электродвигателя.

7) Предварительная проверка двигателя по нагреву и производительности.

8) Выбор системы электропривода и его структурная схема.

9) Расчет и построение естественных механической и электромеханической характеристик электродвигателя.

10) Расчет и построение искусственных характеристик электродвигателя.

11) Расчет переходных режимов электропривода.

12) Расчет и построение уточненной нагрузочной диаграммы электродвигателя.

13) Проверка электропривода на заданную производительность, по нагреву и перегрузочной способности электродвигателя.

14) Принципиальная электрическая схема силовой части электропривода.

15) Заключение.

16) Список использованных источников.

Пояснительная записка выполняется на листах формата А4. В ней должны быть даны обоснования выбранных вариантов решений, приведены расчетные формулы и сами расчеты. Однотипные и повторяющиеся расчеты приводятся в табличной форме или в виде распечаток ЭВМ.

Графическая часть проекта выполняется на чертеже формата А1. В ней должны быть представлены:

1. Кинематическая схема и нагрузочная диаграмма рабочей машины.

2. Статические характеристики электропривода.

3. Структурная схема электропривода.

4. Нагрузочные диаграммы электропривода.

5. Принципиальная электрическая схема силовой части электропривода.

В случае необходимости (участие студента в проводимых на кафедре исследованиях, реальных разработках и т.п.) содержание и объем пояснительной записки и графической части проекта по согласию с руководителем курсового проекта могут быть изменены.

## **1 Введение**

В разделе «Введение» указывается тема курсового проекта и актуальность решаемой задачи. Необходимо коротко отразить преимущества и основные направления развития автоматизированного электропривода.

## **2 Кинематическая схема рабочей машины, ее описание и технические данные**

В этом разделе раскрывается принцип действия рабочей машины, приводится и описывается ее кинематическая схема, технические данные и технологические требования. Здесь же указывается род тока и тип электропривода, которые задаются руководителем курсового проектирования.

Схемы рабочих машин, описание технологических процессов работы, и варианты технических данных для проектирования представлены в приложении А. В приложении Б приведены основные формулы для расчета статических моментов рабочих механизмов.

### **1.1 Основные требования к проектируемому электроприводу**

Спроектированный в результате работы над курсовым проектом электропривод должен удовлетворять определенным требованиям:

- должна быть обеспечена заданная производительность механизма;
- электродвигатель в процессе работы не должен перегреваться;
- электродвигатель должен выдерживать возникающие кратковременные перегрузки;
- перемещение рабочего органа машины должно происходить с заданной скоростью, отклонение которой не должно превышать  $\pm 5\%$ ;
- среднее ускорение рабочего органа машины в пусковых и тормозных режимах не должно превышать заданного значения;
- электропривод должен обеспечивать минимум капитальных затрат и потерь энергии для заданного варианта.

## **3 Расчет нагрузочной диаграммы рабочей машины**

Для того, чтобы ориентировочно оценить требуемую для данного механизма мощность двигателя, необходимо определить тем или иным способом мощность или момент производственного механизма на разных участках его работы и скорости движения рабочего органа механизма на этих участках. Другими словами, необходимо построить нагрузочную диаграмму производственного механизма, дополненную его тахограммой. В зависимости от типа механизма и режима его работы сложность этой задачи лежит в широком диапазоне (от простейшей – в случае вентилятора,

компрессора и т.д., до сложнейшей – в случае уникального механизма, не имеющего аналога в практике).

Поэтому вопросы расчета и построения нагрузочных диаграмм производственных механизмов будут рассмотрены в отдельной работе кафедры автоматизированного электропривода.

Здесь же будем считать, что статические нагрузки рабочего органа механизма на разных участках работы определены, и скорости на этих участках известны. Режим работы механизма – повторно-кратковременный. Задание может отличаться ограничениями, накладываемыми на протекание переходных процессов. В данном курсовом проекте возможны два варианта: получение максимального быстродействия или ограничение допустимого ускорения рабочего органа механизма (ограничение момента двигателя в переходных процессах).

Поскольку электродвигатель и редуктор еще неизвестны, невозможно на данном этапе определить полные статические и динамические нагрузки электропривода. Поэтому в первом случае предварительный расчет мощности двигателя основывается только на учете статических нагрузок, а во втором случае появляется возможность учесть и часть динамических нагрузок, обусловленных изменениями кинетической энергии рабочих органов механизма.

Таким образом, та или иная нагрузочная диаграмма рабочего механизма (рисунки 3.1 и 3.2.) является заданием на проектирование непосредственно электропривода.

Механизм, работающий в повторно-кратковременном режиме, в каждом цикле совершает прямой ход с полной нагрузкой и обратный ход на холостом ходу или с малой нагрузкой. На рисунке 3.1 приведена нагрузочная диаграмма механизма без ограничения допустимого ускорения рабочего органа механизма, а на рисунке 3.2 с ограничением этого ускорения.

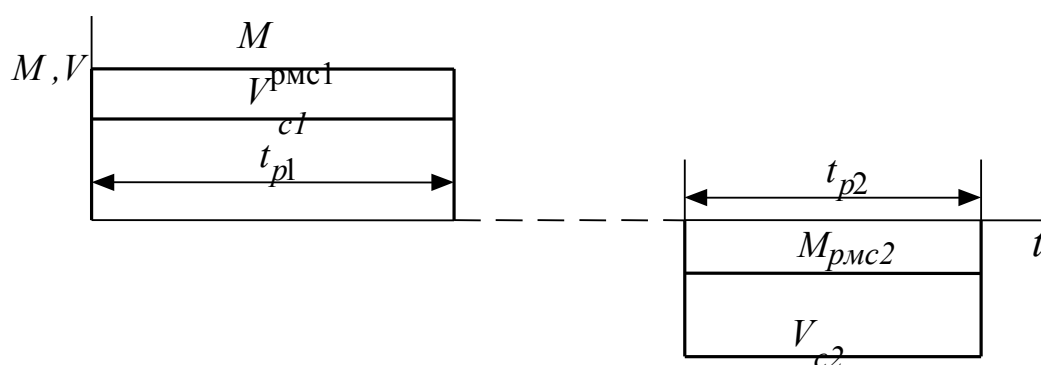


Рисунок 3.1



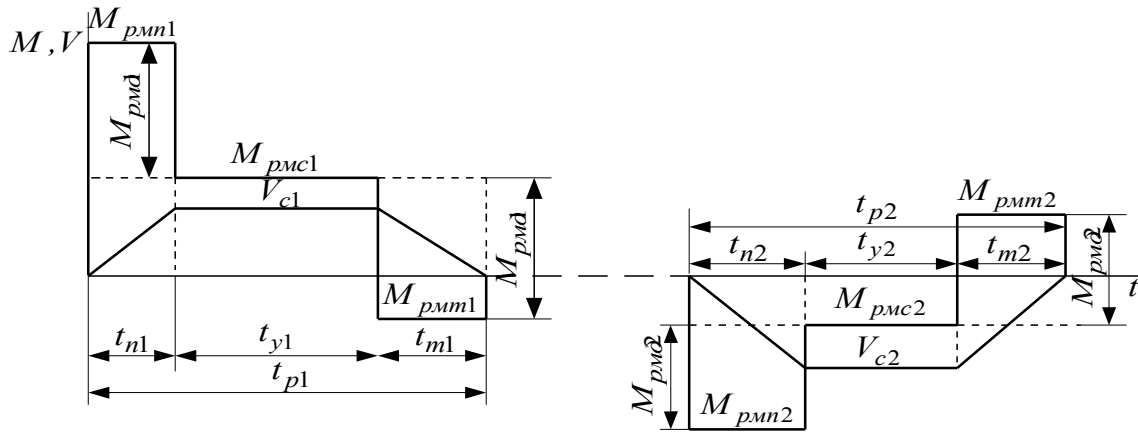


Рисунок 3.2

Здесь  $M_{pmc1}, M_{pmc2}$  – статические моменты при прямом и обратном ходах;  
 $M_{pmd1}, M_{pmd2}$  – динамические моменты при прямом и обратном ходах;

$M_{pmn1}, M_{pmn2}$  – пусковые моменты при прямом и обратном ходах;

$M_{pmt1}, M_{pmt2}$  – тормозные моменты при прямом и обратном ходах;

$V_{c1}, V_{c2}$  – скорости прямого и обратного ходов;

$t_{n1}, t_{m1}, t_{y1}$  – времена пуска, торможения и установившегося движения при прямом ходе;

$t_{n2}, t_{m2}, t_{y2}$  – времена пуска, торможения и установившегося движения при обратном ходе.

Для нагрузочной диаграммы на рисунке 3.1 заданы скорости  $V_{c1}, V_{c2}$  и длина перемещения  $L$ . Рассчитываются  $M_{pmc1}, M_{pmc2}, t_{p1}$  и  $t_{p2}$ .

Статические моменты рабочего механизма при прямом и обратном ходах для обеих нагрузочных диаграмм  $M_{pmc1}$  и  $M_{pmc2}$  в зависимости от типа механизма определяются по выражениям, приводимым в литературных источниках [5-11].

Времена работы определяются по выражениям:

$$t_{p1} = \frac{(1.2-1.4)L}{V_{c1}}, \quad t_{p2} = \frac{(1.2-1.4)L}{V_{c2}}. \quad (3.1)$$

Коэффициент (1.2-1.4) учитывает увеличение времени работы механизма из-за наличия в цикле двух пусков и двух торможений, когда скорость движения изменяется от 0 до установившегося значения (и наоборот).

Для нагрузочной диаграммы на рисунке 3.2 заданы скорости  $V_{c1}$ , и  $V_{c2}$ , длина перемещения  $L$  и допустимое ускорение  $a$ . Рассчитываются  $M_{pмc1}$ ,  $M_{pмc2}$ ,  $t_{n1}$ ,  $t_{n2}$ ,  $t_{m1}$ ,  $t_{m2}$ ,  $t_{y1}$ ,  $t_{y2}$ ,  $M_{pмд1}$ ,  $M_{pмд2}$ .

Время пуска и торможения:

$$t_{n1} = t_{m1} = \frac{V_{c1}}{a}, \quad t_{n2} = t_{m2} = \frac{V_{c2}}{a}. \quad (3.2)$$

Путь, проходимый рабочим органом машины за время пуска (торможения):

$$L_{n1} = L_{m1} = \frac{V_{c1}}{2} \cdot t_{n1} = \frac{V_{c1}^2}{2 \cdot a}, \quad L_{n2} = L_{m2} = \frac{V_{c2}}{2} \cdot t_{n2} = \frac{V_{c2}^2}{2 \cdot a}. \quad (3.3)$$

Путь, проходимый рабочим органом машины за время установившегося движения:

$$L_{y1} = L - (L_{n1} + L_{m1}) = L - \frac{V_{c1}^2}{a}, \quad L_{y2} = L - (L_{n2} + L_{m2}) = L - \frac{V_{c2}^2}{a}. \quad (3.4)$$

Время установившегося движения:

$$t_{y1} = \frac{L_{y1}}{V_{c1}}, \quad t_{y2} = \frac{L_{y2}}{V_{c2}}. \quad (3.5)$$

Время работы механизма при прямом и обратном ходах:

$$t_{p1} = t_{n1} + t_{y1} + t_{m1}, \quad t_{p2} = t_{n2} + t_{y2} + t_{m2}. \quad (3.6)$$

Динамические моменты рабочей машины:

$$M_{pмд1} = J_{pм1} \cdot \frac{2 \cdot a}{D}, \quad M_{pмд2} = J_{pм2} \cdot \frac{2 \cdot a}{D}, \quad (3.7)$$

где  $D$  – диаметр вращающегося элемента рабочей машины, преобразующего вращательное движение в поступательное (колесо, шкив, барабан, шестерня, звездочка и т.п.), м,

$J_{pм1}$ ,  $J_{pм2}$  – моменты инерции рабочей машины при прямом и обратном ходах.

$$\left. \begin{aligned} J_{pm1} &= J_1 + J_2 + \dots + J_i + (m_1 + m_2 + \dots + m_j) \cdot \frac{D^2}{4} \\ J_{pm2} &= J_1 + J_2 + \dots + J_k + (m_1 + m_2 + \dots + m_n) \cdot \frac{D^2}{4} \end{aligned} \right\}. \quad (3.8)$$

а)  $J_1 + J_2 + \dots + J_i$   
б)  $J_1 + J_2 + \dots + J_k$  } – моменты инерции вращающихся элементов рабочей машины при прямом (а) и обратном (б) ходах, кг · м<sup>2</sup>,  
а)  $m_1 + m_2 + \dots + m_j$   
б)  $m_1 + m_2 + \dots + m_n$  } – массы поступательно движущихся частей рабочей машины при прямом (а) и обратном (б) ходах, кг.

Полный момент рабочего механизма в динамическом режиме (пуск, торможение) при прямом и обратном ходах определяется по выражениям:

$$\left. \begin{aligned} M_{pm1} &= \pm M_{pmc1} \pm M_{pmd1} \\ M_{pm2} &= \pm M_{pmc2} \pm M_{pmd2} \end{aligned} \right\}. \quad (3.9)$$

При построении нагрузочных диаграмм и тахограмм следует особое внимание уделить направлению движения рабочего органа механизма и знакам статических и динамических моментов. За положительное направление движения следует принять прямое направление движения с грузом. Соответственно, и момент сопротивления (статический) рабочего механизма при этом направлении движения тоже следует принять положительным. При этом необходимо помнить, что нагрузка может быть активной и реактивной и, таким образом, в принципе, слагаемые выражений (3.8) могут иметь любой знак.

Следует также заметить, что для курсового проектирования могут быть предложены нереверсивные механизмы (например, непрерывного транспорта), работающие в повторно-кратковременном режиме с переменной нагрузкой в цикле. Это тоже должно быть учтено при построении нагрузочной диаграммы производственного механизма.

#### **4 Предварительный расчет мощности электродвигателя и его выбор**

Таким образом, в результате расчетов по вышеприведенным формулам координаты нагрузочных диаграмм на рисунках 3.1 и 3.2 получают конкретные значения, позволяющие рассчитать среднеквадратичное значение момента за цикл работы.

Для нагрузочной диаграммы на рисунке 3.1:

$$M_{сркв} = \sqrt{\frac{M_{рмс1}^2 \cdot t_{p1} + M_{рмс2}^2 \cdot t_{p2}}{(t_{p1} + t_{p2})}}. \quad (4.1)$$

Для нагрузочной диаграммы на рисунке 3.2:

$$M_{сркв} = \sqrt{\frac{M_{рмн1}^2 t_{n1} + M_{рмс1}^2 t_{y1} + M_{рмн1}^2 t_{m1} + M_{рмн2}^2 t_{n2} + M_{рмс2}^2 t_{y2} + M_{рмн2}^2 t_{m2}}{t_{n1} + t_{m1} + t_{n2} + t_{m2} + t_{y1} + t_{y2}}}. \quad (4.2)$$

Выражения (4.1) и (4.2) применимы как для реверсивных, так и для нереверсивных механизмов, так как знаки моментов на отдельных участках работы механизма при определении среднеквадратичного момента не имеют значения.

Фактическая относительная продолжительность включения определяется из выражений:

$$ПВ_{ф} = \frac{t_{p1} + t_{p2}}{t_{ц}}, \quad (4.3)$$

$$t_{ц} = \frac{3600}{N}, \quad (4.4)$$

где  $t_{ц}$  – длительность цикла работы, с,

$N$  – число включений двигателя в час (дается в задании на проектирование).

Имея значение среднеквадратичного момента производственного механизма за цикл, ориентировочную требуемую мощность двигателя можно определить по соотношению:

$$P_{двтрреб} = K \cdot M_{сркв} \cdot \frac{2 \cdot V_{сн}}{D} \cdot \sqrt{\frac{ПВ_{ф}}{ПВ_{н}}}, \quad (4.5)$$

где  $V_{сн}$  – скорость рабочего органа механизма ( $V_{с1}$ , или  $V_{с2}$ ), которая будет обеспечена электродвигателем при номинальных значениях напряжения, частоты и магнитного потока,

$ПВ_{н}$  – номинальное значение продолжительности включения, ближайшее к фактическому  $ПВ_{ф}$ ,

$K$  – коэффициент, учитывающий величину и длительность динамических нагрузок электропривода, а также потери в механических передачах и в электродвигателе.

Для нагрузочной диаграммы на рисунке 3.1  $K=1.5-2.0$ , а для нагрузочной диаграммы на рисунке 3.2  $K=1.3-1.5$ .

Теперь выбирается двигатель подходящего по условиям эксплуатации конструктивного исполнения. Причем его номинальная мощность при  $P_{Вн}$  должна быть несколько больше  $P_{двтроб}$ , полученной из выражения (4.5).

В пояснительной записке должны быть приведены все каталожные данные выбранного двигателя.

Затем определяется передаточное число редуктора:

$$i_p = \frac{\omega_n \cdot D}{2 \cdot V_{сн}}, \quad (4.6)$$

где  $\omega_n$  – номинальная угловая скорость выбранного электродвигателя.

Редуктор можно выбрать по справочнику, учитывая определенное передаточное число, номинальную мощность и скорость двигателя, а также режим работы механизма, для которого этот редуктор предназначен.

Такой выбор редуктора является весьма примитивным и годным разве что для механизмов типа лебедки. Реально редуктор проектируется для конкретного рабочего механизма и является его неотъемлемой частью, органично связанной и с электродвигателем и с рабочим органом. Поэтому, если выбор редуктора не оговорен особо в задании на проектирование, в пояснительной записке можно ограничиться лишь определением его передаточного числа.

## **5 Расчет приведенных статических моментов, моментов инерции и коэффициентов жесткости системы электрический двигатель – рабочая машина**

Для того чтобы можно было рассчитать статические и динамические характеристики электропривода, необходимо все статические и динамические нагрузки привести к валу двигателя. При этом должны учитываться не только передаточное число редуктора, но и потери в редукторе, а также постоянные потери в двигателе.

Потери в редукторе учитываются КПД редуктора  $\eta_p$ , значение которого берется либо из справочника [7], либо дается в задании на проектирование.

Потери холостого хода двигателя (постоянные потери) можно определить, приняв их равными переменным потерям в номинальном режиме работы:

$$\Delta P_c = 0.5 \cdot P_n \cdot \frac{1 - \eta_n}{\eta_n}, \quad (5.1)$$

где  $\eta_n$  – номинальный КПД двигателя.

Если величина  $\eta_n$  в каталоге не дается, ее можно определить по выражениям:

а) для двигателей постоянного тока

$$\eta_n = \frac{P_n}{U_n \cdot I_n}, \quad (5.2)$$

б) для двигателей переменного тока

$$\eta_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_{лн} \cdot I_n}. \quad (5.2a)$$

Момент постоянных потерь двигателя

$$\Delta M_c = \frac{\Delta P_c}{\omega_n}. \quad (5.3)$$

Таким образом, приведенные к валу двигателя статические моменты системы электродвигатель – рабочая машина на каждом участке работы рассчитываются по формулам:

$$M_{c1}' = \frac{M_{pms1}}{i_p \cdot \eta_p} + \Delta M_c, \quad M_{c2}' = \frac{M_{pms2}}{i_p \cdot \eta_p} + \Delta M_c, \quad (5.4)$$

если двигатель в установившемся режиме работает в двигательном режиме.

Если же двигатель в установившемся режиме работает в генераторном режиме (активная нагрузка), то эти моменты рассчитываются по формулам:

$$M_{c1}'' = \frac{M_{pms1}}{i_p} \cdot \eta_p - \Delta M_c, \quad M_{c2}'' = \frac{M_{pms2}}{i_p} \cdot \eta_p - \Delta M_c. \quad (5.5)$$

Суммарный приведенный к валу электродвигателя момент инерции системы электродвигатель – рабочая машина состоит как бы из двух составляющих:

а) момент инерции ротора (якоря) двигателя и связанных с ним элементов электропривода, вращающихся с той же скоростью, что и двигатель,

б) приведенный к валу двигателя суммарный момент инерции движущихся исполнительных органов рабочей машины и связанных с ними движущихся масс, задействованных в технологическом процессе данного рабочего механизма (перемещаемых в рабочем цикле заготовок, грузов и т.п.).

Таким образом, суммарный приведенный к валу двигателя момент инерции при прямом и обратном ходах определяется по выражениям:

$$J_{\Sigma 1} = \alpha \cdot J_{\partial} + J_{nppm1}, \quad J_{\Sigma 2} = \alpha \cdot J_{\partial} + J_{nppm2}, \quad (5.6)$$

где  $J_{\partial}$  – момент инерции якоря (ротора) двигателя,

$\alpha$  – коэффициент, учитывающий наличие на быстроходном валу других элементов электропривода, таких как муфта, тормозного шкива, редуктора и т.п. (Для механизмов, представленных в задании на курсовое проектирование, коэффициент  $\alpha = 1.5$ ),

$J_{nppm1}$ ,  $J_{nppm2}$  – приведенный к валу двигателя суммарный момент инерции движущихся исполнительных органов, и, связанных с ними масс рабочей машины при прямом и обратном ходах:

$$J_{nppm1} = \frac{J_{pm1}}{i_p^2}, \quad J_{nppm2} = \frac{J_{pm2}}{i_p^2}. \quad (5.7)$$

Для того чтобы получить представление о влиянии упругих механических связей на переходные процессы системы электродвигатель – рабочая машина в задании на курсовое проектирование дается крутильная жесткость  $C_k$ , отнесенная к рабочему валу, или линейная жесткость  $C_l$  поступательно движущегося рабочего органа механизма.

Приведенную к валу двигателя жесткость упругой механической связи  $C_{np}$  определяют через значение крутильной жесткости:

$$C_{np} = \frac{C_k}{i_p^2}, \quad (5.8)$$

или через значение линейной жесткости:

$$C_{np} = C_l \frac{D^2}{4 i_p^2}. \quad (5.9)$$

## 6 Построение приближенной нагрузочной диаграммы электродвигателя

Построение на данном этапе проектирования приближенной нагрузочной диаграммы двигателя, когда еще не рассчитаны статические характеристики и не определены способы пуска и торможения двигателя, позволяет выполнить предварительную проверку двигателя по нагреву и производительности и тем самым существенно снизить затраты времени на проектирование в случае, когда предварительно выбранный двигатель окажется неподходящим.

Для построения нагрузочной диаграммы электродвигателя необходимо определить требуемые для пуска и торможения значения динамических моментов, а также значения пусковых и тормозных моментов двигателя. Причем, подходы к этим расчетам для двух видов нагрузочных диаграмм производственного механизма существенно различные.

Для нагрузочной диаграммы механизма с ограничением ускорения (рисунок 3.2) значения этих моментов определяются по следующим выражениям:

$$M_{дин1} = J_{\Sigma 1} \cdot \frac{2a \cdot i_p}{D}, \quad M_{дин2} = J_{\Sigma 2} \cdot \frac{2a \cdot i_p}{D}. \quad (6.1)$$

Пусковые и тормозные моменты для случая, когда двигатель в установившемся режиме работает в двигательном режиме, определяются по формулам:

$$M'_{n1} = M'_{c1} + M_{дин1}, \quad M'_{n2} = M'_{c2} + M_{дин2}. \quad (6.2)$$

$$M'_{m1} = M'_{c1} - M_{дин1}, \quad M'_{m2} = M'_{c2} - M_{дин2}. \quad (6.3)$$

Для случая, когда двигатель в установившемся режиме работает в генераторном режиме, пусковые и тормозные моменты определяются по формулам:

$$M''_{n1} = -M''_{c1} + M_{дин1}, \quad M''_{n2} = -M''_{c2} + M_{дин2}. \quad (6.4)$$

$$M''_{m1} = -M''_{c1} - M_{дин1}, \quad M''_{m2} = -M''_{c2} - M_{дин2}. \quad (6.5)$$

Если требуемые величины пусковых и тормозных моментов, определенные по (6.2 - 6.5), окажутся больше максимально-допустимого момента выбранного двигателя, то по согласованию с преподавателем нужно либо уменьшить ускорение, что приведет к снижению производительности



рабочего механизма, либо выбрать двигатель большей мощности, обеспечивающий требуемые величины пусковых и тормозных моментов.

Следует заметить, что определенные по (6.1 - 6.5) динамические, пусковые и тормозные моменты являются постоянными величинами, обеспечивающими необходимое в переходных процессах ускорение  $a$ . Другими словами, это средние значения динамических, пусковых и тормозных моментов двигателя в переходных процессах, которые должна обеспечить схема управления электродвигателем.

По полученным выше расчетным величинам теперь можно построить нагрузочную диаграмму электродвигателя. Тахограмму построим в значениях скорости вращения вала двигателя.

Для двигателей постоянного тока с независимым (параллельным) возбуждением и асинхронного с фазным ротором, имеющих достаточно жесткие естественные механические характеристики, повышенной скорости перемещения рабочего органа  $V_{c2}$  будет соответствовать номинальная скорость двигателя  $\omega_H$ , а пониженной скорости перемещения рабочего органа  $V_{c1}$  - скорость вращения вала двигателя  $\omega_{c1}$ .

$$\omega_{c1} = \frac{2 \cdot V_{c1} \cdot i_p}{D}, \quad \omega_{c2} = \omega_H. \quad (6.6)$$

Пониженная скорость  $\omega_{c1}$  будет получена на реостатной характеристике.

Если выбран двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением, естественная характеристика которого в области малых нагрузок обладает малой жесткостью, подобный выбор рабочих скоростей целесообразно применить в случае, если нагрузка двигателя на пониженной скорости меньше номинальной более, чем на 15% (скорость двигателя будет отличаться от номинальной больше, чем на 5%). В том случае, когда эта нагрузка отличается меньше, чем на 15% (скорость двигателя будет отличаться от номинальной меньше, чем на 5%), за пониженную скорость перемещения рабочего органа  $V_{c1}$  следует принять номинальную скорость двигателя  $\omega_H$ , а повышенную скорость перемещения рабочего органа  $V_{c2}$  можно обеспечить параллельным включением якоря и обмотки возбуждения двигателя, ослабив при этом магнитный поток в необходимой степени.

$$\omega_{c1} = \omega_H, \quad \omega_{c2} = \frac{2 \cdot V_{c2} \cdot i_p}{D}. \quad (6.7)$$

Такой вариант исключает работу двигателя на реостатной характеристике в установившемся режиме, что обеспечит уменьшение энергопотребления (более подробно об этом будет сказано в разделе 10.2.2).

Если редуктор в проекте не выбирать, а принять его передаточное число, равным расчетному  $i_p$ , то в нагрузочной диаграмме двигателя на рисунке 6.1 все времена останутся неизменными и равными временам нагрузочной диаграммы производственного механизма (рисунок 3.2), т.к. исходной величиной для определения времени переходных процессов является заданное ускорение  $a$ .

Если в соответствии с заданием выбирается редуктор, то в абсолютном большинстве случаев его передаточное число не будет совпадать с расчетным, определенным по уравнению 4.6. В этом случае изменятся величины скоростей прямого и обратного ходов механизма, которые для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением и асинхронного двигателя с фазным ротором будут определяться выражениями:

$$v_{c2p} = \frac{\omega_n \cdot D}{2i_{pp}}, \quad v_{c1p} = \frac{v_{c1}}{v_{c2}} v_{c2p}. \quad (6.8)$$

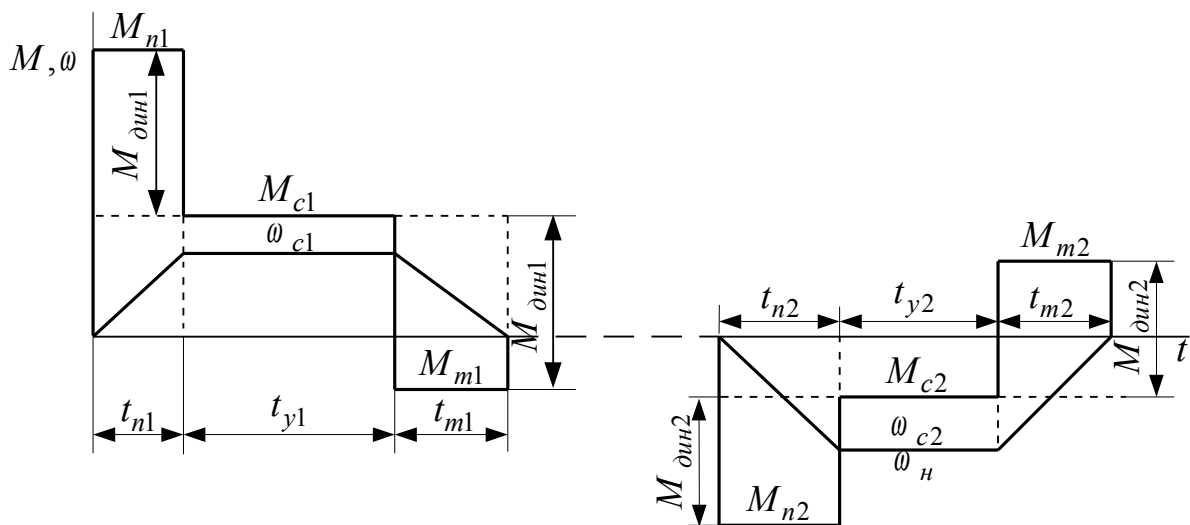


Рисунок 6.1

Для двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением эти скорости будут равны:

$$v_{c1p} = \frac{\omega_n \cdot D}{2i_{pp}}, \quad v_{c2p} = \frac{v_{c2}}{v_{c1}} v_{c1p}, \quad (6.9)$$

где  $i_{pp}$  – реальное передаточное число выбранного редуктора,

$v_{c1p}$  и  $v_{c2p}$  – реальные скорости прямого и обратного ходов с выбранным редуктором.

В случае, когда по заданию на проектирование от электропривода требуется максимальное быстродействие (нагрузочная диаграмма механизма на рисунке 3.1), расчет динамических и пусковых моментов производится иначе.

Для получения максимального быстродействия переходные процессы должны протекать при токах и моментах, близких к максимальным допустимым для выбранного двигателя (рисунок 6.2).

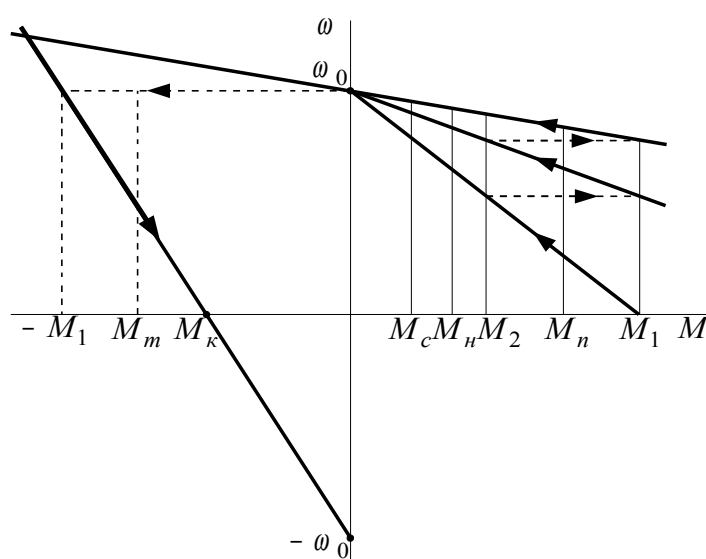


Рисунок 6.2

На этом рисунке представлены пусковые и тормозные характеристики двигателя постоянного тока с независимым возбуждением, обеспечивающие максимальное быстродействие.

$$M_1 = \delta_1 \cdot \lambda \cdot M_n, \quad M_2 = \delta_2 \cdot M_n, \quad |M_k| \approx |0.5 \cdot M_1|, \quad (6.10)$$

где  $\lambda$  - перегрузочная способность двигателя,

$$\delta_2 = (1.1 - 1.2),$$

$$\delta_1 = 0.9 \text{ для двигателя постоянного тока,}$$

$$\delta_1 = (0.7 - 0.8) \text{ для асинхронного двигателя.}$$

Примечания: 1. Для упрощения расчетов начальная скорость торможения принимается равной  $\omega_0$ .

2. Значение  $\delta_1$  для асинхронного двигателя обеспечивает его работу во всех режимах на линейной части механической характеристики.

Таким образом, пусковой и тормозной моменты определяются по выражениям:

$$M_n = \frac{M_1 + M_2}{2}, \quad M_m = -\frac{M_1 + M_{Kz}}{2} = -0,75M_1. \quad (6.11)$$

Динамические моменты при пуске и торможении для прямого хода определяются с учетом (6.10) и (6.11) по выражениям:

$$M'_{динп1} = M_n - M'_{c1}, \quad M'_{динт1} = M_m - M'_{c1}. \quad (6.12)$$

Для обратного хода эти моменты определяются по выражениям:

$$M'_{динп2} = M_n - M'_{c2}, \quad M'_{динт2} = M_m - M'_{c2}. \quad (6.13)$$

Выражения (6.12 - 6.13) справедливы для случая, когда двигатель в установившемся режиме работает в двигательном режиме.

В случае активной нагрузки, когда двигатель в установившемся режиме может работать в генераторном режиме, динамические моменты для прямого хода определяются с учетом (6.10 , 6.11) по выражениям:

$$M''_{динп1} = M_n + M''_{c1}, \quad M''_{динт1} = M_m + M''_{c1}. \quad (6.14)$$

Для обратного хода эти моменты определяются по выражениям:

$$M''_{динп2} = M_n + M''_{c2}, \quad M''_{динт2} = M_m + M''_{c2}. \quad (6.15)$$

Зная значения динамических моментов, определяем ускорения:

$$M_{дин} = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = J_{\Sigma} \cdot \varepsilon, \quad \varepsilon = \frac{M_{дин}}{J_{\Sigma}}, \quad (6.16)$$

где  $\varepsilon$  – угловое ускорение.

