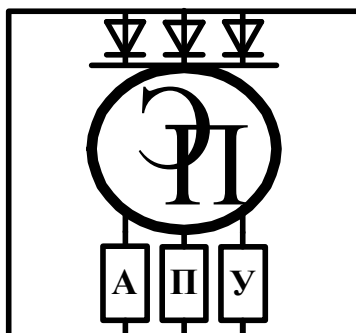


ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электропривод и АПУ»

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД

*Методические рекомендации к практическим занятиям
для студентов направления подготовки
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»
дневной формы обучения*



Могилев 2018

УДК 62-83
ББК 31.291:34.63-5
Э 45

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Электропривод и АПУ» «07» февраля 2018 г.,
протокол № 7

Составитель ст. преподаватель В. Н. Шарков

Рецензент канд. техн. наук, доц. Б. Б. Скарыно

Предназначены к практическим занятиям для студентов направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» дневной формы обучения по дисциплине «Электрический привод». Приведены основные теоретические положения и формулы, необходимые для расчёта механической части электроприводов, статических характеристик двигателей постоянного и переменного тока, мощности исполнительных двигателей и их проверки по условиям пуска и перегрузочной способности.

Учебно-методическое издание

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД

Ответственный за выпуск	Г. С. Леневский
Технический редактор	А. А. Подошевко
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 46 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Государственное учреждение высшего профессионального образования
«Белорусско-Российский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 24.01.2014.

Пр. Мира, 43, 212000, Могилев.

© ГУВПО «Белорусско-Российский
университет», 2018



Содержание

Введение	4
1 Механика электропривода	5
1.1 Движущиеся массы, моменты инерции, жёсткости связей	5
1.2 Приведение параметров элементов к расчётной скорости	6
1.3 Приведение нагрузок к расчётной скорости	7
1.4 Расчётные схемы механической части электропривода.....	9
1.5 Уравнения движения механической части электропривода	10
1.6 Построение тахограмм и нагрузочных диаграмм	11
2 Расчёт статических электромеханических и механических характеристик двигателей постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ с НВ) и асинхронных двигателей (АД).....	12
2.1 Выражения статической электромеханической и механической характеристик ДПТ с НВ.....	13
2.2 Естественные статические характеристики ДПТ с НВ	15
2.3 Искусственные статические характеристики ДПТ с НВ	18
2.4 Тормозные режимы работы двигателя постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ с НВ)	23
2.5 Статические электромеханические и механические характеристики асинхронного двигателя (АД)	26
3 Энергетика и основы выбора мощности электропривода	30
4 Типовые задачи по механике электропривода и их решение.....	36
Список литературы	46



Введение

Методические рекомендации предназначены для закрепления полученных теоретических знаний по дисциплине «Электрический привод», а также приобретения практического опыта по расчёту электроприводов постоянного и переменного тока на практических занятиях, которые в соответствии с учебной программой дисциплины охватывают все основные разделы курса.

В методических рекомендациях приведены основные теоретические положения и формулы, необходимые для расчёта механической части электропривода, статических электромеханических и механических характеристик двигателей постоянного и переменного тока, основные положения по расчёту и выбору исполнительных двигателей по мощности и их проверке по условиям пуска и перегрузочной способности.

Ввиду ограниченного объёма в методических рекомендациях приведены материалы только по основным темам практических занятий, а именно: по механике электропривода; по расчёту статических режимов работы двигателей постоянного тока и асинхронных двигателей; по расчёту мощности исполнительных двигателей и их проверке по условиям пуска и перегрузочной способности.



1 Механика электропривода

1.1 Движущиеся массы, моменты инерции, жёсткости связей

Передача механической энергии от вала двигателя к рабочему органу осуществляется посредством механических передач. С их помощью происходит перераспределение скоростей и нагрузок. Непосредственное представление о передаче механической энергии дает кинематическая схема установки. В кинематической цепи часть элементов совершают вращательные движения, а часть – поступательные. Элементы, движущиеся вращательно, имеют момент инерции J , кг·м², и связаны между собой связями, обладающими жесткостью кручения C_K , Н·м/рад. Элементы, движущиеся поступательно, характеризуются массой m , кг, и связаны между собой связями, обладающими жесткостью деформации (растяжения–сжатия) C_D , Н/м.

Моменты инерции и массы движущихся элементов, а также жёсткости связей либо задаются механиками, либо их можно определить по геометрическим параметрам этих элементов.

