

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Витебский государственный технологический университет»

УТВЕРЖДАЮ  
Первый проректор УО «ВГТУ»  
\_\_\_\_\_ С.И. Малашенков  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 г.

***РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МАШИН И АППАРАТОВ.***  
***Раздел «Расчет электропривода машин***  
***легкой и текстильной промышленности»***

Методические указания к изучению курса  
для студентов специальности 1-36 08 01 «Машины и аппараты легкой,  
текстильной промышленности и бытового обслуживания»

РЕКОМЕНДОВАНО  
Редакционно-издательским  
советом УО «ВГТУ»  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 г.  
протокол № \_\_\_\_\_

Витебск  
2012

УДК 62-83

Расчет и конструирование машин и аппаратов. Раздел «Расчет электропривода машин легкой и текстильной промышленности» : методические указания к изучению курса для студентов специальности 1-36 08 01 «Машины и аппараты легкой, текстильной промышленности и бытового обслуживания».

Витебск : Министерство образования Республики Беларусь, УО «ВГТУ», 2012.

Составитель: д.т.н., проф. Сункуев Б.С.

В методических указаниях изложены основные вопросы расчета электропривода машин: классификация электроприводов, анализ движения, проектный и поверочные расчеты электропривода. Уделено внимание расчету привода с регулируемым асинхронным электродвигателем. Методические указания предназначены для студентов, изучающих дисциплину «Расчет и конструирование машин и аппаратов».

Одобрено кафедрой «Машины и аппараты легкой промышленности»  
УО «ВГТУ» 19.10.2011 г., протокол № 3.

Рецензент: доц. Новиков Ю.В.

Редактор: доц. Кириллов А.Г.

Рекомендовано к опубликованию редакционно-издательским советом УО «ВГТУ» 30.11.2011 г., протокол № 8.

Ответственный за выпуск: Данилова И. А.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»

-----  
Подписано к печати \_\_\_\_\_ Формат \_\_\_\_\_ Уч.- изд. лист. 2,5  
Печать ризографическая. Тираж \_\_\_\_\_ экз. Заказ № \_\_\_\_\_ Цена \_\_\_\_\_  
-----

Отпечатано на ризографе учреждения образования «Витебский государственный технологический университет».

Лицензия № 02330/0494384 от 16.03.2009.

210035, г. Витебск, Московский пр-т, 72.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1 Общие сведения об электроприводе.....	4
2 Основные параметры и механическая характеристика асинхронных электродвигателей.....	7
3 Особенности устройства регулируемого асинхронного электродвигателя и его механические характеристики.....	10
3.1 Особенности устройства регулируемого асинхронного электродвигателя .	10
3.2 Механические характеристики .....	11
4 Структура электроприводов .....	12
5 Приведение масс звеньев и сил, действующих на звенья привода к звену приведения и уравнение его движения .....	15
5.1 Приведение масс звеньев и сил.....	15
5.2 Уравнение движения звена приведения.....	17
6 Анализ движения звена приведения в электроприводе с фрикционной связью электродвигателя с передаточным механизмом.....	18
6.1 Структура цикла движения.....	18
6.2 Определение времени разгона .....	18
6.3 Определение времени торможения .....	22
6.4 Анализ установившегося движения звена приведения .....	22
7 Анализ движения звена приведения электропривода с нерегулируемым асинхронным электродвигателем и жесткой связью электродвигателя с передаточным механизмом .....	23
7.1 Расчет времени разгона .....	23
7.2 Расчет времени торможения .....	25
8 Анализ движения звена приведения электропривода с регулируемым асинхронным электродвигателем .....	26
8.1 Расчет времени разгона .....	26
8.2 Расчет времени торможения .....	28
9 Расчет мощности электродвигателя .....	29
9.1 Предварительный расчет мощности электродвигателя.....	29
9.2 Поверочный расчет мощности электродвигателя.....	31
10 Поверочный расчет электродвигателя по нагреву.....	34
10.1 Построение нагрузочной диаграммы электродвигателя.....	34
10.2 Динамика нагрева электродвигателя .....	36
10.3 Режимы работы асинхронных электродвигателей по нагреву .....	37
10.4 Проверка электродвигателей по нагреву при различных режимах работы	39
ЛИТЕРАТУРА.....	40

## ВВЕДЕНИЕ

Начальные сведения об электроприводе даны в курсе «Детали машин и ПГУ». В этом курсе решается задача выбора электродвигателя по мощности и частоте вращения ротора при условии, что нагрузка на валу электродвигателя постоянна и имеет статический характер. С целью же учета динамических нагрузок, имеющих место при нестационарных режимах (при разгоне, при переменной полезной нагрузке), вводится коэффициент динамичности, большой единицы, на который умножается статическая нагрузка.

В машинах легкой и текстильной промышленности имеет место нестационарный режим работы. Для более точного учета возникающих при этом динамических нагрузок требуются специальные методы расчета электропривода, использующие сведения из теории механизмов и машин (раздел «Динамика машинных агрегатов») и электропривода. Изложению этих специальных методов посвящены методические указания, предназначенные для студентов специальности «Машины и аппараты легкой, текстильной промышленности и бытового обслуживания», изучающих курс «Расчет и конструирование машин и аппаратов».

### 1 Общие сведения об электроприводе

Электропривод есть система подвижных звеньев, состоящая из ротора электродвигателя, связанных с ним звеньев передаточных и исполнительных механизмов, устройств управления, обеспечивающих заданные законы движения рабочих органов машины.

На рис. 1.1 показана блок-схема классификации электроприводов технологических машин.

По типу электродвигателя различают электроприводы:

- 1) с нерегулируемым асинхронным электродвигателем;
- 2) с регулируемым асинхронным электродвигателем;
- 3) с электродвигателем постоянного тока;
- 4) с шаговым электродвигателем.

Нерегулируемые асинхронные электродвигатели имеют наибольшее распространение в приводах технологических машин легкой и текстильной промышленности.

Вместе с тем, в последние десятилетия все более широкое применение находят регулируемые асинхронные электродвигатели и шаговые электродвигатели.

По способу компоновки электродвигателя с передаточными и исполнительными механизмами различают индивидуальные и многодвигательные электроприводы. В первом случае в машине имеется только один электродвигатель, приводящий в движение все исполнительные механизмы. Во втором случае имеется несколько электродвигателей, каждый из которых приводит в движение отдельный механизм или группу механизмов.

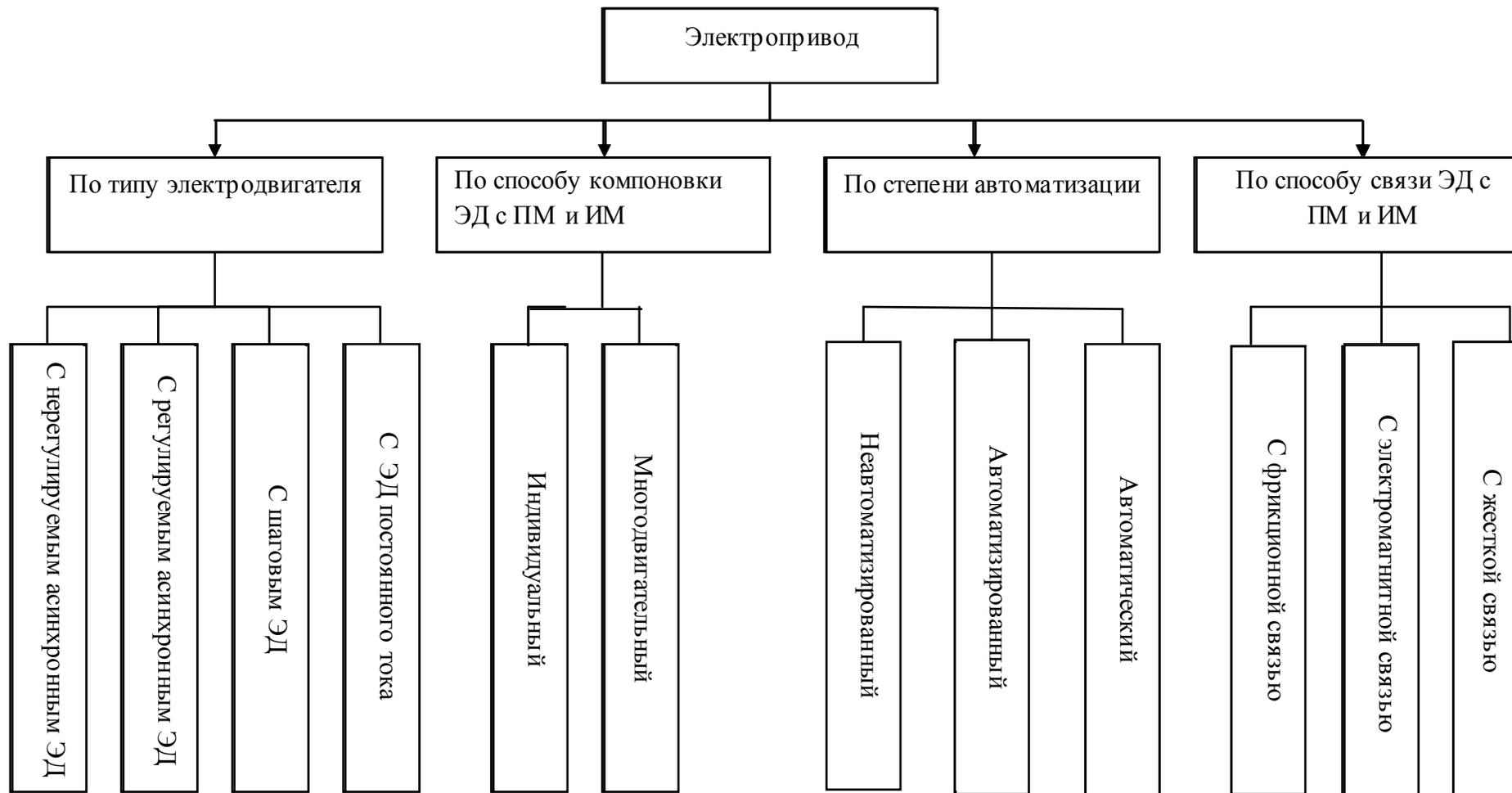


Рисунок 1.1 – Блок-схема классификации электроприводов технологических машин

Многодвигательный электропривод в ряде случаев позволяет снизить металлоемкость машин за счет сокращения числа передач.

По степени автоматизации можно выделить следующие группы электроприводов:

- 1) неавтоматизированные;
- 2) автоматизированные;
- 3) автоматические.

Разделение производится по степени автоматизации операций управления электроприводом. К числу последних относятся:

- 1) пуск;
- 2) торможение и останов;
- 3) останов в заданном положении рабочих органов;
- 4) регулирование скорости установившегося движения;
- 5) останов через заданное число циклов или при повороте главного вала на заданный угол;
- 6) сообщение ротору электродвигателя движения по заданному закону.

В неавтоматизированных электроприводах все операции управления осуществляются оператором, обслуживающим машину.

В автоматизированных приводах автоматизированы операции управления под №№ 2, 3, 4, 5.

В автоматических приводах автоматизированы все операции управления. К последним можно отнести позиционные приводы с шаговыми электродвигателями, управляемые микропроцессорными системами (компьютерами).

По способу связи электродвигателя с передаточными и исполнительными механизмами можно выделить приводы:

- 1) с фрикционной связью;
- 2) с электромагнитной связью;
- 3) с жесткой связью.

Фрикционная связь осуществляется посредством установки между валом электродвигателя и валом передаточного механизма фрикционной муфты, одна часть которой закреплена на валу электродвигателя, а другая – на валу передаточного механизма.

Электромагнитная связь осуществляется посредством электромагнитной муфты, в которой между полумуфтами имеется электромагнитное сцепление.

Схема электромагнитной муфты сцепления приведена на рис. 1.2.

При подаче напряжения на обмотку 2 в ведомой полумуфте 4 индуцируются вихревые токи. Взаимодействие магнитного поля ведущей полумуфты 3 и вихревых токов создает крутящий момент, пропорциональный силе тока обмотки 2, согласно принципу магнетизма вращения, открытому Араго [1]. Торможение ведомой полумуфты 4 происходит при возбуждении обмотки 6 тормозного диска, которая прижимает накладку 8 ведомой полумуфты к тормозному диску 5.

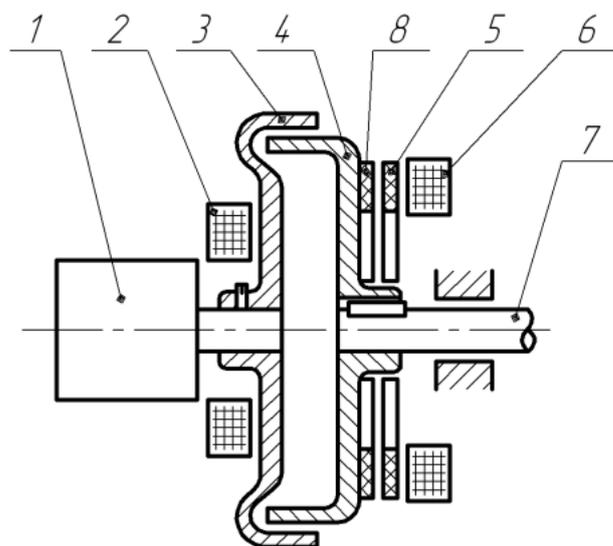


Рисунок 1.2 – Схема электромагнитной муфты сцепления:

- 1 – электродвигатель; 2 – обмотка муфты сцепления; 3 – ведущая полумуфта;  
 4 – ведомая чашеобразная полумуфта; 5 – тормозной диск; 6 – обмотка  
 тормозного диска; 7 – ведомый вал; 8 – накладка ведомой полумуфты

В электроприводах с жесткой связью между валом электродвигателя и валом передаточного механизма устанавливается жесткая сцепная муфта [2].

## 2 Основные параметры и механическая характеристика асинхронных электродвигателей

Перечислим основные параметры нерегулируемых асинхронных электродвигателей.

Синхронная частота вращения ротора  $n_o$  определяется из формулы

$$n_i = \frac{60 f}{p} \text{ об/мин,}$$

где  $f$  – частота напряжения, подаваемого на обмотку статора, Гц;

$p$  – число пар полюсов статора.

В таблице 2.1 приведены значения  $n_o$  для промышленной частоты  $f = 50$  Гц и рекомендуемых чисел  $p$ .