Для случая работы двигателя в двигательном режиме:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{n1} &= \frac{M'_{динп1}}{J_{\Sigma 1}}, & \varepsilon_{n2} &= \frac{M'_{динп2}}{J_{\Sigma 2}}, \\ \varepsilon_{m1} &= \frac{M'_{динт1}}{J_{\Sigma 1}}, & \varepsilon_{m2} &= \frac{M'_{динт2}}{J_{\Sigma 2}}. \end{aligned} \quad (6.17)$$

Далее определяем времена пусков и торможений:

$$t_{n1} = \frac{\omega_H}{\varepsilon_{n1}}, \quad t_{n2} = \frac{\omega_C}{\varepsilon_{n2}}, \quad t_{m1} = \frac{\omega_H}{\varepsilon_{m1}}, \quad t_{m2} = \frac{\omega_C}{\varepsilon_{m2}}. \quad (6.18)$$

Аналогично определяются ускорения и времена пусков и торможений для случая работы двигателя в генераторном режиме с учетом выражений (6.14 - 6.16).

Углы поворота вала двигателя за время пусков и торможений:

$$\alpha_{n1} = \frac{\omega_H \cdot t_{n1}}{2} = \frac{\omega_H^2}{2 \cdot \varepsilon_{n1}}, \quad \alpha_{n2} = \frac{\omega_C \cdot t_{n2}}{2} = \frac{\omega_C^2}{2 \cdot \varepsilon_{n2}}, \quad (6.19)$$

$$\alpha_{m1} = \frac{\omega_H \cdot t_{m1}}{2} = \frac{\omega_H^2}{2 \cdot \varepsilon_{m1}}, \quad \alpha_{m2} = \frac{\omega_C \cdot t_{m2}}{2} = \frac{\omega_C^2}{2 \cdot \varepsilon_{m2}}.$$

Угол поворота вала двигателя, эквивалентный длине перемещения рабочего органа:

$$\alpha = \frac{2 \cdot L}{D} \cdot i_p = L \cdot \frac{\omega_H}{V_{c1}}. \quad (6.20)$$

Угол поворота вала двигателя за время установившегося движения:

$$\alpha_{y1} = \alpha - (\alpha_{n1} + \alpha_{m1}), \quad \alpha_{y2} = \alpha - (\alpha_{n2} + \alpha_{m2}). \quad (6.21)$$

Время установившегося движения

$$t_{y1} = \frac{\alpha_{y1}}{\omega_H}, \quad t_{y2} = \frac{\alpha_{y2}}{\omega_C}. \quad (6.22)$$

Теперь определены все величины, необходимые для построения уточненной нагрузочной диаграммы двигателя (рисунок 6.3).

Особенностью этой нагрузочной диаграммы двигателя является равенство пусковых и тормозных моментов при прямом и обратном ходах.

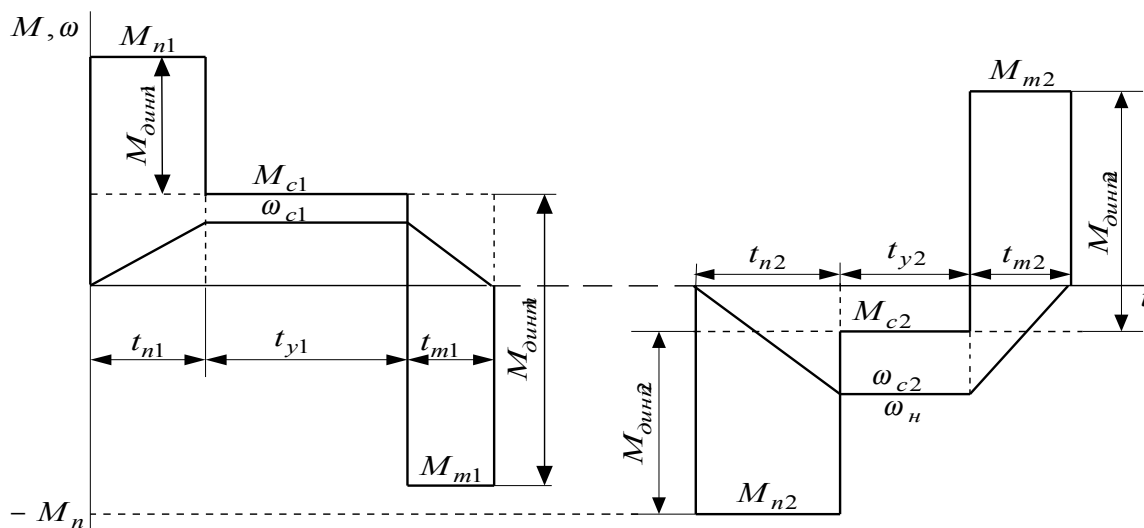


Рисунок 6.3

## 7 Предварительная проверка электродвигателя по нагреву и производительности

Предварительная проверка двигателя по нагреву может быть проведена по нагрузочной диаграмме двигателя методом эквивалентного момента. В данном случае этот метод не дает значительной погрешности, т.к. и двигатель постоянного тока, и двигатель переменного тока будут работать в проектируемом электроприводе на линейной части механических характеристик, что дает основание с большой долей вероятности считать момент двигателя пропорциональным току двигателя.

Нагрузочные диаграммы двигателя для рассматриваемых вариантов задания полностью идентичны между собой и, поэтому, проверка будет производиться по одним и тем же выражениям.

Эквивалентный момент определяется по выражению:

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{M_{n1}^2 t_{n1} + M_{c1}^2 t_{y1} + M_{m1}^2 t_{m1} + M_{n2}^2 t_{n2} + M_{c2}^2 t_{y2} + M_{m2}^2 t_{m2}}{\beta_{ym} \cdot (t_{n1} + t_{m1} + t_{n2} + t_{m2}) + t_{y1} + t_{y2}}}. \quad (7.1)$$

Допустимый момент предварительно выбранного двигателя, работающего при  $PB_{\phi}$ :

$$M_{\text{доп}} = M_n \cdot \sqrt{\frac{PB_n}{PB_{\phi}}}, \quad (7.2)$$

где  $M_n$  – номинальный момент выбранного двигателя, работающего при  $PB_n$ .

Условие правильности предварительного выбора двигателя:

$$M_{\text{э}} \leq M_{\text{доп}}, \quad (7.3)$$

причем

$$1 > \frac{M_{\text{э}}}{M_{\text{доп}}} \geq 0.8. \quad (7.4)$$

Для асинхронных двигателей, работающих в переходных процессах с моментами, большими  $0.7 M_K$  желательно снижать величину допустимого по нагреву момента на (10 - 15)%.

Если выполняется условие (7.5), можно приступить к расчету статических и динамических характеристик выбранного электродвигателя. Если же двигатель не проходит по нагреву или его мощность значительно больше требуемой, следует выбрать другой двигатель, ориентируясь на выражение:

$$P_{\text{ннов}} = P_n \cdot \frac{M_{\text{э}}}{M_{\text{доп}}}, \quad (7.5)$$

где  $P_{\text{ннов}}$  – мощность вновь выбранного двигателя.

Проверка предварительно выбранного двигателя по производительности производится только для случая, когда задание на проектирование предусматривает максимальное быстродействие электропривода, по выражению:

$$t_{n1} + t_{y1} + t_{m1} + t_{n2} + t_{y2} + t_{m2} \leq t_p, \quad (7.6)$$

где  $t_p$  – заданное максимальное значение времени работы в цикле, с.

В случае ограничения ускорения и принятия расчетного значения передаточного числа редуктора за рабочее, времена переходных процессов и установившегося движения остаются теми же, что и в нагрузочной диаграмме производственного механизма и, таким образом, электропривод по производительности проходит.

## **8 Выбор системы электропривода и его структурная схема**

Учитывая то, что к моменту начала проектирования из специальных предметов учебного плана изучены только теория автоматического управ-

ления и первая часть теории электропривода, выбор системы электропривода ограничен вариантом питания электродвигателя постоянного или переменного тока от цеховой сети с релейно-контакторным управлением. Соответственно, регулирование скорости, пуск и торможение двигателей осуществляется с помощью резисторов, включенных в якорную или роторную цепь выбранного двигателя.

Выбор режима торможения двигателя (противовключения или динамического) производится, исходя из заданных требований к интенсивности торможения (ускорения) и сложности реализации данного способа (количество требуемой аппаратуры, резисторов и т.п.).

Таким образом, на данном этапе проектирования выбирается схема питания двигателя от сети с реостатным регулированием скорости, с реостатным пуском в 2 - 3 ступени (в крайнем случае – 4) и с реостатным же торможением противовключением или динамическим. Количество пусковых и тормозных ступеней резисторов определяется из расчета статических характеристик электропривода, после чего может быть составлена принципиальная электрическая схема силовой части электропривода.

Проектируемый электропривод совместно с заданным производственным механизмом образует единую электромеханическую систему. Электрическая часть этой системы состоит из электромеханического преобразователя энергии постоянного или переменного тока и системы управления (энергетической и информационной). Механическая часть электромеханической системы включает в себя все связанные движущиеся массы привода и механизма.

В качестве основного представления механической части принимаем двухмассовую расчетную механическую систему (рисунок 8.1, 8.2 и 8.3), частным случаем которой при пренебрежении упругостью механических связей является жесткое приведенное механическое звено электропривода.

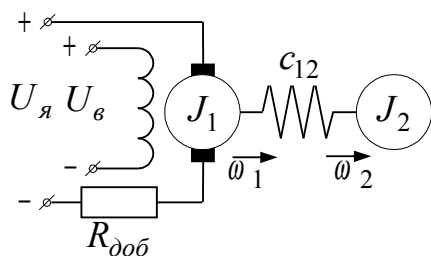


Рисунок 8.2

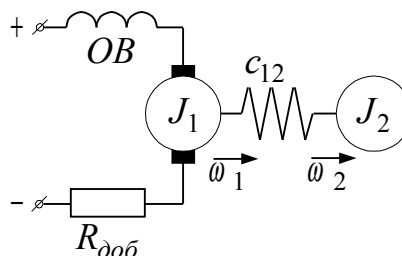


Рисунок 8.3

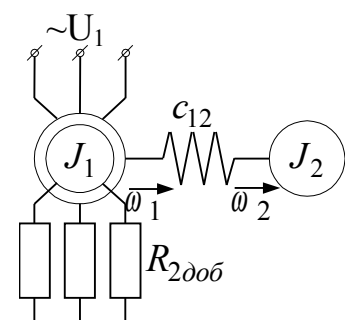


Рисунок 8.1

Здесь  $J_1$  и  $J_2$  – приведенные к валу двигателя моменты инерции двух масс электропривода, связанных упругой связью,



$\omega_1$  и  $\omega_2$  – скорости вращения этих масс,  
 $c_{12}$  – жесткость упругой механической связи.

В результате анализа электромеханических свойств различных двигателей [1] установлено, что при определенных условиях механические характеристики этих двигателей описываются идентичными уравнениями. Поэтому при этих условиях аналогичны и основные электромеханические свойства двигателей, что позволяет описывать динамику электромеханических систем одними и теми же уравнениями.

Вышесказанное справедливо для двигателей с независимым возбуждением, двигателей с последовательным и смешанным возбуждением при линеаризации их механических характеристик в окрестности точки статического равновесия и для асинхронного двигателя с фазным ротором при линеаризации рабочего участка его механической характеристики.

Таким образом, применив одни и те же обозначения для трех типов двигателей, получим систему дифференциальных уравнений, описывающих динамику линеаризованной электромеханической системы:

$$\begin{cases} (1 + T_{\text{э}} p) M = \beta (\omega_0 - \omega); \\ M - M_{12} - M_{c(1)} = J_1 p \omega_1; \\ M_{12} - M_{c(2)} = J_2 p \omega_2; \\ p M_{12} = c_{12} (\omega_1 - \omega_2), \end{cases} \quad (8.1)$$

где  $M_{c(1)}$  и  $M_{c(2)}$  – части общей нагрузки электропривода, приложенные к первой и второй массам,

$M_{12}$  – момент упругого взаимодействия между движущимися массами системы,

$\beta$  – модуль статической жесткости механической характеристики,

$T_{\text{э}}$  – электромагнитная постоянная времени электромеханического преобразователя.

Структурная схема, соответствующая уравнениям (8.1), представлена на рисунке 8.4.

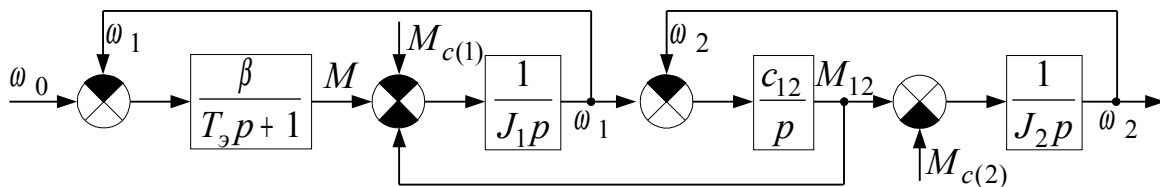


Рисунок 8.4

Параметры  $\omega_0$ ,  $T_{\varepsilon}$ ,  $\beta$  определяются для каждого типа двигателя по выражениям, приведенным в [1].

Система дифференциальных уравнений (8.1) и структурная схема (рисунок 8.4) правильно отражает основные закономерности, свойственные реальным нелинейным электромеханическим системам в режимах допустимых отклонений от статического состояния.

Во многих практических случаях (при определенных сочетаниях параметров механической части электропривода) влияние упругих колебаний на движение первой массы пренебрежимо мало, и тогда можно принять  $c_{12} \approx \infty$ ,  $M_{12}=0$ ,  $M_{c(1)} + M_{c(2)} = M_c$ ;  $J_1 + J_2 = J_{\Sigma}$ ;  $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ . В результате получаем:

$$\begin{cases} (1 + T_{\varepsilon}p)M = \beta(\omega_0 - \omega) \\ M - M_c = J_{\Sigma}p\omega = \beta T_M p\omega \end{cases} \quad (8.2)$$

Системе уравнений (8.2) соответствует структурная схема электропривода, представленная на рисунке 8.5.

Здесь механическая часть электропривода представляется жестким механическим звеном, а электропривод имеет линейную механическую характеристику.

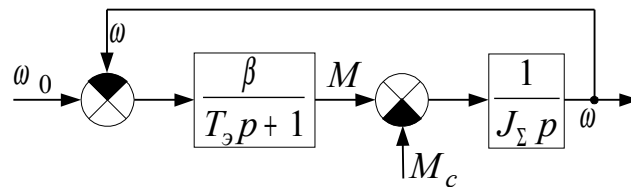


Рисунок 8.5

При работе двигателя на реостатных характеристиках электромагнитная постоянная времени  $T_{\varepsilon}$  гораздо меньше электромеханической постоянной времени  $T_M$ , и можно принять  $T_{\varepsilon}=0$ . Тогда система уравнений (8.1) примет вид:

$$\begin{cases} M = \beta(\omega_0 - \omega) \\ M - M_c = J_{\Sigma}p\omega = \beta T_M p\omega \end{cases} \quad (8.3)$$

Структурная схема, соответствующая (8.3), приведена на рисунке 8.6а, а преобразованная – на рисунке 8.6б.

Наконец, приняв в (8.2)  $P=0$ , получим уравнение статики проектируемого электропривода:

$$M = \beta (\omega_0 - \omega). \quad (8.4)$$

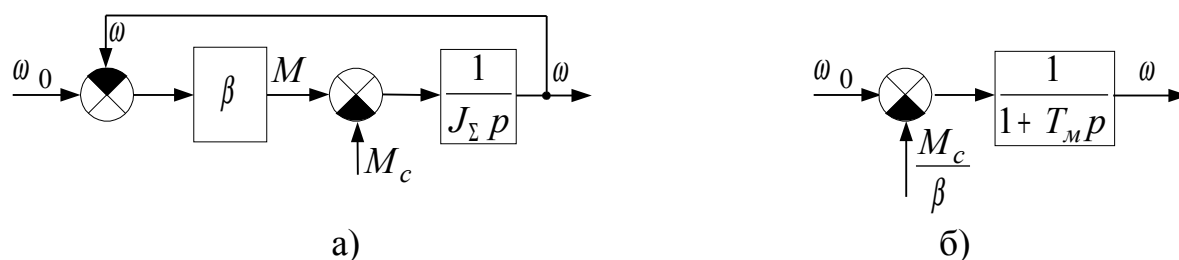


Рисунок 8.6

## 9 Расчет и построение естественных механической и электромеханической характеристик выбранного электродвигателя

### 1.2 Расчет и построение естественных характеристик двигателя постоянного тока с независимым возбуждением

Уравнения естественных электромеханической и механической характеристик данного двигателя имеют вид:

$$\omega = \frac{U - I \cdot R_{я\Sigma}}{K\Phi}, \quad (9.1)$$

$$\omega = \frac{U}{K\Phi} - M \frac{R_{я\Sigma}}{(K\Phi)^2}, \quad (9.2)$$

где  $U$  – напряжение на якоре двигателя,

$I$  – ток якоря двигателя,

$M$  – момент, развиваемый двигателем,

$R_{я\Sigma}$  – суммарное сопротивление якорной цепи двигателя:

$$R_{я\Sigma} = R_{я} + R_{\delta n} + R_{ко},$$

$R_{я}$  – сопротивление обмотки якоря,

$R_{\delta n}$  – сопротивление обмотки дополнительных полюсов,

$M'_{динт} = M_m - M'_{с1}$ ,  $R_{ко}$  – сопротивление компенсационной обмотки,

$\Phi$  – магнитный поток двигателя,

$K$  – конструктивный коэффициент.

Из (9.1) и (9.2) видно, что характеристики двигателя линейны при условии  $\Phi = const$  (рисунок 9.1) и могут быть построены по двум точкам. Такими точками выбираются точка идеального холостого хода ( $I=0$ ;  $M=0$ ;  $\omega=\omega_0$ ) и точка номинального режима ( $I=I_n$ ;  $M=M_n$ ;  $\omega=\omega_n$ ). Значение  $I_n$  приводится в каталожных данных. Остальные величины определяются:

$$\omega_n = \frac{\pi n_n}{30}, \quad (9.3)$$

$$(K\Phi)_n = \frac{U_n - I_n \cdot R_{я\Sigma}}{\omega_n}, \quad (9.4)$$

$$\omega_0 = \frac{U_n}{(K\Phi)_n}, \quad (9.5)$$

$$M_n = (K\Phi)_n \cdot I_n. \quad (9.6)$$

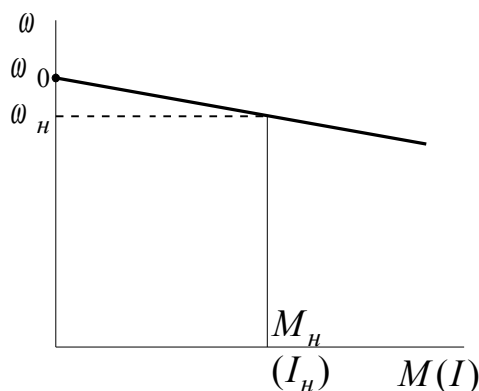


Рисунок 9.1

### 1.3 Расчет и построение естественных характеристик двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением

Уравнения естественных механической и электромеханической характеристик этого двигателя по форме совпадают с такими же уравнениями двигателя с независимым возбуждением:

$$\omega = \frac{U}{K\Phi(I)} - M \frac{R_{я\Sigma}}{[K\Phi(I)]^2}, \quad (9.7)$$

$$\omega = \frac{U - I \cdot R_{я\Sigma}}{K\Phi(I)}, \quad (9.8)$$

где  $R_{\Sigma} = R_{\alpha} + R_{\partial n} + R_{ov}$ ,

$R_{ov}$  — сопротивление обмотки возбуждения.

Поскольку магнитный поток двигателя с последовательным возбуждением зависит от тока якоря (возбуждения) нелинейно (кривая намагничивания аналитического выражения не имеет), аналитических выражений механической и электромеханической характеристик данного двигателя не существует.

В литературе приводятся приближенные эмпирические формулы, но более точные результаты получаются, если пользоваться каталожными универсальными характеристиками двигателей с последовательным возбуждением (рисунок 9.2).

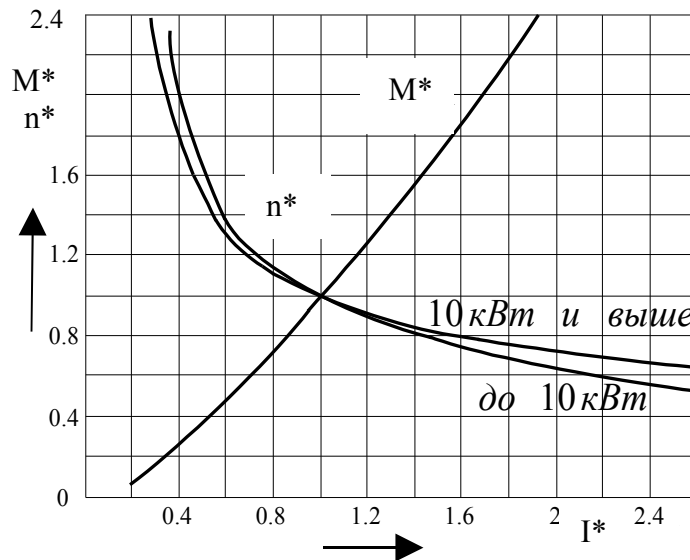


Рисунок 9.2

Здесь приведена естественная электромеханическая характеристика в относительных единицах  $\omega_* = f(I_*)$  и зависимость  $M_* = f(I_*)$  тоже в относительных единицах. Заменяя значения тока в электромеханической характеристике значениями момента из зависимости  $M_* = f(I_*)$ , получим естественную механическую характеристику.

Расчет сводится к замене относительных единиц на абсолютные по формулам:

$$\omega = \omega_* \cdot \omega_H, \quad I = I_* \cdot I_H, \quad M = M_* \cdot M_H. \quad (9.9)$$

Расчет и построение естественных характеристик удобно произвести с помощью таблицы:

Таблица

$\omega_*$	2.4	2.2	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0	0.8	0.6	0.5
$I_*$								1.0			
$M_*$								1.0			
$\omega$											
$I$											
$M$											

#### 1.4 Расчет и построение естественных характеристик асинхронного двигателя с фазным ротором

На рисунке 9.3 приведены электромеханическая и механическая характеристики данного двигателя.

Расчет этих характеристик проводится по известным из литературы выражениям, учитывающим принятые ранее обозначения и терминологию.

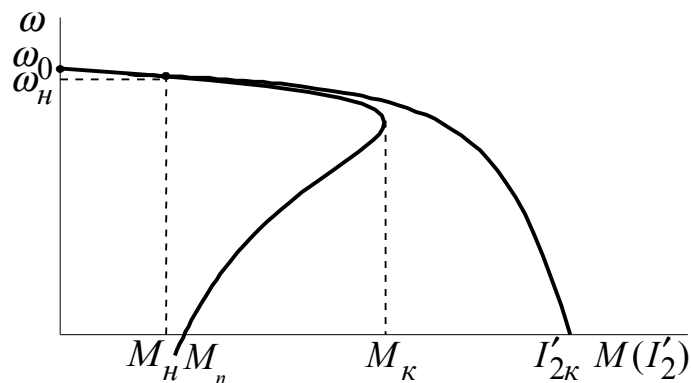


Рисунок 9.3

$$I'_2 = \frac{U_{1H}}{\sqrt{(R_1 + \frac{R'_2}{s})^2 + x'_k{}^2}}, \quad (9.10)$$

$$M = \frac{2M_k(1 + as_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2as_k}, \quad (9.11)$$

$$M_k = \frac{3 U_{1H}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot [R_1 + \sqrt{R_1^2 + x_k^2}]}, \quad (9.12)$$

$$s_k = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + x_k^2}}, \quad (9.13)$$

$$x_k = x_1 + x'_2, \quad (9.14)$$

$$a = \frac{R_1}{R'_2}, \quad (9.15)$$

где  $I'_2$  – приведенный к статорной обмотке ток ротора,

$U_{1H}$  – номинальное фазное напряжение двигателя,

$M_k$  – критический момент,

$s_k$  – критическое скольжение,

$x_k$  – индуктивное сопротивление короткого замыкания,

$R_1, x_1$  – активное и индуктивное сопротивления статорной обмотки,

$R'_2, x'_2$  – приведенные активное и индуктивное сопротивления роторной обмотки,

$S$  – текущее значение скольжения.

Приведенные сопротивления ротора определяются с помощью коэффициента трансформации сопротивлений  $K_R$ :

$$\left. \begin{aligned} R'_2 &= R_2 \cdot K_R \\ x'_2 &= x_2 \cdot K_R \end{aligned} \right\}, \quad (9.16)$$

где  $R_2, x_2$  – активное и индуктивное сопротивления роторной обмотки.

Коэффициент же трансформации сопротивлений может быть определен через коэффициент трансформации ЭДС  $K_e$  или через номинальную ЭДС ротора  $E_{2H}$ :

$$K_R = \frac{m_1}{m_2} \cdot K_e^2 = \frac{m_1}{m_2} \cdot \left(0.95 \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot U_{1H}}{E_{2H}}\right)^2, \quad (9.17)$$

где  $m_1$  и  $m_2$  – число фаз статора и ротора.

Для расчета характеристик необходимо также определить координаты точек идеального холостого хода, номинального режима и критиче-

ской. Скорость идеального холостого хода (синхронная скорость) определяется по выражению:

$$n_0 = \frac{60f_1}{p}, \quad \omega_0 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p}, \quad (9.18)$$

где  $f_1$  – частота питающей сети;

$p$  – число пар полюсов двигателя.

Если число пар полюсов неизвестно, скорость идеального холостого хода определяется как ближайшая к синхронным скоростям (3000, 1500, 1000, 750, 500, 375, 250 и т.д.), об/мин.

Скорость на естественной характеристике  $\omega_e$  определяется по выражению:

$$\omega_e = \omega_0 (1 - s_e). \quad (9.19)$$

Номинальное скольжение равно:

$$s_n = \frac{n_0 - n_n}{n_0} = \frac{\omega_0 - \omega_n}{\omega_0}. \quad (9.20)$$

Номинальный момент определим из (9.11), а угловые скорости  $\omega_0$  из (9.18) и  $\omega_n$  из (9.3). Критические значения момента  $M_k$  и скольжения  $s_k$  определим из выражений (9.12) и (9.13).

Далее, задаваясь значениями скольжения  $s$  от 0 до 1, по выражениям (9.10), (9.11) и (9.19) определим  $I_2'$ ;  $M$  и  $\omega$ , значения которых сводятся в таблицу:

Таблица

$s_e$											
$\omega_e$											
$M_e$											
$I_{2e}'$											

Для построения характеристик двигателя необходимо иметь 12÷14 точек, исходя из следующих соображений. Учитывая то, что естественные характеристики асинхронного двигателя практически линейны на участке от идеального холостого хода до номинального режима задаемся здесь тремя значениями скольжения ( $s = 0$ ;  $s = 0.5 s_n$ ;  $s = s_n$ ). На участке от номинального режима до критической точки механической характеристики следует задаться тремя – четырьмя точками в зависимости от величины разно-



сти критического и номинального скольжений. На последнем участке от критической точки до значения  $s = 1$  желательно установить шаг скольжения, равный 0.1.

По данным заполненной таблицы строятся электромеханическая  $\omega(I_2')$  и механическая  $\omega(M)$  характеристики двигателя.

## **10 Расчет и построение искусственных характеристик электродвигателя**

К искусственным характеристикам двигателя в данном курсовом проекте относятся реостатная характеристика для получения пониженной скорости при работе двигателя с полной нагрузкой, а также реостатные характеристики, обеспечивающие заданные условия пуска и торможения.

Поскольку все искусственные характеристики являются реостатными, а реостатные характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором на рабочем участке характеристики в оговоренных пределах изменения нагрузки (0 - 0.8  $M_k$ ) можно считать практически линейными, построение этих характеристик для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением и для асинхронного двигателя с фазным ротором можно проводить одинаково.

Естественно, что расчет и построение искусственных характеристик двигателя заканчивается определением величин добавочных сопротивлений, включаемых в якорную или роторную цепи двигателей для получения построенных характеристик.

### **1.5 Расчет и построение пусковых характеристик двигателя**

Включение добавочных сопротивлений в силовую цепь двигателей при пуске необходимо, прежде всего, для ограничения в пределах допустимых значений токов и моментов двигателя. Кроме того, техническим заданием на проектирование электропривода конкретного механизма могут быть введены дополнительные ограничения на проведение операций пуска. Такими ограничениями могут быть величины допустимого ускорения, момента, производных ускорения и тока (момента), потерь двигателя и т.п. Все эти ограничения должны быть учтены при построении пусковых характеристик (диаграмм) двигателя.

Наиболее часто встречающимися случаями являются форсированный пуск двигателя с максимальным быстродействием и пуск двигателя с определенным ускорением, меньшим, чем максимальное. И в том и в другом случае могут быть введены дополнительные ограничения.

Для того чтобы процесс пуска двигателя можно было автоматизировать, желательно подобрать ступени пускового реостата таким образом,

чтобы пиковые моменты и моменты переключения были одинаковыми на всех характеристиках (рисунок 10.1).

На характер протекания переходных процессов пуска большое влияние оказывает число ступеней пускового реостата. Чем плавнее требуется протекание переходных процессов, тем меньше должна быть разница между пиковым моментом и моментом переключения, тем больше будет ступеней пускового реостата.

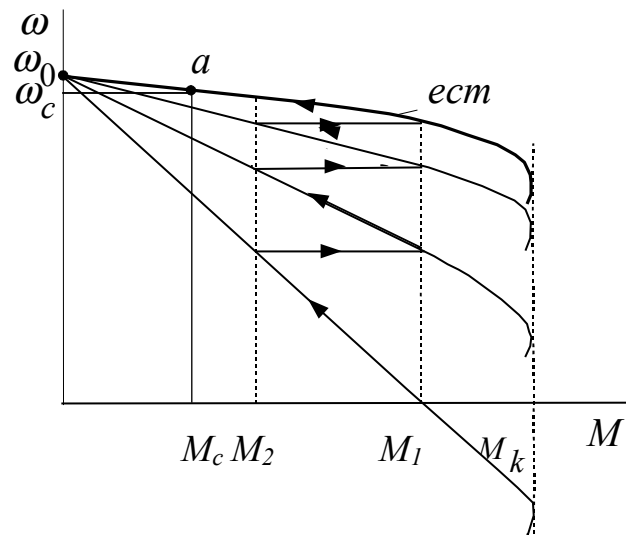


Рисунок 10.1

Здесь  $M_k$  – критический момент (для асинхронного двигателя с фазным ротором).

$M_l$  – пиковый момент;

$M_2$  – момент переключения;

$M_c$  – момент статический;

$\omega_c$  – скорость статическая;

$a$  – точка устойчивой работы в статическом режиме.

Если при ручном управлении с помощью силовых кулачковых контроллеров увеличение числа ступеней увеличивает стоимость электропривода незначительно, то при автоматическом контакторном управлении, когда каждая лишняя ступень добавляет в схему контактор и реле, увеличение стоимости электропривода будет заметным. Кроме того, при большом количестве ступеней пускового реостата суммарное время срабатывания контакторов заметно увеличивает длительность переходных процессов.

Учитывая вышесказанное, при автоматическом контакторном управлении, которое предполагается в проектируемых электроприводах, рекомендуется применять не больше трех пусковых ступеней.

Построение пусковых диаграмм двигателя постоянного тока с независимым возбуждением и асинхронного двигателя с фазным ротором, име-

ющего на рабочем участке практически линейные механические характеристики, а также расчет величин сопротивлений ступеней пускового реостата можно произвести двумя способами: графическим и аналитическим. Построение же пусковых диаграмм двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением, имеющего существенно нелинейные механические характеристики, производится только графическим способом.

### 10.1.1 Расчет и построение пусковой диаграммы двигателя с линейной механической характеристикой графическим способом

Расчет начинается с построения естественной характеристики двигателя постоянного тока или рабочей (линейной) части характеристики асинхронного двигателя (рисунок 10.1 и 10.2). Затем в зависимости от того, какой пуск должен обеспечить проектируемый электропривод, построение пусковой диаграммы различно.

В случае необходимости получения максимального быстродействия задаемся максимально допустимым пиковым моментом  $M_1$  (рисунки 10.1 10.2).

Величину  $M_1$  определяем по выражению (6.10). Затем, изменяя значения момента переключения  $M_2$ , добиваемся получения трехступенчатой пусковой диаграммы (верхняя линия переключения должна пройти через точку  $\bar{b}$  на естественной характеристике).