Определить массу поступательно движущихся элементов возможно, например, взвешиванием.

Большинство тел вращения могут быть представлены в виде сплошного или полого цилиндра.

Момент инерции J , кг·м², для цилиндрического тела диаметром D , м, полого цилиндрического тела с внутренним диаметром d , м, и внешним D , м (при длине L , м) можно определить по формулам:

$$J = \frac{m \cdot D^2}{8} = \frac{\pi \cdot \rho \cdot L \cdot D^4}{32}; \quad (1.1)$$

$$J = m \cdot \frac{D^2 - d^2}{8} = \frac{\pi \cdot \rho \cdot L}{32} \cdot (D^4 - d^4), \quad (1.2)$$

где ρ – плотность материала (для стали $\rho = 7,66$ кг/м³).

Жёсткость при кручении C_K , Н·м/рад, для цилиндрического тела диаметром D , м, полого цилиндрического тела с внутренним диаметром d , м, и внешним D , м (при длине L , м) можно найти по формулам:

$$C_K = G \cdot \frac{\pi \cdot D^4}{32 \cdot L}; \quad (1.3)$$

$$C_K = G \cdot \frac{\pi \cdot d^4}{32 \cdot L} \cdot \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right], \quad (1.4)$$

где G – модуль упругости (для стали $G = 8,1 \cdot 10^{10}$ Н/м²).



Жёсткость деформации (растяжения–сжатия) C_D , Н/м, стержня длиной L , м, поперечным сечением S , м², можно определить по формуле

$$C_D = E \cdot \frac{S}{L}, \quad (1.5)$$

где E – модуль упругости (для стали $E = (2...2,1) \cdot 10^{10}$ Н/м²).

Для троса модуль упругости меньше, чем для стержня сплошного сечения:

$$E_{TP} = E \cdot k, \quad (1.6)$$

где k – коэффициент пропорциональности ($k = 0,35...0,65$ – для тросов двойной завивки; $k = 0,65...0,85$ – для тросов одинарной завивки).

Для некоторых элементов может быть задан не момент инерции, а маховый момент GD^2 , кг·м² или Н·м². Формулы перевода махового момента в момент инерции имеют вид:

- если единица измерения махового момента GD^2 , кг·м², то $J = \frac{GD^2}{4}$;
- если единица измерения махового момента GD^2 , Н·м², то $J = \frac{GD^2}{4 \cdot g}$.

1.2 Приведение параметров элементов к расчётной скорости

Благодаря наличию механических передач элементы кинематической цепи движутся с различными скоростями, запасают разное количество энергии. Чтобы оценить влияние параметров элементов на характер движения электропривода, осуществляют приведение этих параметров к одной расчетной скорости. В качестве расчетной скорости в большинстве случаев целесообразно принимать скорость двигателя, который является первым элементом кинематической цепи.

Параметры вращательно движущихся элементов приводятся к расчетной скорости с помощью передаточного отношения i , а параметры поступательно движущихся элементов – с помощью радиуса приведения r . Передаточное отношение – это безразмерная величина; радиус приведения измеряется в метрах. Передаточное отношение i_{1-j} между j -м элементом кинематической цепи и первым (двигателем) определяется как отношение угловых скоростей первого элемента и j -го:

$$i_{1-j} = \frac{\omega_1}{\omega_j}. \quad (1.7)$$

Радиус приведения r_{1-j} между j -м элементом кинематической цепи и первым определяется как отношение линейной скорости j -го элемента к угловой скорости первого элемента:



$$\rho_{1-j} = \frac{V_j}{\omega_1}. \quad (1.8)$$

Передаточные отношения для механических передач либо заданы, либо их можно легко рассчитать.

Общее передаточное отношение определяется произведением передаточных отношений всех механических передач:

$$i = \prod_{j=1}^n i_j. \quad (1.9)$$

Если между двигателем и передачей шестерня – зубчатая рейка (барбан–канат) имеются зубчатые или иные передачи с передаточным отношением i_p , то радиус приведения к скорости двигателя можно определить по следующей формуле:

$$\rho = \frac{D_{Ш(Б)}}{2 \cdot i_p}. \quad (1.10)$$

В таблице 1.1 даны формулы приведения перемещений, скоростей, ускорений, движущихся масс и жесткостей связей к скорости двигателя для вращательно и поступательно движущихся элементов.