Таблица 2.1

$p$	1	2	3	4	5
$n_o$	3000	1500	1000	750	600

Синхронная угловая скорость ротора определяется из формулы

$$\omega_i = \frac{\pi n_i}{30} = \frac{2\pi f}{p}. \quad (2.1)$$

Номинальная частота вращения  $n_n$  ротора – это такая частота, при которой коэффициент полезного действия электродвигателя максимален.  $n_n$  определяется из формулы

$$n_i = (1 - S_i) n_i \text{ об/мин,}$$

где  $S_n$  – номинальное скольжение ротора ( $S_n = 0,08-0,13$ ).

Номинальная угловая скорость вращения ротора  $\omega_n$  определяется из формулы

$$\omega_i = \frac{\pi n_i}{30} \text{ рад/с.}$$

Номинальная мощность  $N_n$  электродвигателя соответствует режиму работы электродвигателя с максимальным коэффициентом полезного действия (указывается на щитке электродвигателя в кВт).

Номинальный момент  $M_n$  на валу электродвигателя определяется по формуле

$$M_i = \frac{1000 N_i}{\omega_i} \text{ Н·м.}$$

В формуле  $N_n$  берется в кВт.

Критический коэффициент  $\lambda_{кр}$  определяется из формулы

$$\lambda_{\epsilon\delta} = \frac{M_{\epsilon\delta}}{M_i},$$

где  $M_{кр}$  – максимальный критический момент, развиваемый на валу электродвигателя.

Коэффициент пуска  $\lambda_n$  определяется из формулы

$$\lambda_i = \frac{\dot{I}_i}{M_i},$$

где  $M_n$  – момент, развиваемый на валу в момент пуска.

Зависимость текущего значения угловой скорости  $\omega$  ротора от момента  $M_\delta$ , приложенного к ротору, определяется по приближенной формуле [3]:

$$\dot{I}_a = \frac{2 M_{\epsilon\delta}}{\frac{S}{S_{\epsilon\delta}} + \frac{S_{\epsilon\delta}}{S}}, \quad (2.2)$$

где  $S$  – текущее скольжение ротора, определяемое по формуле

$$S = 1 - \frac{\omega}{\omega_i};$$

$S_{кр}$  – критическое скольжение ротора, определяемое из формулы

$$S_{\epsilon\delta} = S_i \left( \lambda_{\epsilon\delta} + \sqrt{\lambda_{\epsilon\delta}^2 - 1} \right), \quad (2.3)$$

полученной подстановкой в формулу (2.2) значений  $M_\delta = M_n$  и  $S = S_n$  с последующим решением квадратного уравнения относительно  $\lambda_{кр}$ .

График зависимости  $\omega$  от  $M_{\delta}$  называется графиком механической характеристики. Вид графика приведен на рис. 2.1. Отметим на графике четыре характерные точки, соответствующие различным режимам работы.

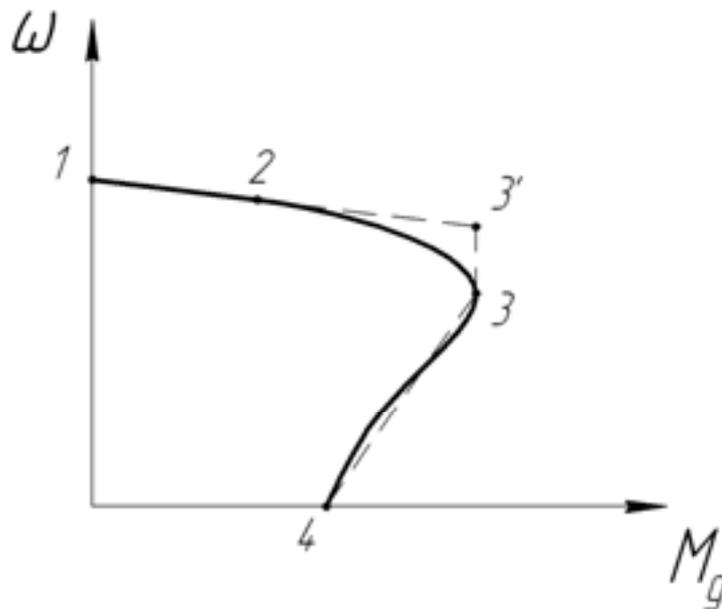


Рисунок 2.1 – График механической характеристики асинхронного электродвигателя

Точка 1 ( $\omega = \omega_0$ ;  $M_{\delta} = 0$ ) соответствует режиму холостого хода.

Точка 2 ( $\omega = \omega_n$ ;  $M_{\delta} = M_n$ ) соответствует номинальному режиму, при котором коэффициент полезного действия электродвигателя – максимальный.

Точка 3 ( $\omega = \omega_{кр}$ ;  $M_{\delta} = M_{кр}$ ) соответствует критическому режиму, при котором  $M_{\delta}$  максимален.

Точка 4 ( $\omega = 0$ ;  $M_{\delta} = M_n$ ) соответствует режиму пуска.

Участок 1–2–3 характеристики соответствует устойчивой работе электродвигателя. Если приложить к валу электродвигателя момент, больший  $M_{кр}$ , то он перейдет в неустойчивый режим работы на участке 3–4 и остановится.

Для упрощения расчетов электропривода уравнение механической характеристики (2.2) аппроксимируют отрезками прямых 1–3', 3–3', 3–4'.

Уравнение прямой 1–3', проходящей через точки 1, 2, 3', имеет вид:

$$\frac{\omega - \omega_i}{\omega_i - \omega_i} = \frac{\dot{I} \dot{a}}{\dot{I} \dot{i}}$$

Это уравнение преобразуется к виду:

$$M_{\dot{a}} = \dot{a} - b\omega, \quad (2.4)$$

где  $a$  и  $b$  – постоянные коэффициенты, определяемые из формул:

$$\dot{a} = \frac{M_i \cdot \omega_i}{\omega_i - \omega_i}, \quad (2.5)$$

$$b = \frac{M_i}{\omega_i - \omega_i}. \quad (2.6)$$

Уравнение прямой 4–3, проходящей через точки 4, 3 имеет вид:

$$\frac{\omega - \omega_4}{\omega_3 - \omega_4} = \frac{\dot{I}_{\dot{a}} - \dot{I}_{\dot{r}}}{\dot{I}_{\dot{e}\delta} - \dot{I}_{\dot{r}}}$$

Подставляя в это уравнение  $\omega_4 = 0$ ;  $\omega_3 = \omega_{кр}$ ;  $M_{\delta 4} = M_n$ ;  $M_{\delta 3} = M_{кр}$ , получим:

$$M_{\dot{a}} = e\omega + M_{\dot{r}}, \quad (2.7)$$

где

$$e = \frac{M_{\dot{e}\delta} - \dot{I}_{\dot{r}}}{\omega_{\dot{e}\delta}}. \quad (2.8)$$

Уравнение прямой, проходящей через точки 3'–3, имеет вид:

$$M_{\dot{a}} = M_{\dot{e}\delta}. \quad (2.9)$$

На интервале  $\omega_{\dot{e}\delta} \leq \omega \leq \omega'_{\dot{e}\delta}$ ,

где

$$\omega'_{\dot{e}\delta} = \frac{a - M_{\dot{e}\delta}}{b}. \quad (2.10)$$

### 3 Особенности устройства регулируемого асинхронного электродвигателя и его механические характеристики

#### 3.1 Особенности устройства регулируемого асинхронного электродвигателя

Регулируемый асинхронный электродвигатель отличается от нерегулируемого наличием преобразователя частоты напряжения, подаваемого на обмотку статора.

Схема включения асинхронного электродвигателя при регулировании частоты напряжения статора приведена на рис. 3.1 [3].

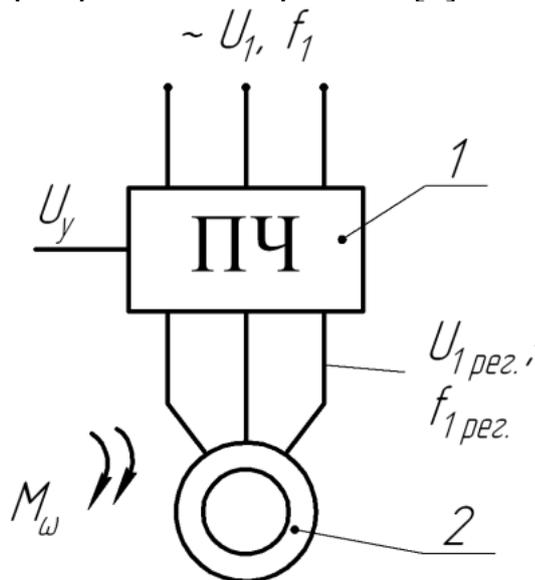


Рисунок 3.1 – Схема управления напряжением: 1 – преобразователь частоты и напряжения; 2 – асинхронный электродвигатель

На вход преобразователя частоты ПЧ подается стандартное напряжение  $U_1$  (380В, 220В) промышленной частоты  $f_1 = 50$  Гц. С выхода ПЧ снимается переменное напряжение  $U_{1рег}$  регулируемой частоты  $f_{1рег}$ . Регулирование выходной частоты и напряжения осуществляется с помощью управляющего сигнала  $U_y$ , который задает требуемое значение частоты и скорости двигателя.

Этот способ обеспечивает плавное регулирование скорости в широком диапазоне ее изменения.

Частотный способ регулирования отличается двумя достоинствами:

- 1) механические характеристики обладают высокой жесткостью;
- 2) регулирование скорости не сопровождается увеличением скольжения, поэтому потери мощности при регулировании скорости оказываются небольшими.

Для лучшего использования двигателя и получения высоких КПД, высоких  $M_{кр}$  одновременно с частотой необходимо изменять и подводимое к двигателю напряжение [3]:

$$M_{\epsilon\delta} = \frac{3U_{\phi}^2}{(2\omega_1 \tilde{\delta}_{\epsilon})}, \quad (3.1)$$

где  $U_{\phi}$  – фазное напряжение сети;

$\omega_0$  – синхронная угловая скорость ротора;

$x_k$  – индуктивное фазное сопротивление короткого замыкания:

$$\tilde{\delta}_{\epsilon} = \tilde{\delta}_1 + \tilde{\delta}'_2,$$

где  $x_1, x'_2$  – индуктивные сопротивления от потоков рассеивания фазы обмотки статора и приведенное сопротивление фазы ротора.

Соотношение частоты и напряжения определяется характером зависимости нагрузки  $M_C$  от скорости. При  $M_C = \text{const}$  напряжение на статоре должно регулироваться пропорционально его частоте:

$$\frac{U_1}{f_1} = \text{const}.$$

При таком соотношении критический момент  $M_{кр}$ , определяемый формулой (3.1), остается неизменным, и двигатель сохраняет свою перегрузочную способность.

### 3.2 Механические характеристики

Для построения семейства механических характеристик асинхронного электродвигателя задаются  $f$  в пределах от 0 до 50 Гц. Для каждого значения  $f$  по формуле (2.1) определяют  $\omega_0$ , задавая  $S$  в пределах 0–1, по формуле (2.2) определяют  $M_{\delta}$ , а затем – соответствующие значения  $\omega = \omega_0(1-S)$ .

В области частот  $f_{1рег} > f_{cm} = 50$  Гц по условиям нормальной работы двигателя нельзя повышать напряжение  $U_1$  выше номинального (паспортного). Поэтому регулирование скорости в этой области ведется при  $U_1 = U_{1ном} = \text{const}$ .

При этом  $M_{кр}$  согласно формуле (3.1) будет уменьшаться, и характеристики будут иметь вид 4, 5 (рис. 3.2).

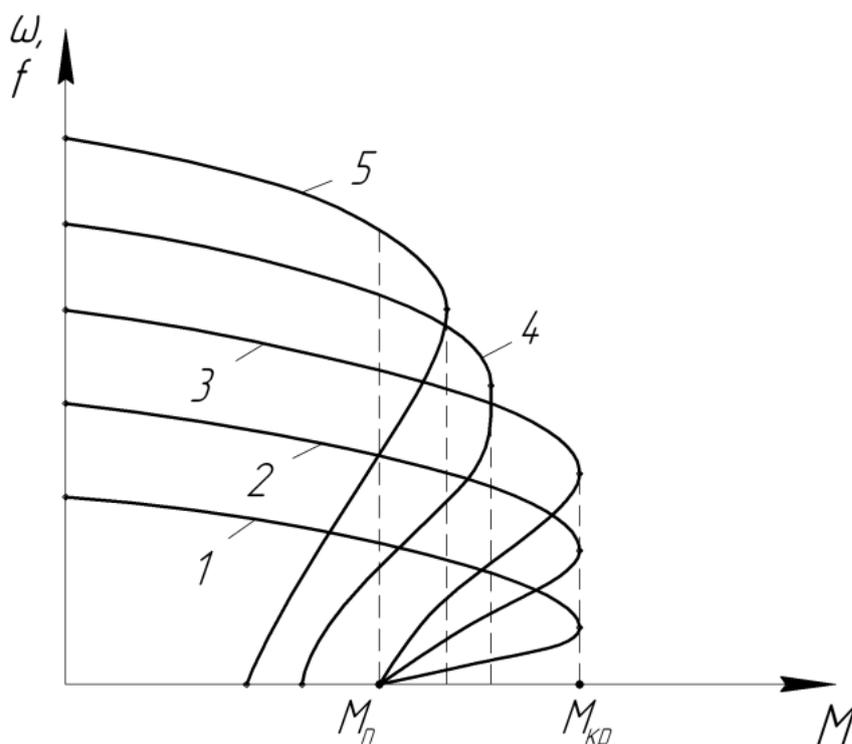


Рисунок 3.2 – Механические характеристики регулируемого асинхронного электродвигателя:

1,2 – при  $f < 50$  Гц; 3 – при  $f = 50$  Гц; 4,5 – при  $f > 50$  Гц

#### 4 Структура электроприводов

Если в приводе используется нерегулируемый асинхронный электродвигатель, то можно выделить два типа электроприводов, отличающихся способами связи электродвигателя с передаточными и исполнительными механизмами:

- 1) с фрикционной или электромагнитной связью;
- 2) с жесткой связью.

На рис. 4.1 приведена схема электропривода с фрикционной связью электродвигателя с передаточными и исполнительными механизмами.