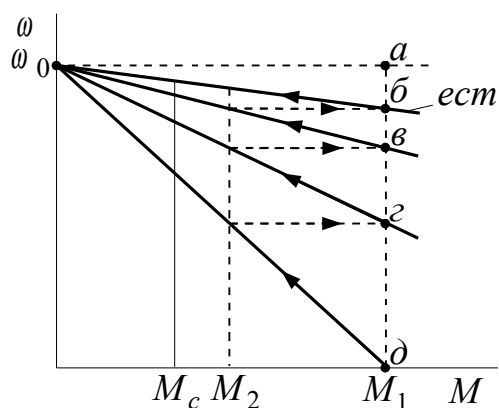


Рисунок 10.2

Поскольку проектируемые электроприводы работают в повторно-кратковременном режиме с не менее чем двумя пусками и торможениями в цикле, динамические моменты составляют значительную долю общей нагрузки электродвигателя. Поэтому статические моменты обычно значительно меньше номинальных, и условие правильного построения пусковой диаграммы:

$$M_2 \geq (1.1 - 1.2) \cdot M_c \quad (10.1)$$

выполняется автоматически. Если же этого не произойдет, то построение диаграммы необходимо обсудить с руководителем проектирования.

Сопротивление ступеней пускового реостата определим, основываясь на том, что величина падения скорости относительно скорости идеального холостого хода пропорциональна полному сопротивлению якорной (роторной) цепи двигателя. Из (9.2) с учетом (9.5):

$$\omega = \omega_0 - \frac{M \cdot R_{я\Sigma}}{(K\Phi)^2}, \quad M = const, \quad \Phi = const. \quad (10.2)$$

Таким образом, отрезок  $ab$  соответствует сопротивлению якорной (роторной) цепи двигателя без добавочных сопротивлений, а отрезки  $bв$ ,  $вг$  и  $гд$  в том же масштабе соответствуют сопротивлениям ступеней реостата (рисунок 10.3, 10.4):

$$R_1 = R_\partial \frac{zd}{ab}, \quad R_2 = R_\partial \frac{вг}{ab}, \quad R_3 = R_\partial \frac{бв}{ab}, \quad (10.3)$$

где  $R_\partial$  – суммарное сопротивление якорной (роторной) цепи двигателя на естественной характеристике.

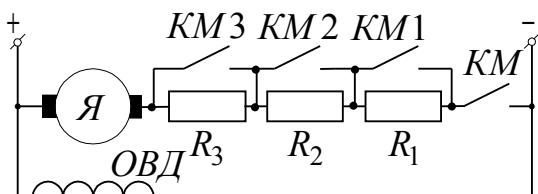


Рисунок 10.3

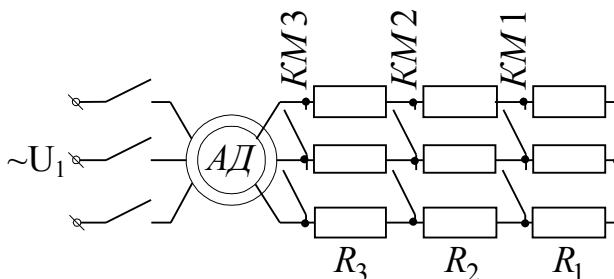


Рисунок 10.4

Итак, пуск производится при введенном добавочном сопротивлении  $R_{н\Sigma 1} = R_1 + R_2 + R_3$ , затем включается контактор  $KM1$ , и пуск продолжается с добавочным сопротивлением  $R_{н\Sigma 2} = R_2 + R_3$ . После включения контактора  $KM2$  пуск осуществляется с добавочным сопротивлением  $R_{н\Sigma 3} = R_3$ . Включение контактора  $KM3$  выводит двигатель на естественную характеристику.

Для случая, когда электропривод должен обеспечить определенную величину ускорения, на этапе предварительного определения мощности двигателя был определен средний динамический момент, действующий во время пуска. Складываясь с моментом статическим, он определяет средний пусковой момент двигателя.

Поскольку определенное техническим заданием ускорение не должно превышать, пусковую диаграмму строим для случая пуска с минимальной нагрузкой. В этом случае, при пуске под нагрузкой, ускорение будет меньше.

Таким образом, после построения естественной характеристики (рисунок 10.5) на оси абсцисс откладываем величину среднего пускового момента  $M_{нсп}$ , а затем, изменяя моменты  $M_1$  и  $M_2$  добиваемся построения трехступенчатой пусковой диаграммы. При этом должны соблюдаться следующие ограничения:

$$M_2 \geq 1.1 \cdot M_c, \quad M_1 \leq \lambda \cdot M_H \quad \text{или} \quad M_1 \leq 0.8 \cdot M_K.$$

Кроме того, при изменениях  $M_1$  и  $M_2$  нужно стараться соблюдать равенство отклонений момента двигателя от среднего значения  $M_{нсп}$  в обе стороны:

$$M_{нсп} = \frac{M_1 + M_2}{2}. \quad (10.4)$$

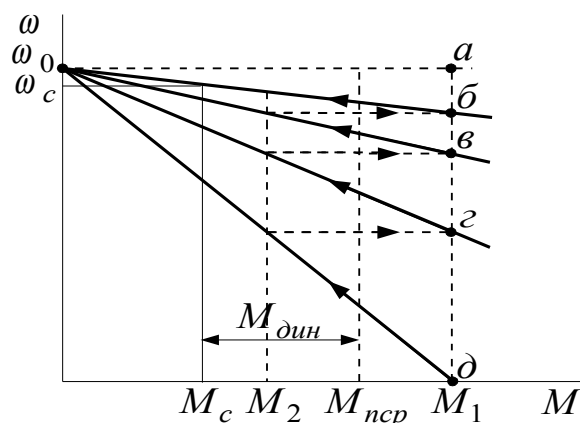


Рисунок 10.5

В случае невозможности соблюдения какого-либо ограничения необходимо проконсультироваться с руководителем проектирования.

Все дальнейшие действия производятся так же, как и в предыдущем случае.

Точность графических методов расчета, естественно, ниже точности аналитических методов. В какой-то мере можно увеличить точность расчета, отодвигая как можно дальше от начала координат вертикальную линию  $a, б, в, г, д$ .

### 10.1.2 Расчет и построение пусковой диаграммы двигателя с линейной механической характеристикой аналитическим способом

Основой для аналитического расчета пусковой диаграммы и величин пусковых сопротивлений для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением является выражение из [3]:

$$K_M = m \sqrt{\frac{R_m}{R_{\Sigma}}}, \quad (10.5)$$

и вытекающее из (10.5) выражение

$$m = \frac{\lg \frac{R_m}{R_{\Sigma}}}{\lg K_M}, \quad (10.6)$$

где  $R_m$  – сопротивление якорной цепи двигателя на первой пусковой ступени,

$m$  – число ступеней пускового реостата,

$K_M$  – отношение пикового момента к переключающему,

$I_1$  – пиковый ток, соответствующий пиковому моменту.

Величины  $R_m, K_M, I_1$  определяются по выражениям:

$$R_m = \frac{U_H}{I_1}, \quad (10.7)$$

$$K_M = \frac{M_1}{M_2}, \quad (10.8)$$

$$I_1 = \frac{M_1}{K\Phi}. \quad (10.9)$$

Для асинхронного двигателя с фазным ротором такой основой для расчета является выражение:

$$K_M = m \sqrt{\frac{M_H}{M_1 \cdot s_H}}, \quad (10.10)$$

и вытекающее из (10.10) выражение:

$$m = \frac{\lg \frac{M_H}{M_1 \cdot s_H}}{\lg K_M}. \quad (10.11)$$

Если для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением под  $s_H$  понимать относительный перепад скорости на естественной характеристике при номинальной нагрузке

$$s_H = \frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0}, \quad (10.12)$$

то выражения (10.10) и (10.11) являются универсальными и пригодными для обоих двигателей.

Итак, в случае необходимости получения максимального быстродействия задаемся, как и в графическом расчете, величиной пикового момента и, имея в виду количество пусковых ступеней, равное трем, определяем по выражению (10.6)  $K_M$  и переключающий момент  $M_2$ :

$$M_2 = \frac{M_1}{K_M}. \quad (10.13)$$

Затем проверяем величину  $M_2$  по условию (10.1).

В случае необходимости определения числа ступеней пускового реостата дополнительно к  $M_1$  задаемся величиной  $M_2$ , соблюдая условие (10.1), и определяем это число по выражению (10.11).

При получении дробного результата округляем до ближайшего целого, имея при этом в виду как технические, так и экономические соображения, а затем уточняем величину  $K_M$ .

Величины полных сопротивлений якорной (роторной) цепи на пусковых ступнях и величины сопротивлений ступеней пускового реостата определяются из выражений [3]:

$$\left. \begin{aligned} R_{3\Sigma} &= R_\partial \cdot K_M \\ R_{2\Sigma} &= R_\partial \cdot K_M^2 \\ R_{1\Sigma} &= R_\partial \cdot K_M^3 \end{aligned} \right\}, \quad (10.14)$$

$$\left. \begin{aligned} R_3 &= R_{\partial} (K_M - 1) \\ R_2 &= R_{\partial} K_M (K_M - 1) \\ R_1 &= R_{\partial} K_M^2 (K_M - 1) \end{aligned} \right\}, \quad (10.15)$$

где  $R_{\partial} = R_{я\Sigma}$  – для двигателя постоянного тока независимого возбуждения,

$R_{\partial} = R_2$  – для асинхронного двигателя с фазным ротором.

Для случая, когда электропривод должен обеспечить определенную величину ускорения, определим значение момента  $M_1$  из выражения (10.4) с учетом (10.13) получим:

$$M_1 = \frac{2M_{ncp} \cdot K_M}{1 + K_M}. \quad (10.16)$$

Подставив (10.16) в (10.10) и (10.11), получим:

$$m = \frac{\lg \frac{M_H (1 + K_M)}{2 \cdot M_{ncp} \cdot K_M \cdot s_H}}{\lg K_M}, \quad (10.17)$$

$$K_M = \sqrt[m]{\frac{M_H (1 + K_M)}{2 \cdot M_{ncp} \cdot K_M \cdot s_H}}. \quad (10.18)$$

Преобразовав (10.18), получим уравнение:

$$K_M^{m+1} - A \cdot K_M - A = 0, \quad (10.19)$$

$$A = \frac{M_H}{2 \cdot M_{ncp} \cdot s_H} \quad (10.20)$$

Уравнение (10.20) решения в общем виде не имеет, за исключением случая, когда  $m = 1$  (пуск в одну ступень), который нас не интересует. Поэтому на ЭВМ были рассчитаны наиболее широко применяемые варианты пуска двигателя в 2, 3 и 4 ступени. Результаты расчета представлены



на рисунке 10.6, где приведены зависимости коэффициента  $K_m$  в функции параметра  $A$  для  $m = 2, m = 3, m = 4$ .

Порядок расчета пусковой диаграммы следующий:

- 1) определяем по (10.20) величину параметра  $A$ ,
- 2) по кривым рисунка 10.6 определяем величины  $K_m$  для случаев пуска двигателя в 2, 3 и 4 ступени,
- 3) по выражениям (10.13) и (10.16) определяем величины моментов  $M_1$  и  $M_2$  для разных  $m$ ,

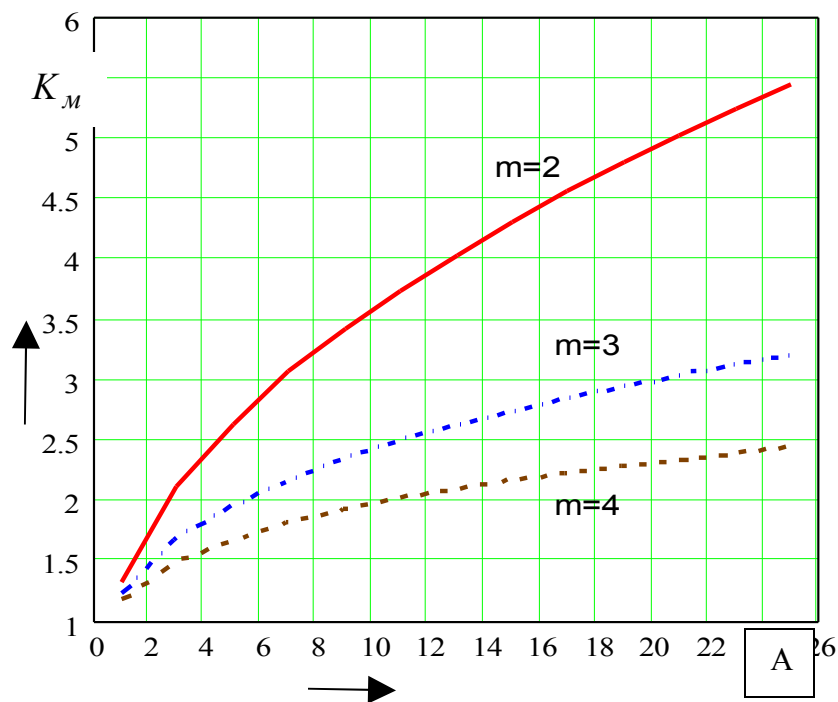


Рисунок 10.6

- 4) выбираем подходящее для данного электропривода число пусковых ступеней, учитывая как технические, так и экономические ограничения [момент  $M_1$  должен быть меньше максимально допустимого, момент  $M_2$  должен подчиняться условию (10.1), желательное число пусковых ступеней – (2÷3).

В случае необходимости, как исключение, возможно применение четырех ступеней.

Величины сопротивлений ступеней пускового реостата определяются по выражениям (10.14) и (10.15).

### 10.1.3 Расчет и построение пусковой диаграммы двигателя с последовательным возбуждением

Поскольку механические и электромеханические характеристики двигателя с последовательным возбуждением нелинейные, аналитического способа расчета и построения пусковой диаграммы для него не существует. Расчет сопротивлений резисторов для пуска таких двигателей может быть произведен без построения самих реостатных характеристик графоаналитическим методом, основанным на существовании линейной зависимости между скоростью двигателя и сопротивлением его якорной цепи при неизменном токе якоря. Это вытекает из уравнения электромеханической характеристики двигателя:

$$\omega = \frac{U - I \cdot R_{я\Sigma}}{K\Phi(I)}. \quad (10.21)$$

При  $I = const$ ,  $\Phi(I) = const$  выражение (10.21) представляет собой уравнение прямой линии.

Порядок построения и расчета пусковой диаграммы (рисунок 10.7) следующий:

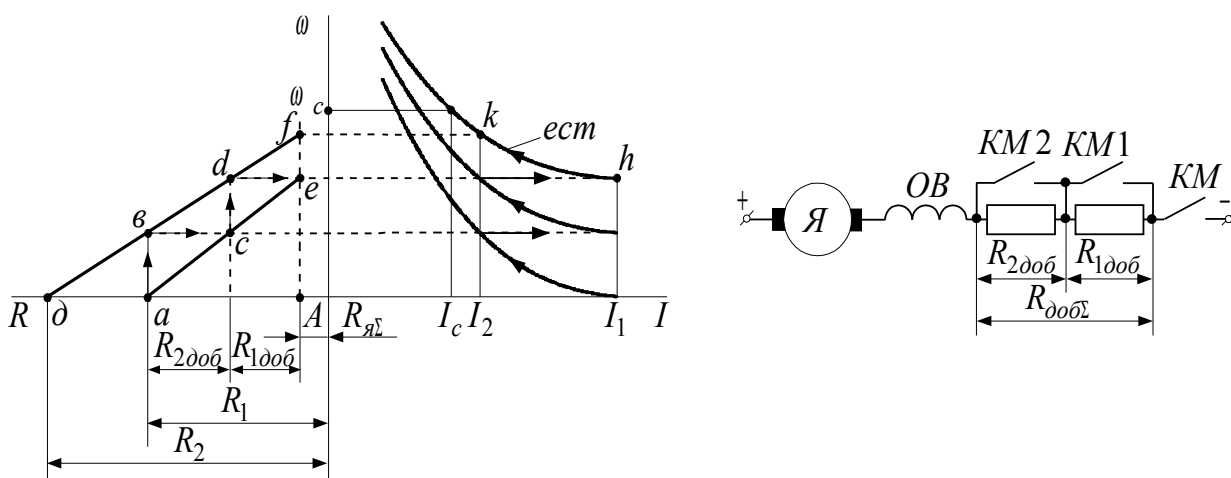


Рисунок 10.7

- 1) строится естественная характеристика двигателя (раздел 9.2),
- 2) исходя из желательных пикового момента и момента переключения при пуске, определенных аналогично рассмотренному в разделе 10.2, задаемся величинами пикового тока  $I_1$  и тока переключения  $I_2$  [токи определяются по каталожной зависимости

$M_* = f(I_*)]$  и откладываем их на естественной характеристике (точки  $h$  и  $k$ ),

- 3) откладываем во втором квадранте по оси абсцисс сопротивление якорной цепи двигателя  $R_{я\Sigma}$ , сопротивление  $R_1 = \frac{U_H}{I_1}$  (точка  $a$ ) и сопротивление  $R_2 = \frac{U_H}{I_2}$  (точка  $d$ ),
- 4) проводим через точки  $h$  и  $k$  параллельные горизонтальные прямые до пересечения с вертикалью  $Af$  в точках  $e$  и  $f$  (вертикаль расположена слева от оси ординат на расстоянии  $R_{я\Sigma}$ ),
- 5) соединяем точки  $a$  и  $e$ ,  $f$  и  $d$  прямыми линиями, которые и определяют линейную зависимость между скоростью и сопротивлением якорной цепи двигателя при постоянных токах якоря  $I_1$  и  $I_2$ ,
- 6) проводятся вертикальные и горизонтальные линии  $ab$ ,  $bc$ ,  $cd$ ,  $de$ , которые являются отражением пускового процесса в осях  $\omega$  и  $R$ .

Построение считается правильным, если последняя горизонталь  $de$  пройдет через точку  $e$ . Если этого не произойдет, необходимо, в зависимости от требований, предъявляемых к процессу пуска, изменить значения токов  $I_1$  и  $I_2$  и повторить построение, имея в виду, что при уменьшении разницы между токами  $I_1$  и  $I_2$  количество пусковых ступеней возрастает, и наоборот. При этом должны соблюдаться определенные ограничения, оговоренные ранее.

После завершения удачного построения определяются величины пусковых резисторов. В масштабе это выражается так:

$$bc = R_{1\partial o\partial}, \quad de = R_{2\partial o\partial}, \quad aA = R_{\partial o\partial\Sigma}.$$

При построении пусковых реостатных характеристик поступаем следующим образом. В случае, когда момент (ток) переключения больше номинального или равен ему, характеристику на пусковом участке  $M_1 - M_2$  можно считать линейной, и, соответственно, момент на этом участке будет пропорционален току. Ошибка такой линеаризации при  $M_2 = M_n$  не превышает 10% и уменьшается с увеличением  $M_2$ . В данном курсовом проекте так можно поступать тогда, когда от электропривода требуется максимальное быстродействие или максимально допустимое ускорение достаточно большое.

Если момент (ток) переключения меньше номинального, то нелинейность характеристик двигателя последовательного возбуждения существенна, и ошибка линеаризации превышает 10%. Поэтому необходимо построить реостатные характеристики на участке  $M_1 - M_2$ , определив параметры одной – двух промежуточных точек по выражению:

$$\omega_u = \omega_e \frac{U_n - I_i(R_{я\Sigma} + R_p)}{U_n - I_i^*R_{я\Sigma}}, \quad (10.22)$$

где  $I_i$  – значение промежуточного тока,  $I_2 < I_i < I_1$ ,

$\omega_{ei}$  – скорость на естественной характеристике при токе  $I_i$ ,

$\omega_{ui}$  – скорость на реостатной характеристике при токе  $I_i$ .

Здесь момент не будет пропорционален току, и величину его следует определять по универсальным характеристикам (рисунок 9.2).

### 1.6 Расчет и построение рабочей характеристики двигателя

Рабочая характеристика – это характеристика двигателя при работе с полной нагрузкой на пониженной скорости. Механизмы, для которых проектируются электропривода, имеют две скорости:

- рабочую  $\omega_{c1}$  при полной нагрузке,
- повышенную  $\omega_{c2}$  при работе на холостом ходу или с пониженной нагрузкой.

#### 10.1.4 Расчет и построение рабочей характеристики двигателя с линейной механической характеристикой

Рабочая характеристика двигателя постоянного тока с независимым возбуждением и асинхронного двигателя с фазным ротором (линейная часть) строится по двум точкам: точка идеального холостого хода и точка рабочего режима, координаты которых ( $\omega_0, \omega_{c1}, M_{c1}$ ) определены ранее (рисунок 10.8).

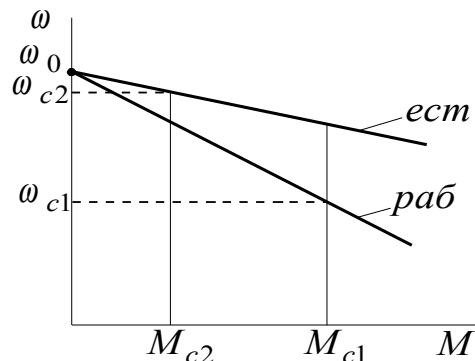


Рисунок 10.8

Скорость  $\omega_{c2}$  на естественной характеристике при малой нагрузке  $M_{c2}$  определим из уравнения естественной характеристики:

$$M = \beta_e (\omega_0 - \omega), \quad (10.23)$$

где  $\beta_e$  – модуль статической жесткости естественной характеристики.

Подставив в (10.23)  $M_{c2}, \beta_e, \omega_0$ , получим:

$$\omega_{c2} = \omega_0 - \frac{M_{c2}}{\beta_e}. \quad (10.24)$$

В зависимости от того, как располагаются рабочая характеристика относительно пусковой диаграммы двигателя, необходима та или иная коррекция либо пусковой диаграммы, либо траектории пуска двигателя под нагрузкой  $M_{c1}$  до скорости  $\omega_{c1}$  (рисунок 10.9).

В случае, когда рабочая характеристика располагается ниже пусковых, можно либо запустить двигатель сразу по рабочей характеристике с добавочным сопротивлением  $R_{раб}$ , либо по пусковой диаграмме с выходом на рабочую характеристику из точки  $a$ , или из точки  $b$  (рисунок 10.9 а). При этом нужно иметь в виду, что выход на рабочую характеристику из точки  $b$  технически осуществить сложнее.

Во всех этих случаях нужна обязательная проверка обеспечения заданной производительности механизма.

Если рабочая характеристика располагается между пусковыми, то прежде всего нужно попробовать использовать ее вместо одной из ступеней пускового реостата (рисунок 10.9б). В случае обеспечения максимального быстродействия нельзя превышать величину  $M_I$ , и переключение на рабочую характеристику следует произвести из точки  $a$ , а переключение на пусковую характеристику из точки  $b$ .

При этом надо проверить соблюдение условия:

$$M_b \geq (1.1 - 1.2)M_{c2}. \quad (10.25)$$

Если же электропривод обеспечивает определенное ускорение, то возможны отклонения как пиковых моментов, так и моментов переключения при соблюдении условия (10.25) и условий:

$$M_{\max} \leq \lambda M_H \quad (10.26)$$

для двигателей постоянного тока

$$M_{\max} \leq (0.8\lambda M_H = 0.8M_K) \quad (10.27)$$

для асинхронного двигателя.

Если в этом случае не получается использовать рабочую характеристику в качестве пусковой, необходимо ввести отдельную ступень пускового реостата и переключаться на рабочую характеристику либо из точки *в*, либо из точки *г*. Технически более простым является переключение из точки *в*.

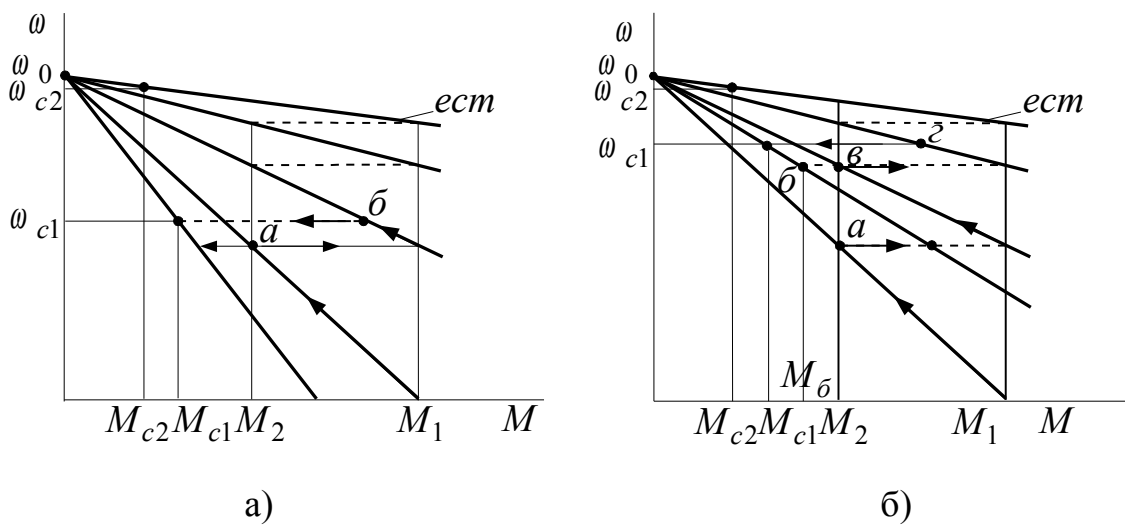


Рисунок 10.9

Здесь также нужна проверка на обеспечение производительности механизма.

### 10.1.5 Расчет и построение рабочей характеристики двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением

Как было указано в разделе 6, имеется два варианта рабочих характеристик двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением.

Первый вариант (когда  $M_{c1} < 0.85M_H$ ) предполагает получение пониженной скорости  $\omega_{c1}$  на реостатной характеристике (рисунок 10.10). Ее построение ведется в следующей последовательности.

На естественной электромеханической характеристике отмечается точка *а* ( $M = M_{c1}$ ,  $I = I_{c1}$ ,  $\omega = \omega_{ec1}$ ). Ток  $I_{c1}$  определяется по каталожной кривой  $M_s = f(I_s)$ . Затем по выражению из [2]:

$$\omega_u = \omega_e \frac{U - I(R_{я\Sigma} + R_p)}{U - I \cdot R_{я\Sigma}}, \quad (10.28)$$

подставляя в него  $I_{c1}$ ,  $\omega_{ec1}$  и  $\omega_{c1}$ , определим добавочное сопротивление  $R_p$ , которое нужно включить для получения необходимой скорости  $\omega_{c1}$ :

$$R_p = \frac{(U - I_{c1} \cdot R_{я\Sigma})(\omega_{ec1} - \omega_{c1})}{I_{c1} \cdot \omega_{ec1}}. \quad (10.29)$$

Подставляя в выражение (10.28) значения тока от  $I_* \approx 0.2I_H$  до  $I = I_1$  (рисунок 10.10) и соответствующие этим значениям тока скорости на естественной характеристике, получим значения скорости на реостатной характеристике.

Теперь в зависимости от того, как располагаются рабочая характеристика относительно пусковой диаграммы двигателя, необходима коррекция либо пусковой диаграммы, либо траектории пуска двигателя под нагрузкой  $M_{c1}$ , до скорости  $\omega_{c1}$ . Эта коррекция проводится так же, как в разделе 10.2.1.

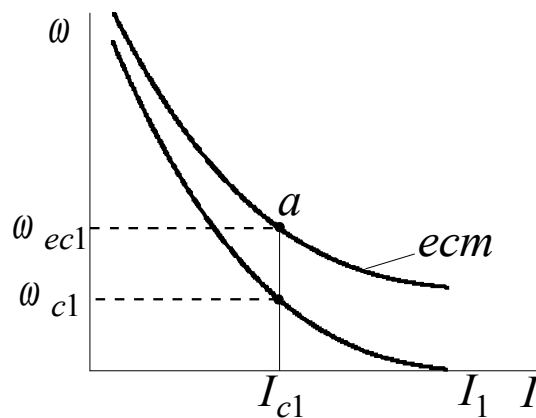


Рисунок 10.10

Двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением имеет неблагоприятные (мягкие) характеристики при работе в режиме холостого хода и малой нагрузки. В таких режимах возможно значительное (вплоть до недопустимого) повышение скорости, что приводит к невозможности работы, даже если предел максимально-допустимой скорости не превышен.

В данном курсовом проекте этот режим тем более недопустим, так как за повышенную скорость при минимальной нагрузке в разделе 6 принята номинальная скорость двигателя  $\omega_n$ . Если для двигателя постоянного

тока с независимым возбуждением и для асинхронного двигателя с фазным ротором, имеющих жесткие естественные характеристики, разница между скоростями  $\omega_{c2}$  и  $\omega_n$  незначительна, то для двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением эта разница может превышать 100%.

Поэтому в случае применения двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением необходимо обеспечить его работу при малых нагрузках со скоростью, близкой к номинальной. Самым надежным и довольно легко просчитываемым вариантом для этой цели может служить схема параллельного включения якоря и последовательной обмотки возбуждения (рисунок 10.11) при сопротивлении  $R_n = 0$  [3].

В этом случае легко обеспечить номинальный поток двигателя, который будет постоянным, и необходимую скорость  $\omega_n$ , так как такая схема включения аналогична схеме включения двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.

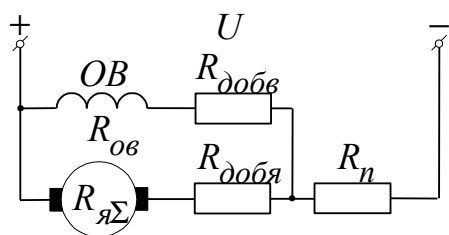


Рисунок 10.11

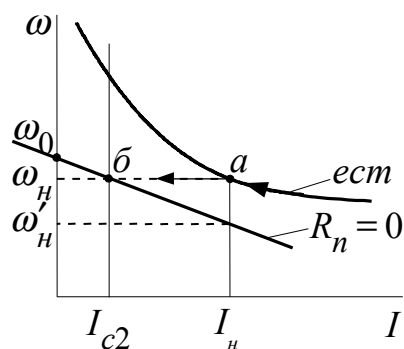


Рисунок 10.12

В цепи возбуждения для создания магнитного потока, равного номинальному, необходимо протекание номинального тока двигателя  $I_n$ .

Тогда

$$R_{добв} = \frac{U_n}{I_n} - R_{обв} \quad (10.30)$$

Из выражения естественной электромеханической характеристики двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением

$$\omega = \frac{U - I \cdot R_{я\Sigma}}{K\Phi(I)} \quad (10.31)$$

определим параметр  $K\Phi_n$ :



$$K\Phi_H = \frac{U_H - I_H * R_{я\Sigma}}{\omega_H} . \quad (10.32)$$

Затем определяем величину сопротивления  $R_{\text{добя}}$ , обеспечивающего при моменте  $M_{c2}$  (токе  $I_{c2}$ ) скорость двигателя  $\omega_{c2}$ . Для этого в выражение электромеханической характеристики двигателя с независимым возбуждением

$$\omega = \frac{U_H - I(R'_{я\Sigma} + R_{\text{добя}})}{K\Phi_H} \quad (10.33)$$

подставим значения  $I_{c2}$  и  $\omega_{c2} = \omega_H$ . Тогда получим:

$$R_{\text{добя}} = \frac{U_H - K\Phi_H \omega_H}{I_{c2}} - R'_{я\Sigma} , \quad (10.34)$$

где  $R'_{я\Sigma} = R_{я\Sigma} - R_{\text{об}}$ .

Характеристика (рисунок 10.12), как и для двигателя с независимым возбуждением строится по двум точкам: точке идеального холостого хода ( $I = 0, \omega_0 = \frac{U_H}{K\Phi_H}$ ) и точке номинального режима ( $I = I_H, \omega = \omega'_H$ ):

$$\omega'_H = \frac{U_H - I_H(R'_{я\Sigma} + R_{\text{добя}})}{K\Phi_H} \quad (10.35)$$

Точка ( $I = I_{c2}, \omega = \omega_H$ ) расположена близко к точке идеального холостого хода, и, поэтому использование ее для построения этой характеристики может привести к значительной погрешности.

Таким образом, при пуске на естественную характеристику, когда двигатель достигнет скорости  $\omega_H$ , с помощью релейно-контакторной аппаратуры с максимальным использованием пусковых резисторов включается схема, представленная на рисунке 10.11, и двигатель практически мгновенно (если считать  $T_g \approx 0$ ) переходит с естественной характеристики на искусственную (из точки  $a$  в точку  $b$  на рисунке 10.12), а затем работает с малой нагрузкой на жесткой характеристике с номинальной скоростью.

Второй вариант рабочей характеристики двигателя (когда  $M_{c1} \geq 0.85M_H$ ) предполагает получение пониженной скорости на естественной характеристике ( $\omega_{c1} \approx \omega_H$ ). Повышенную же скорость также, как и в предыду-

шем случае, обеспечим (как было указано в разделе 6) параллельным включением якоря и обмотки возбуждения при соответствующем ослаблении магнитного потока двигателя по схеме, представленной на рисунке 10.13.

Расчет и построение искусственной характеристики для получения повышенной скорости  $\omega_{c2}$  ведется следующим образом.

Запишем выражение для скорости  $\omega_{c2}$ , полученной по вышеуказанной схеме:

$$\omega_{c2} = K_{\omega} \cdot \omega_n = \frac{(U_n - I_{c2} R'_{я\Sigma}) \cdot K_{\Phi}}{K_{\Phi_n}}, \quad (10.36)$$

где  $K_{\omega} = \frac{\omega_{c2}}{\omega_n},$

$$K_{\Phi} = \frac{\Phi_n}{\Phi_{осл}},$$

$\Phi_{осл}$  — величина ослабленного магнитного потока.