Таблица 1.1 – Формулы приведения к скорости двигателя

Формула приведения	Вращательно движущийся элемент	Поступательно движущийся элемент
Перемещений	$\Phi_{1-j} = \Phi_j \cdot i_{1-j}$	$\Phi_{1-j} = \frac{S_j}{\rho_{1-j}}$
Скоростей	$\omega_{1-j} = \omega_j \cdot i_{1-j}$	$\omega_{1-j} = \frac{V_j}{\rho_{1-j}}$
Ускорений	$\varepsilon_{1-j} = \varepsilon_j \cdot i_{1-j}$	$\varepsilon_{1-j} = \frac{a_j}{\rho_{1-j}}$
Моментов инерции	$J_{1-j} = \frac{J_j}{(i_{1-j})^2}$	$J_{1-j} = m_j \cdot (\rho_{1-j})^2$
Жесткостей связей	$C_{1-j} = \frac{C_j}{(i_{1-j})^2}$	$C_{1-j} = C_j \cdot (\rho_{1-j})^2$

1.3 Приведение нагрузок к расчётной скорости

Рабочий орган производственной машины реализует полезную работу. Если рабочий орган совершает вращательное движение, то к нему прикладывается момент, если возвратно-поступательное – сила (усилие). Моменты и силы, приложенные к рабочему органу, приводятся к скорости двигателя также с по-

мощью радиуса приведения и передаточного отношения:

$$M = \frac{M_j}{i_{1-j}} ; \quad M = F_j \cdot \rho_{1-j}.$$

По характеру действия моменты и силы подразделяются на активные и реактивные. Активные моменты и силы создаются внешними источниками энергии по отношению к приводу, а реактивные возникают как реакция на активное движение привода.

Передача механической энергии от вала двигателя к рабочему органу или обратно связана с потерями в механических передачах. Поэтому суммарный момент статической нагрузки, приведенный к валу двигателя, состоит из момента полезной нагрузки и момента трения в механических передачах:

$$M_C = M_{пол} \pm M_{тр}. \quad (1.11)$$

Здесь момент полезный и момент трения – моменты, приведенные к скорости двигателя. По характеру действия момент, обусловленный трением в механических передачах, реактивный.

В таблице 1.2 даны формулы приведения статических нагрузок (сил и моментов) к расчетной скорости (скорости двигателя) с учетом направления потока механической мощности.

Таблица 1.2 – Формулы приведения статических нагрузок

Направление потока механической мощности	Статическая нагрузка	
	при вращательном движении рабочего органа	при поступательном движении рабочего органа
От двигателя к рабочему органу	$M_C = \frac{M_j}{\eta \cdot i_{1-j}}$	$M_C = \frac{F_j}{\eta} \cdot \rho_{1-j}$
От рабочего органа к двигателю	$M_C = \frac{M_j}{i_{1-j}} \cdot \eta$	$M_C = F_j \cdot \eta \cdot \rho_{1-j}$

Зависимость статического момента, приведенного к скорости двигателя, от скорости двигателя ($M_C = f(\omega)$) называется механической характеристикой механизма и показывает, как изменяется момент нагрузки при изменении угловой скорости.

Активные нагрузки не зависят ни от величины, ни от направления скорости вращения двигателя. Реактивные нагрузки зависят от направления вращения двигателя и в ряде случаев от величины этой скорости.

Различают следующие типовые реактивные нагрузки (рисунок 1.1):

- типа «сухого» трения (характеристика 1);
- типа «вязкого» трения тип 1 (характеристика 2);



- «вентиляторного» типа (характеристика 3);
- типа «вязкого» трения тип 2 (характеристика 4).

Количественно потери энергии в механических передачах оцениваются коэффициентом полезного действия этих передач. Не следует забывать, что КПД механических передач в большинстве случаев зависят от их загрузки, т. е. от передаваемого момента (усилия) (рисунок 1.2), а для червячных самотормозящих редукторов – от скорости вращения червяка (рисунок 1.3).