На схеме обозначены: 1б – вал электродвигателя с закрепленными на нем ротором 1а и маховиком 1в; 2б – ведомый вал привода, соосный с валом электродвигателя, с закрепленными на нем диском 2а с фрикционными накладками и шкивом 2в клиноременной передачи; 3б – промежуточный вал с закрепленными на нем шкивом 3а клиноременной передачи и зубчатым колесом 3в; 4б – главный вал машины с закрепленными на нем зубчатым колесом 4а и кривошипом 4в; 5 – шатун; 6а – ползун с закрепленным на нем рабочим органом 6б (пуансоном). Управление приводом осуществляется с помощью педали 8 через систему звеньев 9-11. Ролик 10а рычага 10 входит в паз подвижного корпуса 11, в котором закреплены вращающиеся опоры вала 2б.

Рычаг 10 удерживается в исходном положении пружиной 12. В исходном положении педаль 8 не нажата, пружина 12 через вертикальное плечо и ролик 10а рычага 10 удерживает корпус 11, вал 2б и диск 2а в крайнем левом положении, левая фрикционная накладка диска 2а прижата к неподвижному диску 7, вал 2 неподвижен, электродвигатель работает в режиме холостого хода.

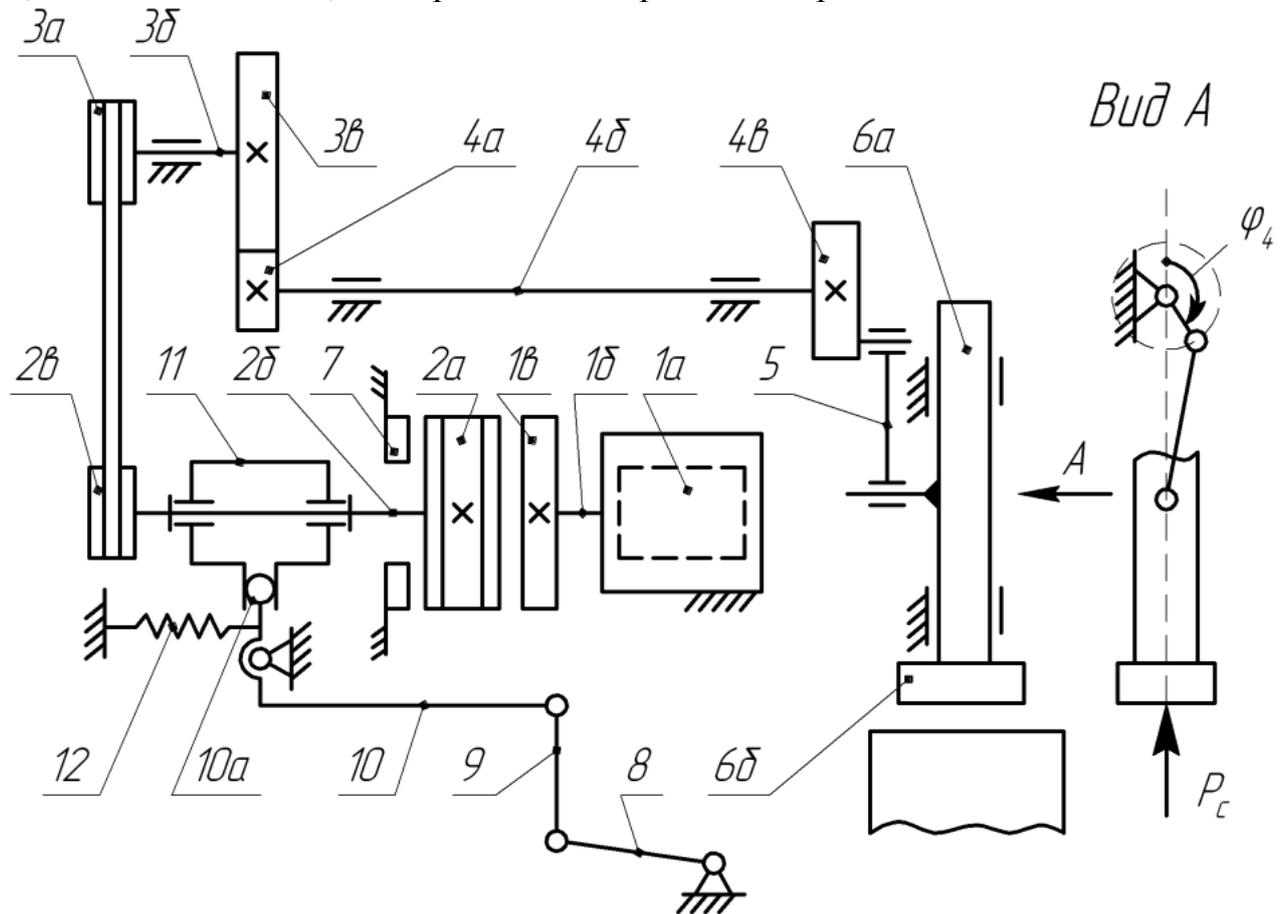


Рисунок 4.1

При нажатии на педаль 8 тяга 9 опускается, угловой рычаг 10, преодолевая действие пружины 12, поворачивается по часовой стрелке, верхнее плечо рычага перемещает корпус 11, вал 2б и диск 2а вправо, в конце хода диск 2а правой фрикционной накладкой прижимается к маховику 1в, в результате вращения от ротора двигателя передаётся валам 2б, 3б, 4б и звеньям 5, 6 исполнительного механизма.

При опускании педали 8 фрикционный диск 2а под действием пружины 12 перемещается влево, в конце хода диск 2а левой фрикционной накладкой прижимается к тормозному диску 7, происходит торможение вала 2б.

Применение электропривода с фрикционной связью целесообразно в том случае, когда длительность цикла работы невелика и имеют место частые включения и выключения работы привода.

На рис. 4.2 приведена схема электропривода с жесткой связью электродвигателя с передаточным механизмом. В подписи к рис. 4.2 указаны обозначения и наименования звеньев.

Электропривод с жесткой связью целесообразно применять в том случае, когда рабочий цикл привода весьма продолжителен и не требует частого включения и выключения электродвигателя. Довольно часто это происходит в начале и конце рабочей смены.

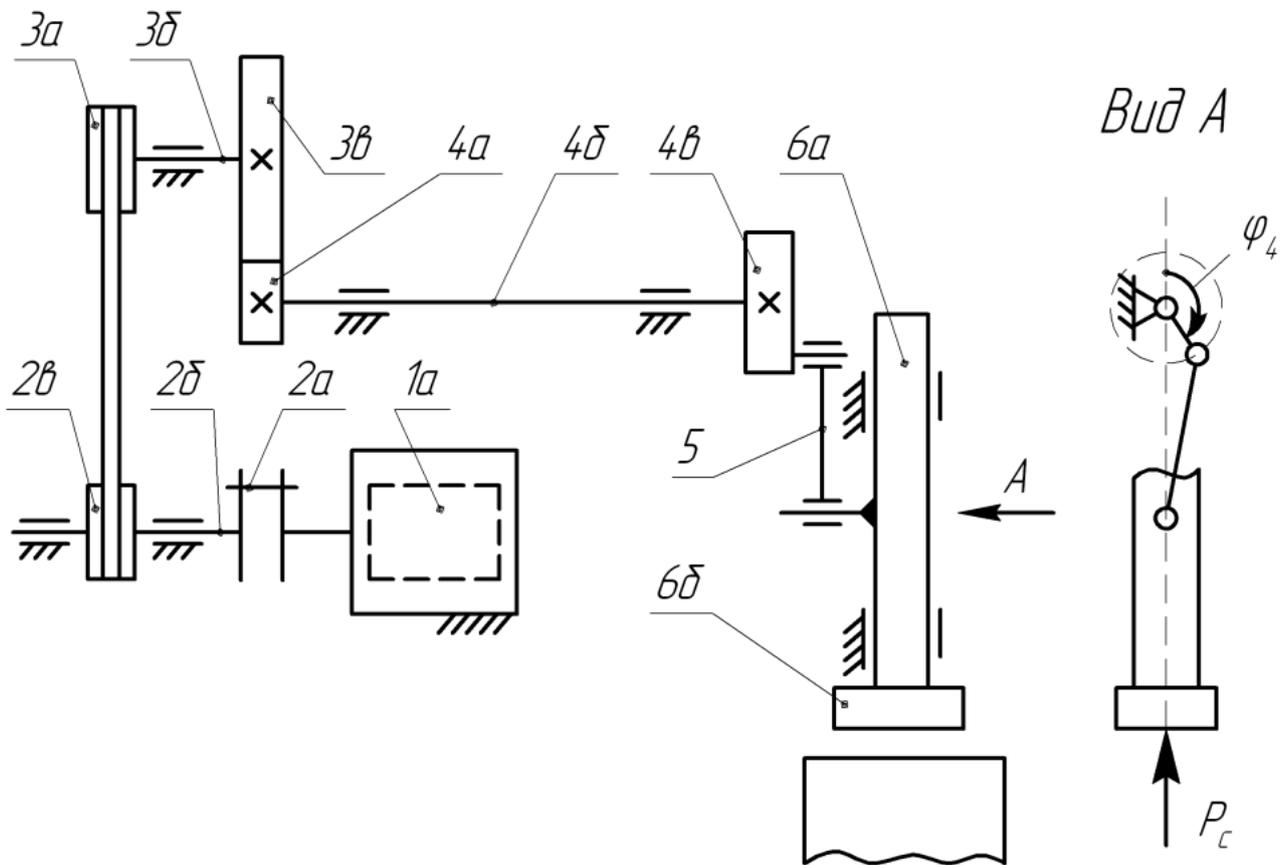


Рисунок 4.2 – Схема электропривода с жесткой связью электродвигателя с передаточным механизмом: 1а – ротор электродвигателя; 2а – муфта сцепления; 2б – ведущий вал передаточного механизма; 2в, 3а – шкивы клиноременной передачи; 3б – ведомый вал; 3в, 4а – зубчатые колеса; 4б – рабочий вал; 4в – кривошип; 5 – шатун; 6а – ползун; 6б – рабочий орган

В электроприводе с регулируемым асинхронным электродвигателем нет необходимости в передаточном механизме. На рис. 4.3 приведена схема электропривода с регулируемым электродвигателем. На валу электродвигателя непосредственно закреплен ведущий кривошип исполнительного механизма.

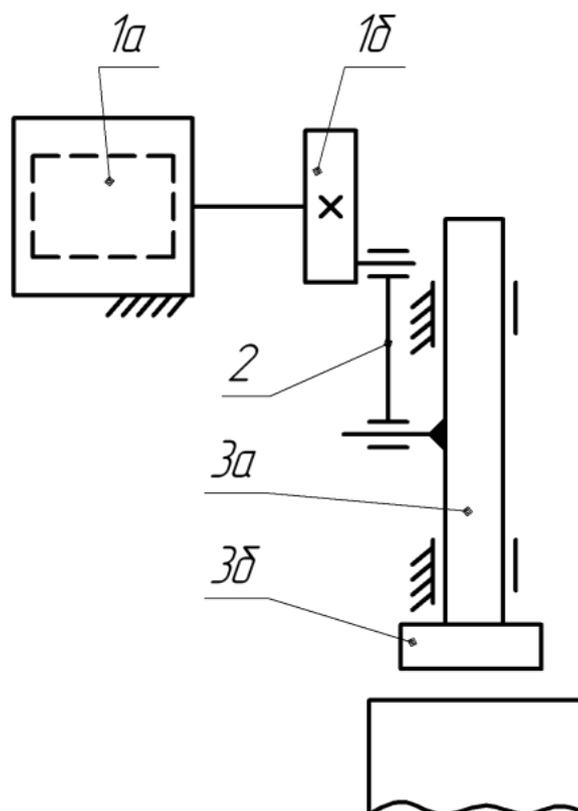


Рисунок 4.3 – Схема электропривода с регулируемым асинхронным электродвигателем: 1а – ротор электродвигателя; 1б – кривошип; 2 – шатун; 3а – ползун; 3б – рабочий орган.

## 5 Приведение масс звеньев и сил, действующих на звенья привода к звену приведения, и уравнение его движения

### 5.1 Приведение масс звеньев и сил

Движущиеся элементы машин обычно образуют систему кинематически связанных звеньев. Например, типовой электропривод (рис. 4.1) при нажатой педали 8 и при отсутствии проскальзывания во фрикционной муфте 1в-2а представляет собой систему кинематически связанных звеньев 2,3,...6.

Движение подобных систем может быть представлено движением одного произвольно выбранного звена системы, например, движением звена 1 (рис. 4.1).

Звено, движением которого представлено движение всей системы, называют звеном приведения, а его координату – обобщенной координатой системы.

Методы приведения сил и масс подробно изложены в курсе «Теория механизмов и машин» [4]. Поэтому ограничимся рассмотрением основных формул приведения.

Силы и моменты сил, приложенные к звеньям системы, приводятся к звену  $i$  по формуле

$$M_{i\delta i} = \sum \frac{M_j}{U_{i-j}} + \sum \frac{P_{\dot{e}} \cdot V_{\dot{e}} \cos \alpha_{\dot{e}}}{\omega_i}, \quad (5.1)$$

где  $M_j$  – момент, приложенный к звену с индексом (номером)  $j$ ;

$P_K$  – сила, приложенная к звену с номером  $K$ ;

$V_K$  – скорость точки приложения силы  $P_K$ ;

$\alpha_K$  – угол между направлениями  $P_K$  и  $V_K$ ;

$U_{i-j}$  – передаточное отношение от звена  $i$  к звену  $j$ ;

$\omega_i$  – угловая скорость звена  $i$ .

В типовом приводе (рис. 4.1) действует полезная сила  $P_c$ , приложенная к ползуну 6. Приведенный к звену 1 момент этой силы определится из соотношения

$$M_{\dot{n}\delta l} = \frac{P_{\dot{n}} \cdot V_6}{\omega_1}, \quad (5.2)$$

где  $\omega_2$  – угловая скорость звена 1 (рис. 4.1);

$V_6$  – соответствующая скорость ползуна 6.

Массы приводятся к звену  $i$  по формуле

$$I_{i\delta i} = \sum \frac{I_j}{U_{i-j}^2} + \sum \frac{m_{\dot{e}} \cdot V_{\dot{e}}^2}{\omega_i^2} + \sum \left( \frac{I_{Se}}{U_{i-e}^2} + \frac{m_e V_{Se}^2}{\omega_i^2} \right), \quad (5.3)$$

где  $I_j$  – моменты инерции вращающихся масс относительно оси их вращения;

$m_K, V_K$  – массы и скорости звеньев, движущихся поступательно;

$I_{Se}, m_e, V_{Se}$  – моменты инерции относительно центров масс, массы и скорости движения центров масс звеньев, движущихся плоскопараллельно;

$U_{i-e}$  – передаточное отношение от звена  $i$  к звену  $e$ .