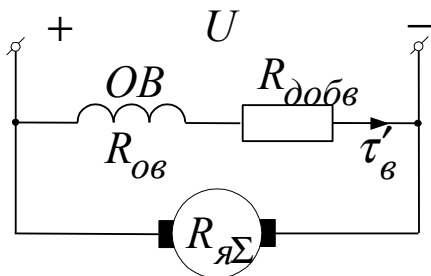


Рисунок 10.13

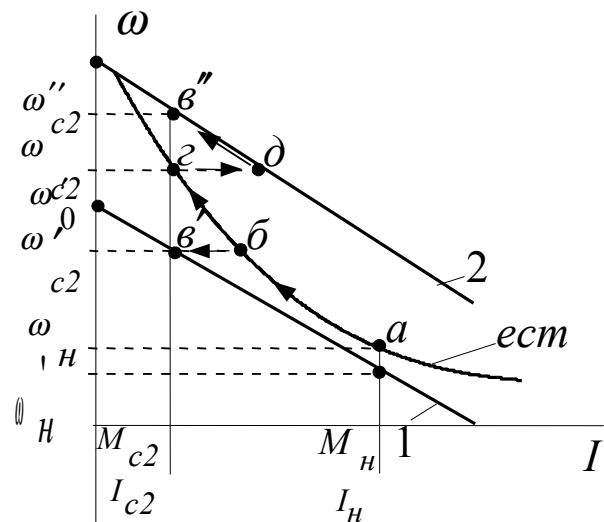


Рисунок 10.14

Подставляя в выражение (10.36) величину  $K_{\Phi_n}$  из выражения (10.32), получим величину  $K_{\Phi}$ , характеризующую степень ослабления магнитного потока по сравнению с номинальным.

$$K_{\Phi} = K_{\omega} \cdot \frac{U_n - I_n R_{я\Sigma}}{U_n - I_{c2} R'_{я\Sigma}}. \quad (10.37)$$

Теперь определяем величину добавочного сопротивления в цепи обмотки возбуждения:

$$R_{доб} = \frac{U_n \cdot K_{\Phi}}{I_n} - R_{ов}. \quad (10.38)$$

Далее строим электромеханическую характеристику двигателя, работающего по схеме, представленной на рисунке 10.14, по двум точкам, так как характеристика линейна.

$$\omega_0 = \frac{U_n \cdot K_{\Phi}}{K_{\Phi_n}}, \quad \omega'_n = \frac{U_n - I_n \cdot R'_{я\Sigma}}{K_{\Phi_n}} K_{\Phi}. \quad (10.39)$$

На рисунке 10.14 приведены естественная и искусственные характеристики двигателя. Причем, в зависимости от величин  $I_{c2}$  и  $\omega_{c2}$  могут быть получены искусственные характеристики 1 или 2, и траектории пуска при включении схемы, представленной на рисунке 10.13, будут различными.

В одном случае (1) эта траектория  $a, б, в'$ , и переход с естественной характеристики на искусственную в рабочую точку  $в'$  происходит при постоянной скорости практически мгновенно (если  $T_s \approx 0$ ). В другом случае (2) эта траектория  $a, б, г, д, в''$ , и переход с естественной характеристики на искусственную происходит также, как и в предыдущем случае (из точки  $г$  в точку  $д$ ), а в рабочую точку двигатель разгоняется по закону уравнения движения. По окончании этих переходных процессов двигатель работает с малой нагрузкой на жесткой характеристике.

### 1.7 Расчет и построение тормозных характеристик двигателя

Торможение двигателя – это процесс, обратный его пуску, и поэтому все характерные особенности пусковых процессов, отмеченные в разделе 10.1, в полной мере относятся и к тормозным процессам.

Для торможения двигателя в реверсивном электроприводе в большинстве случаев применяется торможение противовключением. И только при повышенных требованиях к плавности протекания переходного процесса следует применить динамическое торможение. Соответственно, в неревверсивных электроприводах применяется динамическое торможение. Но при необходимости получения максимального быстродействия следует применить торможение противовключением.

Также как и пусковые диаграммы, тормозные характеристики могут быть построены, а величины сопротивлений тормозных ступеней реостатов определены либо графическим, либо аналитическим способом.

### 10.1.6 Расчет и построение характеристик торможения противовключением двигателя с линейной характеристикой графическим способом

В случае необходимости получения максимального быстродействия принимаем двухступенчатое торможение, при работе с повышенной скоростью на естественной характеристике (с малой нагрузкой). Для торможения с рабочей характеристики (пониженная скорость) используется вторая ступень торможения (рисунок 10.15).

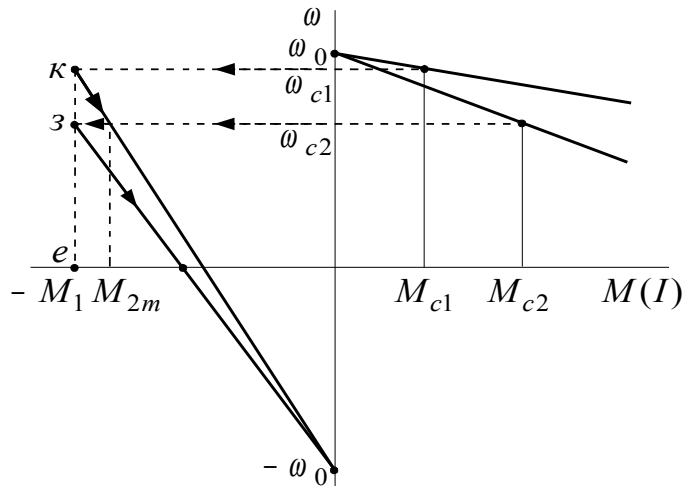


Рисунок 10.15

Здесь  $M_1$  – пиковый момент из пусковой диаграммы (рисунок 10.2),

$M_{c1}$  – малая нагрузка,

$M_{c2}$  – большая нагрузка,

$\omega_{c1}, \omega_{c2}$  – скорости, соответствующие этим нагрузкам.

Построение ведется в том же масштабе, что и пусковая диаграмма. Для большей наглядности и пусковые, и тормозные характеристики нужно строить на одном чертеже.

Дополнительные тормозные ступени реостата определяются по выражениям, аналогичным (10.15):

$$R_{m1} = R_d \frac{\kappa z}{a b}; \quad R_{m2} = R_d \frac{e z}{a b}. \quad (10.40)$$

При этом абсолютно необходимо, чтобы вертикальная линия  $a, b, в, г, д$  на рисунке 10.2 и вертикальная линия  $e, z, \kappa$  на рисунке 10.15 находились на одинаковом расстоянии от начала координат. Момент переключения  $M_{2m}$  определяется из построения. Таким образом, реостат, включенный в якорную цепь двигателя постоянного тока (одна фаза реостата, включен-

ного в роторную цепь асинхронного двигателя с фазным ротором), будет пятиступенчатым, если пуск и торможение осуществлялись по характеристикам, представленным на рисунках 10.2 и 10.15, (рисунок 10.16).

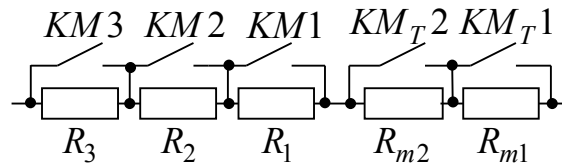


Рисунок 10.16

Если нет крайней необходимости в сокращении времени торможения с пониженной скорости  $\omega_{c2}$  (например, заданная производительность обеспечивается), лучше применить одноступенчатое торможение с помощью тормозной ступени реостата, величина сопротивления которой

$$R_{m\Sigma} = R_{m1} + R_{m2} = R_{\partial} \frac{ек}{аб}. \quad (10.41)$$

В этом случае сокращается количество и стоимость аппаратов управления.

Если техническим заданием определено максимально допустимое в переходных процессах ускорение, то исходными для построения тормозных характеристик являются величины средних постоянных по величине тормозных моментов, определенных в разделе 6 ( $M'_{m1}$  и  $M'_{m2}$  или  $M''_{m1}$  и  $M''_{m2}$ ). Так как, при их определении ускорение считалось постоянным, тормозные моменты при торможении с различной нагрузкой и с разных начальных скоростей могут значительно отличаться друг от друга, причем в большую, либо в меньшую сторону. Теоретически возможно даже их равенство:

$$M_{m1} = M_{m2}. \quad (10.42)$$

Поэтому должны быть построены обе тормозные характеристики (рисунок 10.17).

Из этого рисунка видно, что реостатные характеристики торможения противовключением должны быть построены таким образом, чтобы площадь между характеристикой и осями координат примерно равнялась в одном случае:

$$S_{M_{\kappa 1} b_1^{\omega} c_1 0} = S_{M_{m1} a_1^{\omega} c_1 0}, \quad (10.43)$$

а в другом случае:

$$S_{M_{\kappa 2} b_2 \omega_{c2} 0} = S_{M_{m2} a_2 \omega_{c2} 0}. \quad (10.44)$$

Еще раз следует заметить, что построение может быть другим (при  $|M_{m2}| > |M_{m1}|$ ).

Далее, также, как и в предыдущем случае (10.40), определяются тормозные сопротивления, и принимается решение (исходя из тех же соображений) о количестве тормозных ступеней. Однако, зачастую величины тормозных моментов бывают намного меньше пикового момента  $M_l$ , при котором определены пусковые сопротивления. В этом случае необходимо

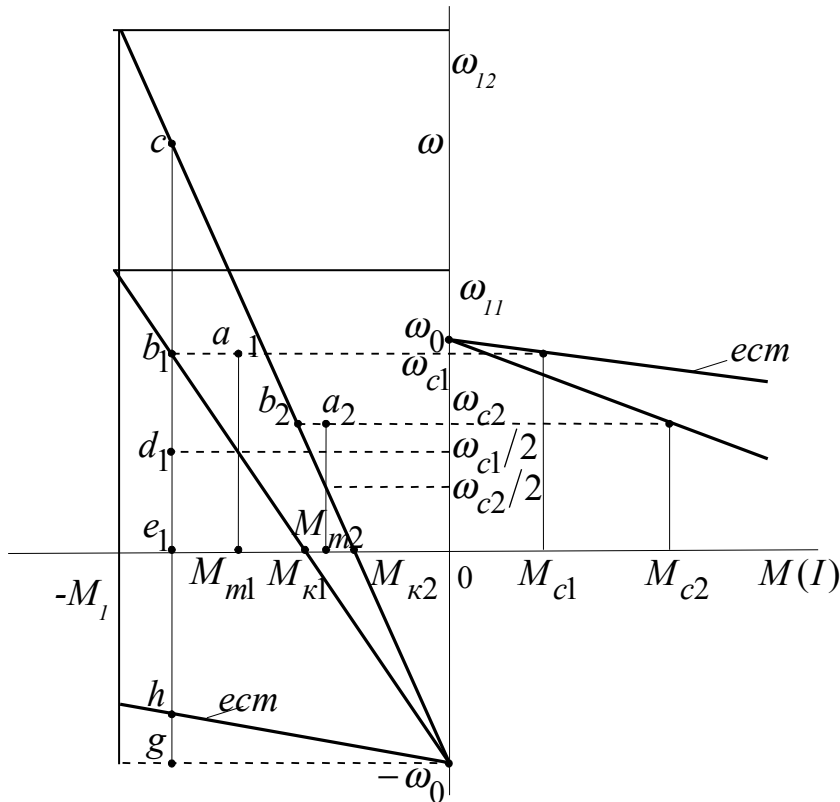


Рисунок 10.17

построить естественную характеристику двигателя для обратного направления вращения (рисунок 10.17) и определить величины тормозных сопротивлений по выражениям:

$$R_{m1} = R_d \frac{e_1 b_1}{gh}, \quad R_{m2} = R_d \frac{b_1 c}{gh}, \quad R_{m\Sigma} = R_{m1} + R_{m2} = R_d \frac{e_1 c}{gh}. \quad (10.45)$$

При одноступенчатом торможении величина сопротивления ступени торможения берется равной  $R_{m\Sigma}$ .

Поскольку одно из торможений в этом случае будет протекать с меньшим ускорением, необходимо обязательно проверить обеспечение необходимой производительности механизма.

### 10.1.7 Расчет и построение характеристик торможения противовключением двигателя с линейной характеристикой аналитическим способом

В случае необходимости получения максимального быстродействия исходными данными для расчетов являются координаты электропривода, определенные ранее:  $M_l$ ,  $R_\partial$ ,  $R_{n\Sigma 1} = R_1 + R_2 + R_3$ ,  $\omega_{c1}$  и  $\omega_{c2}$  (раздел 10. 1).

Для того, чтобы расчет был одинаковым для обоих типов двигателей обозначим одинаково скольжение асинхронного двигателя и относительный перепад скорости двигателя постоянного тока:

$$s_H = \frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0}, \quad s_{cm1} = \frac{\omega_0 + \omega_{c1}}{\omega_0}; \quad s_{cm2} = \frac{\omega_0 + \omega_{c2}}{\omega_0}. \quad (10.46)$$

где  $s_{cm1}$  и  $s_{cm2}$  – скольжение или относительный перепад скорости при торможении со скоростями  $\omega_{c1}$  и  $\omega_{c2}$ .

Тогда при торможении со скорости  $\omega_{c1}$

$$\frac{s_H}{s_{cm1}} = \frac{R_\partial}{R_\partial + R_{n\Sigma} + R_{m\Sigma}}, \quad (10.47)$$

где  $R_{m\Sigma}$  – полное сопротивление тормозной ступени реостата,

$R_{n\Sigma}$  – полное сопротивление пускового реостата.

Из (10.47)

$$R_{m\Sigma} = R_{m1} + R_{m2} = R_\partial \frac{s_{cm1}}{s_H} - R_\partial - R_{n\Sigma}, \quad (10.48)$$

$$R_{m2} = R_\partial \frac{s_{cm2}}{s_H} - R_\partial - R_{n\Sigma}, \quad (10.49)$$

$$R_{m1} = R_{m\Sigma} - R_{m2} = R_\partial \frac{s_{cm1} - s_{cm2}}{s_H}. \quad (10.50)$$

Для определения момента переключения  $M_{2m}$  (рисунок 10.15) составим пропорцию:

$$\frac{\omega_0 + \omega_{c1}}{\omega_0 + \omega_{c2}} = \frac{M_1}{M_{2m}}. \quad (10.51)$$

Отсюда

$$M_{2m} = M_1 \frac{\omega_0 + \omega_{c2}}{\omega_0 + \omega_{c1}}. \quad (10.52)$$

Теперь, исходя из соображений, изложенных ранее, определяемся с количеством тормозных ступеней.

В случае, когда задано ускорение, к исходным данным добавляются значения средних тормозных моментов, определенные в разделе 6.

Ориентируясь на рисунок 10.17, можно составить пропорции:

$$\frac{M_{\kappa 1}}{M_{m1}} = \frac{\omega_0}{\omega_0 + \frac{\omega_{c1}}{2}}, \quad \frac{M_{\kappa 2}}{M_{m2}} = \frac{\omega_0}{\omega_0 + \frac{\omega_{c2}}{2}}, \quad (10.53)$$

где  $M_{\kappa 1}$ ,  $M_{\kappa 2}$  – моменты короткого замыкания на реостатных тормозных характеристиках.

Из (10.53) определим  $M_{\kappa 1}$  и  $M_{\kappa 2}$ :

$$M_{\kappa 1} = 2M_{m1} \frac{\omega_0}{2\omega_0 + \omega_{c1}}, \quad M_{\kappa 2} = 2M_{m2} \frac{\omega_0}{2\omega_0 + \omega_{c2}}. \quad (10.54)$$

Далее определим скорости  $\omega_{11}$  и  $\omega_{12}$  на реостатных тормозных характеристиках, соответствующие пиковому моменту  $M_1$ , из соотношений:

$$\frac{M_{\kappa 1}}{M_1} = \frac{\omega_0}{\omega_0 + \omega_{11}}, \quad \frac{M_{\kappa 2}}{M_1} = \frac{\omega_0}{\omega_0 + \omega_{12}}, \quad (10.55)$$

$$\omega_{11} = \omega_0 \frac{M_1 - M_{\kappa 1}}{M_{\kappa 1}}, \quad \omega_{12} = \omega_0 \frac{M_1 - M_{\kappa 2}}{M_{\kappa 2}}. \quad (10.56)$$

Теперь определим скольжения (относительные перепады скорости)  $s_{11}$  и  $s_{12}$ :

$$s_{11} = \frac{\omega_0 + \omega_{11}}{\omega_0}, \quad s_{12} = \frac{\omega_0 + \omega_{12}}{\omega_0}. \quad (10.57)$$



и по аналогии с предыдущим (10.48), (10.49):

$$R_{m1} = R_{\partial} \frac{s_{11}}{s_H} - R_{\partial} - R_{n\Sigma}, \quad (10.58)$$

$$R_{m2} = R_{\partial} \frac{s_{12}}{s_H} - R_{\partial} - R_{n\Sigma}. \quad (10.59)$$

Затем, также по аналогии с предыдущим, решаем вопрос о количестве тормозных ступеней реостата, не забывая о том, что должна быть обеспечена заданная производительность механизма.

### 10.1.8 Расчет и построение характеристик торможения противовключением двигателя с последовательным возбуждением

Также как и все другие характеристики этого двигателя, характеристики торможения противовключением строятся графическим способом. При необходимости получения максимального быстродействия бросок тока при переходе в режим противовключения должен быть равен максимально допустимому и при скорости  $\omega_{c1}$ , и при скорости  $\omega_{c2}$ . Таким образом, как и в случае двигателя с линейной характеристикой, получаем двухступенчатое торможение (рисунок 10.18).

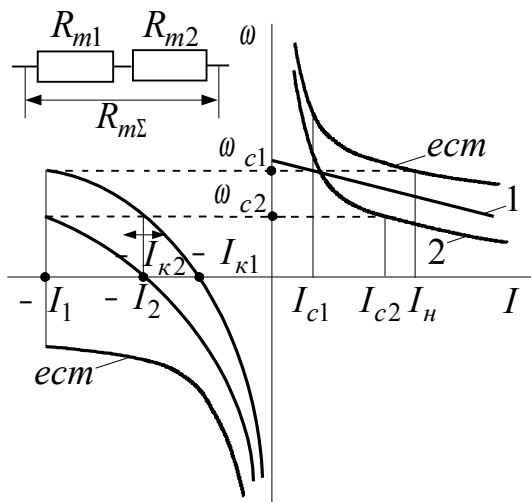


Рисунок 10.18

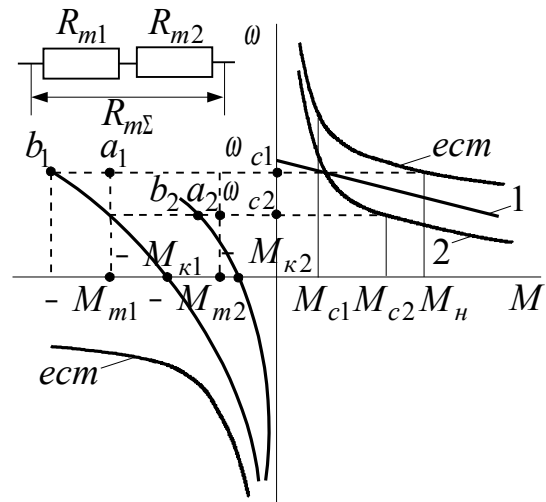


Рисунок 10.19

Сопротивления ступеней противовключения определяем по выражениям из [3]:

$$R_{m\Sigma} = \frac{U_H + E_{c1}}{I_1} - (R_{я\Sigma} + R_{n\Sigma}), \quad (10.60)$$

$$R_{m2} = \frac{U_H + E_{c2}}{I_1} - (R_{я\Sigma} + R_{н\Sigma}), \quad (10.61)$$

где  $I_1$  – максимально-допустимый ток двигателя,

$E_{c1}$  – ЭДС двигателя при работе на скорости  $\omega_{c1}$ ,

$E_{c2}$  – ЭДС двигателя при работе на скорости  $\omega_{c2}$ .

$$E_{c1} = \frac{U_H - I_1 R_{я\Sigma}}{\omega_{e1}} \omega_{c1}, \quad E_{c2} = \frac{U_H - I_1 R_{я\Sigma}}{\omega_{e1}} \omega_{c2}, \quad (10.62)$$

где  $\omega_{e1}$  – скорость на естественной характеристике при токе  $I_1$ .

Если двигатель с последовательным возбуждением работает на скорости  $\omega_{c1}$  по схеме с параллельным включением якоря и обмотки возбуждения (характеристика 1 на рисунке 10.18), то ЭДС  $E_{c1}$  определяется по выражению:

$$E_{c1} = K\Phi_H \omega_{c1}. \quad (10.63)$$

Сопротивление первой тормозной ступени реостата:

$$R_{m1} = R_{m\Sigma} - R_{m2}. \quad (10.64)$$

Если нет крайней необходимости в сокращении времени торможения с пониженной скорости  $\omega_{c2}$  (например, заданная производительность обеспечивается), лучше, как и в случае с двигателем независимого возбуждения, применить одноступенчатое торможение с помощью тормозной ступени реостата  $R_{m\Sigma}$ .

Для возможности определения тока (момента) переключения в случае двухступенчатого торможения и более точного расчета переходного процесса торможения необходимо построить тормозные реостатные характеристики по выражению (10.28) также, как это делалось в разделе 10.5.2. В результате этого построения получим значения тока переключения  $I_2$  (момента  $M_2$ ) и токов короткого замыкания  $I_{к1}$  и  $I_{к2}$  (моментов  $M_{к1}$  и  $M_{к2}$ ), необходимых для настройки схемы управления и расчета переходного процесса торможения.

В случае ограничения заданием на проектирование величины ускорения рабочего органа в переходных процессах исходными данными для построения тормозных характеристик являются величины средних, постоянных по величине тормозных моментов, определенных в разделе 6.

Все дальнейшие построения и рассуждения аналогичны построениям и рассуждениям для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением в разделе 10.3.1 (рисунок 10.19).

Однако, поскольку характеристики двигателя с последовательным возбуждением нелинейные и не имеют точки пересечения с осью ординат, в которой сходятся все реостатные характеристики двигателя постоянного тока с независимым возбуждением, построение реостатных характеристик, обеспечивающих необходимые тормозные моменты, усложняется. Прежде чем начертить реостатные характеристики торможения противовключением на рисунке 10.19, необходимо провести предварительные построения и расчеты, которые поясняет рисунок 10.20:

- 1) строим естественную электромеханическую характеристику.
- 2) по каталожным универсальным характеристикам определяем токи  $I_{m1}$  и  $I_{m2}$ , соответствующие постоянным по величине моментам  $M_{m1}$  и  $M_{m2}$ , и проводим через них вертикальные прямые,
- 3) через точки, соответствующие скоростям  $-\omega_{c1}$  и  $-\omega_{c2}$ , проводим горизонтальные прямые,
- 4) проводим ориентировочно реостатные характеристики таким образом, чтобы площадь между характеристикой и осями координат примерно равнялась в одном случае:

$$S_{I_{\kappa 1} b_1 \omega_{c1} 0} = S_{I_{m1} a_1 \omega_{c1} 0}, \quad (10.65)$$

а в другом случае:

$$S_{I_{\kappa 2} b_2 \omega_{c2} 0} = S_{I_{m2} a_2 \omega_{c2} 0}; \quad (10.66)$$

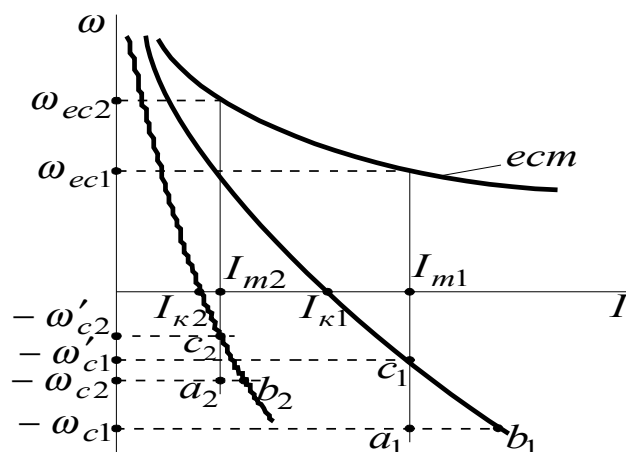


Рисунок 10.20

- 5) определим сопротивления тормозных ступеней по выражению

(10.29), подставляя в него для одной характеристики значения скоростей  $\omega_{ec1}$ ,  $-\omega'_{c1}$  и тока  $I_{m1}$ , а для другой характеристики значения  $\omega_{ec2}$ ,  $-\omega'_{c2}$  и тока  $I_{m2}$ ,

- б) используя выражение (10.28), по трем точкам уточняется вид реостатных характеристик в области отрицательных скоростей (точки  $I_{к1}$ ,  $c_1$ ,  $b_1$  для одной характеристики и точки  $I_{к2}$ ,  $c_2$ ,  $b_2$  - для другой).

По построенным тормозным характеристикам определяются пиковые токи и моменты, токи и моменты короткого замыкания, токи и моменты переключения (если оно необходимо), а также начальные и конечные скорости торможения.

### 10.1.9 Расчет и построение характеристик динамического торможения для двигателей постоянного тока

Динамическое торможение двигателя постоянного тока с независимым возбуждением осуществляется по схеме, представленной на рисунке 10.21. При этом тормозной ток определяется выражением:

$$I_m = \frac{E}{R_{я\Sigma} + R_{\partial m}} \quad (10.67)$$

Поскольку при переходе в тормозной режим скорость двигателя достаточно высокая (особенно при торможении с естественной характеристики), то ЭДС двигателя  $E$  близка по величине к напряжению сети в двигательном режиме, и броски тормозного тока должны быть ограничены до допустимых значений добавочными сопротивлениями  $R_{\partial m}$ , близкими по величине к пусковым сопротивлениям  $R_{н\Sigma 1}$ .

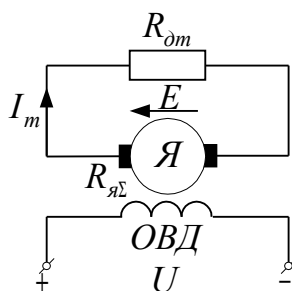


Рисунок 10.21

Поэтому для динамического торможения применяются рассчитанные ранее пусковые сопротивления. В этом случае тормозная диаграмма строится перенесением пусковой диаграммы во второй квадрант в перевернутом виде (рисунок 10.22)

Что касается количества ступеней, то оно выбирается исходя из конкретных (заданных) условий торможения.

Для получения максимального быстродействия используются все пусковые ступени реостата. Причем для упрощения технической реализации моменты  $M_1$  и  $M_2$  берутся такими же, как и при пуске (траектории  $c_2, z, a, б, в, г, д, e, 0$  и  $c_1, u, a, б, в, г, д, e, 0$  на рисунке 10.22).

В случае необходимости получения определенного ускорения траектория должна быть изменена в сторону уменьшения среднего тормозного момента до значения  $M_m$  (траектории  $c_2, z, a_1, б_1, в_1, г_1, д_1, e_1, 0$  и  $c_1, u, a_1, б_1, в_1, г_1, д_1, e_1, 0$  на рисунке 10.22).

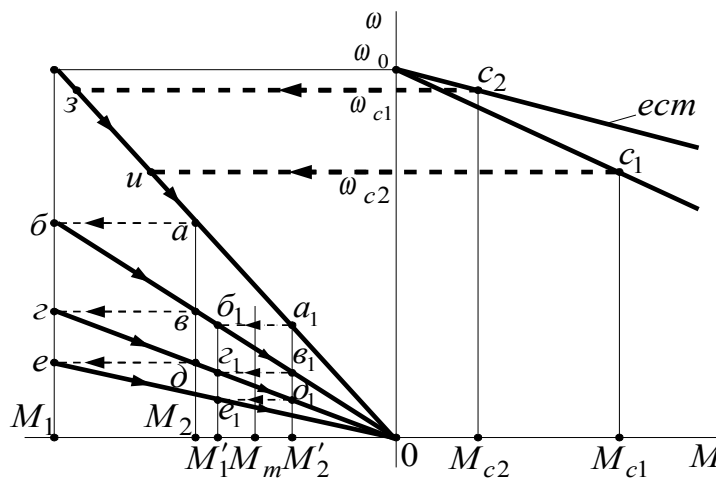


Рисунок 10.22

где  $M_1$  – пиковый момент,

$M_2$  – момент переключения.

$M_1$  и  $M_2$  заданы при расчете пусковой диаграммы.

Значение среднего тормозного момента берется меньшим из двух, определенных по выражениям (6.3) или (6.5). В этом случае допустимое ускорение не будет превышено.

Если требования к быстродействию занижены или вообще отсутствуют, можно исключить одну или две промежуточные ступени, или вообще осуществить торможение в одну ступень по траекториям  $c_1, u, o$  или  $c_2, z, , o$  на рисунке 10.22).

По построенной тормозной диаграмме, представленной на рисунке 10.22, определяются все параметры, необходимые для расчета переходных процессов (пиковые моменты и моменты переключения, а также скорости переключения).

Двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением имеет два режима динамического торможения: с самовозбуждением и с независимым возбуждением. Режим динамического торможения с самовозбуждением применяется в основном в качестве аварийного, так как элек-

трическое торможение возникает при наличии определенной скорости двигателя. В качестве рабочего торможения применяется динамическое торможение с независимым возбуждением, осуществляемое по той же схеме, представленной на рисунке 10.19, что и для двигателя с независимым возбуждением.

При этом, для получения номинального потока возбуждения может быть использован резистор  $R_{добв}$ , величина сопротивления которого определена по (10.30).

Тормозная диаграмма для случая получения максимального быстродействия строится аналогично построению пусковой диаграммы двигателя с независимым возбуждением исходя из уже имеющихся пусковых сопротивлений. При этом, для того чтобы использовать пусковую аппаратуру управления в режиме торможения, желательно сохранить величину тока переключения  $I_2$  или величины скоростей переключения из пусковой диаграммы двигателя с последовательным возбуждением.

Если заданием на проектирование ограничено ускорение, то построение тормозной диаграммы и определение параметров, необходимых для расчета переходных процессов, производится так же, как и для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.

#### **10.1.10 Расчет и построение характеристик динамического торможения для асинхронного двигателя с фазным ротором**

Схема динамического торможения асинхронного двигателя с фазным ротором приведена на рисунке 10.23.

Характеристики динамического торможения асинхронного двигателя, хотя и имеют вид, аналогичный характеристикам двигателя, работающего в двигательном режиме, в корне от них отличаются и по своим параметрам ( $M_k, s_k$ ), и по физическим процессам, протекающим в двигателе. Достаточно отметить только одно различие, чтобы понять, насколько в принципе отличаются эти режимы работы.

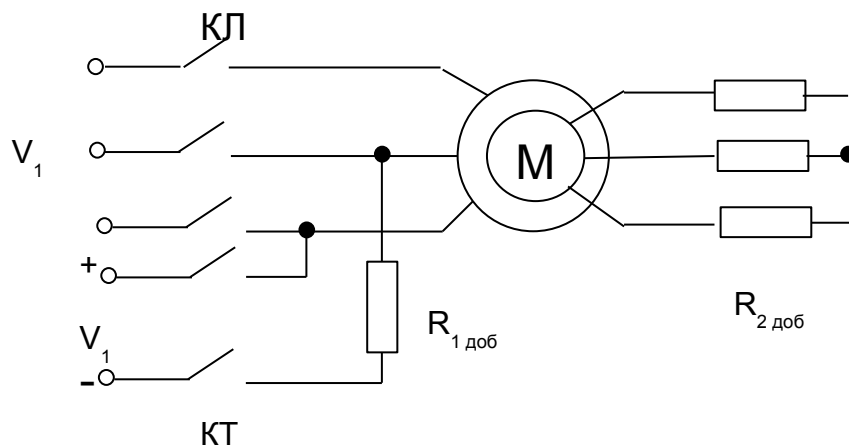
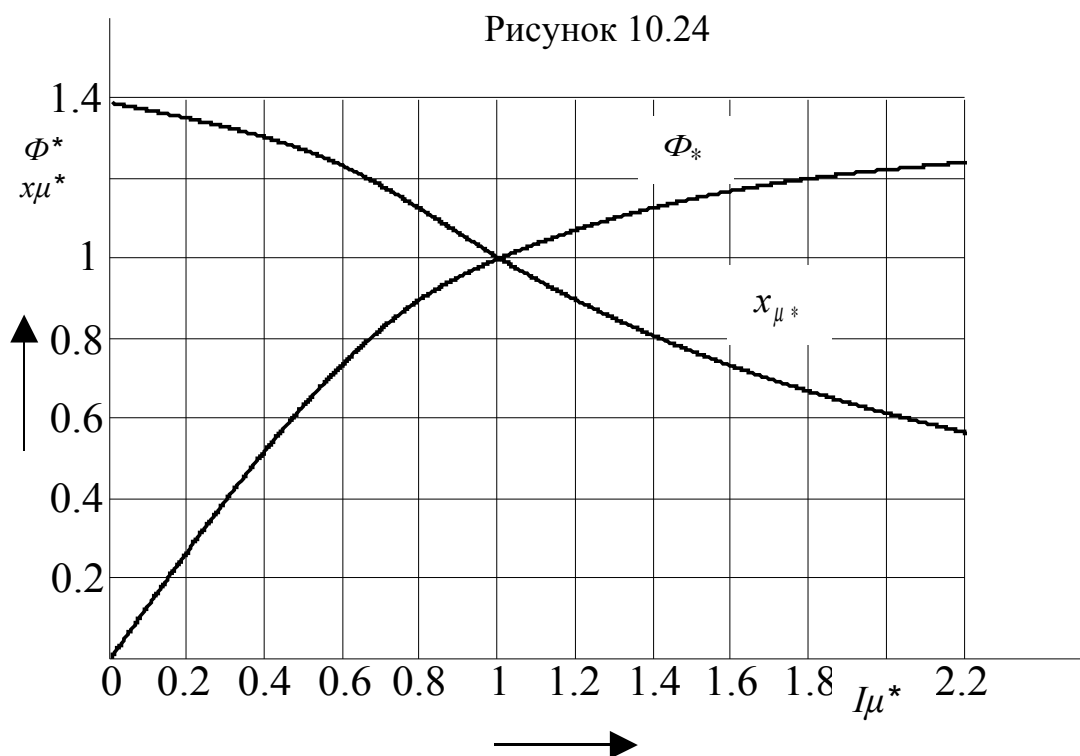


Рисунок 10.23

Асинхронный двигатель, работающий в двигательном режиме при тех условиях, которые определены техническим заданием, получает питание от источника напряжения. Режим динамического торможения, когда по статору двигателя протекает постоянный ток, является частным случаем питания асинхронного двигателя от источника тока при частоте  $f = 0$ . Этот факт определяет различные подходы к рассмотрению процессов, протекающих в двигателе в этих режимах.