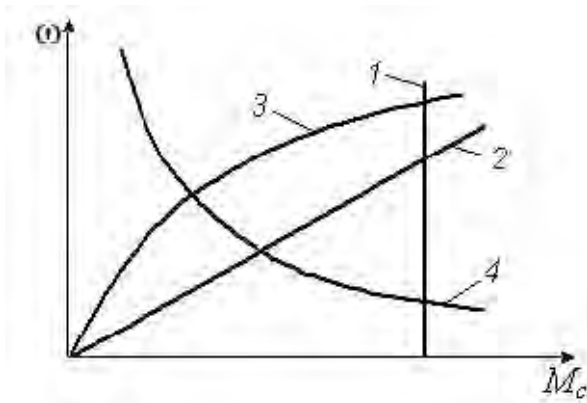


Рисунок 1.1 – Типовые реактивные нагрузки механической части электропривода

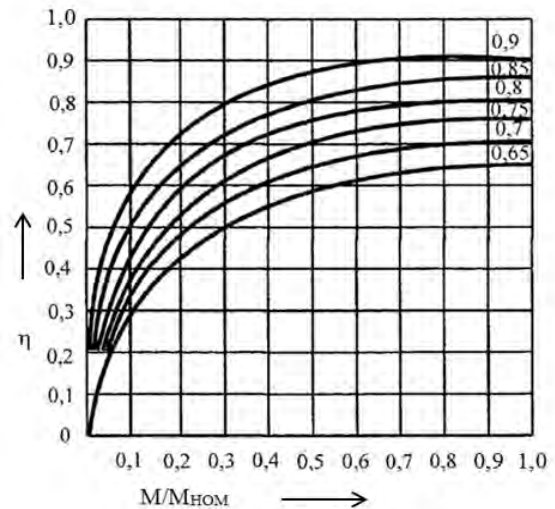


Рисунок 1.2 – Зависимость КПД передач от загрузки

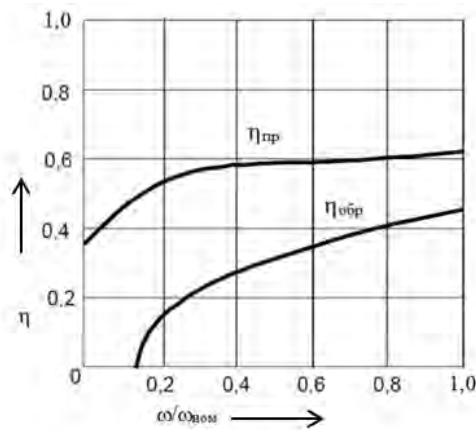


Рисунок 1.3 – Зависимость КПД червячных передач от скорости вращения червяка

1.4 Расчётные схемы механической части электропривода

После приведения параметров элементов кинематической схемы к расчётной скорости представляется возможным их сопоставить и выбрать главные массы и главные упругие связи и на этой основе составить приближённую расчётную схему механической части электропривода.

Если приведенные жесткости связей большие, то можно считать их абсолютно жесткими. Тогда суммарный приведенный момент инерции определяет

ся как сумма момента инерции двигателя, приведенных моментов инерции вращательно движущихся элементов и приведенных моментов инерции поступательно движущихся элементов кинематической цепи:

$$J_{\Sigma} = J_{\partial} + \sum_j \frac{J_j}{i_{1-j}^2} + \sum_j m \cdot \rho_{1-j}^2. \quad (1.12)$$

При этом получают одномассовую расчётную схему механической части электропривода, которую иногда называют эквивалентным жёстким приведенным звеном (рисунок 1.4).

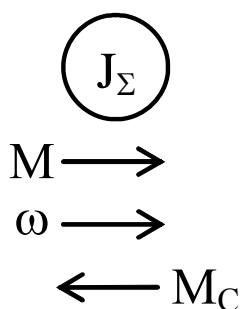


Рисунок 1.4 – Одномассовая расчётная схема механической части электропривода (эквивалентное жёсткое приведенное звено)

1.5 Уравнения движения механической части электропривода

Движение электропривода определяется действием двух моментов: момента, развиваемого двигателем, и момента сопротивления, приведенного к скорости двигателя, а для двухмассовой расчётной схемы ещё и моментом упругого взаимодействия, который возникает из-за наличия податливых связей в кинематической цепи. Положительное направление момента сопротивления принимают противоположным положительному направлению момента двигателя.

Следует помнить различия между консервативными и диссипативными силами и моментами. Консервативными называются силы и моменты, при воздействии которых на систему не происходит процесс поглощения колебаний, диссипативными – силы и моменты, при воздействии которых на систему происходит процесс поглощения колебаний.

Уравнение движения электропривода для двигательного режима работы для одномассовой расчётной схемы механической части электропривода (эквивалентного жесткого приведенного звена) имеет вид:

$$M - M_C = J_{\Sigma} \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (1.13)$$

где M – момент, развиваемый двигателем, Н·м;

J_{Σ} – суммарный приведенный момент инерции, кг·м²;

ω – угловая скорость ротора (якоря) двигателя, рад/с;

M_C – момент сопротивления, приведенный к скорости двигателя, Н·м.