Рассмотрим определение  $I_{np}$  и  $M_{ср}$  для привода, показанного на рис. 4.1.

$$I_{i\delta} = I_1 + I_2 + \frac{I_3}{U_{1-3}^2} + \frac{I_{S4}}{U_{1-4}^2} + \frac{I_{S5}}{U_{1-5}^2} + \frac{m_5}{w_{1-5}^2} + \frac{m_6}{w_{1-6}^2},$$

где  $I_1 = I_{1a} + I_{1б} + I_{1в}$ ;

$I_{1a}, I_{1б}, I_{1в}$  – моменты инерции ротора электродвигателя 1а, вала 1б и маховика 1в;

$I_2 = I_{2a} + I_{2б} + I_{2в}$ ;

$I_{2a}, I_{2б}, I_{2в}$  – моменты инерции муфты 2а, вала 2б и шкива 2в;

$I_3 = I_{3a} + I_{3б} + I_{3в}$ ;

$I_{3a}, I_{3б}, I_{3в}$  – моменты инерции шкива 3а, вала 3б и зубчатого колеса 3в;

$U_{1-3}$  – передаточное число от звена 1 к звену 3;

$I_4 = I_{4a} + I_{4б} + I_{4в}$ ;

$I_{4a}, I_{4б}, I_{4в}$  – моменты инерции зубчатого колеса 4а, рабочего вала 4б, кривошипа 4в;

$U_{1-4}$  – передаточное число от звена 1 к звену 4;

$m_5$  – масса шатуна 5;

$I_{S5}$  – момент инерции шатуна 5 относительно оси, проходящей через центр массы;

$U_{2-5}$  – передаточное число от звена 1 к шатуну 5 во вращательном движении;

$$U_{1-5} = \frac{\omega_1}{\omega_5};$$

$\omega_1, \omega_5$  – угловые скорости звеньев 1 и 5;

$w_{1-5}$  – передаточное число от звена 1 к звену 5 в поступательном движении последнего;

$w_{1-5} = \frac{\omega_1}{V_{S5}}$ ,  $V_{S5}$  – скорость поступательного движения центра масс шатуна 5;

$m_6$  – масса ползуна 6;

$$m_6 = m_{6a} + m_{6d};$$

$w_{1-6}$  – передаточное число от звена 1 к звену 6;

$w_{1-6} = \frac{\omega_1}{V_6}$ ,  $V_6$  – скорость поступательного движения ползуна.

## 5.2 Уравнение движения звена приведения

С учетом формул приведения уравнение движения звена приведения выводится из следующих соотношений.

Элементарная работа сил, приложенных к звену приведения, равна приращению кинетической энергии звена:

$$d(A_{\ddot{a}} - A_{\ddot{n}}) = dT, \quad (5.4)$$

$$A_{\ddot{a}} = M_{\ddot{a}} \cdot d\varphi, \quad (5.5)$$

где  $M_{\ddot{a}}$  – приведенный момент движущих сил;

$\varphi$  – угол поворота звена приведения;

$$A_{\ddot{n}} = M_{\ddot{n}} \cdot d\varphi, \quad (5.6)$$

где  $M_{\ddot{n}}$  – приведенный момент сил сопротивления.

$$T = \frac{I_{i\delta} \omega^2}{2}. \quad (5.7)$$

Подставим (5.5) и (5.6) в (5.4):

$$(M_{\ddot{a}} - M_{\ddot{n}})d\varphi = dT;$$

$$M_{\ddot{a}} - M_{\ddot{n}\ddot{i}\ddot{o}} = \frac{dT}{d\varphi}. \quad (5.8)$$

Дифференцированием (5.7) по  $\varphi$  получим:

$$\frac{dT}{d\varphi} = \frac{I_{\ddot{i}\ddot{o}} \cdot \omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \cdot \frac{dI_{\ddot{i}\ddot{o}}}{d\varphi}. \quad (5.9)$$

Подставляя (5.9) в (5.8), получим:

$$M_{\ddot{a}} - M_{\ddot{n}\ddot{i}\ddot{o}} = I_{\ddot{i}\ddot{o}} \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \cdot \frac{dI_{\ddot{i}\ddot{o}}}{d\varphi}. \quad (5.10)$$

## 6 Анализ движения звена привода в электроприводе с фрикционной связью электродвигателя с передаточным механизмом

### 6.1 Структура цикла движения

На рис. 6.1 приведен график изменения угловой скорости звена привода на протяжении цикла  $T$ . На графике выделим три участка:  $t_p$  – время разгона;  $t_y$  – время установившегося движения;  $t_m$  – время торможения. На участке  $t_y$  угловая скорость в общем случае колеблется относительно средней величины  $\omega_y$ .

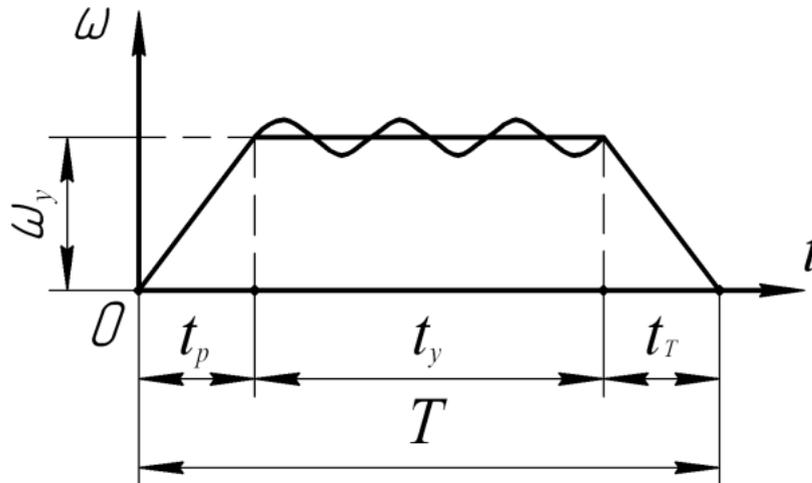


Рисунок 6.1

Для приводов с малой длительностью  $T$  величины  $t_p$  и  $t_m$  существенно влияют на длительность  $T$ , т. е. на производительность машины.

Поэтому необходимо определять величины  $t_p$  и  $t_m$ .

### 6.2 Определение времени разгона

На участке разгона привода следует выделить две фазы работы длительностей  $t_1$  и  $t_2$  (рис. 6.2). Фаза  $t_1$  соответствует различным угловым скоростям дисков 1в, 2а фрикционной муфты (рис. 4.1), происходит пробуксовка дисков. Фаза  $t_2$  соответствует полному сцеплению дисков 1в, 2а, пробуксовка отсутствует.

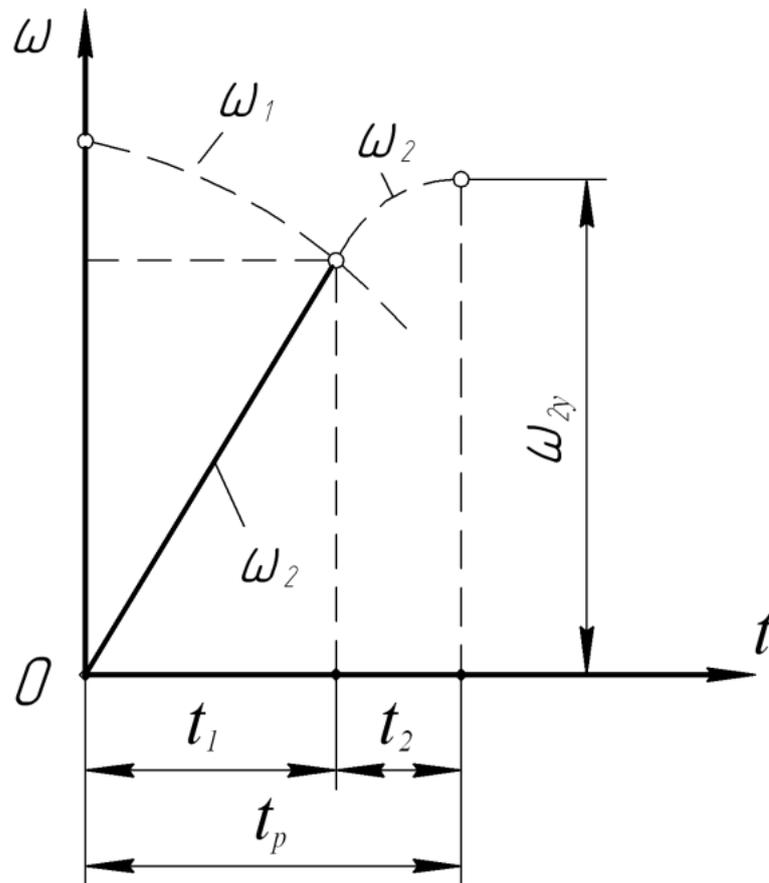


Рисунок 6.2

В фазе  $t_1$  привод следует рассматривать в виде двух систем звеньев: ведущей, включающей звено 1, и ведомой, включающей звенья 2, 3, ..., 6.

Уравнение движения звена 1 имеет вид:

$$M_{\dot{a}} - M_{\dot{\omega}\dot{\omega}} = I_1 \frac{d\omega_1}{dt}. \quad (6.1)$$

где  $M_{\dot{a}}$  – момент, развиваемый электродвигателем;

$M_{\dot{\omega}\dot{\omega}}$  – момент трения во фрикционной паре 1в-2а;

$\omega_1$  – угловая скорость вала электродвигателя.

Момент  $M_{\dot{a}}$  может быть представлен в виде уравнения (2.4), в котором  $\omega = \omega_1$ . Момент трения  $M_{\dot{\omega}\dot{\omega}}$  определится из формулы

$$M_{\dot{\omega}\dot{\omega}} = \frac{QfR_{\dot{\omega}\dot{\omega}}}{K},$$

где  $Q$  – осевое усилие прижатия фрикционных дисков 1в и 2а;

$f$  – коэффициент трения;

$R_{\dot{\omega}\dot{\omega}}$  – радиус трения;

$K$  – коэффициент динамичности нагрузки.

Ведомая система звеньев приводится к звену 2. Уравнение движения звена приведения 2 имеет вид:

$$M_{\dot{\omega}\dot{\omega}} - M_{\dot{\omega}\dot{\omega}} = I'_{\dot{\omega}\dot{\omega}} \frac{d\omega_2}{dt} + \frac{\omega_2^2}{2} \cdot \frac{dI'_{\dot{\omega}\dot{\omega}}}{d\varphi_2}, \quad (6.2)$$

где  $M_{cnp}$  – момент силы  $P_c$ , приведенный к звену 1;  
 $I'_{i\delta}$  – сумма масс и моментов инерции звеньев 1, 2,...6, приведенных к звену 1,  $I'_{i\delta} = I_{i\delta} - I_1$ ;

$\varphi_2, \omega_2$  – угловая координата и угловая скорость звена 2.

Значение  $M_{cnp}$  определяется из формулы (5.2). Выразим  $\omega_2$  через  $\omega_4$ :

$\omega_2 = \omega_4 \cdot U_{2-4}$ . Тогда из формулы (5.2) получим:

$$M_{c\delta} = \frac{P_{\tilde{n}} \cdot V_6}{\omega_4 \cdot U_{2-4}}. \quad (6.3)$$

Соотношение  $V_6/\omega_4$  зависит от угловой координаты  $\varphi_4$  звена 4 и, следовательно, от  $\varphi_2$ , так как  $\varphi_2 = \varphi_4 \cdot U_{2-4}$ . По формуле (6.3) для ряда значений  $P_c$ , взятых на интервале  $0 \leq \varphi_4 < 2\pi$ , можно определить соответствующие значения  $M_{cnp}$  и подсчитать  $\varphi_2$ , а затем построить график зависимости  $M_{cnp}$  от  $\varphi_2$ .

На рис 9.1 показан вид графиков зависимостей  $P_c$  от  $\varphi_4$  и  $M_{cnp}$  от  $\varphi_2$ .

В большинстве приводов машин легкой промышленности (швейных, обувных) величина  $I'_{i\delta}$  изменяется незначительно, поэтому допустимо для инженерных расчетов принять  $I'_{i\delta}$  приближенно-постоянным:

$$I'_{i\delta} = \frac{I'_{i\delta max} + I'_{i\delta min}}{2}, \quad (6.4)$$

где  $I'_{i\delta max}$ ,  $I'_{i\delta min}$  – максимальное и минимальное значение  $I'_{i\delta}$ .

С учетом (6.4) уравнение (6.2) принимает вид:

$$M_{\delta\delta} - M_{\tilde{n}\delta} = I'_{i\delta} \frac{d\omega_2}{dt}. \quad (6.5)$$

В этом уравнении  $M_{cnp}$  является функцией  $\varphi_2$ , поэтому для точного решения (6.5) требуется иметь аналитическое выражение зависимости  $M_{cnp}$  от  $\varphi_2$ . В практических расчетах на основании анализа графика зависимости  $M_{cnp}$  от  $\varphi_2$  (рис. 9.1) можно выделить участок графика, который соответствует разгону привода, и определить для этого участка среднее значение  $M_{cnp}$ , которое принимается за приближенно-постоянное его значение.

Для определения  $t_1$  нужно совместно решить уравнения (6.1) и (6.5), т. е. найти такие решения, при которых  $\omega_1 = \omega_2$ . Решим сначала (6.1) и (6.5) относительно  $\omega_1$  и  $\omega_2$ . Из уравнения (6.1) с учетом (2.4) получим:

$$dt = \frac{I_1 d\omega_1}{c - b\omega_1},$$

где  $c = a - M_{\delta\delta}$ .