Вследствие непостоянства магнитного потока асинхронного двигателя в режиме динамического торможения (при малой скорости уменьшается размагничивающее действие тока ротора, и магнитный поток увеличивается), расчет его механических характеристик следует вести с учетом насыщения по точкам с помощью кривой намагничивания (кривая 1 на рисунке 10.24).

Для облегчения расчетов на рисунке 10.24 приведена зависимость  $x_{\mu^*} = f(I_{\mu^*})$  (кривая 2).



Здесь  $\Phi^*$  - магнитный поток двигателя в относительных единицах;

$x_{\mu^*}$  - индуктивное, изменяющееся по величине сопротивление цепи намагничивания двигателя, определяемое ЭДС статора  $E_{1^*}$  и током намагничивания  $I_{\mu^*}$  в относительных единицах.

$$x_{\mu^*} = \frac{E_{1^*}}{I_{\mu^*}} = \frac{E_1}{E_{1H}} \cdot \frac{I_0}{I_{\mu}}, \quad (10.68)$$

где  $I_0$  - ток холостого хода статора двигателя,

$E_{1H}$  - ЭДС фазы статора при номинальном напряжении и токе холостого хода  $I_0$ .

$$E_{1H} \approx 0.95 \cdot U_{1H}. \quad (10.69)$$

Расчетные формулы [1] имеют вид:

$$\left( \frac{R'_2}{s_a} \right)^2 = \frac{I_{\mu}^2 (x_{\mu} + x'_2)^2 - I_{\text{экв}}^2 x'_2}{I_{\text{экв}}^2 - I_{\mu}^2}, \quad (10.70)$$

$$I'_2 = \frac{I_{\text{экв}} x_{\mu}}{\sqrt{\left( \left( \frac{R'_2}{s_a} \right)^2 + (x_{\mu} + x'_2)^2 \right)}}, \quad (10.71)$$

$$M = \frac{3 I_2'^2}{\omega_0} \left( \frac{R'_2}{s_a} \right). \quad (10.72)$$

где  $s_a$  - абсолютное скольжение для режима динамического торможения:

$$s_a = \frac{\omega}{\omega_0}. \quad (10.73)$$

$I_{\text{экв}}$  - трехфазный ток статора двигателя, эквивалентный по создаваемой МДС постоянному току, протекающему по обмоткам статора в режиме динамического торможения.



Для определения эквивалентного тока необходимо задаться максимальным значением момента двигателя, развиваемого при динамическом торможении  $M_{\max \partial t}$ .

Чтобы была возможность использования пусковых резисторов, задается  $M_{\max \partial t} = M_K$ .

Из [3] известно, что для создания в режиме динамического торможения максимального момента  $M_{\max \partial t} = (2 \div 2.2)M_H$ , необходимо по статору двигателя пропускать постоянный ток возбуждения  $I_B \approx 3I_0$ . Теперь легко определить эквивалентный ток  $I_{\text{экв}}$

$$I_{\text{экв}} = K_{\text{сх}} I_B, \quad (10.74)$$

где  $K_{\text{сх}}$  – коэффициент схемы включения фаз статора на постоянное напряжение [3].

Если необходимо получить в режиме динамического торможения  $M_{\max \partial t} = 3M_H$ , то постоянный ток возбуждения статора следует увеличить до четырехкратного значения тока холостого хода.

Порядок расчета механической характеристики динамического торможения следующий:

1) задаемся значениями тока намагничивания  $I_\mu$  в пределах от  $I_{\text{экв}}$  до  $I_{\mu \text{пред}}$  и определяем с помощью кривой 2 на рисунке 10.24 значения  $x_\mu$ .  $I_{\mu \text{пред}}$  – это ток намагничивания при больших скольжениях, когда двигатель при данном токе возбуждения  $I_B$  или эквивалентном токе  $I_{\text{экв}}$  выходит из насыщения.

$$I_{\mu \text{пред}} = I_{\text{экв}} \frac{x'_2}{x_{\mu H} + x'_2}, \quad (10.75)$$

где  $x_{\mu H}$  – сопротивление намагничивающего контура ненасыщенного двигателя:

$$x_{\mu H} = \frac{E_1}{I_{\mu H}} = \frac{0.95U_1\phi}{I_0}, \quad (10.76)$$

2) подставляя значения  $I_{э\kappa\upsilon}$ ,  $I_{\mu}$  и  $x_{\mu}$  в выражение (10.70), определяем значения параметров  $\left(\frac{R'_2}{s_a}\right)^2$ ,  $\left(\frac{R'_2}{s_a}\right)$  и  $s_a$ ,

3) по выражению (10.71) определяем токи  $I'_2$ , соответствующие задаваемым токам намагничивания  $I_{\mu}$ ,

4) подставляя рассчитанные значения  $I'_2$  и  $\left(\frac{R'_2}{s_a}\right)$  в выражение (10.72), определяем значения моментов, соответствующих определенным значениям  $s_a$ ,

5) скорость двигателя определяем по формуле:

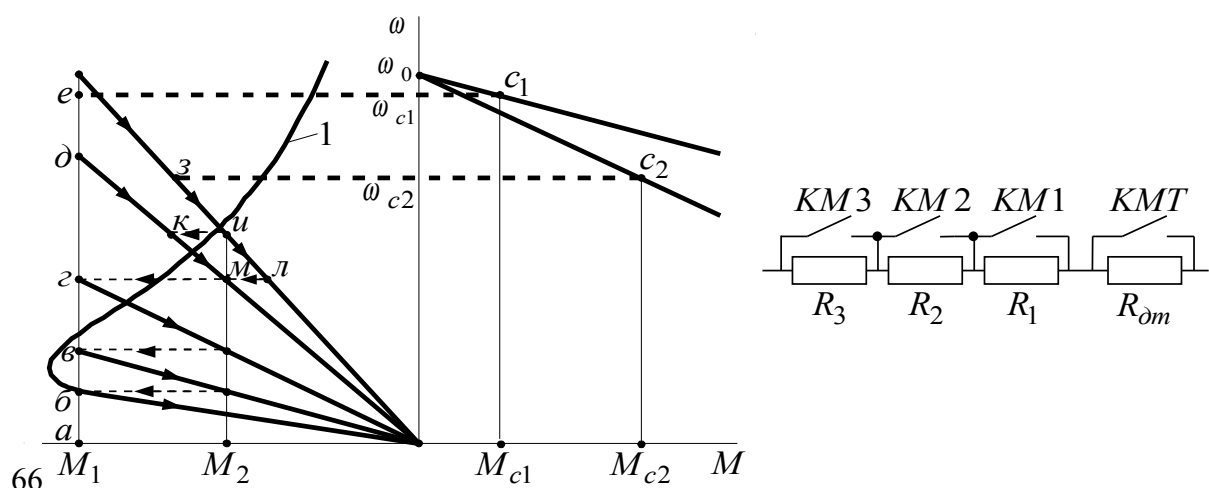
$$\omega = \omega_0 \cdot s_a = \frac{\omega_0 R'_2}{s_a} \quad (10.77)$$

Для удобства результаты расчета следует свести в таблицу:

Таблица

$I_{\mu^*}$	$I_{\mu}$	$x_{\mu^*}$	$x_{\mu}$	$x_{\mu} + x'_2$	$\left(\frac{R'_2}{s_a}\right)^2$	$\left(\frac{R'_2}{s_a}\right)$	$s_a$	$I_{э\kappa\upsilon} x_{\mu}$	$I'_2$	$M$	$\omega$

Если к быстрдействию в режиме торможения особых требований в задании на проектирование не предъявляется, то характеристика динамического торможения при отсутствии добавочных сопротивлений в цепи ротора (естественная характеристика) строится от скольжения  $s_a = 0$  до скольжения, соответствующего скорости двигателя  $\omega_{c1}$ , при работе с малой нагрузкой (кривая 1 на рисунке 10.25).



### Рисунок 10.25

В случае, если требуется максимальное быстродействие или определенное ускорение, большее, чем может обеспечить одна ступень торможения, следует торможение осуществить в несколько ступеней, работая на линейной части естественной и реостатных характеристик динамического торможения.

Ориентировочно оценить время одноступенчатого торможения на естественной характеристике можно, определив графически средний действующий во время торможения момент двигателя и подставив его в выражение

$$t_{mi} = \frac{J_{\Sigma i} \cdot \Delta \omega_i}{M - M_{ci}}, \quad (10.78)$$

где  $J_{\Sigma i}$ ,  $M_{ci}$  и  $\Delta \omega_i$  – момент инерции, момент сопротивления механизма и перепад скорости при торможении с нагрузкой и без нагрузки (с малой нагрузкой).

Если необходимо, строим прямолинейные участки реостатных характеристик динамического торможения, задаваясь теми же значениями моментов  $M_1$  и  $M_2$ , что и при пуске, и используя правило масштабов (рисунок 10.25).

$$b\beta = \frac{a\beta}{R_{\partial}} R_3, \quad \beta\gamma = \frac{a\beta}{R_{\partial}} R_2, \quad \gamma\delta = \frac{a\beta}{R_{\partial}} R_1.$$

Как известно из [1], механические характеристики асинхронного двигателя в режиме динамического торможения гораздо жестче характеристик двигательного режима при одинаковых активных сопротивлениях цепи ротора. Поэтому пиковый момент (а соответственно и пиковый ток) на первой ступени торможения (особенно при торможении с естественной характеристики) может быть гораздо больше момента  $M_1$ . В этом случае возможны следующие варианты выхода из этой ситуации:

- 1) пиковый момент не превышает  $M_{к\delta m}$ . В этом случае все можно оставить, как есть, и допустить кратковременную работу двигателя на нелинейной части характеристики динамического торможения,
- 2) если пиковый момент больше  $M_{к\delta m}$ , то предлагается следующее:
  - а) можно кратковременно в течение работы двигателя на первой ступени торможения увеличить значение постоянного тока  $I_{n1}$ , ориентируясь на соотношение [3]:

$$I_n \approx 1.36 \frac{M_{\kappa \partial m}}{M_H}. \quad (10.79)$$

б) можно ввести дополнительную тормозную ступень с тем, чтобы пиковый момент равнялся  $M_I$  (траектория  $c_1(c_2)$ ,  $e(z)$ ,  $u$ ,  $\kappa$ ,  $m$ ,  $z$  и т.д. на рисунке 10.25), определив величину сопротивления этой ступени из выражения:

$$R_{\partial m} = R_{\partial} \frac{\partial e}{\partial b}.$$

в) наконец, можно просто увеличить сопротивление первой ступени пускового реостата на величину  $R_{\partial m}$ , при этом несколько увеличится время торможения на первой ступени (траектория  $c_1(c_2)$ ,  $e(z)$ ,  $u$ ,  $l$ ,  $m$ ,  $z$  и т.д.).

Все вышесказанное справедливо для получения максимального быстрого действия при торможении.

Если необходимо получить определенное ускорение, то исходными данными являются динамические и тормозные моменты, рассчитанные в разделе 6. Ориентируясь на их значения, также как и для двигателя постоянного тока, строится тормозная диаграмма и определяются все параметры, необходимые для расчета переходных процессов (пиковые моменты и моменты переключения, а также скорости переключения).

## 11 Расчет переходных режимов электропривода

В данном курсовом проекте должны быть рассчитаны переходные процессы пуска и торможения с различной нагрузкой (два пуска и два торможения). В результате расчета должны быть получены зависимости момента, скорости и угла поворота вала от времени  $[M(t), \omega(t), \alpha(t)]$ . Зависимость тока якоря двигателя постоянного тока, тока ротора и статора асинхронного двигателя с фазным ротором от времени  $I(t)$  рассчитывать нет необходимости, так как предполагается работа двигателя на линейной части механической характеристике, где момент двигателя пропорционален его току.

Результаты расчета переходных процессов будут использованы при построении нагрузочных диаграмм электропривода и проверке двигателя по нагреву, перегрузочной способности и заданной производительности.

Для детального исследования переходных процессов электропривода необходимо, кроме его механической инерции, учитывать также электромагнитную инерцию двигателя и жесткость механических передач системы «двигатель – рабочая машина».

Однако, в большинстве практических случаев сочетание механических параметров такие, что механическая часть электропривода без суще-

ственных погрешностей может быть представлена жестким механическим звеном. Кроме того, переходные процессы пуска и торможения двигателя реализуются на реостатных характеристиках, когда электромеханическая постоянная времени двигателя  $T_m$  гораздо больше его электромагнитной постоянной  $T_\varepsilon$ , что позволяет пренебречь ею.

Учитывая вышесказанное, в курсовом проекте переходные процессы рассматриваются без учета жесткости механических передач и электромагнитной инерции. Для иллюстрации же влияния этих факторов один переходный процесс (пуск электропривода с малой нагрузкой  $M_{c2}$ ) рассчитывается с учетом жесткости механической передачи, а выход двигателя на естественную характеристику в этом же переходном процессе рассчитывается с учетом электромагнитной инерции.

### 1.8 Расчет механических переходных процессов электропривода при абсолютно жестких механических связях

Ранее было показано, что при представлении механической части электропривода жестким механическим звеном и при пренебрежении электромагнитной инерцией, электропривод с линейной механической характеристикой представляет собой апериодическое звено с постоянной времени  $T_m$  (рисунок 8.6 б).

Уравнения переходного процесса для этого случая записываются так [1]:

$$\omega = \omega_c + (\omega_{нач} - \omega_c) \cdot e^{-\frac{t}{T_m}}, \quad (11.1)$$

$$M = M_c + (M_{нач} - M_c) \cdot e^{-\frac{t}{T_m}}, \quad (11.2)$$

где  $M_c$  – момент двигателя в установившемся режиме,

$\omega_c$  – скорость двигателя в установившемся режиме,

$M_{нач}$  – момент двигателя в начале переходного процесса,

$\omega_{нач}$  – скорость двигателя в начале переходного процесса.

$T_m$  – электромеханическая постоянная времени, определяемая как:

$$T_m = \frac{J_\Sigma}{\beta} = \frac{J_\Sigma \omega_0}{M_{кз}}, \quad (11.3)$$

где  $M_{кз}$  – момент короткого замыкания на рассматриваемой характеристике.

Процессы пуска и торможения реализуются на реостатных характеристиках в общем случае в несколько ступеней. Причем из расчета и по-

строения статических характеристик известны и начальные, и конечные значения скорости и момента на каждой ступени.

Подставив в (11.1) и (11.2) конечные значения скорости  $\omega_{кон}$  и момента  $M_{кон}$ , определим время работы (разгона или торможения) на данном участке характеристики:

$$\Delta t_i = T_{mi} \cdot \ln \frac{M_{начi} - M_{ci}}{M_{конi} - M_{ci}}. \quad (11.4)$$

Электромеханическая постоянная времени на рассматриваемом участке  $T_{mi}$  может быть определена либо по выражению (11.3), либо по формуле:

$$T_{mi} = J_{\Sigma i} \frac{\omega_{конi} - \omega_{начi}}{M_{начi} - M_{конi}}. \quad (11.5)$$

Время переходного процесса пуска или торможения в случае, когда он осуществляется в несколько ступеней, определяется суммой времен работы на каждой ступени:

$$t_{nn} = \sum_{i=1}^m \Delta t_i, \quad (11.6)$$

где  $m$  – число ступеней пуска или торможения.

Время работы на естественной характеристике, когда  $M_{кон} = M_c$ , и  $\Delta t_{i(e)}$  теоретически равно бесконечности, принимается равным

$$\Delta t_{i(e)} = (3-4)T_{me}. \quad (11.7)$$

Теперь можно построить кривые переходного процесса  $\omega(t)$  и  $M(t)$  (рисунок 11.1).

Для повышения точности построения кривых переходного процесса определим на каждом участке координаты средних точек при  $t_{cpi} = \frac{\Delta t_i}{2}$ :

$$\omega_{cpi} = \omega_{ci} + (\omega_{начi} - \omega_{ci}) \cdot e^{-\frac{\Delta t_i}{2T_{mi}}}, \quad (11.8)$$

$$M_{cpi} = M_{ci} + (M_{начi} - M_{ci}) \cdot e^{-\frac{\Delta t_i}{2T_{mi}}} \quad (11.9)$$

Угол поворота вала двигателя (пути) на рассматриваемом участке определяется по приближенной формуле:

$$\Delta \alpha_i \approx \frac{\omega_{начi} + \omega_{конi}}{2} \Delta t_i \quad (11.10)$$

Суммарный угол поворота вала двигателя (пути) за время переходного процесса  $t_{nn}$  определяется суммированием углов поворота на каждой ступени:

$$\alpha_{nn} = \sum_{i=1}^m \Delta \alpha_i \quad (11.11)$$

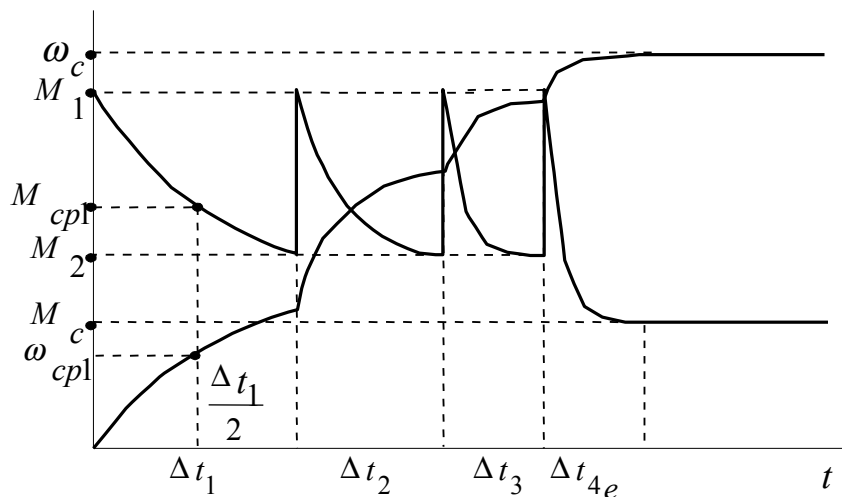


Рисунок 11.1

Таким образом рассчитываются все четыре переходных процесса (два пуска и два торможения), строятся кривые  $\omega(t)$  и  $M(t)$  и определяются углы поворота вала двигателя (пути) за время каждого переходного процесса.

### 1.9 Расчет механического переходного процесса электропривода при наличии упругой механической связи

Выше были приведены система дифференциальных уравнений (8.1) и структурная схема (рисунок 8.4) двухмассовой линеаризованной электромеханической системы. Эти уравнения и схема справедливы при опре-

деленных ограничениях для всех типов двигателей, которые могут быть применены в данном курсовом проекте.

Если пренебречь электромагнитной инерцией ( $T_e = 0$ ), то первое уравнение системы дифференциальных уравнений (8.1) становится уравнением статики, и динамика механической части электропривода будет описываться упрощенной системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} M - M_{12} - M_{c(1)} = J_1 \frac{d\omega_1}{dt} \\ M_{12} - M_{c(2)} = J_2 \frac{d\omega_2}{dt} \\ \frac{dM_{12}}{dt} = c_{12}(\omega_1 - \omega_2). \end{cases} \quad (11.12)$$

Будем считать, что в переходном процессе момент двигателя  $M = M_l = const$ . Тогда после преобразования (11.12) получим дифференциальное уравнение третьего порядка:

$$\frac{1}{\Omega_{12}^2} \cdot \frac{d^3\omega_1}{dt^3} + \frac{d\omega_1}{dt} = \varepsilon_{cp}, \quad (11.13)$$

где  $\varepsilon_{cp} = \frac{M_l - M_{c(1)} - M_{c(2)}}{J_\Sigma} = \frac{M_l - M_c}{J_\Sigma}$  – среднее ускорение системы,

$\Omega_{12} = \sqrt{\frac{c_{12}(J_1 + J_2)}{J_1 \cdot J_2}}$  – частота свободных колебаний системы.

Значение  $M_l = const$  берется равным пусковому моменту, рассчитанному в разделе 6 по одному из выражений (6.2), (6.4) или (6.11).

Решение уравнения (11.13) имеет вид:

$$\omega_1 = \varepsilon_{cp} t + \frac{J_2}{J_1} \frac{\varepsilon_{cp}}{\Omega_{12}} \sin \Omega_{12} t. \quad (11.14)$$

Выражение для скорости  $\omega_2$  получим, подставив в первое уравнение системы (11.12) значение  $M_{12}$  и продифференцировав его:

$$\omega_2 = \varepsilon_{cp} t - \frac{\varepsilon_{cp}}{\Omega_{12}} \sin \Omega_{12} t. \quad (11.15)$$



По выражениям (11.14) и (11.15) строятся кривые  $\omega_1 = f(t)$ ,  $\omega_2 = f(t)$ ,  $\omega_{cp} = \varepsilon_{cp} t = f(t)$ , представленные на рисунке 11.2.

В абсолютно жесткой системе нагрузка передач в процессе пуска равна:

$$M_{12cp} = J_2 \varepsilon_{cp} + M_{c(2)}. \quad (11.16)$$

За счет упругих колебаний нагрузка возрастает и определяется по выражению из [1] (рисунок 11.3):

$$M_{12} = M_{12cp} - (M_{12cp} - M_{c(2)}) \cos \Omega_{12} t. \quad (11.17)$$

Максимум нагрузки наступает при  $\cos \Omega_{12} t = -1$ :

$$M_{12max} = 2M_{12cp} - M_{c(2)}. \quad (11.18)$$

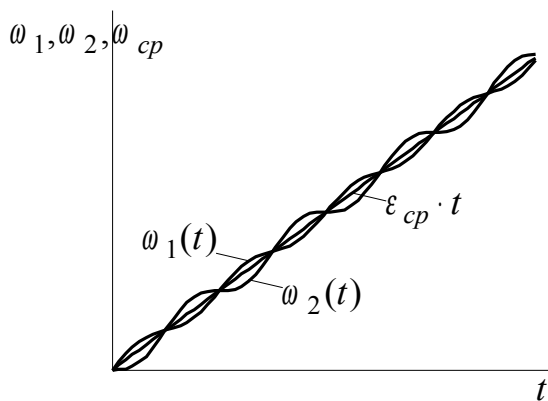


Рисунок 11.2

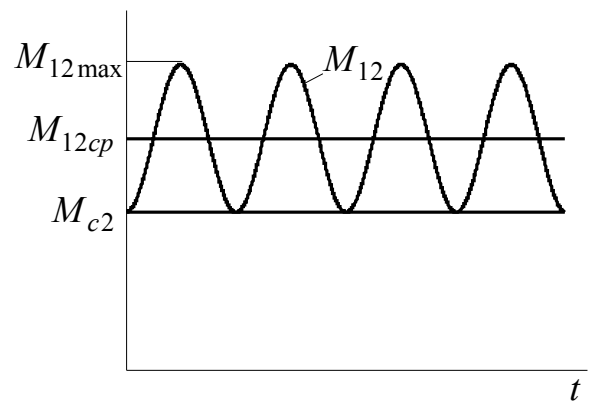


Рисунок 11.3

Динамический коэффициент превышения нагрузки определяется, как:

$$K_{дин} = \frac{M_{12max}}{M_{12cp}} = 2 - \frac{M_{c(2)}}{M_{12cp}} = 2 - \frac{M_{c(2)}}{J_2 \varepsilon_{cp} + M_{c(2)}}. \quad (11.19)$$

Величина  $M_{c(2)}$  (нагрузка на вторую массу электропривода) берется равной моменту сопротивления рабочей машины, приведенному к валу двигателя:

$$M_{c(2)} = \frac{M_{pms2}}{i_p}. \quad (11.20)$$

Момент сопротивления рабочей машины  $M_{pms2}$  (рисунки 3.1, 3.2) определяется по выражениям, приводимым для конкретного механизма в литературных источниках [5 - 10]. Для механизмов, предлагаемых в задании на курсовое проектирование (Приложение А), момент статического сопротивления рассчитываются в соответствии с приложением Б.

Таким образом, наличие упругих механических звеньев в электроприводе приводит к несовпадению мгновенных скоростей  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , так как они содержат колебательные составляющие, хотя в среднем при  $M = const$  переходные процессы протекают равномерноускоренно. Кроме того, динамические нагрузки, обусловленные упругими колебаниями, существенно увеличивают нагрузки передач.

### 1.10 Расчет электромеханического переходного процесса электропривода при абсолютно жестких механических связях

Так как переходные процессы пуска и торможения реализуются на реостатных характеристиках двигателя, когда электромеханическая постоянная времени  $T_m$  значительно превышает электромагнитную постоянную времени  $T_\varepsilon$ , необходимость учета электромагнитной инерции возникает только при расчете переходных процессов, протекающих при работе на естественной характеристике.

Таким переходным процессом в курсовом проекте является конечный этап пуска двигателя, когда закорачивается последняя ступень пускового реостата, и двигатель разгоняется по естественной характеристике до скорости  $\omega_{c2}$ .

Электромеханические переходные процессы в электроприводе в этом случае описываются уравнением динамической механической характеристики двигателя и уравнением движения электропривода при  $C_{l2} = \infty$  [1]:

$$\begin{cases} (1 + T_\varepsilon p)M = \beta(\omega_0 - \omega) \\ M - M_c = J_\Sigma p\omega. \end{cases} \quad (11.21)$$

После преобразований получим дифференциальное уравнение системы, решенное относительно скорости:

$$T_\varepsilon T_m p^2 \omega + T_m p \omega + \omega = \omega_c. \quad (11.22)$$

Аналогично получим дифференциальное уравнение системы, решенное относительно момента:

$$T_{\mathcal{E}} T_M p^2 M + T_M p M + M = M_c. \quad (11.23)$$

Если  $\frac{T_M}{T_{\mathcal{E}}} < 4$ , корни характеристического уравнения сопряженно-комплексные:

$$p_{1,2} = -\alpha \pm j\Omega p, \quad (11.24)$$

где  $\alpha = \frac{1}{2T_{\mathcal{E}}}$ ,  $\Omega p = \sqrt{\frac{1}{T_{\mathcal{E}} T_M} - \frac{1}{4T_{\mathcal{E}}^2}}$ .

При этом решение уравнения (11.22) будет иметь вид [1]:

$$\omega = \omega_c + e^{-\alpha t} \left[ \begin{array}{l} (\omega_{нач} - \omega_c) \cos \Omega p t + \\ + \frac{(M_{нач} - M_c) + J_{\Sigma} \alpha (\omega_{нач} - \omega_c)}{J_{\Sigma} \Omega p} \sin \Omega p t \end{array} \right]. \quad (11.25)$$

Аналогично, решение уравнения (11.23) будет иметь вид:

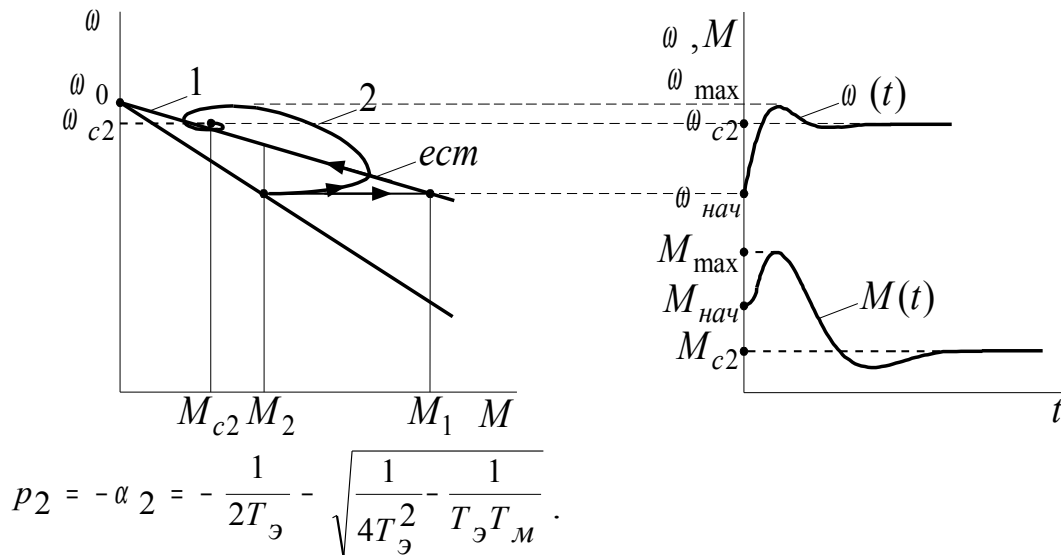
$$M = M_c + e^{-\alpha t} \left[ \begin{array}{l} (M_{нач} - M_c) \cos \Omega p t + \\ + \frac{\beta \Delta \omega_{нач} - M_{нач} (1 - \alpha T_{\mathcal{E}}) - \alpha T_{\mathcal{E}} M_c}{T_{\mathcal{E}} \Omega p} \sin \Omega p t \end{array} \right], \quad (11.26)$$

где  $\Delta \omega_{нач} = \omega_0 - \omega_{нач}$ .

Как видно из выражений (11.25) и (11.26), переходные процессы  $\omega(t)$  и  $M(t)$  имеют колебательный характер (рисунок 11.4а,б).

Если  $\frac{T_M}{T_{\mathcal{E}}} > 4$ , корни характеристического уравнения вещественные:

$$p_1 = -\alpha_1 = -\frac{1}{2T_\vartheta} + \sqrt{\frac{1}{4T_\vartheta^2} - \frac{1}{T_\vartheta T_M}}, \quad (11.27)$$



- а) б)  
 1 – естественная механическая характеристика,  
 2 – динамическая механическая характеристика.

Рисунок 11.4

Тогда решения дифференциальных уравнений (11.22) и (11.23) будут иметь вид [1]:

$$\omega = \omega_c - \left[ \frac{\alpha_2(\omega_{нач} - \omega_c)}{\alpha_1 - \alpha_2} + \frac{M_{нач} - M_c}{J_\Sigma(\alpha_1 - \alpha_2)} \right] \cdot e^{-\alpha_1 t} -$$

$$- \frac{(M_c - M_{нач}) - \alpha_1 J_\Sigma (\omega_{нач} - \omega_c)}{J_\Sigma (\alpha_1 - \alpha_2)} \cdot e^{-\alpha_2 t}, \quad (11.28)$$

$$M = M_c - \left[ \frac{\alpha_2 (M_{нач} - M_c)}{\alpha_1 - \alpha_2} - \frac{M_{нач} - \beta \Delta \omega_{нач}}{T_\partial (\alpha_1 - \alpha_2)} \right] \cdot e^{-\alpha_1 t} - \frac{(M_{нач} - \beta \Delta \omega_{нач}) - \alpha_1 T_\partial (M_{нач} - M_c)}{T_\partial (\alpha_1 - \alpha_2)} \cdot e^{-\alpha_2 t}. \quad (11.29)$$

Как видно из выражений (11.28) и (11.299), переходные процессы  $\omega(t)$  и  $M(t)$  в данном случае монотонные (рисунок 11.5).

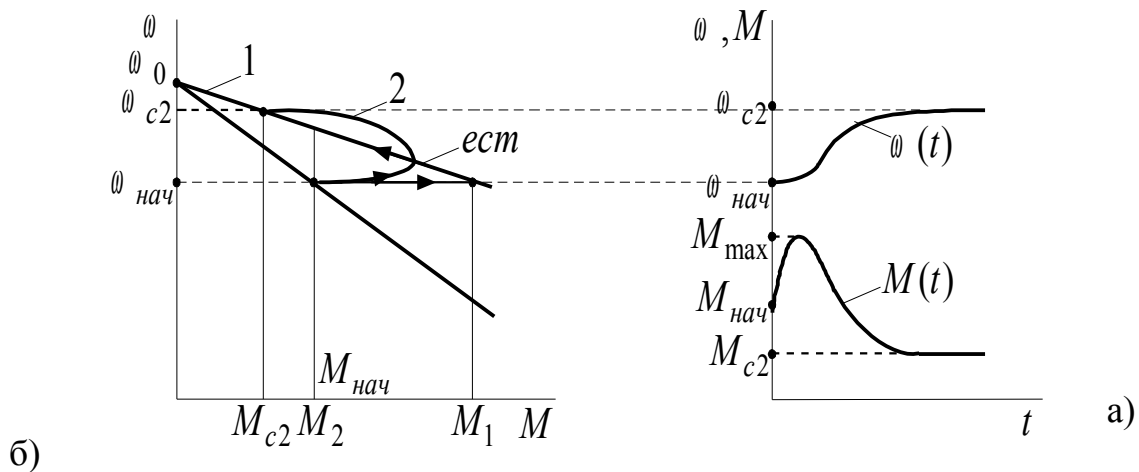


Рисунок 11.5

Из приведенных выражений и графиков переходных процессов видно, что электромагнитная инерция увеличивает длительность переходных процессов и может привести к колебаниям скорости и момента. Но при этом максимальное значение момента и соответственно тока двигателя уменьшается.