В уравнении (1.13) моменты являются алгебраическими, а не векторными величинами, т. к. оба момента M и M_C действуют относительно одной и той же оси вращения. Правую часть уравнения (1.13) называют динамическим (или избыточным) моментом:

$$M_{\text{дин}} = J_{\Sigma} \cdot \frac{d\omega}{dt}. \quad (1.14)$$

Направление динамического момента всегда совпадает с направлением ускорения электропривода. В зависимости от знака динамического момента различают следующие режимы работы электропривода:

- 1) $M_{\text{дин}} > 0$ ($d\omega/dt = \varepsilon > 0$) – разгон при $\omega > 0$, торможение при $\omega < 0$;
- 2) $M_{\text{дин}} < 0$ ($d\omega/dt = \varepsilon < 0$) – торможение при $\omega > 0$, разгон при $\omega < 0$;
- 3) $M_{\text{дин}} = 0$ ($d\omega/dt = \varepsilon = 0$) – установившийся режим при $\omega = \text{const}$.

Другими словами, для разгона привода двигатель должен развивать момент, преодолевающий момент сопротивления, приведенный к валу двигателя (момент полезной нагрузки с учетом потерь в механических передачах), и момент динамический, обусловленный разгоном массы, обладающей приведенным моментом инерции, с требуемым ускорением. Для торможения привода момент, развиваемый двигателем, должен быть меньше приведенного момента сопротивления на величину динамического момента, определяемого приведенным моментом инерции и требуемой интенсивностью торможения.

1.6 Построение тахограмм и нагрузочных диаграмм

Тахограмма движения электропривода $\omega = f(t)$ представляет собой зависимость угловой скорости ротора двигателя от времени за цикл работы. Для её построения необходимо рассчитать скорости, ускорения и интервалы времени, соответствующие установившимся и переходным режимам работы (разгон, торможение). Требуемые угловые скорости и ускорения двигателя легко определить по формулам приведения при известных скоростях и требуемых ускорениях рабочего органа. Интервалы времени, соответствующие разгону и торможению при постоянном ускорении (равноускоренное движение) и движению привода с постоянной скоростью (равномерное движение), определяются по формулам, которые приведены в таблице 1.3. При линейных кинематических передачах ($i = \text{const}$, $\rho = \text{const}$) интервалы времени могут быть рассчитаны как по известным скоростям, ускорениям и перемещениям самого рабочего органа, так и по этим параметрам, приведенным к расчетной скорости.

Под нагрузочной диаграммой механизма $M_C = f(t)$ подразумевается зависимость приведенного статического момента от времени за цикл работы производственного механизма. Если предварительно рассчитана тахограмма, а также приведенные моменты сопротивления, то построение нагрузочной диаграммы



не вызывает затруднений. Нагрузочная диаграмма определяет изменение статической нагрузки на валу двигателя в течение времени работы электропривода (цикла работы). Более точно проанализировать режимы работы электропривода можно по уточненной нагрузочной диаграмме $(M_C \pm M_{ДИН}) = f(t)$. Для ее построения необходимо определить дополнительно к статическим еще и динамические нагрузки с учетом их знака.

Таблица 1.3 – Формулы для определения интервалов времени и пути

Рассчитываемый параметр	Вид движения	
	поступательное	вращательное
Время разгона (торможения) при постоянном допустимом ускорении	$t_{P(T)} = \frac{V_{КОН} - V_{НАЧ}}{a_{ДОП}}$	$t_{P(T)} = \frac{\omega_{КОН} - \omega_{НАЧ}}{\varepsilon_{ДОП}}$
Путь, проходимый рабочим органом за время разгона (торможения)	$S_{P(T)} = \frac{a_{ДОП} \cdot t_{P(T)}^2}{2}$	$\Phi_{P(T)} = \frac{\varepsilon_{ДОП} \cdot t_{P(T)}^2}{2}$
Путь, проходимый рабочим органом при движении с постоянной скоростью	$S_Y = S_{\Sigma} - S_P - S_T$ S_{Σ} – весь путь	$\Phi_Y = \Phi_{\Sigma} - \Phi_P - \Phi_T$ Φ_{Σ} – весь путь
Время движения рабочего органа с постоянной скоростью V (ω)	$t_Y = \frac{S_Y}{V}$	$t_Y = \frac{\Phi_Y}{\omega}$

2 Расчёт статических электромеханических и механических характеристик двигателей постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ с НВ) и асинхронных двигателей (АД)

Расчёт и анализ статических электромеханических и механических характеристик двигателя позволяет оценить его работу в установившемся режиме. Статическая электромеханическая характеристика двигателя представляет собой зависимость угловой скорости двигателя от тока в установившемся режиме работы $\{\omega = f(I_A)\}$. Электромеханическая характеристика позволяет оценить загрузку двигателя по току, а также верно выбрать коммутационные аппараты.