Интегрируя последнее уравнение, получим:

$$\int_0^t dt = I_1 \int_{\omega_0}^{\omega_1} \frac{d\omega_1}{c - b\omega_1},$$

$$t = \frac{I_1}{b} \ln \frac{c - b\omega_0}{c - b\omega_1},$$

$$e^{\frac{bt}{I_1}} = \frac{c - b\omega_0}{c - b\omega_1},$$

$$\omega_1 = e^{-\frac{bt}{I_1}} \left( \omega_0 - \frac{c}{b} \right) + \frac{c}{b}. \quad (6.6)$$

Интегрируя уравнение (6.5), получим:

$$\int_0^{\omega_2} d\omega_2 = \frac{M_{\dot{\omega}\dot{\omega}} - M_{\ddot{\omega}\ddot{\omega}}}{I'_{\ddot{\omega}}} \int_0^t dt,$$

$$\omega_2 = \frac{M_{\dot{\omega}\dot{\omega}} - M_{\ddot{\omega}\ddot{\omega}}}{I'_{\ddot{\omega}}} \cdot t. \quad (6.7)$$

Приравняв правые части (6.6) и (6.7), получим:

$$e^{-\frac{bt}{I_1}} \left( \omega_0 - \frac{c}{b} \right) + \frac{c}{b} - \frac{M_{\dot{\omega}\dot{\omega}} - M_{\ddot{\omega}\ddot{\omega}}}{I'_{\ddot{\omega}}} \cdot t = 0. \quad (6.8)$$

Трансцендентное уравнение (6.8) может быть решено на ЭЦВМ численным методом [5]. Решив это уравнение, получим  $t = t_1$  и  $\omega_2 = \omega_{2,1}$ , где  $\omega_{2,1}$  – угловая скорость звена 2 к моменту окончания первой фазы разгона.

Во второй фазе разгона  $t_2$  проскальзывание между дисками 2а и 1б отсутствует, привод может быть представлен в виде одной системы, приведенной к звену 1. Уравнение звена приведения имеет вид:

$$M_{\ddot{a}} - M_{\ddot{\omega}\ddot{\omega}} = I_{\ddot{\omega}} \frac{d\omega_2}{dt}, \quad (6.9)$$

где  $M_{\ddot{a}} = \dot{a} - b\dot{\omega}_2$ ,  $M_{\ddot{\omega}\ddot{\omega}} \approx \text{const}$ .

С учетом последних выражений уравнение (6.9) запишем в виде:

$$\int_0^{t_2} dt = I_{\ddot{\omega}} \int_{\omega_{2,1}}^{\omega_{2,\dot{\omega}}} \frac{d\omega_2}{c' - b\omega_2},$$

где  $\omega_{2,y}$  – угловая скорость звена 2 в установившемся режиме работы привода,  $\dot{\omega} = a - M_{\ddot{\omega}\ddot{\omega}}$ .

В результате определим  $t_2$ :

$$t_2 = \frac{I_{\ddot{\omega}}}{b} \ln \frac{c' - b\omega_{2,1}}{c' - b\omega_{2,\dot{\omega}}}. \quad (6.10)$$

Следует отметить, что в реальных приводах часто  $t_2 \ll t_1$ . Это связано с тем, что разность  $(\omega_0 - \omega_{2,1})$  (рис. 6.2) составляет не более 20 % от величины  $\omega_0$

по соображениям недопущения перегрузки электродвигателя в период разгона. Поэтому для приближенного определения  $t_p$  вполне допустимо принять  $t_\delta \approx t_1$ . Приближенное значение  $t_p$  можно определить из уравнения (6.5):

$$\int_0^{t_\delta} dt = \frac{I'_{i\delta}}{M_{\delta\delta} - M_{\tilde{n}i\delta}} \int_0^{\omega_{2\delta}} d\omega_2,$$

$$t_\delta = \frac{I'_{i\delta}}{M_{\delta\delta} - M_{\tilde{n}i\delta}} \cdot \omega_{2\delta}. \quad (6.11)$$

### 6.3 Определение времени торможения

Для определения  $t_m$  нужно рассмотреть свободное движение ведомой части привода под действием тормозного момента:

$$M_\delta = \frac{Q_\delta \cdot f \cdot R_{\delta\delta}}{K},$$

где  $Q_m$  – осевое усилие прижатия диска 2а к тормозному диску 7 (рис. 4.1), обеспечиваемое пружиной 12;

$f$  – коэффициент трения;

$R_{mp}$  – радиус трения;

$K$  – коэффициент динамичности.

Уравнение движения звена приведения 2 системы имеет вид:

$$-M_\delta - M_{\tilde{n}i\delta} = I'_{i\delta} \frac{d\omega_2}{dt}. \quad (6.12)$$

Интегрируя это уравнение, получим:

$$\int_0^{t_\delta} dt = -\frac{I'_{i\delta}}{M_\delta + M_{\tilde{n}i\delta}} \cdot \int_{\omega_{2\delta}}^0 d\omega_2,$$

$$t_\delta = \frac{I'_{i\delta}}{M_\delta + M_{\tilde{n}i\delta}} \cdot \omega_{2\delta}. \quad (6.13)$$

### 6.4 Анализ установившегося движения звена приведения

Уравнение движения звена приведения имеет вид (5.10).

Предположим, что известны зависимости  $M_{\tilde{n}i\delta} = f_1(\varphi)$  и  $I_{i\delta} = f_2(\varphi)$ .

Дифференцируя последнюю, получим  $\frac{dI_{i\delta}}{d\varphi} = f_3(\varphi)$ . При установившемся движении зависимость  $M_\delta$  от  $\omega$  имеет вид (2.4).

При указанных исходных данных решение уравнения движения возможно численным методом. Рассмотрим алгоритм численного решения уравнения (5.10) методом Эйлера [5].

1.  $t := 0; \varphi := 0; \omega = \omega_y.$

2.  $M_\delta = a - b\omega; M_{сnp} = f_1(\varphi); I_{np} = f_2(\varphi); \frac{dI_{i\delta}}{d\varphi} = f_3(\varphi).$

3. 
$$\varepsilon = \frac{M_\delta - M_{сnp} - \frac{dI_{np}}{d\varphi} \cdot \frac{\omega^2}{2}}{I_{np}}.$$

4. Печатаь  $t, \varphi, \omega, \varepsilon, M_\delta.$

5.  $t := t + \Delta t; \Delta \omega = \varepsilon \cdot \Delta t; \omega := \omega + \Delta \omega; \Delta \varphi := \varepsilon \frac{\Delta t^2}{2}; \varphi := \varphi + \Delta \varphi.$

6. Если  $\varphi \geq \varphi_\delta$ , идти к 8.

7. Идти к 2.

8. Конец.

В результате расчетов на ЭВМ по изложенному алгоритму получим распечатку значений  $t, \varphi, \omega, \varepsilon, M_\delta$ , по которым можно построить графики зависимостей  $\varphi, \omega, \varepsilon, M_\delta$  от  $t$ , а также определить время установившегося движения  $t_y$ .

## **7 Анализ движения звена приведения электропривода с нерегулируемым асинхронным электродвигателем и жесткой связью электродвигателя с передаточным механизмом**

Отметим, что анализ установившегося движения звена приведения выполняется аналогично анализу электропривода с фрикционной связью электродвигателя с передаточным механизмом (см. подраздел 6.4). Поэтому рассмотрим методики расчета времени разгона и торможения.

### **7.1 Расчет времени разгона**

График изменения  $\omega$  в функции времени имеет вид (рис. 7.1). Выделим три отрезка на этом графике:  $t_1, t_2, t_3$ .

На отрезке  $t_1$  электродвигатель работает на участке 4-3 механической характеристики (см. рис. 2.1), на отрезке  $t_2$  – на участке 3-3', на отрезке  $t_3$  – на участке 1-2-3'.

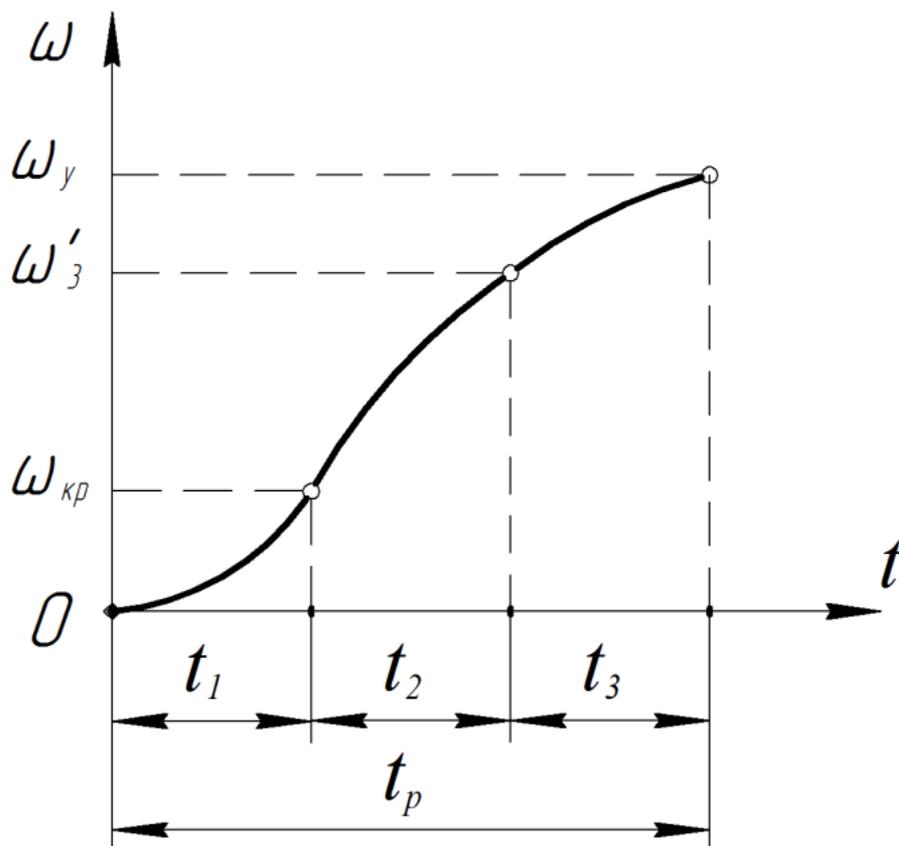


Рисунок 7.1 – График зависимости  $\omega$  от  $t$

Для определения  $t_1$  рассмотрим уравнение движения на участке 4–3 механической характеристики

$$M_{\bar{a}} - M_{\bar{n}\bar{i}\bar{\delta}} = I_{\bar{i}\bar{\delta}} \frac{d\omega}{dt}, \quad (7.1)$$

где  $M_{\bar{a}}$  – момент электродвигателя, определяемый из уравнения (2.7);

$M_{\bar{n}\bar{i}\bar{\delta}}$  – приведенный момент сил сопротивления, принимаем  $M_{\bar{n}\bar{i}\bar{\delta}} = const$ ;

$I_{\bar{n}\bar{p}}$  – приведенный момент инерции звена приведения, принимаем  $I_{\bar{i}\bar{\delta}} = const$ .

Подставив (2.7) в (7.1) и обозначив  $M_{\bar{i}} - M_{\bar{n}\bar{i}\bar{\delta}} = h$ , получим:

$$h + e\omega = I_{\bar{i}\bar{\delta}} \frac{d\omega}{dt},$$

$$\int_0^{t_1} dt = I_{\bar{i}\bar{\delta}} \int_0^{\omega_{\bar{e}\bar{\delta}}} \frac{d\omega}{h + e\omega},$$

$$t_1 = \frac{I_{\bar{i}\bar{\delta}}}{e} \ln \frac{h + e\omega_{\bar{e}\bar{\delta}}}{h}. \quad (7.2)$$

Для определения  $t_2$  подставим  $M_{\bar{a}} = M_{\bar{e}\bar{\delta}}$  в уравнение (7.1), в результате получим:

$$M_{\dot{\epsilon}\delta} - M_{\ddot{n}\delta} = I_{i\delta} \frac{d\omega}{dt},$$

$$\int_0^{t_2} dt = \frac{I_{i\delta}}{M_{\dot{\epsilon}\delta} - M_{\ddot{n}\delta}} \int_{\omega_{\dot{\epsilon}\delta}}^{\omega'_{\dot{\epsilon}\delta}} d\omega,$$

$$t_2 = \frac{I_{i\delta}}{M_{\dot{\epsilon}\delta} - M_{\ddot{n}\delta}} (\omega'_{\dot{\epsilon}\delta} - \omega_{\dot{\epsilon}\delta}). \quad (7.3)$$

Для определения  $t_3$  подставим в (7.1) уравнение (2.4) и обозначим  $a - M_{\ddot{n}\delta} = \tilde{n}'$ , в результате получим:

$$\tilde{n}' - b\omega = I_{i\delta} \frac{d\omega}{dt},$$

$$\int_0^{t_3} dt = I_{i\delta} \int_{\omega'_3}^{\omega_\delta} \frac{d\omega}{\tilde{n}' - b\omega},$$

$$t_3 = \frac{I_{np}}{b} \ln \frac{c' - b\omega'_3}{c' - b\omega_\delta}. \quad (7.4)$$

Время разгона  $t_p$  определится из равенства:

$$t_p = t_1 + t_2 + t_3. \quad (7.5)$$

## 7.2 Расчет времени торможения

Для расчета времени торможения в уравнение движения (7.1) подставим  $M_\delta = 0$ , в результате получим:

$$-M_{cnp} = I_{np} \frac{d\omega}{dt},$$

$$\int_0^{t_m} dt = -\frac{I_{np}}{M_{cnp}} \cdot \int_{\omega_y}^0 d\omega,$$

$$t_\delta = \frac{I_{i\delta}}{M_{\ddot{n}\delta}} \cdot \omega_\delta. \quad (7.6)$$

## 8 Анализ движения звена привода электропривода с регулируемым асинхронным электродвигателем

Отметим, что анализ установившегося движения звена привода выполняется аналогично анализу электропривода с фрикционной связью (см. подраздел 6.4). Поэтому рассмотрим методики определения времени разгона и торможения.

### 8.1 Расчет времени разгона

При разгоне имеет место плавное увеличение частоты  $f$  напряжения обмотки статора. Предположим, что  $f$  изменяется по закону  $f = kt$ , где  $k$  – коэффициент пропорциональности, определяемый из равенства:

$$k = \frac{f_{\max}}{t_p},$$

где  $f_{\max}$  – максимальное значение, до которого изменяется  $f$ ;

$t_p$  – время разгона.

В процессе разгона электродвигатель работает в режиме перехода между семействами механических характеристик (см. рис. 3.2).