### 1.11 Расчет механических переходных процессов электропривода при работе на нелинейных механических характеристиках

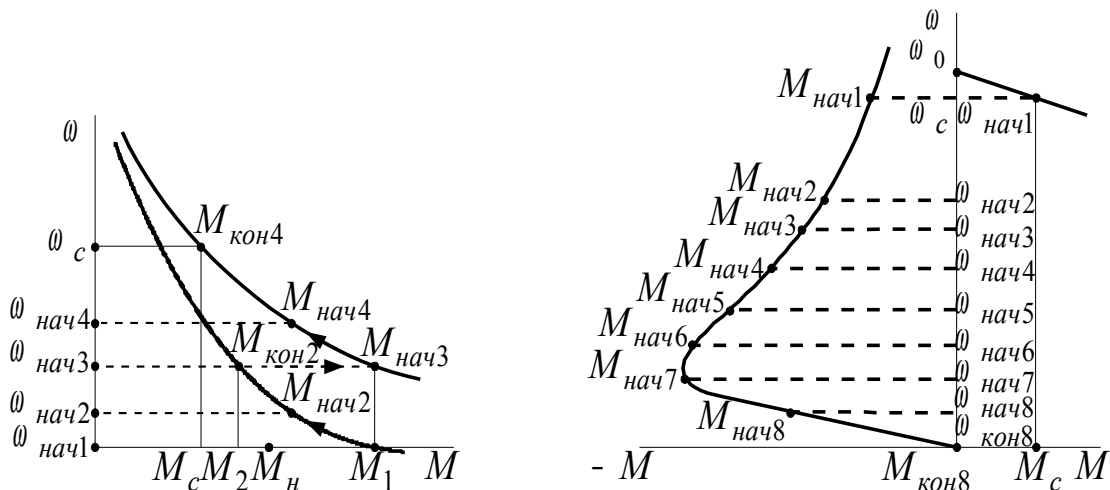
Такие механические характеристики имеют двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением в режиме торможения противовключением и в пусковом режиме в случае, когда заданием ограничивается максимально-допустимое ускорение таким образом, что действующие в переходных процессах моменты будут меньше номинального (рисунок 11.6а), а также асинхронный двигатель с фазным ротором в режиме динамического торможения с возбуждением постоянным током в том случае,

когда торможение проводится в одну ступень без введения в роторную цепь добавочных сопротивлений (рисунок 11.6б).

И в том и в другом случае, когда механические и электромеханические характеристики существенно нелинейные, можно рекомендовать для расчета переходных процессов метод кусочно-линейной аппроксимации [1- 4]. Суть его заключается в том, что реальные механические характеристики двигателя (нелинейные) разбиваются на участки, на которых эти характеристики можно представить прямыми линиями. Затем определяются граничные координаты участков  $\omega_{начi}$ ,  $M_{начi}$ ,  $\omega_{конi}$ ,  $M_{конi}$ .

Время разгона или торможения на каждом участке аппроксимации, значения электромеханических постоянных времени определяются по выражениям (11.4) и (11.5). Время разгона до скорости  $\omega_c$  на последнем участке определяется по (11.7).

Полное время переходного процесса определяется по (11.6), а угол поворота вала двигателя на данном участке и суммарный угол поворота определяется по выражениям (11.10) и (11.11).



а)

б)

Рисунок 11.6

Далее, для границ участков ( $\omega_{начi}$ ,  $\omega_{конi}$ ,  $M_{начi}$ ,  $M_{конi}$ ) определяются значения тока в силовой цепи. Для двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением токи определяются по универсальным характеристикам, представленным на рисунке 9.2.

Для случая динамического торможения асинхронного двигателя с фазным ротором в одну ступень без введения в роторную цепь добавочных сопротивлений сначала нужно по данным таблицы раздела 10.3.5 построить электромеханическую характеристику, а затем по этой характеристике определить граничные токи.

## 12 Расчет и построение уточненной нагрузочной диаграммы электродвигателя

Уточненная нагрузочная диаграмма двигателя должна быть построена с учетом пусковых и тормозных режимов работы двигателя в цикле. Примерный вид нагрузочной диаграммы представлен на рисунке 12.1.

Одновременно с расчетом нагрузочной диаграммы двигателя необходимо рассчитать величину среднеквадратичного момента на каждом участке переходного процесса  $\Delta t_i$ .

Среднеквадратичный момент характеризует нагрев двигателей в том случае, когда двигатели работают на линейной части своих характеристик, где момент пропорционален току.

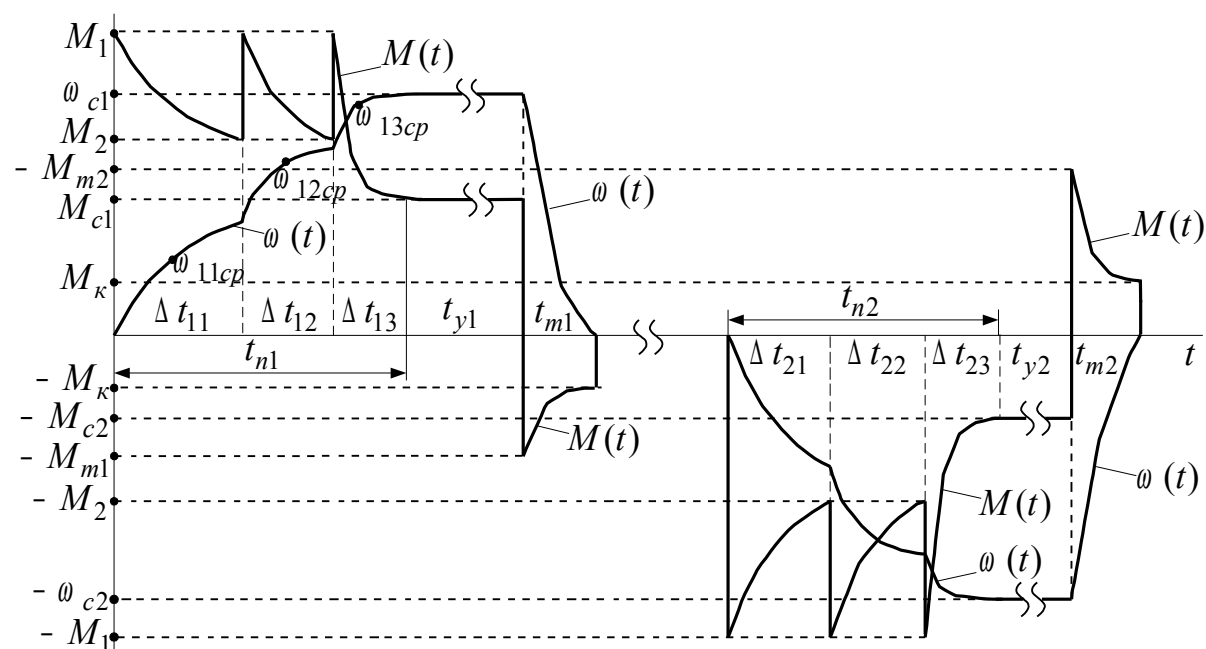


Рисунок 12.1

Для двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением, работающего в переходных процессах на нелинейной части механических характеристик, и для одноступенчатого динамического торможения

асинхронного двигателя с фазным ротором нагрузочная диаграмма строится в значениях тока двигателя.

Для определения среднеквадратичных значений момента или тока реальная кривая переходного процесса аппроксимируется прямолинейными участками. Причем, для повышения точности расчетов переходный процесс на каждой ступени пускового и тормозного реостата аппроксимируется двумя прямыми (пунктирные линии на рисунке 12.2).

Ранее были определены значения моментов двигателя в середине отрезков времени, в течение которых происходит разгон или торможение на каждой ступени пускового и тормозного реостатов.

Значения среднеквадратичных моментов на каждом участке аппроксимации определим по выражению:

$$M_{скij} = \sqrt{\frac{M_{начi}^2 + M_{начi}M_{конi} + M_{конi}^2}{3}} \quad (12.1)$$

где  $M_{начi}$  – начальное значение момента на рассматриваемом участке,

$M_{конi}$  – конечное значение момента на рассматриваемом участке.

В качестве примера определим значение среднеквадратичных моментов нагрузочной диаграммы рисунка 12.2:

$$M_{ск11} = \sqrt{\frac{M_1^2 + M_1M_{11cp} + M_{11cp}^2}{3}} \quad (12.2)$$

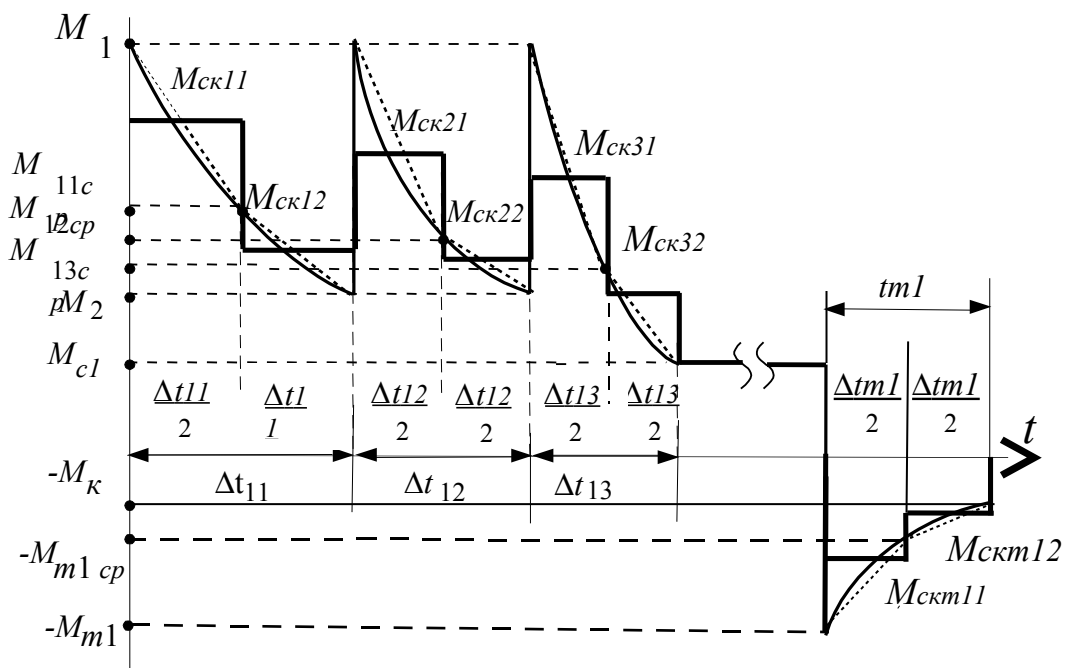


Рисунок 12.2



$$M_{ck12} = \sqrt{\frac{M_{11cp}^2 + M_{11cp}M_2 + M_2^2}{3}}. \quad (12.3)$$

$M_{ck21}, M_{ck22}, M_{ck31}, M_{ckm11}$  определяются аналогично.

$$M_{ck32} = \sqrt{\frac{M_{13cp}^2 + M_{13cp}M_{c1} + M_{c1}^2}{3}}. \quad (12.4)$$

$$M_{ckm12} = \sqrt{\frac{M_{m1cp}^2 + M_{m1cp}M_{\kappa} + M_{\kappa}^2}{3}}. \quad (12.5)$$

Для токовой нагрузочной диаграммы выражения аналогичные.

Далее – такой же расчет по всем участкам работы двигателя с уменьшенной нагрузкой. В результате расчета получим аппроксимированную прямоугольно-ступенчатую нагрузочную диаграмму двигателя, которая в полной мере характеризует нагрев двигателя (рисунок 12.2).

### 13 Проверка электропривода на заданную производительность, по нагреву и перегрузочной способности электродвигателя

Проверка на заданную производительность механизма заключается в том, чтобы проверить, укладывается ли рассчитанное время работы электропривода в заданное техническим заданием время  $t_p$ .

$$t_{pp} = t_{n1} + t_{y1} + t_{m1} + t_{n2} + t_{y2} + t_{m2} \leq t_p, \quad (13.1)$$

где  $t_{pp}$  – расчетное время работы электропривода,

$t_{n1}$  и  $t_{n2}$  – времена первого и второго пусков,

$t_{m1}$  и  $t_{m2}$  – времена первого и второго торможений,

$t_{y1}$  и  $t_{y2}$  – времена установившихся режимов при работе с большой и малой нагрузкой,

$t_{n1}, t_{n2}, t_{m1}$  и  $t_{m2}$  берутся из расчета переходных процессов.

Время работы в установившихся режимах определяется из соотношения:

$$t_{y1} = \frac{\alpha_{\Sigma} - (\alpha_{n1} + \alpha_{m1})}{\omega_{c1}}, \quad (13.2)$$

$$t_{y2} = \frac{\alpha_{\Sigma} - (\alpha_{n2} + \alpha_{m2})}{\omega_{c2}}, \quad (13.3)$$

где  $\alpha_{\Sigma}$  – угловой путь, проходимый двигателем на рассматриваемом участке движения:

$$\alpha_{\Sigma} = \frac{2L \cdot i}{D} p, \quad (13.4)$$

где  $L$  – длина перемещения рабочего органа механизма.

Проверка двигателя на перегрузочную способность заключается в том, что максимальные значения момента двигателя из нагрузочной диаграммы не должны превышать максимально-допустимых значений для данного двигателя. Для двигателя постоянного тока максимально-допустимые значения тока и момента определяются условиями коммутации, а для асинхронных двигателей – величиной критического момента. И в том и в другом случае

$$M_{\max p} \leq M_{\max \partial on} = \lambda M_H, \quad (13.5)$$

где  $\lambda$  – перегрузочная способность двигателя.

Проверку выбранного двигателя по нагреву в данном курсовом проекте следует выполнять методом эквивалентного момента либо для двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением, работающего на нелинейной части механических характеристик, методом эквивалентного тока:

$$M_{\mathcal{E}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n M_i^2 \Delta t_i}{\sum_{i=1}^n \beta_{ymi} \Delta t_i}} \leq M_{\partial on}, \quad (13.6)$$

$$I_{\mathcal{E}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n I_i^2 \Delta t_i}{\sum_{i=1}^n \beta_{ymi} \Delta t_i}} \leq I_{\partial on}, \quad (13.7)$$

где  $M_i$  – среднеквадратичное значение момента на  $i^{om}$  участке,

$\Delta t_i$  – длительность  $i^{zo}$  участка,

$\beta_{ymi}$  – коэффициент ухудшения теплоотдачи на  $i^{om}$  участке,

$M_{\text{дон}}$  – допустимый по нагреву момент,

$I_i$  – среднеквадратичное значение тока на  $i^{\text{ом}}$  участке,

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

Строить токовую нагрузочную диаграмму для асинхронного двигателя с фазным ротором в случае применения одноступенчатого динамического торможения из-за большой трудоемкости нецелесообразно. Поэтому эквивалентный за время динамического торможения момент приближенно можно определить через эквивалентный ток по выражению:

$$M_{\text{эдт}} = \frac{M_{\text{н}}}{I_{\text{н}}} I_{\text{эдт}}. \quad (13.8)$$

Таким образом, проверка асинхронного двигателя с фазным ротором в этом случае будет проведена методом эквивалентного момента.

Значения среднеквадратичных моментов (токов) для всех участков работы двигателя определены ранее [в установившихся режимах берутся моменты (токи)  $M(I_{c1})$  и  $M(I_{c2})$ ]. Эквивалентный момент (ток) двигателя режима S3 (ПК – режима) рассчитывается только за время работы. Пауза учитывается по определению режима.

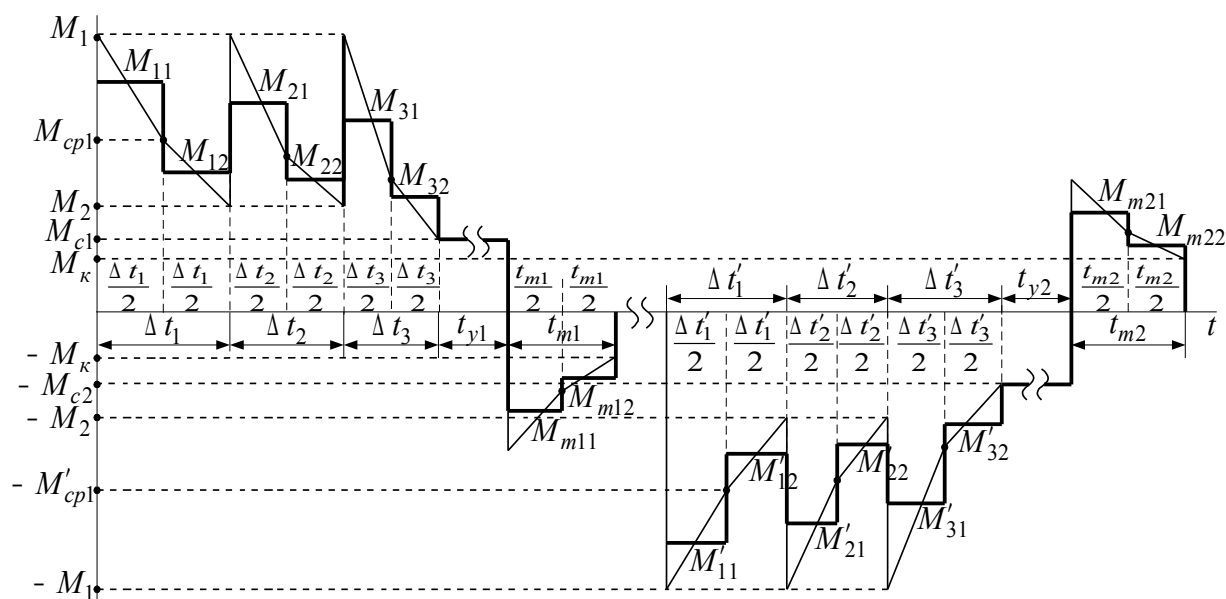


Рисунок 13.1

Коэффициент ухудшения теплоотдачи  $\beta_{ym}$  в зависимости от скорости вращения принимает следующие значения [6, 10]:

$$\beta_{ymi} = \beta_{ym0}, \quad \text{при } 0 \leq \omega < 0.2\omega_{\text{н}},$$

$$\beta_{ymi} = \frac{1 + \beta_{ym0}}{2}, \quad \text{при } 0.2\omega_n \leq \omega < 0.8\omega_n,$$

$$\beta_{ymi} = 1, \quad \text{при } \omega \geq 0.8\omega_n.$$

Коэффициент ухудшения теплоотдачи неподвижного двигателя  $\beta_{ym0}$  для двигателей различного исполнения имеет следующие значения:

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

Для двигателей краново-металлургической серии, применяющихся для механизмов в данном курсовом проекте, коэффициент ухудшения теплоотдачи для неподвижного двигателя можно принять  $\beta_{ym0} = 0.5$ , а для пускового и тормозного режимов  $\beta_{ymn} = \beta_{ymt} = 0.75$

Допустимые момент и ток для двигателей повторно-кратковременного режима определяют по выражениям:

$$M_{доп} = M_n \sqrt{\frac{ПВ_n}{ПВ_{факт}}}, \quad (13.9)$$

$$I_{доп} = I_n \sqrt{\frac{ПВ_n}{ПВ_{факт}}}, \quad (13.10)$$

где  $M_n, ПВ_n$  – номинальные момент и продолжительность включения выбранного двигателя,

$ПВ_{факт}$  – фактическая продолжительность включения, определяемая по выражению:

$$ПВ_{факт} = \frac{t_{pp}}{t_{ц}}. \quad (13.11)$$

Длительность цикла работы  $t_{ц}$  берется из (4.4).

Анализируя выражения (13.6) и (13.7), нужно иметь в виду, что нельзя допускать даже малейшего превышения эквивалентного момента (тока) над допустимым. Двигатель будет считаться выбранным правильно, если эквивалентный момент (ток) лежит в пределах  $(0.85-1.0)M(I)_{доп}$ .

Если  $M(I_э) > M(I)_{дон}$  или  $M(I_э) < 0.85M(I)_{дон}$ , необходимо выбрать другой двигатель и по согласованию с преподавателем повторить расчет. Мощность вновь выбранного двигателя определяется по выражению (7.6).

Аналогично следует поступить и в случаях, когда выбранный двигатель не проходит по перегрузочной способности.

В случае, если электропривод не обеспечивает заданной производительности, необходимо либо увеличить установленную мощность электродвигателя (если электропривод обеспечивал максимальное быстродействие), либо увеличить плавность протекания переходных процессов пуска и торможения увеличением числа пусковых и тормозных ступеней или заменой спроектированного электропривода на систему управляемый преобразователь-двигатель (УП-Д) с бесступенчатыми пусками и торможениями. В любом случае окончательное решение исполнитель курсового проекта принимает совместно с его руководителем.

## **14 Принципиальная электрическая схема силовой части электропривода**

Последним разделом курсового проекта является составление принципиальной схемы силовой части электропривода и описание ее работы во всех режимах: пуск, установившийся режим, торможение. В схеме должны быть приведены все ступени пусковых и тормозных резисторов с контактами аппаратов, осуществляющих автоматический режим работы электропривода.

## **15 Заключение**

В этом разделе необходимо отразить выполнение спроектированным электроприводом требований, предъявленным к нему в разделе 2, и, если какие-то требования не выполнены, необходимо указать пути их выполнения.

## Список использованных источников

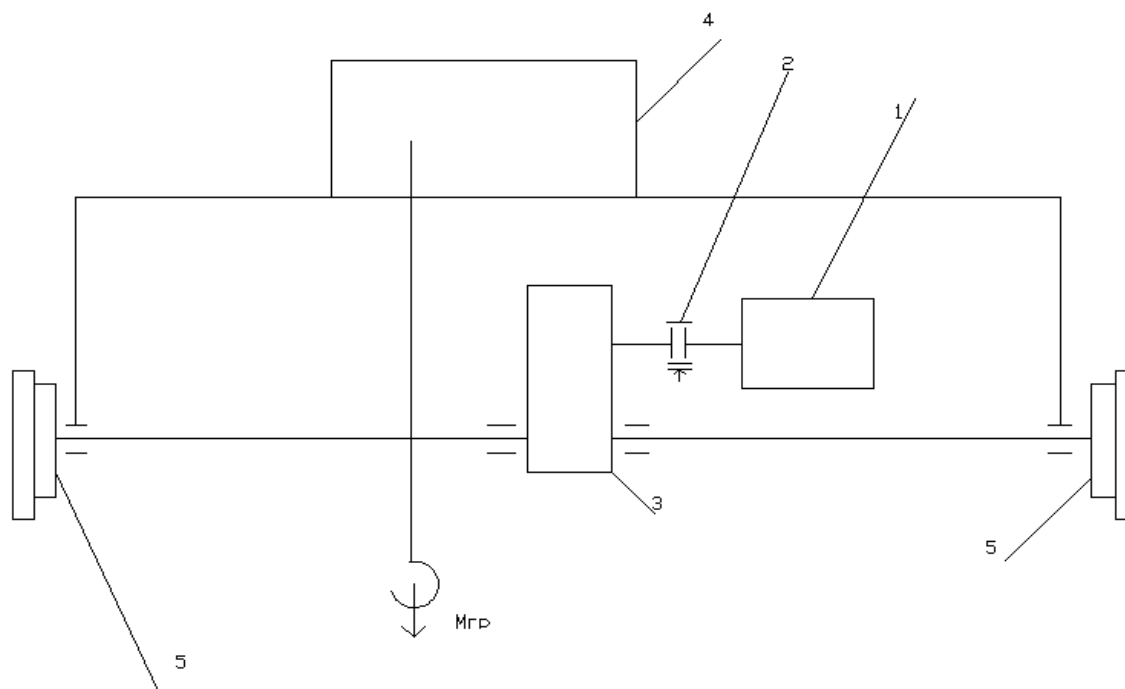
1. **Ключев, В.И.** Теория электропривода / В.И. Ключев.- М.: Энергоатомиздат, 1998. – 704 с.
2. **Чиликин, М.Г.** Общий курс электропривода/ М.Г. Чиликин.- М.: Энергоатомиздат, 1981. –576 с.
3. **Вешеневский, С.Н.** Характеристики двигателей в электроприводе / С.Н. Вешеневский. - М.: Энергия, 1977. - 432 с.
4. **Андреев, В.П.** Основы электропривода / В.П. Андреев, Ю.А. Сабинин. – Госэнергоиздат, 1963. - 772 с.
5. Справочник по автоматизированному электроприводу/ Под редакцией В.А. Елисеева, А.В., А.В. Шинянского. - М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.
6. Электротехнический справочник. Т. 4/ Под редакцией В.Г. Герасимова. - М.: Издание МЭИ, 2002. - 695 с.
7. **Муха, Т.И.** Приводы машин: справочник / Т.И. Муха, Б.В. Януш, А.П. Цупиков. - Л.: Машиностроение, 1975. - 343с.
8. **Александров, М.П.** Грузоподъемные машины/ М.П. Александров. - М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, ГУП Высшая школа, 2000. - 551с.
9. **Бычков, В.П.** Электропривод и автоматизация металлургического производства/ В.П. Бычков - М.: Высшая школа, 1977. - 391с.
10. **Яуре, А.Г.** Крановый электропривод: справочник / А.Г. Яуре, Е.М. Певзнер. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 344с.
11. Теория электропривода: методические указания к курсовому проектированию/ О.И. Осипов, Г.И. Драчев. - Челябинск.: Издательство ЧПИ, 1991. - 75с.

## Приложение А

(обязательное)

### Задания на курсовое проектирование

#### А.1 Электропривод механизма передвижения тележки мостового крана



- 1 – электродвигатель,
- 2 - тормозной шкив,
- 3 – редуктор,
- 4 - механизм подъёма груза,
- 5 - ходовые колёса.

Рисунок А.1 Кинематическая схема механизма передвижения тележки

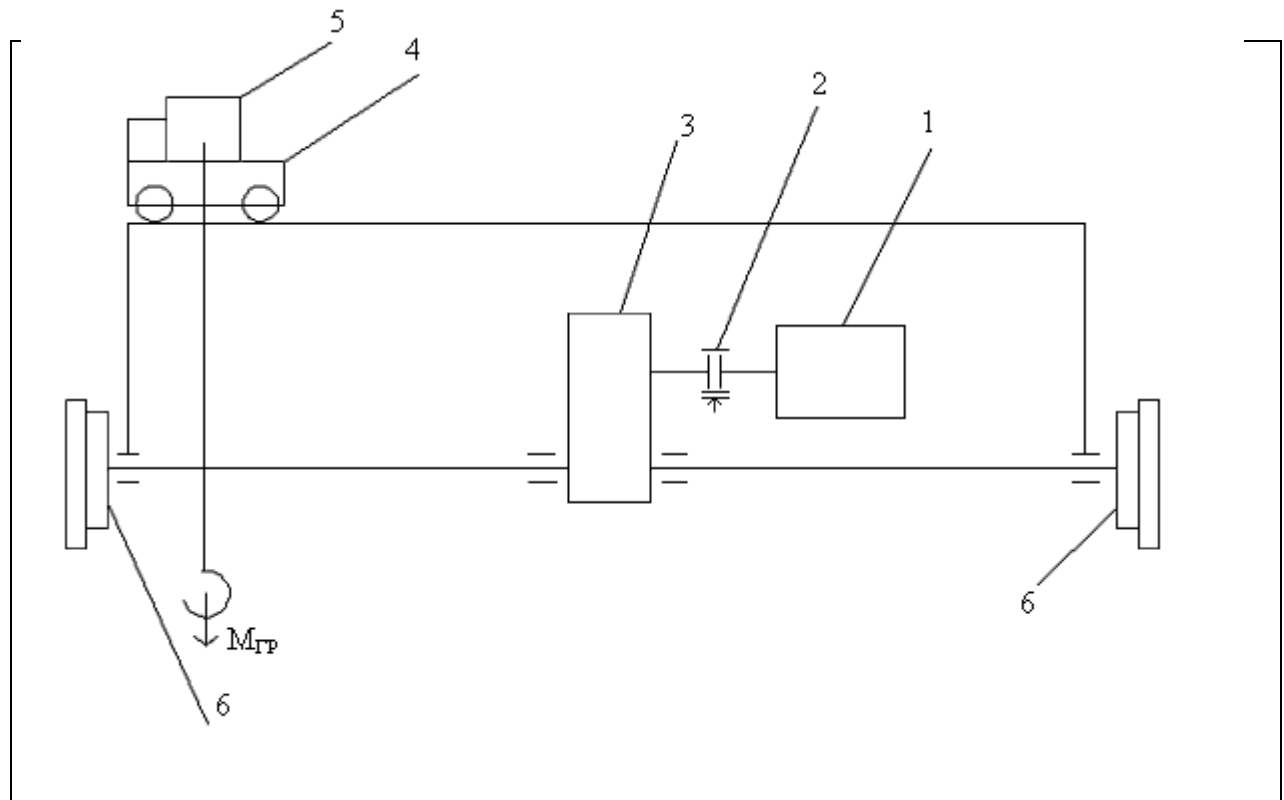
Тележка мостового крана совершает возвратно – поступательное движение на длину  $L$  (длина моста). Движение тележки с грузом происходит с установившейся рабочей скоростью  $V_p$ , а обратное движение к исходной точке осуществляется без груза с установившейся скоростью  $V_B > V_p$ . В цикл работы тележки, кроме времени движения с грузом и без груза входит время пауз, когда тележка неподвижна и производятся технологические операции (зацепление и расцепление груза, подъём и спуск груза и пустого крюка, перемещения моста).

**Таблица А.1 - Технические данные механизма передвижения тележки**

Обозначение	Наименование показателя	Размерность	Варианты														
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$m_m$	Масса тележки	т	2	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	8	8	10	10
$m_z$	Масса груза	т	8	10	12	12	15	18	20	20	24	24	28	30	32	36	40
$D$	Диаметр колеса	м	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6
$d_{ц}$	Диаметр цапфы	мм	60	60	60	60	60	70	70	70	70	70	70	80	80	80	80
$\mu_n$	Коэффициент трения скольжения в подшипниках	-	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06
$f$	Коэффициент трения качения	мм	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6
$C_k$	Крутильная жесткость рабочего вала	$\frac{МН \cdot м}{рад}$	2.0	2.6	3.0	3.2	4.0	7.0	7.5	7.8	9.0	9.2	10.5	15	16	18	20
$L$	Длина перемещения тележки	м	10	12	10	15	12	16	18	18	20	18	17	16	15	14	18
$V_p$	Скорость движения с грузом	м/с	2.0	1.9	1.9	1.8	1.8	1.7	1.7	1.6	1.6	1.5	1.5	1.4	1.4	1.3	1.3
$V_e$	Скорость движения без груза	м/с	2.7	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1	2.1	2.0	2.0	2.0	1.9	1.8	1.7	1.6
$a$	Допустимое ускорение	м/с <sup>2</sup>	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7
$Z$	Число циклов в час	-	80	80	75	75	70	70	65	65	60	60	55	55	50	50	45
$t_p$	Суммарное время работы, не более	с	17	20	18	23	20	24	28	30	31	26	29	28	28	28	34



## А.2 Электропривод механизма передвижения мостового крана



- 1 – электродвигатель,
- 2 - тормозной шкив,
- 3 – редуктор,
- 4 – тележка,
- 5 - механизм подъёма груза,
- 6 - ходовые колёса.

Рисунок А.2 Кинематическая схема механизма передвижения мостового крана

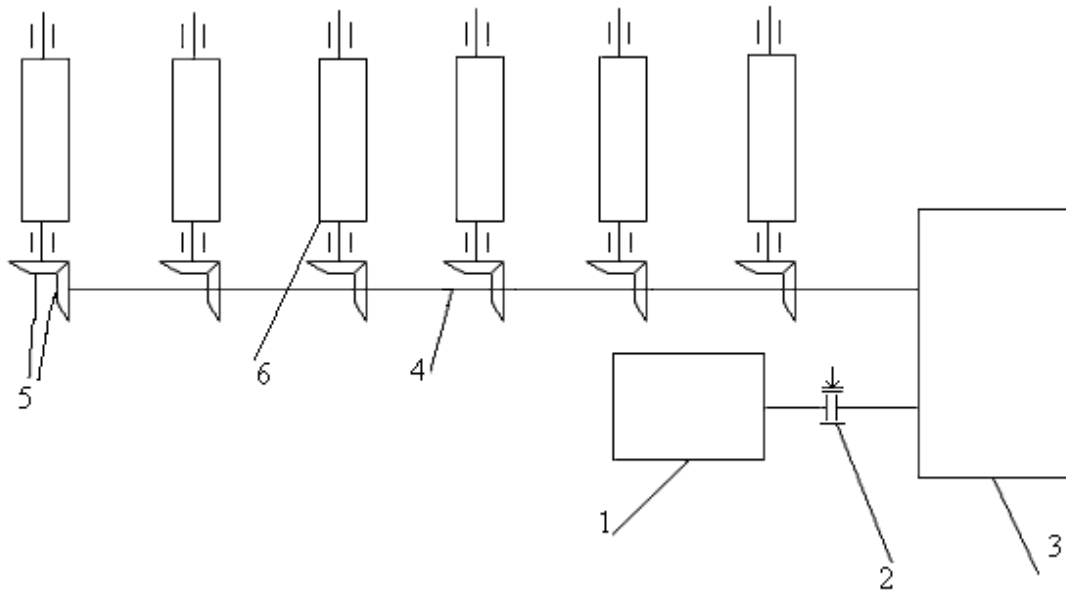
Мостовой кран совершает возвратно – поступательное движение на длину  $L$  цеха. Движение крана с грузом происходит с установившейся рабочей скоростью  $V_p$ . Движение крана к исходной точке (возвратное) осуществляется без груза с установившейся скоростью  $V_B > V_p$ .