Статическая механическая характеристика двигателя $\{\omega = f(M)\}$ представляет собой зависимость угловой скорости от момента (электромагнитного M_{Σ} или на валу M_B) в установившемся режиме работы. Момент электромагнитный M_{Σ} и на валу M_B связаны соотношением $M_{\Sigma} = M_B \pm \Delta M$, где ΔM – момент потерь вращения. В двигательном режиме работы момент электромагнитный M_{Σ} больше момента на валу M_B на величину ΔM , а в тормозных режимах (рекуперативное торможение, торможение противовключением и динамическое торможение) меньше.

Статическая механическая характеристика позволяет определить угловую скорость, с которой будет вращаться вал двигателя при данном моменте нагрузки M_C на валу. Статическая механическая характеристика есть множество точек установившегося режима работы электрической машины, для которого момент, развиваемый двигателем, равен моменту нагрузки ($M = M_C$). При

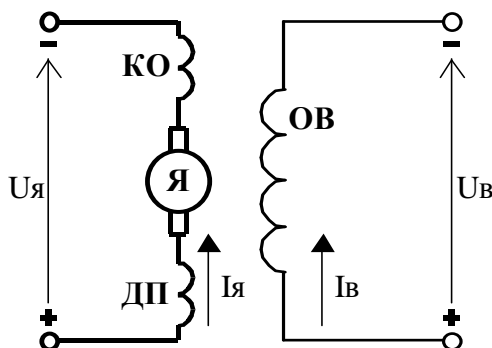
совместном рассмотрении механических характеристик механизма $\{\omega = f(M_C)\}$ и двигателя $\{\omega = f(M)\}$ в качестве последней следует рассматривать зависимость угловой скорости в функции момента двигателя на валу $\{\omega = f(M_B)\}$. Однако следует помнить, что эта функция имеет разрыв первого рода при переходе от двигательного к тормозному режиму работы. Поэтому в ряде задач целесообразнее рассматривать зависимость угловой скорости от электромагнитного момента двигателя $\{\omega = f(M_{\mathcal{E}})\}$, отнеся момент потерь вращения, вызванный механическими потерями в двигателе, если он превышает 5 % от номинального электромагнитного момента, к нагрузке M_C или пренебрегая им в случае его малости (менее 5 %). При этом следует помнить, что момент потерь вращения ΔM зависит от угловой скорости двигателя, т. е. $\Delta M = f(\omega)$.

Статические характеристики (электромеханические и механические) рассчитанные при номинальных параметрах для нормальной схемы включения двигателя называются естественными. При изменении хотя бы одного из параметров двигателя или при изменении схемы включения двигатель в установившемся режиме будет работать на искусственной характеристике.

Большинство методов расчёта статических характеристик требуют данных, кроме каталожных, а также его электрических параметров (активных и индуктивных сопротивлений статорных и роторных обмоток асинхронных двигателей, полного внутреннего сопротивления якоря двигателя постоянного тока и др.). Если эти параметры в справочниках не приведены, что чаще всего бывает, необходимо применять приближённые методы расчёта, основанные лишь на данных, приведенных в каталогах (справочниках).

2.1 Выражения статической электромеханической и механической характеристик ДПТ с НВ

Схема включения ДПТ с НВ приведена на рисунке 2.1. Особенностью этого двигателя является то, что якорь двигателя и обмотка возбуждения получают питание от различных (независимых) источников энергии.