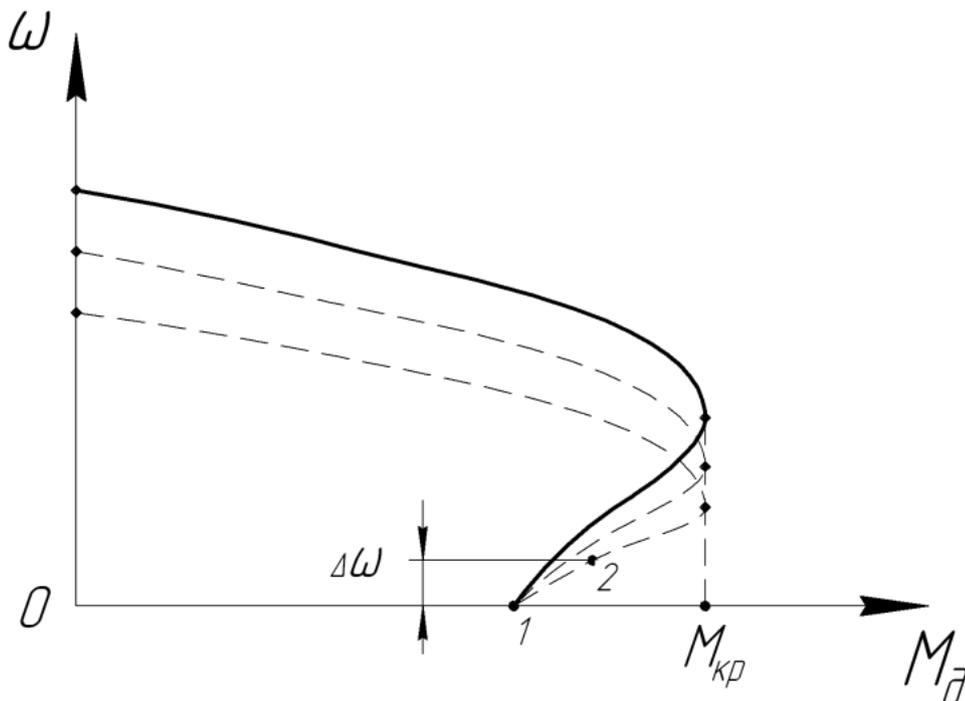


Рисунок 8.1

Рассмотрим алгоритм численного решения задачи определения  $t_p$  (рис. 8.1). Пусть в начальный момент  $t = 0$ ,  $\omega = 0$ ,  $f = 0$ ,  $M_d = M_n$  (точка 1 на рис. 8.1), и затем в течение некоторого интервала  $\Delta t$  значения  $f$  и  $M_d$  остаются неизменными, а в конце интервала величины  $\omega$ ,  $f$  и  $M_d$  изменяются

скачкообразно:  $\omega$  – на величину  $\Delta\omega = \frac{M_\delta - M_{cnp}}{I_{np}} \Delta t$ ;  $f$  – на величину  $\Delta f = k \cdot \Delta t$ ;  $M_\delta$  – до величины, определяемой из формулы (2.2) для новых значений  $\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}$  и  $s = 1 - \frac{\omega}{\omega_0}$ . В результате электродвигатель переходит в новый режим, определяемый точкой 2 на рис. 8.1.

На следующем интервале  $\Delta t$  остаются неизменными новые значения  $f$ ,  $M_{\dot{a}}$  и т. д.

Величину шага изменения  $\Delta t$  можно определить из формулы

$$\Delta t = \frac{t_\delta^*}{10},$$

где  $t_\delta^*$  – приближенное время разгона.

$$t_\delta^* = \frac{I_{i\delta}}{M_{\dot{a}\ddot{n}\delta} - M_{\ddot{n}i\delta}} \cdot \omega_\delta,$$

$\dot{I}_{\dot{a}\ddot{n}\delta}$  – среднее значение  $\dot{I}_{\dot{a}}$  на участке разгона;

$$\dot{I}_{\dot{a}\ddot{n}\delta} = \frac{M_{\dot{e}\delta} + M_{\dot{i}}}{2},$$

$\omega_\delta$  – ожидаемое установившееся значение угловой скорости звена приведения в конце разгона, определяемое из (2.4):

$$\omega_\delta = \frac{a - M_{\ddot{n}i\delta}}{b}.$$

Приближенное значение  $k$  определяется из формулы

$$k = \frac{f_{max}}{t_\delta^*}.$$

Алгоритм расчета времени разгона  $t_p$ .

Дано:  $\Delta t$ ;  $p$ ;  $k$ ;  $S_{кр}$ ;  $f_{max}$ ;  $M_{кр}$ ;  $M_{cnp} = const$ ;  $I_{np} = const$ .

1.  $t := \Delta t$ ;  $f := 0$ ;  $\omega := 0$ .

2.  $\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}$ .

3.  $s = 1 - \frac{\omega}{\omega_0}$ .

4.  $M_\delta = \frac{2M_{кр}}{\frac{s}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{s}}$ .

$$5. \Delta\omega = \frac{M_{\dot{a}} - M_{\ddot{n}\ddot{i}\ddot{o}}}{I_{\ddot{i}\ddot{o}}} \Delta t.$$

$$6. \omega := \omega + \Delta\omega; t := t + \Delta t; f = k \cdot t.$$

7. Если  $f \leq f_{max}$ , идти к 2.

$$8. t := t_p.$$

9. Конец.

## 8.2 Расчет времени торможения

При торможении имеет место плавное уменьшение частоты  $f$  напряжения обмотки статора. Предположим, что  $f$  изменяется по закону  $f = f_{max} - k_1 t$ , где

$$k_1 = \frac{f_{max}}{t_{\dot{o}}}, \quad t_{\dot{o}} - \text{время торможения.}$$

При торможении электродвигатель работает в режиме перехода между семействами механических характеристик с уменьшением  $f$  (см. рис. 3.2).

Пусть в начальный момент  $t = 0; f = f_{max}; M_{\dot{o}} = M_{cnp}; \omega = \omega_y$ . За время интервала  $\Delta t$  частота уменьшается на  $\Delta f = k_1 \cdot \Delta t$ , при этом двигатель

переходит на механическую характеристику с  $\omega_0 = \frac{2\pi}{p} (f_{max} - k_1 \Delta t)$ ,

скольжение ротора составит  $s = 1 - \frac{\omega_{\dot{o}}}{\omega_0}$ , а момент электродвигателя

определится из (2.2). В результате угловая скорость ротора уменьшится на

$$\Delta\omega = \frac{M_{\dot{a}} - M_{\ddot{n}\ddot{i}\ddot{o}}}{I_{\ddot{i}\ddot{o}}} \Delta t. \quad \text{За время следующего интервала } \Delta t \text{ картина повторяется.}$$

Величина интервала  $\Delta t$  определяется по формуле  $\Delta t = \frac{t_{\dot{o}}^*}{10}$ , где  $t_{\dot{o}}^*$  –

ожидаемое приближенное время торможения;  $t_{\dot{o}}^* = \frac{M_{\ddot{n}\ddot{i}\ddot{o}}}{I_{\ddot{i}\ddot{o}}} \omega_{\dot{o}}$ .

Величина коэффициента  $k_1$  может быть определена из формулы

$$k_1 = \frac{f_{max}}{t_{\dot{o}}^*}.$$

Алгоритм расчета времени торможения.

Дано:  $p; \Delta t; k; \omega_y; S_{кр}; f_{max}; M_{кр}; M_{cnp} = const; I_{np}$ .

1.  $t := \Delta t; f = (f_{max} - k_1 t); \omega := \omega_y,$
2.  $\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}.$
3.  $s = 1 - \frac{\omega}{\omega_0}.$
4.  $M_{\dot{a}} = \frac{2M_{\dot{e}\delta}}{\frac{s}{s_{\dot{e}\delta}} - \frac{s_{\dot{e}\delta}}{s}}.$
5.  $\Delta\omega = \frac{M_{\dot{a}} - M_{\ddot{n}\dot{\delta}}}{I_{\dot{\delta}}} \Delta t.$
6.  $\omega := \omega + \Delta\omega; t := t + \Delta t; f := f_{max} - k_1 t.$
7. Если  $f \leq f_{max}$ , идти к 2.
8.  $t := t_m.$
9. Конец.

## 9 Расчет мощности электродвигателя

Правильный расчет мощности электродвигателя имеет исключительно важное значение. При выборе двигателя завышенной мощности снижается коэффициент использования активной мощности, увеличивается стоимость машины, ее вес. При выборе двигателя заниженной мощности последний быстро выходит из строя ввиду разрушения изоляции обмотки статора (из-за ее перегрева).

Расчет мощности электродвигателя производится в два этапа:

1. Предварительный расчет мощности электродвигателя.
2. Поверочный расчет мощности электродвигателя.

### 9.1 Предварительный расчет мощности электродвигателя

Исходными данными для предварительного расчета мощности электродвигателя являются: диаграмма приведенного момента сопротивления (см. рис. 9.1) и синхронная угловая скорость двигателя. При предварительном расчете исходят из того, что угловые скорости звена приведения (рис. 6.1) в начале  $\omega_{ну}$  и конце  $\omega_{ку}$  одного цикла установившегося движения  $T_u$  одинаковы:  $\omega_{ну} = \omega_{ку}$ .

Рассмотрим уравнение кинетической энергии привода за время цикла при условии, что  $I_{\dot{\delta}} = const$ :

$$I_{\dot{\delta}} \frac{\omega_{\dot{e}\delta}^2 - \omega_{\dot{i}\delta}^2}{2} = A_{\dot{a}} - A_{\ddot{n}\dot{\delta}}, \quad (9.1)$$

где  $A_{\delta}$  – работа момента двигателя  $M_{\delta}$ ;

$A_{сnp}$  – работа момента  $M_{сnp}$ .

Левая часть уравнения (9.1) ввиду равенства  $\omega_{ny}$  и  $\omega_{ky}$  равна нулю, следовательно:

$$A_{\ddot{a}} = A_{\ddot{n}i\delta} . \quad (9.2)$$

В первом приближении будем считать момент двигателя за время  $T_u$  приближенно-постоянным и равным номинальному значению  $M_n$ .

Тогда

$$A_{\ddot{a}} \approx M_i \cdot \varphi_{\delta} , \quad (9.3)$$

где  $\varphi_{\delta}$  – угол поворота звена приведения за время  $T_u$ .

Из (9.2) и (9.3) определим  $M_n$ :

$$M_i \approx \frac{A_{\ddot{n}i\delta}}{\varphi_{\delta}} . \quad (9.4)$$

Для рассматриваемого привода (рис. 4.1) величина  $A_{cnp}$  может быть определена из формулы

$$A_{\ddot{n}i\delta} = s_{i\delta} \cdot k_i \cdot k_{\varphi} , \quad (9.5)$$

где  $s_{np}$  – площадь, заключенная между кривой  $M_{cnp}$  (рис. 9.1) и осью  $\varphi_2$  на интервале  $\varphi_2 = 0 \dots 2\pi \cdot u_{2-4}$ , в мм<sup>2</sup>;

$k_m, k_{\varphi}$  – масштабы графика по осям  $M_{cnp}$  и  $\varphi_2$  соответственно в Н·м/мм и рад/мм.

Для привода на рис. 4.1 угол поворота  $\varphi_{\delta}$  определится из формулы

$$\varphi_{\delta} = 2\pi \cdot u_{2-4} . \quad (9.6)$$

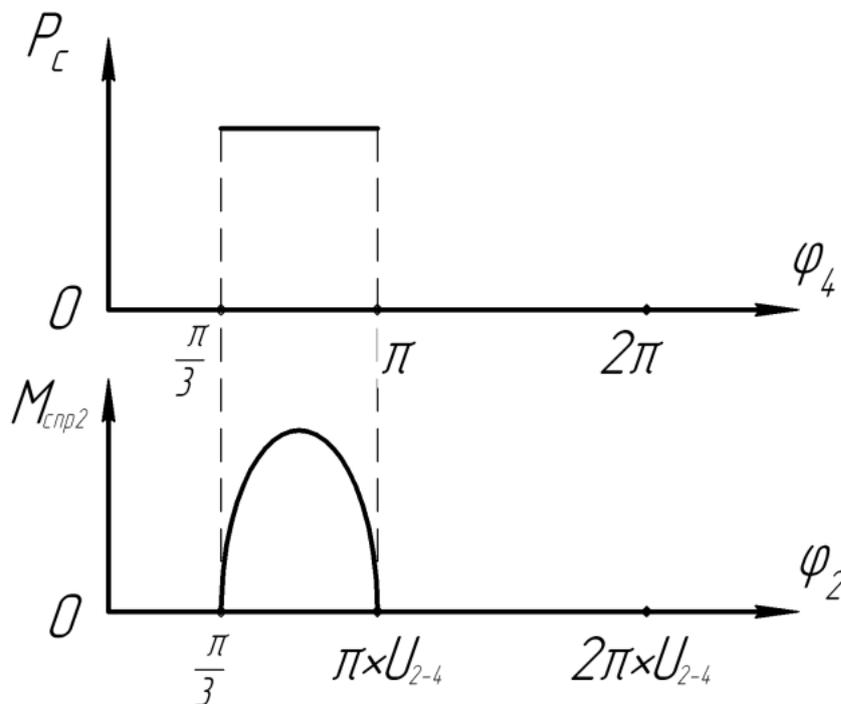


Рисунок 9.1

Подставив (9.5) и (9.6) в (9.4), получим:

$$M_i = \frac{s_{i\delta} \cdot k_i \cdot k_\varphi \dot{I} \cdot i}{2\pi \cdot u_{2-4}} \quad (9.7)$$

При известном  $M_n$  номинальная мощность двигателя определится из формулы

$$N_i = \frac{M_i \cdot \omega_0}{\eta_{i\delta}}, \quad (9.8)$$

где  $\eta_{np}$  – коэффициент полезного действия передач привода. По известным  $N_n$  и  $\omega_0$  по каталогу подбираем электродвигатель.

## 9.2 Поверочный расчет мощности электродвигателя

Поверочный расчет электродвигателя проводится с целью определения возможности надежной работы двигателя с учетом динамических нагрузок. Выделим два вида поверочных расчетов:

1. Проверка маховых масс электропривода.
2. Проверка двигателя по нагреву.

### Проверка маховых масс электропривода

При предварительном расчете мощности двигателя принимали, что в период установившегося движения  $M_\delta = M_n = const$ , т. е. считали, что угловая скорость звена привода постоянна. На самом деле, при переменном  $M_{сnp}$  (рис. 9.1) угловая скорость установившегося движения звена привода изменяется.

Для упрощения дальнейших рассуждений принимаем, что звеном привода является вал двигателя 1 (рис. 4.1).

Колебания угловой скорости  $\omega_l$  звена привода регламентируются в любом случае механической характеристикой электродвигателя (рис. 2.1):

$$\left. \begin{aligned} \omega_{lmin} &= k\omega_{e\delta}, \\ \omega_{lmax} &= \omega_0. \end{aligned} \right\} \quad (9.9)$$

где:  $k$  – коэффициент запаса,  $k = 0,8-0,9$ .