В цикл работы крана, кроме времени движения с грузом и без груза, входит время пауз, когда кран неподвижен и производятся технологические операции (зацепление и расцепление груза, подъём и спуск груза и пустого крюка, перемещения тележки).

**Таблица А.2 - Технические данные механизма передвижения мостового крана**

Обозначение	Наименование показателя	Размерность	Варианты														
			16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$m_m$	Масса крана	т	15	20	22	25	30	35	40	42	46	50	55	60	65	70	88
$m_2$	Масса груза	т	8	10	12	12	15	18	20	20	24	24	28	30	32	36	40
$D$	Диаметр колеса	м	0.5	0.5	0.5	0.5	0.55	0.55	0.55	0.55	0.6	0.6	0.6	0.6	0.65	0.65	0.65
$d_{ц}$	Диаметр цапфы	мм	100	100	100	100	100	110	110	110	110	110	120	120	120	120	120
$\mu_n$	Коэффициент трения скольжения в подшипниках	-	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
$f$	Коэффициент трения качения	мм	0.6	0.6	0.6	0.6	0.65	0.65	0.65	0.65	0.75	0.75	0.75	0.75	0.8	0.8	0.8
$C_k$	Крутильная жесткость рабочего вала	$\frac{МН \cdot м}{рад}$	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.6	2.9	3.2	3.5	3.8	4.1	4.3	4.5
$L$	Длина перемещения крана	м	50	40	70	60	75	45	65	50	40	55	80	70	45	60	80
$V_p$	Скорость движения с грузом	м/с	2.0	2.0	1.9	1.9	1.8	1.8	1.7	1.7	1.6	1.6	1.5	1.5	1.4	1.3	1.2
$V_в$	Скорость движения без груза	м/с	2.8	2.8	2.7	2.7	2.6	2.6	2.5	2.5	2.4	2.4	2.3	2.3	2.1	2.1	2.0
$a$	Допустимое ускорение	м/с <sup>2</sup>	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
$Z$	Число циклов в час	-	80	80	75	75	70	70	65	65	60	60	55	55	50	50	50
$t_p$	Суммарное время работы, не более	с	80	60	110	100	160	80	100	80	70	90	160	130	90	120	180

### А.3 Электропривод рольганга ножниц



- 1 - электрический двигатель,
- 2 - тормозной шкив,
- 3 – редуктор,
- 4 - продольный вал,
- 5 - конические шестерни,
- 6 - ролик.

Рисунок А.3 Кинематическая схема рольганга

Рольганг ножниц служит для перемещения заготовки и установки её для пореза на заданной отметке.

Заготовка длиной  $L$  подаётся на рольганг транспортёром. Рольганг запускается. Перемещает заготовку на длину  $L/2$  и останавливается. Рез заготовки ножницами происходит при неподвижном рольганге, а отрезанная часть заготовки снимается отводящим транспортёром. После этого рольганг снова запускается и перемещает оставшуюся часть заготовки длиной  $L/2$  за ножницы, где она снимается с рольганга. Затем цикл повторяется.

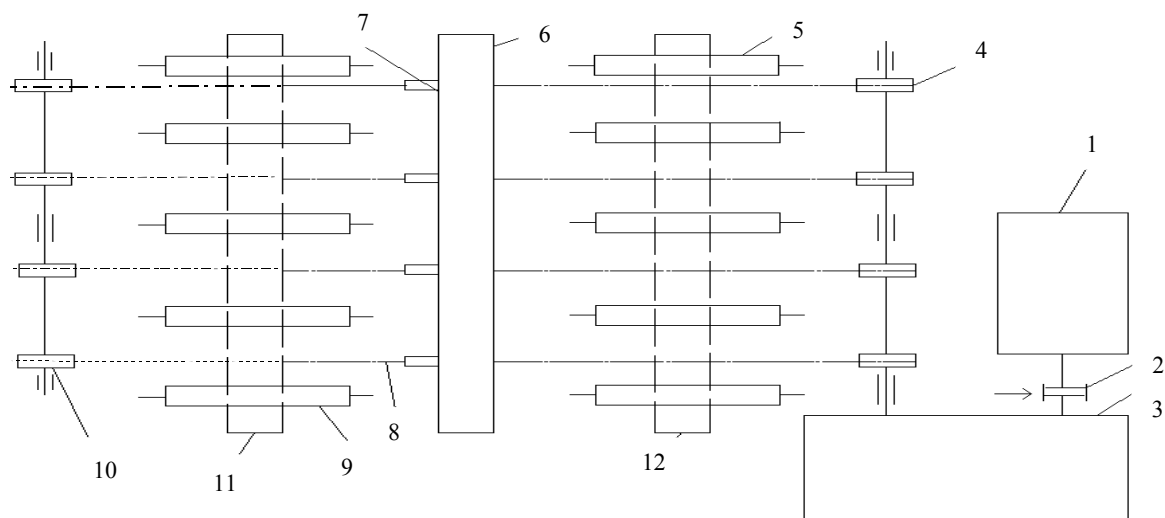
Для точной установки заготовки перед порезом перемещение целой заготовки (рабочий ход рольганга) производят при пониженной скорости  $V_p$ , а транспортирование оставшейся части – при скорости  $V_B > V_p$ .

При выборе двигателя и его проверке на перегрузочную способность необходимо учитывать возможность буксования роликов по заготовке, которое возникает при кратковременных остановках заготовки.

**Таблица А.3 -Технические данные рольганга**

Обозначение	Наименование показателя	Размерность	Варианты														
			31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
$N$	Число роликов	т	16	15	15	20	15	12	20	15	20	12	15	16	15	12	15
$m_p$	Масса ролика	т	1.2	1.0	1.0	1.2	0.8	1.0	1.0	0.8	0.8	0.8	1.2	1.0	1.1	1.0	1.1
$D$	Диаметр ролика	м	0.5	0.4	0.4	0.5	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4
$d_{ц}$	Диаметр цапфы	мм	150	140	140	150	130	140	140	130	130	130	150	140	140	140	140
$\mu_n$	Коэффициент трения скольжения в подшипниках	-	0.05	0.06	0.06	0.05	0.07	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06
$f$	Коэффициент трения качения	мм	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
$J_p$	Момент инерции ролика	кг·м <sup>2</sup>	24	20	20	24	16	20	20	16	16	16	24	20	20	20	20
$J_v$	Момент инерции продольного вала	кг·м <sup>2</sup>	5	5	5	6	5	4	6	5	6	4	5	5	5	4	5
$C_k$	Крутильная жесткость рабочего вала	$\frac{МН \cdot м}{рад}$	2.0	1.5	2.2	2.4	1.2	1.8	3.0	0.8	1.6	0.7	1.2	1.6	0.6	0.8	1.1
$L$	Длина заготовки	м	20	16	20	24	20	18	28	28	24	18	24	24	20	16	18
$m_з$	Масса заготовки	т	7.5	7.0	7.5	8.0	7.5	7.3	8.0	8.0	8.0	7.3	8.0	8.0	7.5	7.0	7.3
$V_p$	Скорость рабочего хода	м/с	1.5	1.4	1.6	1.5	1.5	1.2	1.4	1.8	1.4	1.4	1.5	1.4	1.3	1.4	1.2
$V_v$	Скорость повышенная	м/с	2.0	1.9	2.2	2.0	1.9	1.5	1.9	2.3	1.9	1.9	2.0	1.9	1.8	1.9	1.6
$a$	Допустимое ускорение	м/с <sup>2</sup>	1.7	2.0	2.0	1.0	2.0	1.3	1.0	1.7	1.2	1.6	1.5	1.3	1.3	2.0	1.2
$Z$	Число циклов в час	-	70	70	70	70	70	70	70	80	80	80	80	80	80	80	80
$t_p$	Суммарное время работы, не более	с	18	16	18	22	18	20	25	21	22	18	22	22	20	17	20

## А.4 Электропривод цепного транспортёра



- 1 - электрический двигатель,
- 2 - тормозной шкив,
- 3 - редуктор,
- 4 - ведущий вал со звёздочками,
- 5,9 - рольганги,
- 6 - заготовка,
- 7 - упор,
- 8 - цепь,
- 10 - ведомый вал со звёздочками,
- 11 - исходное положение заготовки,
- 12 - конечное положение заготовки.

Рисунок А.4 Кинематическая схема цепного транспортёра

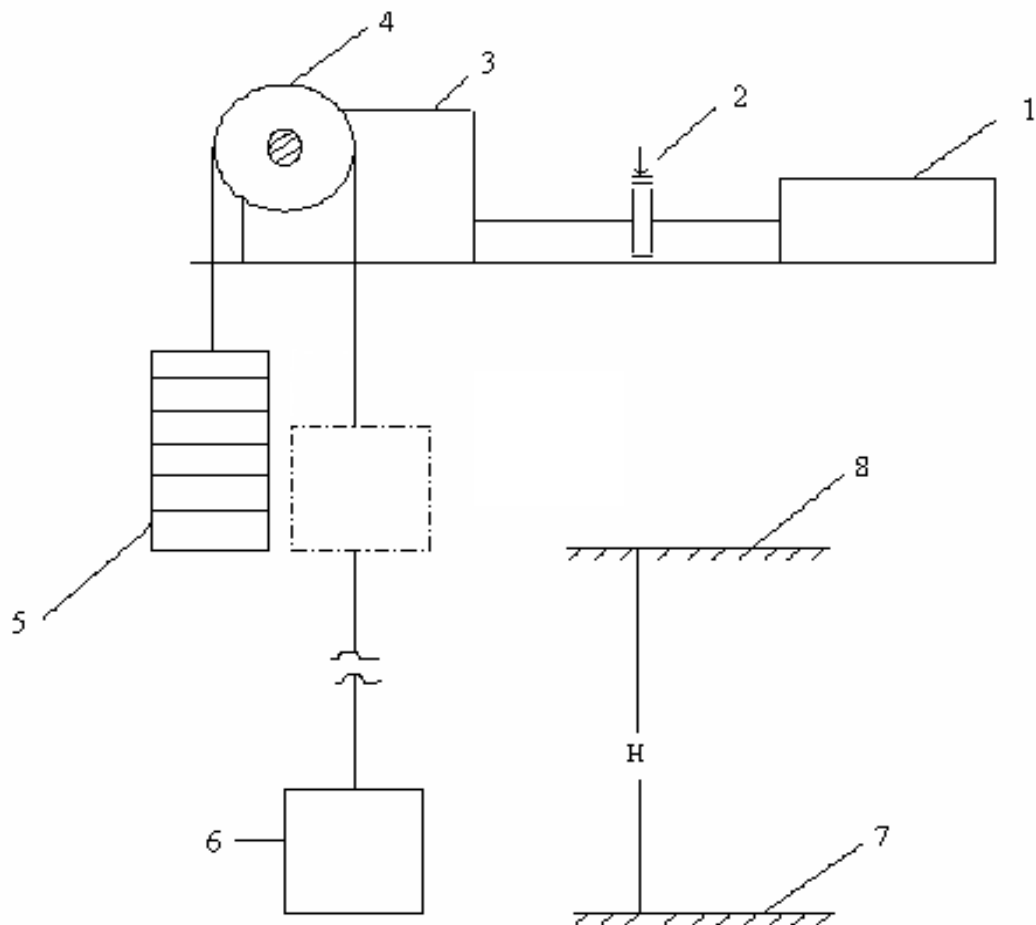
Цепной транспортёр служит для перемещения заготовки по направляющим с рольганга 9 на рольганг 5. Движение заготовки обеспечивается с помощью упоров, закреплённых на цепях, натянутых между звёздочками ведущего и ведомого валов.

В исходном положении транспортёра упоры располагаются за рольгангом 9. После подачи заготовки и остановки рольганга 9 транспортёр разгоняется, сразу же зацепляя заготовку, и перемещает её на рабочей скорости  $V_p$  к рольгангу 5. После установки заготовки в требуемое положение транспортёр реверсируется и на скорости  $V_B > V_p$  возвращается в исходное положение в режиме холостого хода. Рольганг 5 включается и транспортирует заготовку в нужное место. Следующий цикл начинается с момента подачи на рольганг 9 новой заготовки.

**Таблица А.4 - Технические данные транспортера**

Обозначение	Наименование показателя	Размерность	Варианты														
			46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
$m_v$	Масса вала со звездочками	Т	2.0	2.4	2.8	3.2	3.6	4.0	4.4	4.8	5.2	5.6	6.0	6.4	6.8	7.2	7.6
$D$	Диаметр колеса	М	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
$d_{ц}$	Диаметр цапфы	ММ	100	100	100	120	120	120	150	150	150	150	180	180	180	180	180
$\mu_n$	Коэффициент трения скольжения в подшипниках	-	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
$\mu_c$	Коэффициент скольжения заготовки по направляющим	-	0.20	0.20	0.20	0.22	0.22	0.22	0.24	0.24	0.24	0.24	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26
$J_v$	Момент инерции продольного вала	$кг \cdot м^2$	60	60	60	75	75	75	90	90	90	90	100	100	100	100	100
$C_k$	Крутильная жесткость рабочего вала	$\frac{МН \cdot м}{рад}$	0.65	0.70	0.90	0.95	0.95	1.00	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.35	1.40	1.40
$m_3$	Масса заготовки	Т	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9
$L$	Длина перемещения тележки	М	5	5	6	6	7	7	8	8	7	7	8	8	7	6	5
$V_p$	Скорость движения с грузом	М/С	1.2	1.0	1.3	1.1	1.4	1.2	1.5	1.5	1.4	1.2	1.5	1.3	1.3	1.2	1.5
$V_v$	Скорость движения без груза	М/С	2.0	1.8	2.1	1.9	2.0	1.8	2.3	2.1	2.2	2.0	2.3	2.1	2.1	2.0	2.3
$a$	Допустимое ускорение	М/С <sup>2</sup>	2.0	1.5	2.0	1.5	2.0	1.5	1.8	1.5	1.6	1.5	1.5	1.5	1.2	1.2	1.5
$Z$	Число циклов в час	-	60	70	80	90	100	110	120	110	100	90	80	70	60	70	80
$t_p$	Суммарное время работы, не более	С	13	14	14	15	15	16	16	16	15	16	16	17	16	15	13

## А.5 Электропривод грузового лифта



- 1 – электродвигатель,
- 2 - тормозной шкив,
- 3 – редуктор,
- 4 - канатоведущий шкив,
- 5 – противовес,
- 6 - грузовая клеть,
- 7 - нижняя площадка,
- 8 - верхняя площадка.

Рисунок А.5 Кинематическая схема лифта

Грузовой лифт осуществляет подъём груза, помещённого в грузовую клеть, с нижней площадки на верхнюю. Вниз клеть опускается пустая.

В цикл работы грузового лифта входит время загрузки, время подъёма клетки со скоростью  $V_P$ , время разгрузки и время спуска клетки со скоростью  $V_B > V_P$ .

**Таблица А.5 - Технические данные лифта**

Обозначение	Наименование показателя	Размерность	Варианты														
			61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
$m_z$	Грузоподъемность	т	5.0	5.0	4.0	4.0	3.5	3.0	3.2	2.5	2.0	1.5	1.0	1.0	0.75	0.5	0.5
$m_k$	Масса клетки	т	7.5	7.0	7.0	6.5	6.0	5.0	5.5	4.0	3.0	2.3	1.5	1.5	1.5	1.0	0.9
$m_n$	Масса противовеса	т	10.0	9.5	9.0	8.5	8.0	6.5	7.0	5.2	4.0	3.0	2.0	2.0	1.8	1.2	1.2
$D$	Диаметр канатопроводящего шкива	м	1.0	1.2	1.1	1.25	0.9	0.8	0.9	1.0	0.8	0.8	0.9	1.2	1.0	1.1	0.8
$\mu_n$	Коэффициент трения скольжения в подшипниках	-	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
$C_k$	Линейная жесткость механизма	$\frac{MN}{м}$	110	105	100	90	80	70	55	50	45	40	35	30	25	20	13
$H$	Высота подъема клетки	м	6.0	8.0	7.0	9.0	4.0	6.0	8.0	7.0	9.0	8.0	7.0	9.0	10.0	9.0	8.0
$V_p$	Скорость движения с грузом	м/с	0.6	0.85	0.6	0.85	0.6	0.6	0.85	0.6	0.85	0.85	1.2	0.85	1.2	1.2	1.2
$V_v$	Скорость движения без груза	м/с	1.0	1.5	1.0	1.5	1.0	1.0	1.5	1.0	1.5	1.5	2.0	1.5	2.0	2.0	2.0
$a$	Допустимое ускорение	м/с <sup>2</sup>	1.0	1.5	1.0	1.5	1.0	1.0	1.5	1.0	1.5	1.5	2.0	1.5	2.0	2.0	2.0
$Z$	Число циклов в час	-	40	40	45	45	50	50	50	40	50	50	60	50	60	60	60
$t_p$	Суммарное время работы, не более	с	22	21	25	23	17	22	21	25	23	21	15	23	19	18	17



## Приложение Б

(обязательное)

### Расчёт статических моментов рабочих механизмов

#### Б.1 Механизмы передвижения тележки мостового крана и моста

При передвижении тележки или моста по рельсам электрический двигатель механизма передвижения преодолевает сопротивление сил трения и ветровой нагрузки, которая возможна только при работе мостового крана на открытом воздухе.

Рассматриваемые в курсовом проекте мостовые краны находятся в закрытых помещениях. Поэтому рассмотрим только сопротивление передвижению, вызываемое трением.

При качении по рельсу колёс, нагруженных массой тележки, и груза или крана и груза возникает момент трения скольжения в подшипниках колёс, а также момент трения качения колеса по рельсу.

Момент сопротивления от трения в подшипниках колёс определяется по выражению:

$$M_{cn} = \frac{(m_c + m_{gp}) \cdot d_{ц} \cdot \mu_n \cdot g}{2}, \quad (\text{Б.1})$$

где  $m_c$  - собственная масса тележки или крана, кг,

$m_{gp}$  - масса транспортируемого груза, кг,

$\mu_n$  - коэффициент трения в подшипниках,

$d_{ц}$  - диаметр цапфы рабочего вала, м,

$g = 9.8 \text{ м/с}^2$  - ускорение силы тяжести.

Момент сопротивления от трения качения колеса по рельсу определится из выражения:

$$M_{ck} = (m_c + m_{gp}) \cdot f \cdot g, \quad (\text{Б.2})$$

где  $f$  - коэффициент трения качения колеса по рельсу, м.

Значение коэффициента трения качения для стальных ходовых колёс диаметром от 200 мм до 1000 мм, движущихся по рельсам, лежит в пределах (0.03 – 0.12) см.

Таким образом, момент статического сопротивления механизма передвижения тележки или крана определяется выражением:

$$M_{pмс} = M_{сн} + M_{ск}. \quad (Б.3)$$

В производственном цикле рассматриваемых в курсовом проекте кранов и тележек движение в прямом направлении совершается с грузом, а движение в обратном направлении - без груза.

При движении тележек и кранов мостового типа по различным причинам может образоваться перекосяк, когда плоскости качения ходовых колёс не совпадают с направлением движения, и происходит поперечное скольжение реборд ходовых колёс по рельсу.

Момент сопротивления реборд ходовых колёс о рельсы теоретически оценить трудно, так как на его значение влияет большое количество различных факторов. Поэтому сопротивление от трения реборд учитываются в практике расчётов коэффициентом трения реборд  $K_p$ . Тогда полный момент статического сопротивления с учетом этого явления:

$$M_{pмс\Sigma} = K_p \cdot M_{pмс}.$$

Величины коэффициента  $K_p$  определены на основе экспериментальных исследований и приводятся в литературе [8]. Для механизмов, рассматриваемых в данном курсовом проекте, значение  $K_p$  может быть взято равным 1.5.

## Б.2 Рольганг ножиц

Момент статического сопротивления рольганга складывается из момента холостого хода и момента, необходимого для перемещения металла по рольгангу.

Момент холостого хода рольганга определяется по выражению:

$$M_{xx} = \frac{N_p \cdot m_p \cdot d_{ш} \cdot \mu_n \cdot g}{2}, \quad (\text{Б.4})$$

где  $N_p$  - количество роликов рольганга,

$m_p$  - масса одного ролика, кг,

$d_{ш}$  - диаметр шейки ролика, м,

$\mu_n$  - коэффициент трения скольжения в подшипниках роликов.

Коэффициент трения скольжения в подшипниках равен для роликовых подшипников 0.005 – 0.007, а для бронзовых – 0.06 – 0.08.

Момент, необходимый для перемещения металла по рольгангу  $M_{nm}$  складывается из момента трения скольжения в подшипниках роликов и момента трения качения металла по роликам. Таким образом, полный момент статического сопротивления загруженного рольганга определяется по выражению:

$$M_{pms} = M_{xx} + M_{nm} = \frac{(N_p \cdot m_p + m_3) \cdot d_{ш} \cdot \mu_n \cdot g}{2} + m_3 \cdot f \cdot g, \quad (\text{Б.5})$$

где  $m_3$  - масса заготовки металла, кг,

$f$  - коэффициент трения качения металла по роликам, м.

Коэффициент трения качения рольгангов равен для горячего металла 0.15 см, а для холодного – 0.1 см.

Особенностью производственного цикла рассматриваемого в курсовом проекте рольганга является отсутствие режима холостого хода. Рольганг перемещает либо целую заготовку, либо её половину.

При ударе перемещаемой заготовки в ограничительный упор ножиц, а также при случайных упорах заготовки в борта рольганга и в направляющие линейки происходит проскальзывание (буксование) роликов по металлу. При этом вместо трения качения появляется трение скольжения металла по металлу, и нагрузка резко возрастает.

Момент статического сопротивления при буксовании определится из выражения:

$$M_{сб} = \frac{(N_p \cdot m_p + m_3) \cdot d_{ш} \cdot \mu_n \cdot g + m_3 \cdot D_p \cdot \mu_{б} \cdot g}{2}, \quad (\text{Б.6})$$

где  $D_p$  - диаметр ролика, м,

$\mu_{б} = 0.3$  - коэффициент трения металла о ролик при буксовании.

Поскольку явление буксования кратковременно и не может существенно влиять на величину среднеквадратичного момента сопротивления, величина  $M_{сб}$  определяет максимальный пик нагрузки и учитывается при проверке выбранного двигателя на перегрузочную способность:

$$M_{сбпр} \leq \lambda \cdot M_n \quad (\text{Б.7})$$

где  $M_{сбпр}$  - приведенный к валу двигателя момент статического сопротивления при буксовании,

$M_n$  - номинальный момент выбранного двигателя,

$\lambda$  - перегрузочная способность двигателя.

### Б.3 Цепной транспортер

Во время рабочего хода цепного транспортера, когда заготовка перемещается с одного рольганга на другой, приводной электрический двигатель преодолевает сопротивление сил трения скольжения в подшипниках рабочих валов со звездочками и трения скольжения металлической заготовки по металлическим направляющим. Во время обратного (холостого) хода остается только сопротивление сил трения скольжения в подшипниках.

Момент статического сопротивления при холостом ходе цепного транспортера определяется по выражению:

$$M'_{pms} = M_{xx} = \frac{(2 \cdot m_6) \cdot d_y \cdot \mu_n \cdot g}{2}, \quad (\text{Б.8})$$

где  $(2 \cdot m_6)$  - масса двух валов со звездочками, кг.

Момент сопротивления сил трения скольжения заготовки по направляющим определится по выражению:

$$M_{c3} = \frac{m_3 \cdot D_{зв} \cdot \mu_c \cdot g}{2}, \quad (\text{Б.9})$$

где  $m_3$  - масса заготовки, кг,

$D_{зв}$  - диаметр звездочки, м,

$\mu_c$  - коэффициент сил трения скольжения заготовки по направляющим.

Таким образом, момент статического сопротивления при рабочем ходе цепного транспортера:

$$M''_{pms} = M_{xx} + M_{c3} \quad (\text{Б.10})$$

## Б.4 Грузовой лифт

Момент статического сопротивления грузового лифта складывается из момента силы тяжести и момента сил трения в подшипниках канатоведущего шкива и трения грузовой клетки и противовеса в направляющих шахты.

Момент силы тяжести определяется по формуле:

$$M_T = \frac{m_{рез} \cdot D \cdot g}{2}, \quad (Б.11)$$

где  $D$  - диаметр канатоведущего шкива, м,

$m_{рез}$  - результирующая масса, которая поднимается или спускается электроприводом лифта, кг.

Результирующая масса определяется соотношением масс груза, клетки и противовеса и может быть рассчитана по формуле:

$$m_{рез} = m_k + m_z - m_n, \quad (Б.12)$$

где  $m_k$  - масса клетки, кг,

$m_z$  - масса груза, кг,

$m_n$  - масса противовеса, кг.

Если при подъеме  $m_{рез} > 0$ , двигатель работает в двигательном режиме; если же  $m_{рез} < 0$ , то двигатель работает в тормозном (генераторном) режиме. При спуске, если  $m_{рез} > 0$ , двигатель работает в тормозном (генераторном) режиме, если же  $m_{рез} < 0$ , двигатель работает в двигательном режиме.

Момент сил трения в подшипниках канатоведущего шкива можно определить по выражению:

$$M_{сн} = \frac{(m_k + m_z + m_n) \cdot d_{ш} \cdot \mu \cdot g}{2}, \quad (Б.13)$$

где  $d_{ш}$  - диаметр цапфы вала канатоведущего шкива, м.

Массы  $m_k$ ,  $m_z$ ,  $m_n$  складываются, так как эти массы при любом направлении движения висят на тросе, который навит на канатоведущий

шкив. Забегая вперед, отметим, что и при определении суммарного момента инерции поступательно движущихся масс грузового лифта массы

$m_k$ ,  $m_z$ ,  $m_n$  тоже должны суммироваться.

Момент сил трения грузовой клетки и противовеса в направляющих шахты математически точно определить практически невозможно, так как величина этого сопротивления зависит от многих факторов, не поддающихся учету (перекосы, степень изношенности, загрязненность, температура, влажность и т.п.). Поэтому величина момента сил трения клетки и противовеса в направляющих учитывается величиной КПД механизма  $\eta_l$ , которая определена заданием на проектирование.

Таким образом, полный момент статического сопротивления грузового лифта определяется по выражению:

$$M_{рмс} = \frac{M_m}{\eta_l} + M_{сн}, \quad (\text{Б.14})$$

если двигатель работает в двигательном режиме, и по выражению:

$$M_{рмс} = \left| M_m \cdot \eta_l \right| - M_{сн}, \quad (\text{Б.15})$$

если двигатель работает в тормозном (генераторном) режиме.

## Приложение В

(справочное)

Каталожные данные краново-металлургических электрических двигателей

**Таблица В.1 - Краново-металлургические двигатели постоянного тока типа МП, 220 В, ПВ = 25%**

Тип	Параллельного возбуждения						Последовательного возбуждения				$n_{max}$ , об/мин	J, кг·м <sup>2</sup>
	$P_H$ , кВт	$n_H$ , об/мин	$I_H$ , А	$R_H + R_{дп}$ , Ом	$R_{об}$ , Ом	$I_{вн}$ , А	$P_H$ , кВт	$n_H$ , об/мин	$I_H$ , А	$R_{об}$ , Ом		
МП-12	2.5	1300	14.2	1.33	329	0.525	2.5	1000	15.6	0.89	3250	0.05
МП-22	4.5	1100	26	0.87	168	0.955	4.5	880	28	0.26	3100	0.155
МП-32	9	900	48	0.348	138	1.26	9	750	52	0.143	2600	0.305
МП-41	12	685	64	0.243	91	1.75	12.5	680	72	0.088	2200	0.775
МП-42	16	700	84	0.168	81	1.97	17	680	92	0.056	2100	0.95
МП-51	23	600	120	0.0845	62	2.55	25	575	134	0.032	2000	2.35
МП-52	33	650	168	0.0495	59	2.75	35	575	185	0.028	2000	3.03
МП-62	46	580	231	0.0330	55.5	2.93	50	510	260	0.02	1800	5.5
МП-72	75	520	374	0.0133	40	4.07	80	460	405	0.0098	1600	14.0
МП-82	100	475	500	0.01045	35.8	4.55	106	420	530	0.0068	1470	25.3

**Таблица В.2 - Краново-металлургические двигатели постоянного тока типа ДП, 220 В, ПВ = 25%**



Тихоходное исполнение

Тип	Параллельного возбуждения						Последовательного возбуждения				n <sub>max</sub> , об/мин	J, кг·м <sup>2</sup>
	P <sub>н</sub> , кВт	n <sub>н</sub> , об/мин	I <sub>н</sub> , А	R <sub>я</sub> +R <sub>дп</sub> , Ом	R <sub>об</sub> , Ом	I <sub>вн</sub> , А	P <sub>н</sub> , кВт	n <sub>н</sub> , об/мин	I <sub>н</sub> , А	R <sub>об</sub> , Ом		
ДП-12	3	1200	17.5	1.43	260	0.65	3	960	19	0.59	3300	0.05
ДП-21	4.5	1050	26	0.94	128	1.24	4.5	900	28	0.275	3200	0.125
ДП-22	6	1130	33	0.566	130	1.18	6	850	36	0.30	3000	0.155
ДП-31	8.5	870	47	0.423	107	1.42	8.5	770	50	0.118	2600	0.30
ДП-32	12	790	65	0.266	94	1.6	12	675	68	0.097	2500	0.425
ДП-41	16	710	85	0.177	70	2.2	17	630	94	0.053	2200	0.80
ДП-42	21	660	110	0.1155	65	2.4	23	600	125	0.039	2100	1.05
ДП-52	32	760	164	0.0545	58	2.6	33	630	175	0.033	2100	1.87
ДП-62	46	625	233	0.0332	42	3.6	50	520	260	0.0205	1800	4.00
ДП-72	67	590	338	0.0204	36	4.3	75	470	385	0.0105	1600	8.25
ДП-82	95	500	470	0.0117	34.4	4.6	106	425	540	0.007	1500	17.0
ДП-92	135	470	670	0.00745	24.4	6.3	150	405	760	0.0043	1500	32.5

Таблица В.3 - Краново-металлургические двигатели постоянного тока типа ДП, 220 В, ПВ = 25%

Быстроходное исполнение

Тип	Параллельного возбуждения						Последовательного возбуждения				$n_{max}$ , об/мин	$J$ , кг·м <sup>2</sup>
	$P_{нз}$ , кВт	$n_{нз}$ , об/мин	$I_{нз}$ , А	$R_{я+R_{дп}}$ , Ом	$R_{обз}$ , Ом	$I_{внз}$ , А	$P_{нз}$ , кВт	$n_{нз}$ , об/мин	$I_{нз}$ , А	$R_{обз}$ , Ом		
ДП-21	5.5	1460	31	0.531	128	1.24	5.5	1200	33	0.0275	3200	0.125
ДП-22	8	1550	44	0.322	130	1.18	8	1200	46	0.19	3000	0.155
ДП-31	12	1410	64	0.194	107	1.42	12	1100	67	0.118	2600	0.30
ДП-32	16	1230	84	0.125	94	1.6	17	1000	92	0.06	2500	0.425
ДП-41	22	1160	114	0.072	70	2.2	23	970	124	0.053	2200	0.8
ДП-42	29	1040	150	0.0510	65	2.4	32	900	170	0.0255	2100	1.05
ДП-52	38	1020	193	0.0315	58	2.6	42	850	218	0.022	2100	1.87
ДП-82А	112	650	560	0.0121	34.4	5.4	125	590	630	0.0051	1500	17.0
ДП-92А	140	640	700	0.0121	34.4	5.4	140	575	710	0.0051	1500	17.0

**Таблица В.4 - Краново-металлургические двигатели постоянного тока типа Д, 220 В, ПВ = 40%**

Тихоходное исполнение

Тип	Параллельного возбуждения						Последовательного возбуждения				$n_{max}$ , об/мин	J, кг·м <sup>2</sup>
	$P_{нз}$ , кВт	$n_{нз}$ , об/мин	$I_{нз}$ , А	$R_{я+R_{дп}}$ , Ом	$R_{об}$ , Ом	$I_{внз}$ , А	$P_{нз}$ , кВт	$n_{нз}$ , об/мин	$I_{нз}$ , А	$R_{об}$ , Ом		
Д-12	2.4	1230	14	1.63	260	0.65	2.4	1150	15	0.59	3600	0.05
Д-21	3.6	1080	20.5	0.95	128	1.24	3.6	1040	22	0.275	3600	0.125
Д-22	4.8	1150	26	0.57	130	1.18	4.8	970	28	0.30	3600	0.155
Д-31	6.8	880	37	0.42	107	1.42	6.8	900	38.5	0.118	3600	0.30
Д-32	9.5	800	51	0.28	94	1.6	9.5	760	53	0.097	3300	0.425
Д-41	13.0	720	69.5	0.17	70	2.2	13.0	730	71	0.053	3000	0.80
Д-806	16.0	710	84	0.11	65	2.7	17.0	640	92	0.052	2600	1.00
Д-808	22.0	630	112	0.054	44.5	3.93	24.0	615	125	0.031	2300	2.00
Д-810	29.0	600	148	0.036	46	3.85	35.0	610	182	0.017	2200	3.625
Д-812	38.0	565	192	0.023	34.5	5.10	47.0	560	242	0.010	1900	7.00
Д-814	55.0	560	280	0.081	35	6.25	70.0	550	356	0.007	1700	10.25
Д-816	70.0	535	350	0.084	25	7.45	85.0	540	430	0.005	1600	16.25
Д-818	83.0	470	415	0.066	17.5	10.20	100.0	510	500	0.004	1500	27.50