Я – обмотка якоря; ДП – обмотка дополнительных полюсов; КО – компенсационная обмотка; ОВ – обмотка возбуждения; $U_{\text{я}}$ – напряжение якоря; $U_{\text{в}}$ – напряжение возбуждения; $I_{\text{я}}$ – ток якоря; $I_{\text{в}}$ – ток возбуждения

Рисунок 2.1 – Схема включения ДПТ с независимым возбуждением

Статическая электромеханическая характеристика ДПТ с НВ $\{\omega = f(I_{\text{я}})\}$ представляет собой зависимость угловой скорости от тока якоря в установившемся режиме работы:

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{k \cdot \Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{k \cdot \Phi} \cdot I_{\text{я}}. \quad (2.1)$$

От этого уравнения можно перейти к уравнению статической механической характеристики, т. к. развиваемый двигателем электромагнитный момент пропорционален току якоря и потоку и определяется выражением

$$M = k \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}}. \quad (2.2)$$

Подставляя (2.1) в уравнение (2.2), получаем уравнение статической механической характеристики ДПТ с НВ

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{k \cdot \Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{(k \cdot \Phi)^2} \cdot M, \quad (2.3)$$

где $U_{\text{я}}$ – напряжение на якоре, В;

$R_{\text{я}}$ – сопротивление якорной цепи для нагретого состояния, Ом;

$I_{\text{я}}$ – ток якорной цепи, А;

k – конструктивный коэффициент двигателя;

Φ – полезный поток, Вб,

Конструктивный коэффициент двигателя определяется выражением

$$k = \frac{p \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot a}, \quad (2.4)$$

где p – число пар полюсов двигателя;

N – число активных проводников обмотки якоря;

a – число параллельных ветвей обмотки якоря.

Произведение $(k \cdot \Phi)$ иногда называют коэффициентом ЭДС и момента (электромагнитного). При неизменном потоке возбуждения ($\Phi = \text{const}$) этот коэффициент обозначают символом C (т. е. $k \cdot \Phi = C$).

С учетом этого уравнения статических электромеханической и механической характеристик двигателя могут быть записаны в виде

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{C} - \frac{R_{\text{я}}}{C} \cdot I_{\text{я}}; \quad (2.5)$$

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{C} - \frac{R_{\text{я}}}{C^2} \cdot M, \quad (2.6)$$

где C – коэффициент ЭДС и момента, В·с/рад; $C = k\Phi$.



В выражениях (2.5) и (2.6) угловая скорость ω является функцией; $I_{Я}$ и M называют аргументами, а все остальные величины, входящие в выражения характеристик, – параметрами двигателя.

2.2 Естественные статические характеристики ДПТ с НВ

Статические характеристики (электромеханические и механические) рассчитанные при номинальных параметрах для нормальной схемы включения ДПТ с НВ (отсутствуют добавочные сопротивления), называются естественными. Выражения естественных статических электромеханической и механической характеристик имеют вид:

$$\omega = \frac{U_{Яном}}{C_{ном}} - \frac{R_{Я}}{C_{ном}} \cdot I_{Я}; \quad (2.7)$$

$$\omega = \frac{U_{Яном}}{C_{ном}} - \frac{R_{Я}}{(C_{ном})^2} \cdot M. \quad (2.8)$$

Параметры, входящие в выражения этих характеристик определяются следующим образом:

- номинальное напряжение на якоре задается в справочниках и указывается на табличке двигателя;
- сопротивление якорной цепи определяется выражением

$$R_{Я} = k_T \cdot (R_{ОЯ} + R_{ОДП} + R_{КО}) + R_{ЩК}, \quad (2.9)$$

где $R_{ОЯ}$ – сопротивление обмотки якоря, Ом;

$R_{ОДП}$ – сопротивление обмотки дополнительных полюсов, Ом;

$R_{КО}$ – сопротивление компенсационной обмотки, Ом;

$R_{ЩК}$ – сопротивление щеточного контакта, Ом;

k_T – коэффициент приведения сопротивлений к нагретому состоянию,

$$k_T = [1 + \alpha \cdot (\theta - t^\circ)],$$

где t° – температура при измерении сопротивлений, $t^\circ = 20^\circ\text{C}$;

α – температурный коэффициент (для меди $\alpha = 0,004\ 1/^\circ\text{C}$);

θ – расчётное значение температуры, определяемое классом изоляции ($\theta = 75^\circ\text{C}$ в случае класса изоляции В, $\theta = 90^\circ\text{C}$ в случае класса изоляции F).

Если сопротивления обмоток якоря, добавочных полюсов и компенсационной обмотки приведены в справочнике уже для нагретого состояния, то при расчете сопротивления якорной цепи следует использовать коэффициент k_T , равный 1.

У двигателей небольшой мощности компенсационная обмотка может отсутствовать, тогда в формуле (2.9) следует принять $R_{КО} = 0$.