Экстремальные значения  $\omega_l$ , указанные в (9.9), следует рассматривать как предельно допустимые. Иногда могут быть заданы и более узкие пределы изменения  $\omega_l$ , например:

$$\left. \begin{aligned} \omega_{lmin} &= \omega_i - (\omega_0 - \omega_i) = 2\omega_i - \omega_0, \\ \omega_{lmax} &= \omega_0. \end{aligned} \right\} \quad (9.10)$$

Последние определены из условия, что модули отклонений  $\omega_{lmin}$  и  $\omega_{lmax}$  от  $\omega_n$  равны, что обеспечивает наиболее благоприятный режим работы электродвигателя.

Из теории механизмов и машин [4] известен также способ задания неравномерности движения с помощью коэффициента неравномерности.

Поставим задачу определения такого значения  $I_{i\delta 1}^*$  – суммы моментов инерции масс звеньев привода, приведенных к звену приведения, при котором движение звена приведения происходит с угловой скоростью, изменяющейся в заданных пределах  $\omega_{1min}, \dots, \omega_{1max}$ .

При этом рассмотрим случай, когда допустимо принять  $I_{i\delta 1}^*$  постоянным. Уравнение движения звена приведения в этом случае имеет вид:

$$M_{\ddot{a}} - M_{\ddot{i}\delta 1} = I_{i\delta 1}^* \frac{d\omega_1}{dt}. \quad (9.11)$$

Для экстремальных значений  $\omega_1$  (9.11) имеем:  $\frac{d\omega_1}{dt} = 0$ ,  $M_{\delta} = M_{cпр1}$ . Из последнего равенства следует, что при  $\omega_1 = \omega_{1min}$  и  $\omega_1 = \omega_{1max}$  кривые  $M_{\ddot{i}\delta} = f_1(\varphi_1)$  и  $M_{\ddot{a}} = f_2(\varphi_1)$  пересекаются. Ординаты точек пересечения определяются с помощью уравнения (2.4):

$$M_{\ddot{a}max} = a - b\omega_{1min},$$

$$M_{\ddot{a}min} = a - b\omega_{1max}.$$

Таким образом, на заданной кривой  $M_{\ddot{i}\delta 1} = f_1(\varphi_1)$  (рис. 9.2) может быть определен ряд точек а, а', ... с ординатами  $M_{\delta min}$  и ряд точек б, б', ... с ординатами  $M_{\delta max}$ . Далее, с учетом хода кривой,  $M_{\ddot{i}\delta 1} = f_1(\varphi_1)$  может быть вычерчен в виде ломаной линии приближенный график зависимости  $M_{\ddot{a}} = f_2(\varphi_1)$ . Ломаную линию проводят таким образом, чтобы увеличению (уменьшению)  $M_{cпр}$  соответствовало увеличение (уменьшение)  $M_{\ddot{a}}$ ; при этом точки максимума выбираются из ряда б, б', ..., а точки минимума из ряда а, а', ...

На рис. 9.2 график зависимости  $M_{\ddot{a}} = f_2(\varphi_1)$  представлен ломаной  $\dot{a} - \dot{a}' - \dot{a}''$ .

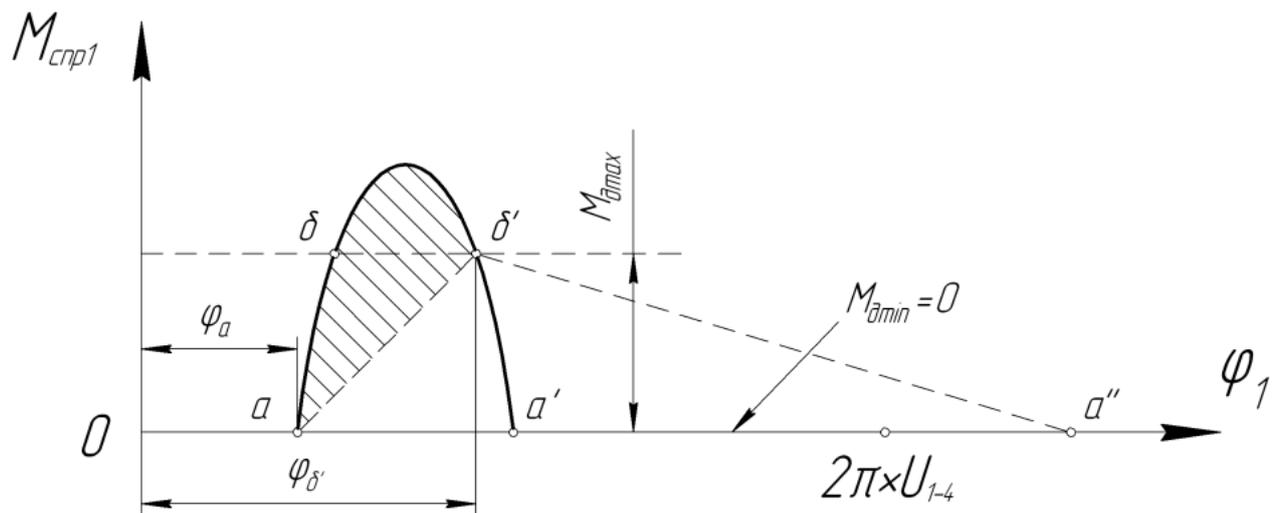


Рисунок 9.2

На графиках  $M_{\tilde{n}\tilde{i}\tilde{\delta}l} = f_1(\varphi_1)$  и  $M_{\tilde{a}} = f_2(\varphi_1)$  выделим интервалы значений  $\varphi_1$ , для которых  $M_{cnp2} > M_{\delta}$ .

На рис. 9.2 таковым является интервал  $\varphi_a, \dots, \varphi_b$ . В общем случае таких интервалов может быть несколько. Для определения  $I_{i\delta l}^*$  интерес представляет только один из указанных интервалов, на котором площадь, заключенная между кривыми  $M_{\tilde{n}\tilde{i}\tilde{\delta}l} = f_1(\varphi_2)$  и  $M_{\tilde{a}} = f_2(\varphi_1)$ , – наибольшая.

Для этого интервала запишем уравнение кинетической энергии звена приведения:

$$I_{i\delta l}^* \frac{\omega_{1e}^2 - \omega_{1i}^2}{2} = A_{\tilde{a}} - A_{\tilde{n}\tilde{i}\tilde{\delta}}, \quad (9.12)$$

где  $\omega_{1k}$  – угловая скорость звена приведения в конце интервала;  
 $\omega_{1n}$  – угловая скорость звена приведения в начале интервала;

$A_{\tilde{a}}, A_{\tilde{n}\tilde{i}\tilde{\delta}}$  – работы моментов  $M_{\delta}$  и  $M_{cnp1}$  на интервале. Учитывая, что  $\omega_{1k} = \omega_{1min}, \omega_{1n} = \omega_{1max}, A_{\tilde{a}} < A_{\tilde{n}\tilde{i}\tilde{\delta}}$ , запишем уравнение (9.12) в виде:

$$I_{i\delta l}^* \frac{\omega_{1max}^2 - \omega_{1min}^2}{2} = A_{\tilde{e}\tilde{c}\tilde{a}}, \quad (9.13)$$

где  $A_{\tilde{e}\tilde{c}\tilde{a}} = A_{\tilde{n}\tilde{i}\tilde{\delta}} - A_{\tilde{a}}$  – разность работ  $M_{cnp1}$  и  $M_{\delta}$  на интервале (избыточная работа).

$A_{\tilde{e}\tilde{c}\tilde{a}}$  может быть определена по формуле

$$A_{\tilde{e}\tilde{c}\tilde{a}} = s_{\tilde{e}\tilde{c}\tilde{a}} \cdot k_i \cdot k_{\varphi}, \quad (9.14)$$

где  $s_{\tilde{e}\tilde{c}\tilde{a}}$  – площадь, заключенная между графиками  $M_{cnp1}$  и  $M_{\delta}$  на интервале.

Тогда из формулы (9.13) с учетом (9.14) имеем:

$$I_{i\delta l}^* = \frac{2s_{\tilde{e}\tilde{c}\tilde{a}} \cdot k_i \cdot k_{\varphi}}{\omega_{1max}^2 - \omega_{1min}^2}. \quad (9.15)$$

Если окажется, что  $I_{i\delta l} \geq I_{i\delta l}^*$ , то выбранный согласно ориентировочному расчету электродвигатель обеспечит необходимый режим движения звена приведения.

Если же  $I_{i\delta l} < I_{i\delta l}^*$ , то необходимо установить на звене приведения дополнительную массу (маховик) с моментом инерции  $I_{\tilde{a}\tilde{i}\tilde{i}} = I_{i\delta l}^* - I_{i\delta l}$ . Масса, эквивалентная  $I_{\tilde{a}\tilde{i}\tilde{i}}$  по кинетической энергии, может быть установлена на любом звене привода.

Если установка дополнительной массы невозможна по каким-либо соображениям, то следует выбрать двигатель большей мощности и проверку повторить.

## 10 Поверочный расчет электродвигателя по нагреву

Нагрев изоляции обмотки статора происходит в результате выделения тепла при прохождении электрического тока по проводам обмотки. Количество тепла  $q$ , выделяемое в обмотке за единицу времени для асинхронного электродвигателя, определяется формулой:

$$q = B + CM_{\dot{a}}^2, \quad (10.1)$$

где  $M_{\dot{a}}$  – момент на валу двигателя;  
 $B, C$  – константы электродвигателя.

Двигатель рассчитан таким образом, чтобы при постоянном  $M_{\dot{a}}$ , равном номинальному значению  $M_i$ , соответствующее тепловыделение не приводило к перегреву изоляции обмотки.

Фактическая нагрузка на валу двигателя может быть переменной в течение цикла нагружения  $T$ , поэтому при поверочном расчете определяют некоторый постоянный момент, при котором количество тепла, выделяемое в обмотке статора, такое же, как и при переменном моменте. Этот постоянный момент называется эквивалентным  $M_{\dot{a}}$ .

### 10.1 Построение нагрузочной диаграммы электродвигателя

Реальное нагружение электродвигателя отражается его нагрузочной диаграммой, которая представляет график зависимости момента двигателя  $M_{\dot{a}}$  от времени  $t$  для одного цикла работы  $T$ .

Нагрузочная диаграмма строится на основе решения уравнений движения звена приведения электропривода для различных участков цикла: разгона, установившегося движения, торможения.

Характер нагрузочной диаграммы для типового электропривода с фрикционной связью электродвигателя с передаточным механизмом (рис. 4.1) показан на рис. 10.1.

На участке разгона  $t_p$  график изменения  $M_{\dot{a}}$  может быть представлен в виде ломаной линии, где  $M_{\dot{a}max}$  определяется из уравнения (2.4) подстановкой в него значения  $\omega = \omega_2$ , определяемого из уравнения (6.7) при  $t = t_1$ .

$M_{\dot{a}2}$  определится из уравнения (2.4) подстановкой в него  $\omega = \omega_{2y}$ .

Для участка установившегося движения  $t_y$  точный график изменения  $M_{\dot{a}}$  может быть построен в результате численного решения уравнения установившегося движения (6.2). В первом приближении для периода  $t_y$  можно принять  $M_{\dot{a}} \approx M_{\dot{o}} \approx const$ .

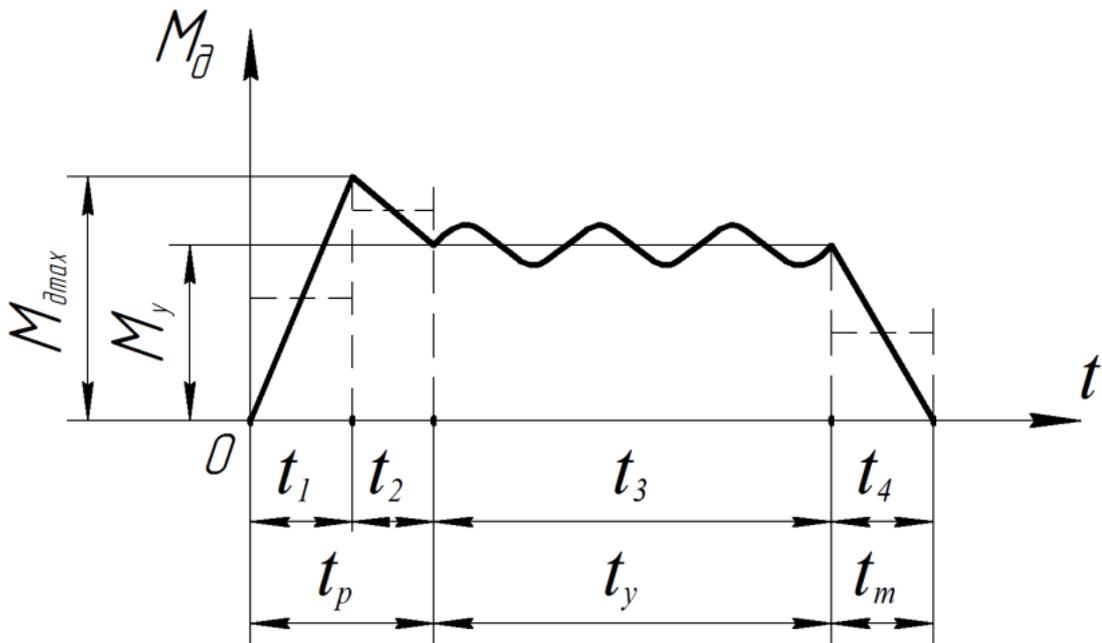


Рисунок 10.1

Для участка торможения график  $M_{\delta}$  может быть представлен в виде наклонной прямой.

Для упрощения дальнейших расчетов нагрузочную диаграмму представляют в виде ступенчатой. При этом разбивают диаграмму на участки  $t_1, t_2, \dots, t_n$ , а для каждого участка  $M_{\delta}$  принимают постоянным, равным среднему значению.

Так, диаграмма на рис. 10.1 разбивается на участки  $t_1, t_2, t_3 = t_y; t_4 = t_m$ . Для этих участков средние значения равны:

$$M_{\delta 1} = \frac{M_{\delta \max}}{2}; M_{\delta 2} = \frac{M_{\delta \max} + M_{\delta 0}}{2}; M_{\delta 3} = M_{\delta 0}; M_{\delta 4} = \frac{M_{\delta 0}}{2}.$$

Разобьем нагрузочную диаграмму (рис. 10.2) на ряд участков  $t_1, t_2, \dots, t_n$  и для каждого участка определим среднее значение  $M_{\delta}$ . Обозначим средние значения  $M_{\delta}$  для участков  $t_1, t_2, \dots, t_n$  соответственно  $M_{\delta 1}, M_{\delta 2}, \dots, M_{\delta n}$ , где  $n$  – число участков. Обозначим также количество тепла, выделяемое в единицу времени, на этих участках через  $q_1, q_2, \dots, q_n$ .