**Таблица В.5 - Краново-металлургические двигатели постоянного тока типа Д, 220 В, ПВ = 40%**

Быстроходное исполнение

Тип	Параллельного возбуждения						Последовательного возбуждения				$n_{max}$ , об/мин	J, кг·м <sup>2</sup>
	$P_{нз}$ , кВт	$n_{нз}$ , об/мин	$I_{нз}$ , А	$R_{я+R_{дп}}$ , Ом	$R_{об}$ , Ом	$I_{внз}$ , А	$P_{нз}$ , кВт	$n_{нз}$ , об/мин	$I_{нз}$ , А	$R_{об}$ , Ом		

Д-21	4.4	1500	24.5	0.531	128	1.24	4.4	1340	26	0.275	3200	0.125
Д-22	6.5	1570	34	0.322	130	1.18	6.5	1300	37	0.19	3000	0.155
Д-31	9.5	1420	50.5	0.194	107	1.42	9.5	1190	52.5	0.118	2600	0.30
Д-32	13.0	1240	68	0.125	94	1.6	13.5	1100	72	0.06	2500	0.425
Д-41	17.5	1160	90.5	0.072	70	2.2	18.0	1060	96	0.053	2200	0.80
Д-806	21.0	1060	110	0.047	65	2.7	23.0	1010	120	0.028	2600	1.00
Д-808	26.0	825	134	0.030	44.5	3.93	30.0	850	155	0.02	2300	2.00

**Таблица В.6 - Краново-металлургические двигатели постоянного тока типа Д, 440 В, ПВ = 40%**

Тихоходное исполнение

Тип	Параллельного возбуждения						Последовательного возбуждения				$n_{\text{max}}$ , об/мин	J, кг·м <sup>2</sup>
	$P_{\text{н}}$ , кВт	$n_{\text{н}}$ , об/мин	$I_{\text{н}}$ , А	$R_{\text{я}} + R_{\text{дп}}$ , Ом	$R_{\text{пар}}$ , Ом	$I_{\text{вн}}$ , А	$P_{\text{н}}$ , кВт	$n_{\text{н}}$ , об/мин	$I_{\text{н}}$ , А	$R_{\text{пос}}$ , Ом		
Д-21	3.1	1300	9.5	3.54	128	1.24	3.1	1230	10	1.52	3600	0.125

Д-31	5.2	910	14.5	2.08	107	1.42	5.2	900	16	0.63	3600	0.3
Д-41	12.5	720	34	0.695	70	2.2	12.5	760	34.5	0.24	3000	0.8
Д-808	22.0	630	56	0.210	44.4	3.93	24.0	615	63	0.135	2300	2.0
Д-810	29.0	600	74	0.146	46.2	3.85	35.0	610	91	0.066	2200	3.625
Д-812	36.0	570	92	0.099	34.4	5.10	45.0	590	115	0.041	1900	7.0
Д-816	70.0	540	175	0.0324	24.7	7.44	85.0	540	215	0.02	1600	16.25
Д-818	83.0	470	205	0.026	17.3	10.20	106	500	265	0.0148	1500	27.5

Быстроходное исполнение

Д-22	5.6	1550	15.5	1.69	42	3.6	5.6	1300	16.5	0.96	3200	0.125
Д-32	12.0	1240	31.5	0.534	36	4.3	12.6	1200	34	0.24	2500	0.425
Д-806	21.0	1060	55	0.205	65	2.7	23.0	1010	60	0.099	2600	1.0

**Таблица В.7 - Краново-металлургические асинхронные двигатели с фазным ротором типа МТ, 380 В, 50 Гц, ПВ = 25%**

Тип	P <sub>н</sub> , кВт	n <sub>н</sub> , об/мин	$\frac{M_M}{M_H}$	Статор				Ротор				J, кг·м <sup>2</sup>
				I <sub>с.н</sub> , А	I <sub>с.х</sub> , А	Z <sub>с</sub> , Ом	X <sub>с</sub> , Ом	E <sub>р.н</sub> , В	I <sub>р.н</sub> , А	Z <sub>р</sub> , Ом	ОмX <sub>р</sub>	
МТ-11-6	2.2	885	2.3	7.2	5.2	3.67	2.47	135	12.8	0.61	0.506	0.0425
МТ-12-6	3.5	910	2.5	10.3	7.5	2.09	1.565	204	12.2	0.77	0.73	0.0675
МТ-21-6	5	940	2.9	14.9	10.9	1.11	1.07	164	20.6	0.24	0.406	0.1025
МТ-22-6	7.5	945	2.8	20.9	15.0	0.685	0.735	227	21.6	0.29	0.544	0.142

110	MT-31-6	11	953	3.1	28.4	19.2	0.415	0.465	200	35.4	0.132	0.27	0.262
	MT-31-8	7.5	702	2.6	21.2	16.7	0.788	0.898	185	28.0	0.211	0.33	0.262
	MT-41-8	11	715	2.9	30.8	22.2	0.43	0.515	155	46.7	0.0835	0.171	0.465
	MT-42-8	16	718	3.0	42.5	29.6	0.271	0.354	222	46.3	0.105	0.239	0.675
	MT-51-8	22	723	3.0	56.5	36.1	0.179	0.297	197	70.5	0.0496	0.136	1.1
	MT-52-8	30	725	3.0	71.6	44.0	0.136	0.225	257	74.3	0.0593	0.174	1.42
	MT-61-10	30	574	3.3	80.0	55.0	0.1125	0.273	142	133	0.0225	0.0382	3.25
	MT-62-10	45	577	3.2	110	71.0	0.0652	0.186	206	138	0.0280	0.0547	4.37
	MT-63-10	60	577	2.9	133	73.8	0.0549	0.160	253	160	0.0332	0.0704	5.5
	MT-71-10	80	582	3.3	190	119	0.0275	0.113	294	167	0.0266	0.068	10
	MT-72-10	100	584	3.3	239	149	0.0199	0.0877	368	170	0.0299	0.0817	12
	MT-73-10	125	585	3.4	286	170	0.0151	0.0731	442	175	0.0337	0.098	14.2

**Таблица В.8 - Краново-металлургические асинхронные двигатели с фазным ротором типов МТ и МТВ,  
380 В, 50 Гц, ПВ = 25%**

Тип	P <sub>н</sub> , кВт	n <sub>н</sub> , об/мин	$\frac{M_M}{M_H}$	Статор				Ротор				J, кг·м <sup>2</sup>
				I <sub>c.н</sub> , А	I <sub>c.х</sub> , А	Z <sub>c</sub> , Ом	X <sub>c</sub> , Ом	E <sub>p.н</sub> , В	I <sub>p.н</sub> , А	Z <sub>p</sub> , Ом	ОмX <sub>p</sub>	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
MT011-6	1.4	885	2.3	5.3	3.9	5.98	3.93	112	9.3	0.695	0.57	0.0212
MT012-6	2.2	895	2.3	7.5	5.4	3.6	2.58	144	11.0	0.67	0.585	0.0288

MT111-6	3.5	915	2.3	10.5	6.6	2.16	2.03	181	13.7	0.525	0.755	0.0488
MT112-6	5.0	925	2.5	14.8	9.5	1.32	1.39	206	16.6	0.50	0.43	0.0675
MT211-6	7.5	935	2.5	20.8	11.8	0.68	1.07	255	19.8	0.44	0.88	0.115
MTB311-6	11.0	945	2.8	28.6	16.7	0.54	0.575	172	42.5	0.11	0.225	0.225
MTB311-8	7.5	695	2.5	21.0	14.0	0.88	0.965	251	20.5	0.47	0.72	0.275
MTB312-6	16	955	2.8	37.6	20.6	0.33	0.41	208	49.5	0.099	0.25	0.313
MTB312-8	11	710	2.8	33.0	22.1	0.53	0.56	182	41.0	0.13	0.23	0.387

Продолжение таблицы В.8

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
MTB411-6	22	965	2.8	55.0	33.2	0.19	0.31	225	61.0	0.066	0.23	0.5
MTB411-8	16	715	2.8	45.7	30.2	0.285	0.43	207	49.5	0.103	0.25	0.538
MTB412-6	30	970	2.8	70.5	42.0	0.125	0.23	259	72.0	0.055	0.225	0.675
MTB412-8	22	720	2.8	58.0	37.1	0.207	0.32	234	59.0	0.09	0.24	0.75

112

MTB511-8	30	720	2.8	77.0	46	0.123	0.245	280	67.5	0.082	0.28	1.025
MTB512-8	40	730	2.8	101	60	0.08	0.17	322	76.5	0.072	0.24	1.4
MTB611-10	45	575	3.0	115	80	0.087	0.189	185	155	0.027	0.046	4.25
MTB612-10	60	578	3.0	145	93	0.055	0.142	245	153	0.033	0.062	5.25
MTB613-10	80	580	3.0	190	120	0.042	0.107	320	155	0.038	0.078	6.25
MTB711-10	100	584	2.8	255	180	0.025	0.096	275	230	0.017	0.066	10.25
MTB712-10	125	587	2.8	320	230	0.016	0.080	345	225	0.020	0.082	12.7
MTB713-10	160	587	2.8	395	285	0.012	0.061	420	235	0.022	0.098	15.0

**Таблица В.10 - Краново-металлургические асинхронные двигатели с фазным ротором типа МТН,  
380/220 В, 50 Гц, ПВ = 25%**

Тип	P <sub>н</sub> , кВт	n <sub>н</sub> , об/мин	$\frac{M_M}{M_H}$	Статор				Ротор				J, кг·м <sup>2</sup>
				I <sub>c.н</sub> , А	I <sub>c.х</sub> , А	Z <sub>c2</sub> , Ом	X <sub>c2</sub> , Ом	U <sub>р.н</sub> , В	I <sub>р.н</sub> , А	Z <sub>р2</sub> , Ом	ОмX <sub>р2</sub>	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
МТН111-6	3.5	870	1.2	11.6	9.87	2.62	1.7	178	16.5	0.671	0565	0.195



MTH112-6	5.3	885	2.0	15.3	11.8	1.61	1.14	217	19	0.603	0625	0.27
MTH211-6	8.2	900	2.0	24.6	19	0.835	0.88	257	23	0.466	0.666	0.46
MTH311-6	13	925	2.5	35	23.2	0.51	0.645	186	51	0.124	0.241	0.9
MTH312-6	17.5	945	2.4	43	34.4	0.337	0.431	233	54	0.125	0.254	1.25
MTH311-8	9	675	2.0	26.1	17.7	0.98	0.843	264	26	0.498	0.643	1.1
MTH312-8	13	690	2.5	34.7	27.5	0.534	0.529	178	53	0.13	0.1825	1.25
MTH411-6	27	950	3.0	65	39.7	0.219	0.271	247	77	0.08	0.233	2.0
MTH412-6	36	955	3.1	87	51.8	0.133	0.197	271	88	0.059	0.173	2.7

Продолжение таблицы В.10

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
MTH411-8	18	695	2.5	48	29.8	0.352	0.507	221	59	0.125	0.245	2.15
MTH412-8	26	710	2.5	72	49.6	0.202	0.313	266	68	0.102	0.231	3.0
MTH511-8	34	695	2.3	82	47.4	0.164	0.232	297	81	0.124	0.448	4.3
MTH512-8	45	695	3.0	104	53.1	0.103	0.172	319	94	0.091	0.356	5.7

114	МТН611-10	53	560	3.2	128	78.1	0.0855	0.18	197	185	0.0274	0.176	17
	МТН612-10	70	560	2.6	165	88.7	0.06	0.136	262	181	0.033	0.133	21
	МТН613-10	90	570	2.1	207	120	0.0416	0.102	339	179	0.0384	0.0988	25
	МТН711-10	125	580	2.3	287	155	0.0255	0.078	288	294	0.017	0.077	41
	МТН712-10	155	580	2.3	355	183	0.0202	0.064	345	295	0.0189	0.091	51
	МТН713-10	200	582	2.3	458	247	0.0135	0.048	431	305	0.021	0.109	60

**Таблица В.11 - Краново-металлургические асинхронные двигатели с фазным ротором типа МТФ,  
380/220 В, 50 Гц, ПВ = 25%**

Тип	Р <sub>н</sub> , кВт	n <sub>н</sub> , об/мин	$\frac{M_M}{M_H}$	Статор				Ротор				J, кг·м <sup>2</sup>
				I <sub>с.н</sub> , А	I <sub>с.х</sub> , А	Z <sub>с</sub> , Ом	X <sub>с</sub> , Ом	E <sub>р.н</sub> , В	I <sub>р.н</sub> , А	Z <sub>р</sub> , Ом	ОмX <sub>р</sub>	
МТФ011-6	1.7	850	2.0	5.9	4.9	5.78	3.6	126	12.0	0.77	0.566	0.085
МТФ012-6	2.7	840	1.9	8.9	6.12	3.63	2.51	154	15	0.745	0.59	0.115
МТФ111-6	4.1	870	1.9	11.7	7.45	2.1	1.93	175	18.7	0.6	0.57	0.195

MTF112-6	5.8	915	2.4	16	11.35	1.26	1.26	217	19.0	0.5	0.648	0.27
MTF211-6	9	915	2.1	24	14.35	0.755	1.05	273	25	0.485	0.855	0.46
MTF311-6	13	935	2.5	34.5	23.2	0.48	0.645	184	51	0.111	0.241	0.9
MTF312-6	17.5	950	2.4	42.5	28.7	0.23	0.334	233	54	0.107	0.244	1.25
MTF311-8	9	680	2.0	25.6	17.7	0.835	0.843	264	26	0.46	0.643	1.1
MTF312-8	13	695	2.5	34	24.2	0.365	0.53	178	53	0.122	0.182	1.55
MTF411-6	27	955	3.0	64	40	0.197	0.287	246	77	0.0763	0.236	2.0
MTF412-6	36	965	3.0	86	51.8	0.124	0.197	271	88	0.055	0.173	2.7
MTF411-8	18	700	2.5	46.7	29.8	0.327	0.53	221	59	0.117	0.26	2.15
MTF412-8	26	715	2.5	71	49.6	0.182	0.313	266	38	0.095	0.231	3.0

**Таблица В.12 - Краново-металлургические асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором типа МТК, 380 В, 50 Гц, ПВ = 25%**

Тип	P <sub>н</sub> , кВт	n <sub>н</sub> , об/мин	$\frac{M_M}{M_H}$	$\frac{M_{II}}{M_H}$	Статор							
					$\frac{I_{C.I.}}{I_{C.H.}}$	cos φ			I <sub>с.н</sub> , А	I <sub>с.х</sub> , А	R <sub>с</sub> , Ом	X <sub>с</sub> , Ом
						пуско- вой	номиналь- ный	холостого хода				
МТК-11-6	2.2	883	2.6	2.6	3.3	0.86	0.76	0.36	6.4	4.7	3.67	2.54
МТК-12-6	3.5	875	2.6	2.6	3.6	0.84	0.78	0.33	9.6	6.8	2.09	1.605

116	МТК-21-6	5.0	910	3.1	2.9	4.3	0.76	0.75	0.32	13.4	9.2	1.11	1.072
	МТК-22-6	7.5	905	3.1	3.0	4.4	0.74	0.76	0.30	19.3	12	0.685	0.738
	МТК-31-6	11.0	920	3.4	3.2	5.1	0.72	0.78	0.26	26.4	16.2	0.415	0.467
	МТК-31-8	7.5	682	3.0	2.9	4.5	0.77	0.76	0.23	19.1	13.5	0.788	0.898
	МТК-41-8	11.0	685	3.2	3.0	4.5	0.70	0.73	0.24	28.8	19.4	0.43	0.526
	МТК-42-8	16.0	685	3.3	3.1	4.8	0.71	0.76	0.23	39.6	25.8	0.271	0.36
	МТК-51-8	22.0	692	3.1	2.8	5.0	0.61	0.77	0.27	52.6	28.8	0.179	0.302
	МТК-52-8	28.0	695	3.2	2.8	5.2	0.61	0.79	0.25	64.6	35.9	0.137	0.229

Продолжение таблицы В.12

Тип	Ротор				J, кг·м <sup>2</sup>	Q, кг
	$I'_{p.n}, A$	$R'_p, Ом$	$X'_p, Ом$	$k_p = k_e^2$		
МТК-11-6	4.2	5.02	2.88	$5.3 \cdot 10^4$	0.04	79
МТК-12-6	6.85	3.36	1.915	$2.35 \cdot 10^4$	0.0625	98
МТК-21-6	9.2	1.862	1.5	$1.92 \cdot 10^4$	0.0975	130

МТК-22-6	13.6	1.33	1.07	$1.005 \cdot 10^4$	0.138	153
МТК-31-6	19.2	0.824	0.708	$0.595 \cdot 10^4$	0.25	205
МТК-31-8	13.2	1.296	0.794	$1.087 \cdot 10^4$	0.25	205
МТК-41-8	19.5	0.84	0.662	$0.94 \cdot 10^4$	0.445	267
МТК-42-8	28.6	0.598	0.466	$0.46 \cdot 10^4$	0.65	332
МТК-51-8	38.4	0.383	0.390	$0.397 \cdot 10^4$	1.05	415
МТК-52-8	49.0	0.297	0.301	$0.234 \cdot 10^4$	1.38	490

**Таблица В.13 - Крановые асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором типа МТК и МТКВ, 380 В, 50 Гц, ПВ = 25%**

Тип	$P_n$ , кВт	$n_n$ , об/мин	$\frac{M_M}{M_H}$	$\frac{M_{II}}{M_H}$	Статор							
					$\frac{I_{с.п.}}{I_{с.н.}}$	$\cos \varphi$			$I_{с.н.}$ , А	$I_{с.х.}$ , А	$R_c$ , Ом	$X_c$ , Ом
						пуско- вой	номиналь- ный	холостого хода				
МТК011-6	1.4	870	2.8	2.8	3.0	0.86	0.69	0.15	4.8	3.2	5.98	3.93
МТК012-6	2.2	875	2.8	2.8	3.1	0.85	0.7	0.13	7.2	4.6	3.6	2.58
МТК111-6	3.5	870	2.8	2.8	3.5	0.85	0.74	0.11	10.1	6.1	2.16	2.03
МТК112-6	5.0	890	3.0	3.0	3.9	0.80	0.75	0.12	13.5	8.4	1.32	1.39

118	МТК211-6	7.5	905	2.9	2.8	4.3	0.72	0.79	0.09	18.4	11.0	0.68	1.07
	МТКВ311-6	11	910	3.1	2.8	4.9	0.72	0.8	0.09	26	15.7	0.54	0.575
	МТКВ311-8	7.5	680	3.1	2.9	4.4	0.76	0.74	0.09	20	13.2	0.88	0.965
	МТКВ312-6	16	905	3.1	2.8	4.9	0.70	0.79	0.08	37.8	19.8	0.33	0.41
	МТКВ312-8	11	690	3.3	3.1	4.6	0.77	0.71	0.10	30.4	21.3	0.53	0.56
	МТКВ411-6	22	935	3.0	2.8	5.2	0.61	0.78	0.07	50	29.7	0.19	0.31
	МТКВ411-8	16	695	3.3	3.0	4.8	0.66	0.73	0.08	41	28.2	0.285	0.43
	МТКВ412-6	28	945	3.3	2.8	5.6	0.60	0.81	0.06	62	35.1	0.125	0.23
	МТКВ412-8	22	695	3.3	3.0	5.0	0.65	0.76	0.07	53.2	35.8	0.207	0.32
	МТКВ511-8	28	700	3.4	3.1	5.4	0.61	0.75	0.06	68	40	0.123	0.245
	МТКВ512-8	37	705	3.6	3.3	5.8	0.61	0.72	0.06	91	55	0.08	0.17

Продолжение таблицы В.13

Тип	Ротор				J, кг·м <sup>2</sup>	Q, кг
	$I'_{р.н}, A$	$R'_{ф.р}, Ом$	$X'_{ф.р}, Ом$	$k_p = k_e^2$		
МТК011-6	2.9	8.41	3.80	$9.45 \cdot 10^4$	0.02	47
МТК012-6	4.5	5.70	2.63	$4.71 \cdot 10^4$	0.0275	53
МТК111-6	7	3.33	1.46	$3.02 \cdot 10^4$	0.0462	70
МТК112-6	9.2	2.34	1.015	$1.62 \cdot 10^4$	0.065	80
МТК211-6	13.6	1.62	1.05	$1.445 \cdot 10^4$	0.11	110
МТКВ311-6	19.5	0.73	0.64	$0.78 \cdot 10^4$	0.212	155
МТКВ311-8	13.7	1.17	0.70	$1.4 \cdot 10^4$	0.262	155
МТКВ312-6	28.6	0.52	0.47	$0.40 \cdot 10^4$	0.3	195

МТКВ312-8	19.6	0.725	0.44	$0.62 \cdot 10^4$	0.375	195
МТКВ411-6	37	0.355	0.375	$0.115 \cdot 10^4$	0.475	255
МТКВ411-8	27.8	0.505	0.42	$0.6 \cdot 10^4$	0.512	255
МТКВ412-6	48.2	0.265	0.28	$0.065 \cdot 10^4$	0.637	315
МТКВ412-8	38	0.37	0.32	$0.335 \cdot 10^4$	0.712	315
МТКВ511-8	49.1	0.27	0.235	$0.284 \cdot 10^4$	0.975	330
МТКВ512-8	63	0.19	0.16	$0.15 \cdot 10^4$	1.32	470

**Таблица В.14 - Металлургические асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором типа МТКМ,  
380 В, 50 Гц, ПВ = 40%**

Тип	$P_n$ , кВт	$n_n$ , об/мин	$\frac{M_M}{M_H}$	$\frac{M_{II}}{M_H}$	Статор							
					$\frac{I_{C.П.}}{I_{C.H.}}$	$\cos \phi$			$I_{c.n.}$ , А	$I_{c.x.}$ , А	$R_c$ , Ом	$X_c$ , Ом
						пуско- вой	номиналь- ный	холостого хода				
МТКМ111-6	2.2	895	2.6	2.6	3.8	0.88	0.78	0.13	6.3	4.25	4.33	2.61
МТКМ112-6	3.3	905	2.6	2.5	4.0	0.88	0.79	0.13	8.9	6.6	2.8	1.67
МТКМ211-6	5.0	920	3.1	2.9	4.7	0.78	0.8	0.10	12.5	7.8	1.41	1.29
МТКМ311-6	7.5	930	2.8	2.5	4.9	0.76	0.83	0.095	17.5	11.8	0.90	0.663
МТКМ311-8	5.0	695	2.9	2.6	4.5	0.84	0.76	0.12	13.3	9.4	1.76	1.24
МТКМ312-6	11.0	935	3.0	2.8	5.3	0.72	0.8	0.09	26.0	16	0.595	0.485
МТКМ312-8	7.5	695	3.0	2.8	4.6	0.81	0.76	0.105	19.8	13.3	1.04	0.833
МТКМ411-6	16	940	3.0	2.8	5.5	0.67	0.81	0.075	36.0	18	0.323	0.398

120	МТКМ411-8	11	700	3.4	3.1	5.2	0.7	0.74	0.085	28.0	18.6	0.465	0.543
	МТКМ412-6	22	940	3.1	2.8	5.6	0.64	0.86	0.07	46.0	21.9	0.218	0.312
	МТКМ412-8	16	705	3.4	3.1	5.2	0.7	0.73	0.08	41.5	27.2	0.316	0.371
	МТКМ511-6	22	705	3.3	2.9	5.5	0.68	0.8	0.07	49.5	31	0.205	0.284
	МТКМ512-8	28	705	3.5	3.1	6.0	0.65	0.75	0.07	67.0	40	0.141	0.214

Продолжение таблицы В.14

Тип	Ротор				J, кг·м <sup>2</sup>	Q, кг
	$I'_{р.н}, A$	$R'_{\phi.p}, Ом$	$X'_{\phi.p}, Ом$	$k_p = k_e^2$		
МТКМ111-6	4.4	4.3	1.88	$3.88 \cdot 10^4$	0.0462	70
МТКМ112-6	6.7	2.78	1.17	$1.93 \cdot 10^4$	0.065	80
МТКМ211-6	9.3	2.0	0.74	$1.79 \cdot 10^4$	0.110	110
МТКМ311-6	13.6	0.86	0.75	$0.91 \cdot 10^4$	0.212	155
МТКМ311-8	9	1.5	0.9	$1.79 \cdot 10^4$	0.263	155
МТКМ312-6	19	0.62	0.56	$0.48 \cdot 10^4$	0.300	195
МТКМ312-8	13.7	1.04	0.63	$0.89 \cdot 10^4$	0.376	195
МТКМ411-6	28.2	0.45	0.47	$0.15 \cdot 10^4$	0.475	255
МТКМ411-8	19.2	0.65	0.54	$0.76 \cdot 10^4$	0.512	255
МТКМ412-6	38.2	0.36	0.38	$0.09 \cdot 10^4$	0.637	315
МТКМ412-8	28.3	0.44	0.37	$0.4 \cdot 10^4$	0.712	315
МТКМ511-6	37.6	0.32	0.27	$0.34 \cdot 10^4$	0.975	380
МТКМ512-8	47.6	0.24	0.20	$0.19 \cdot 10^4$	1.32	470



**Таблица В.15 - Краново-металлургические асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором типа  
МТКФ, 380/220 В, 50 Гц, ПВ = 40%**

Тип	P <sub>н</sub> , кВт	n <sub>н</sub> , об/мин	$\frac{M_M}{M_H}$	$\frac{M_{II}}{M_H}$	Статор							
					$\frac{I_{C.П.}}{I_{C.Н.}}$	cosφ			I <sub>с.н</sub> , А	I <sub>с.х</sub> , А	R <sub>с</sub> , Ом	X <sub>с</sub> , Ом
						пуско- вой	номиналь- ный	холостого хода				
МТКФ011-6	1.7	835	2.3	2.3	2.6	0.87	0.74	0.166	5.8	4.17	5.78	3.6
МТКФ012-6	2.7	835	2.2	2.2	2.7	0.85	0.77	0.14	8.2	5.3	3.63	2.51
МТКФ111-6	4.1	850	2.3	2.3	3.2	0.81	0.83	0.108	10.9	6.22	2.1	1.93
МТКФ112-6	5.8	870	2.3	2.3	3.4	0.81	0.8	0.105	15.5	9.6	1.26	1.26
МТКФ211-6	9	840	2.2	2.1	3.4	0.71	0.81	0.085	23.2	11.7	0.755	1.05
МТКФ311-6	13	895	2.9	2.8	9.0	0.715	0.8	0.0925	32.3	19.3	0.48	0.645
МТКФ312-6	17.5	915	3.2	3.1	5.0	0.72	0.82	0.085	40.5	29.8	0.23	0.334
МТКФ311-8	9	670	3.0	2.9	4.0	0.77	0.77	0.108	24	16.4	0.835	0.843
МТКФ312-8	13	690	3.0	2.8	4.7	0.735	0.79	0.0805	31.8	27.7	0.365	0.53
МТКФ411-6	27	915	2.6	2.4	4.5	0.622	0.83	0.077	61	31.3	0.197	0.287
МТКФ412-6	36	920	3.3	3.1	4.7	0.62	0.82	0.069	81	42.1	0.124	0.197
МТКФ411-8	18	680	2.4	2.3	4.1	0.649	0.77	0.083	45	25.4	0.327	0.53
МТКФ412-8	26	690	2.8	2.6	4.5	0.633	0.75	0.08	66	43.3	0.182	0.313

Продолжение таблицы В.15

Тип	Ротор				J, кг·м <sup>2</sup>	Q, кг
	$I'_{р.н}, A$	$R'_{ф.р}, Ом$	$X'_{ф.р}, Ом$	$k_p = k_e^2$		
МТКФ011-6	2.76	7.45	3.17	$8.67 \cdot 10^4$	0.08	47
МТКФ012-6	4.48	5.38	2.32	$4.6 \cdot 10^4$	0.11	53
МТКФ111-6	6.55	3.26	0.165	$3.51 \cdot 10^4$	0.18	70
МТКФ112-6	8.65	2.19	1.12	$1.8 \cdot 10^4$	0.26	80
МТКФ211-6	14.2	1.62	1.02	$1.44 \cdot 10^4$	0.44	110
МТКФ311-6	19.5	0.8	0.555	$0.74 \cdot 10^4$	0.85	155
МТКФ312-6	26.2	0.477	0.356	$0.359 \cdot 10^4$	1.2	195
МТКФ311-8	13.2	1.01	0.645	$1.335 \cdot 10^4$	1.1	155
МТКФ312-8	19.1	0.64	0.42	$0.615 \cdot 10^4$	1.55	195
МТКФ411-6	38.0	0.327	0.348	$0.319 \cdot 10^4$	1.9	255
МТКФ412-6	51.8	0.236	0.251	$0.173 \cdot 10^4$	2.55	315
МТКФ411-8	26.3	0.503	0.409	$0.596 \cdot 10^4$	2.15	2545
МТКФ412-8	38.0	0.325	0.278	$0.293 \cdot 10^4$	3.0	315

**Таблица В.16 - Краново-металлургические асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором типа  
МТКН, 380/220 В, 50 Гц, ПВ = 25%**

Тип	P <sub>н</sub> , кВт	n <sub>н</sub> , об/мин	$\frac{M_M}{M_H}$	$\frac{M_{II}}{M_H}$	Статор							
					$\frac{I_{C.П.}}{I_{C.Н.}}$	cosφ			I <sub>с.п</sub> , А	I <sub>с.х</sub> , А	R <sub>с</sub> , Ом	X <sub>с</sub> , Ом
						пуско- вой	номиналь- ный	холостого хода				
МТКН111-6	3.5	890	2.8	2.8	3.0	0.86	0.75	0.154	10.5	8.0	2.62	1.7
МТКН112-6	5.3	875	3.0	3.0	3.5	0.84	0.81	0.123	14	9.6	1.61	1.14
МТКН211-6	8.2	875	2.7	2.6	3.8	0.6	0.75	0.112	23.2	14.4	0.835	0.88
МТКН311-6	13	895	2.9	2.8	4.0	0.725	0.8	0.095	32.3	19.3	0.51	0.645
МТКН311-8	9	670	3.0	2.9	4.0	0.797	0.77	0.12	24	16.4	0.98	0.843
МТКН312-6	17.5	915	3.2	3.1	5.0	0.715	0.82	0.0916	40.5	30.3	0.337	0.431
МТКН312-8	13	690	3.0	2.8	4.7	0.764	0.79	0.106	31.8	27.7	0.534	0.529
МТКН411-6	27	915	2.6	2.4	4.5	0.651	0.83	0.08	61	30.8	0.219	0.217
МТКН411-8	18	680	2.4	2.3	4.1	0.672	0.77	0.086	45	25.5	0.352	0.507
МТКН412-6	36	920	3.3	3.1	4.7	0.62	0.82	0.071	81	41.5	0.133	0.197
МТКН412-8	26	690	2.8	2.6	4.5	0.655	0.75	0.084	66	43.3	0.202	0.313
МТКН511-8	34	680	2.3	2.3	4.3	0.51	0.82	0.07	79	38.8	0.164	0.232
МТКН512-8	45	680	2.5	2.4	4.4	0.54	0.81	0.08	104	45	0.103	0.172

Продолжение таблицы В.16

Тип	Ротор				J, кг·м <sup>2</sup>	Q, кг
	$I'_{р.н}, A$	$R'_{ф.р}, Ом$	$X'_{ф.р}, Ом$	$k_p = k_e^2$		
МТКН111-6	5.65	2.82	1.425	$3.03 \cdot 10^4$	0.18	70
МТКН112-6	7.7	2.19	1.12	$1.8 \cdot 10^4$	0.26	80
МТКН211-6	12.5	1.4	0.88	$1.25 \cdot 10^4$	0.44	110
МТКН311-6	19.5	0.8	0.555	$0.74 \cdot 10^4$	0.85	155
МТКН311-8	13.5	1.01	0.645	$1.335 \cdot 10^4$	1.1	155
МТКН312-6	26.4	0.478	0.356	$0.359 \cdot 10^4$	1.2	195
МТКН312-8	19.5	0.64	0.42	$0.615 \cdot 10^4$	1.55	195
МТКН411-6	37.7	0.328	0.346	$0.319 \cdot 10^4$	1.9	255
МТКН411-8	26.1	0.507	0.409	$0.597 \cdot 10^4$	2.15	255
МТКН412-6	51.4	0.236	0.25	$0.173 \cdot 10^4$	2.55	315
МТКН412-8	37.8	0.325	0.27	$0.293 \cdot 10^4$	3.0	315
МТКН511-8	48.0	0.307	0.464	$0.386 \cdot 10^4$	4.3	440
МТКН512-8	64.7	0.237	0.366	$0.226 \cdot 10^4$	5.7	540