При этом  $q_i = B + CM_{\delta i}^2, i = 1, 2, \dots, n$ . Общее количество тепла, выделяемое в двигателе за время цикла, определится из формулы

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i t_i = \sum_{i=1}^n (B + CM_{\delta i}^2) t_i. \quad (10.2)$$

При нагружении двигателя в период  $T = t_1 + t_2 + \dots + t_n$  некоторым постоянным моментом  $M_{y\delta a}$  выделяется тепло:

$$Q_{y\delta a} = (B + CM_{y\delta a}^2) T. \quad (10.3)$$

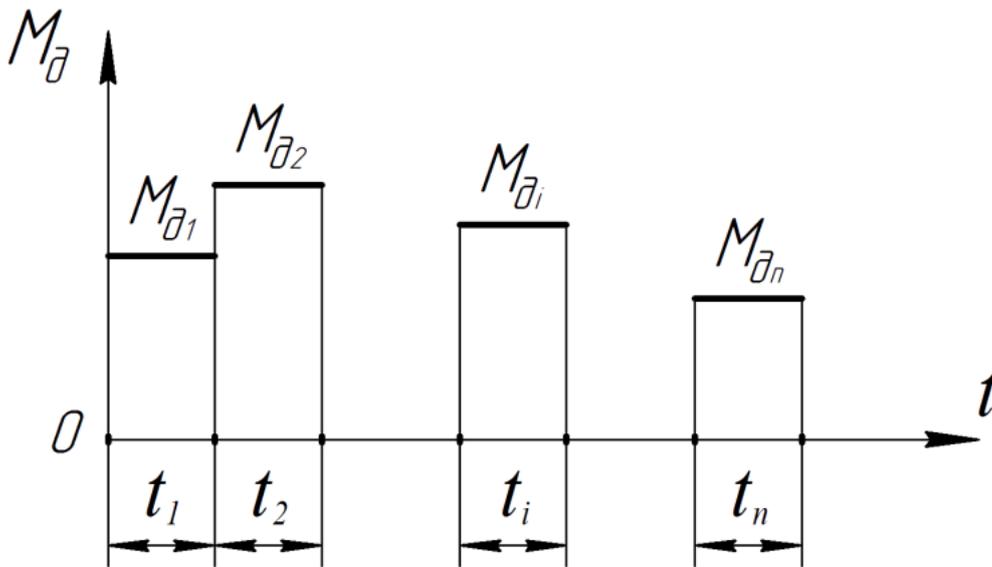


Рисунок 10.2

Приравнивая правые части уравнений (10.2) и (10.3), определим:

$$M_{y\acute{e}a} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n M_{\delta i}^2 \cdot t_i}{T}}. \quad (10.4)$$

### 10.2 Динамика нагрева электродвигателя

Динамику изменения температуры электродвигателя, представленного в виде однородного по тепловым свойствам тела, определим из уравнения теплового баланса:

$$qdt = Cd \tau + A \tau dt, \quad (10.5)$$

где  $q$  – тепло, выделяемое в электродвигателе в единицу времени, кал/с;

$t$  – время, с;

$\tau$  – температура электродвигателя, °С;

$A$  – коэффициент теплоотдачи электродвигателя окружающей среде, кал/с·град;

$C$  – теплоемкость электродвигателя, кал/град.

Решим уравнение (10.5) относительно  $t$ :

$$dt(q - A \tau) = Cd \tau,$$

$$\int_0^t dt = \int_{\tau_0}^{\tau} \frac{C}{\tau_0(q - A \tau)} d\tau,$$

$$t = \frac{C}{A} \ln \frac{q - A \tau_0}{q - A \tau},$$

где  $\tau_0$  – температура окружающей среды, °С.

Обозначим  $\frac{C}{A} = \Theta$ ;  $\Theta$  – постоянная времени асинхронного электродвигателя, обычно  $\Theta = (24-30)$  минут.

$$t = \Theta \ln \frac{q - A\tau_0}{q - A\tau},$$

$$e^{\frac{t}{\Theta}} = \frac{q - A\tau_0}{q - A\tau},$$

$$q - A\tau = e^{-\frac{t}{\Theta}} (q - A\tau_0),$$

$$\tau = \frac{q}{A} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\Theta}} \right) + \tau_0 e^{-\frac{t}{\Theta}}. \quad (10.6)$$

График изменения  $\tau$  (рис. 10.3) в функции  $t$  представляет экспоненту, где

$$\tau_0 = \frac{q}{A}.$$

Установившееся значение  $\tau_y$  практически достигается при  $t = 5\Theta = 120-150$  минут.

### 10.3 Режимы работы асинхронных электродвигателей по нагреву

Режимы работы электродвигателей по нагреву различают на длительный, кратковременный и повторно-кратковременный.

Большинство электродвигателей технологического оборудования работает в длительном режиме. В этом режиме электродвигатель находится непрерывно под нагрузкой в течение более двух часов. За это время температура  $\tau$  нагрева электродвигателя достигает установившегося значения  $\tau_y$ .

На рис. 10.3 представлены графики зависимостей  $M_{э\kappa\upsilon}$  и  $\tau$  в функции времени  $t$ . При этом время  $t_p > 120$  мин.

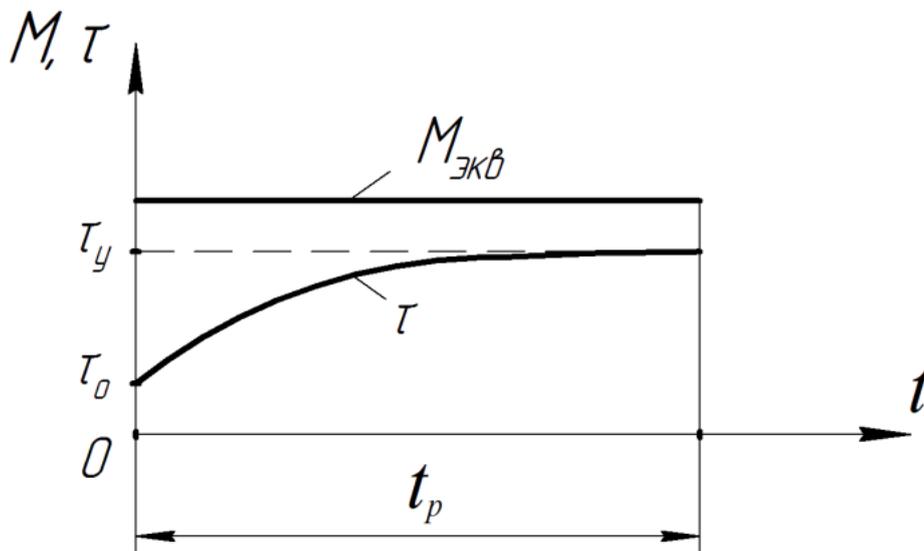


Рисунок 10.3

График изменения  $M_{экв}$  и  $\tau$  в функции времени  $t$  при кратковременном режиме представлен на рис. 10.4. Время нагружения  $t_p$  электродвигателя  $t_p \leq 120$  минут.

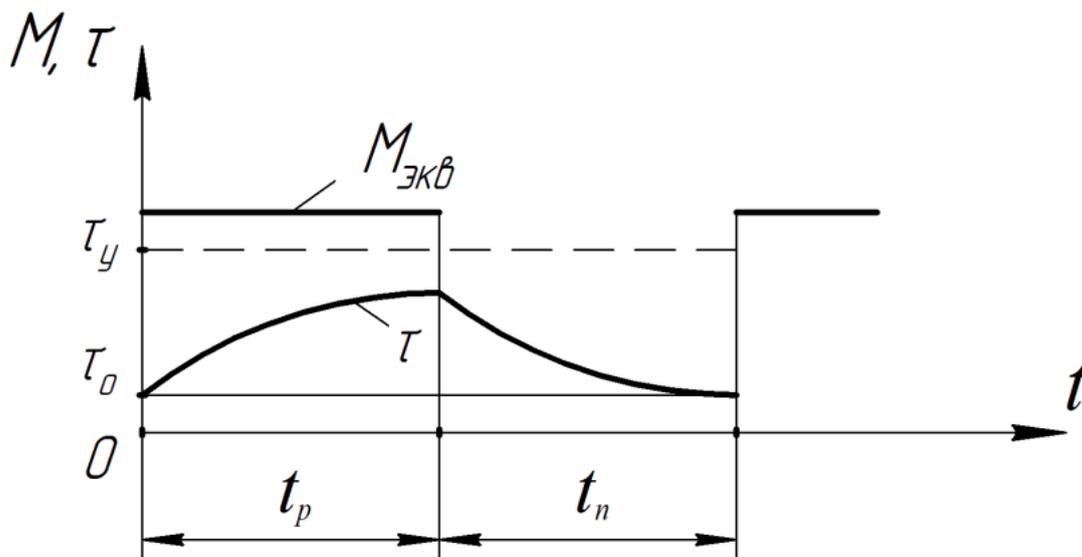


Рисунок 10.4

За это время температура  $\tau$  нагрева электродвигателя не достигает установившегося значения. В течение последующей паузы  $t_n$  температура электродвигателя уменьшается до температуры  $\tau_0$  окружающей среды.

В кратковременном режиме работают электродвигатели бытовых приборов, средств механизации вспомогательных операций и т. п.

При повторно-кратковременном режиме работы участки  $t_p$  нагружения чередуются с паузами  $t_n$ , при этом за время  $t_p$  электродвигатель не нагревается до максимальной температуры  $\tau_y$ , а во время паузы  $t_n$  — не успевает охладиться до температуры  $\tau_0$  окружающей среды, а суммарное время  $t_p + t_n < 10$  минут (рис. 10.5).

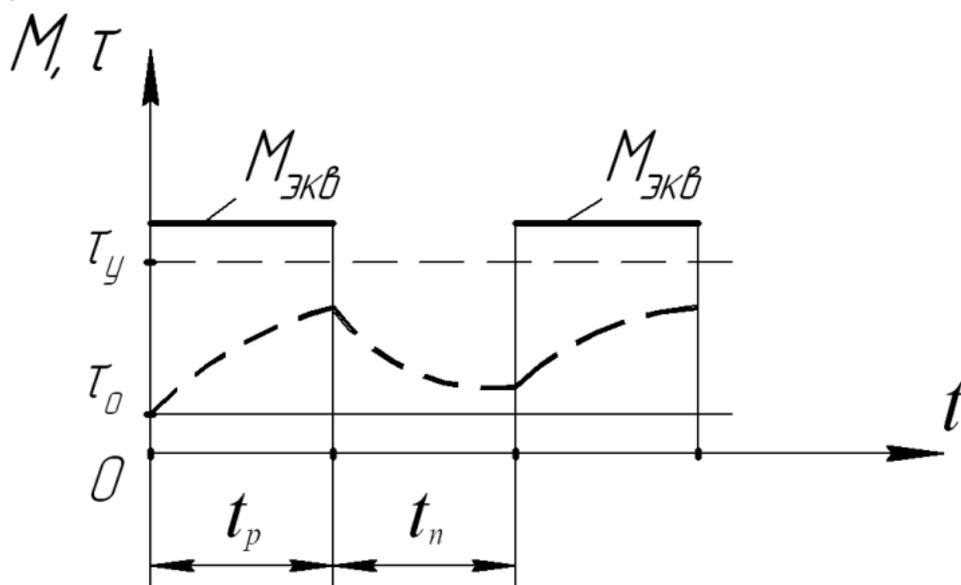


Рисунок 10.5

Повторно-кратковременный режим также характеризуется продолжительностью включения:

$$\hat{I\ddot{A}} = \frac{t_{\delta}}{t_{\delta} + t_{\tau}} \cdot 100\%.$$

В повторно-кратковременном режиме работают электродвигатели подъемно-транспортных устройств, средств механизации и т. п.

#### **10.4 Проверка электродвигателей по нагреву при различных режимах работы**

При длительном режиме работы проверка заключается в проверке неравенства:

$$M_{\hat{y}\hat{e}\hat{a}} \leq M_i. \quad (10.7)$$

Если это неравенство не выполняется, то следует выбрать электродвигатель большей мощности.

Для кратковременного режима работы выпускаются электродвигатели с различными периодами кратковременной работы  $t_k$ : (15, 30, 60, 90, 120) минут. Поэтому, кроме проверки неравенства (10.7) необходимо проверить условие

$$t_{\delta} \leq t_{\hat{e}}. \quad (10.8)$$

Если одно из условий (10.7) и (10.8) не выполняется, то возможно использование электродвигателя с другим номинальным моментом, согласно соотношению:

$$M_{i1} = M_{i2} \sqrt{\frac{t_{\hat{e}1}}{t_{\hat{e}2}}}.$$

Для повторно-кратковременного режима работы выпускаются электродвигатели с различными показателями продолжительности включения [ПВ] равными 15 %, 25 %, 40 %, 60 %.

Поэтому, кроме проверки неравенства (10.7) необходимо проверить условие

$$ПВ \leq [ПВ]. \quad (10.9)$$

Если одно из условий (10.7), (10.9) не выполняется, то возможно использование электродвигателя с другим номинальным моментом согласно соотношению

$$M_{i1} = M_{i2} \sqrt{\frac{\hat{I\ddot{A}}_1}{\hat{I\ddot{A}}_2}}.$$

## ЛИТЕРАТУРА

1. Коновалов, Л. И. Элементы и схемы электроавтоматики : учебное пособие для студ. вузов спец. «Автоматизация и компл. механизация хим.-технол. процессов» / Л. И. Коновалов, Д. П. Петелин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 1985. – 216 с., илл.
2. Иванов, М. Н. Детали машин : учебник для студ. вузов / М. Н. Иванов, под ред. В. А. Финогенова. – 6-е изд. перераб. – Москва : Высшая школа, 1985. – 216 с.
3. Москаленко, В. В. Электрический привод : учебник для студ. высш. учеб. заведений / В. В. Москаленко. – Москва : Издательский центр «Академия», 2007.– 368 с.
4. Артоболевский, И. И. Теория механизмов / И. И. Артоболевский. – Москва : Наука, 1965.– 776 с., илл.
5. Демидович, Б. П. Основы вычислительной математики / Б. П. Демидович, И. А. Марон. – Москва : Наука, 1970.– 664 с.