Сопротивление щеточного контакта определяется по формуле



$$R_{ЩК} = \frac{\Delta U_{Щ}}{I_{Яном}}, \quad (2.10)$$

где $\Delta U_{Щ}$ – падение напряжения на щеточном контакте, $\Delta U_{Щ} = 0,6$ В – для медно-графитовых и $\Delta U_{Щ} = 2$ В – для графитовых щеток;

$I_{Яном}$ – номинальный ток якоря двигателя, А.

Обычно номинальный ток якоря приводится в справочнике или на табличке двигателя. Если ток якоря номинальный неизвестен, то его можно определить по формуле

$$I_{Яном} = \frac{P_{2ном}}{\eta_{ном} \cdot U_{Яном}} - \frac{U_{Вном}}{k_T \cdot R_{ОВ}}, \quad (2.11)$$

где $P_{2ном}$ – номинальная мощность на валу двигателя, Вт;

$\eta_{ном}$ – номинальный коэффициент полезного действия, о. е.;

$U_{Вном}$ – номинальное напряжение на обмотке возбуждения, В;

$R_{ОВ}$ – сопротивление обмотки возбуждения, Ом.

В случае, если в справочнике не заданы сопротивления обмоток двигателя, то сопротивление якорной цепи можно оценить по приближенной формуле, считая, что половина всех потерь в двигателе приходится на долю переменных потерь:

$$R_{Я} \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{Яном}}{I_{Яном}} \cdot (1 - \eta_{ном}). \quad (2.12)$$

Коэффициент ЭДС и момента может быть определен из выражения естественной электромеханической характеристики, записанной для номинального режима работы двигателя. Выражение для определения этого коэффициента имеет вид:

$$k \cdot \Phi_{ном} = C_{ном} = \frac{U_{Яном} - I_{Яном} \cdot R_{Я}}{\omega_{ном}}, \quad (2.13)$$

где $\omega_{ном}$ – номинальная угловая скорость вала двигателя, рад/с.

В справочнике и на табличке двигателя обычно указывается номинальная частота вращения вала двигателя $n_{ном}$, об/мин. Угловая скорость и частота вращения связаны следующим выражением:

$$\omega = \pi \cdot n / 30. \quad (2.14)$$

Из анализа выражений электромеханической и механической характеристик видно, что они линейны (при $\Phi = \text{const}$). Для двигательного режима работы ДПТ с НВ угловая скорость и ток (момент) имеют одинаковые знаки. Характеристики двигательного режима работы располагаются в I–III квадрантах



плоскости $\{\omega, M\}$. Так как характеристики линейны, то для их построения достаточно рассчитать две точки. Подставляя в выражение требуемой характеристики два значения тока (момента), определяют угловые скорости, соответствующие этим токам (моментам). По полученным двум точкам на плоскости $\{\omega, I_{\text{я}}\}$ или $\{\omega, M\}$ строят требуемую электромеханическую или механическую характеристику. Обычно для расчета первой точки электромеханической (механической) характеристики принимают $I_{\text{я}} = 0$ ($M = 0$), при этом скорость вала двигателя будет равна скорости идеального холостого хода ($\omega = \omega_0$). Скорость идеального холостого хода определяется выражением

$$\omega_0 = \frac{U_{\text{я}}}{k \cdot \Phi}. \quad (2.15)$$

Для расчета второй точки электромеханической (механической) характеристики примем скорость равной нулю. При скорости, равной нулю, имеет место режим короткого замыкания. При этом по цепи якоря протекает ток короткого замыкания. Ток короткого замыкания рассчитывают относительно тока якоря при $\omega = 0$:

$$I_{\text{кз}} = \frac{U_{\text{я}}}{R_{\text{я}\Sigma}}. \quad (2.16)$$

Момент короткого замыкания определяют относительно момента при $\omega = 0$:

$$M_{\text{кз}} = k \cdot \Phi \cdot \frac{U_{\text{я}}}{R_{\text{я}\Sigma}} = k \cdot \Phi \cdot I_{\text{кз}}. \quad (2.17)$$

На рисунках 2.2 и 2.3 представлены статические электромеханические $\{\omega = f(I_{\text{я}})\}$ и механические $\{\omega = f(M)\}$ характеристики ДПТ с НВ соответственно.

Статическая электромеханическая (ЭМХ) и механическая характеристика (МХ), показанные сплошными линиями, построены при условии $k \cdot \Phi = \text{const}$.

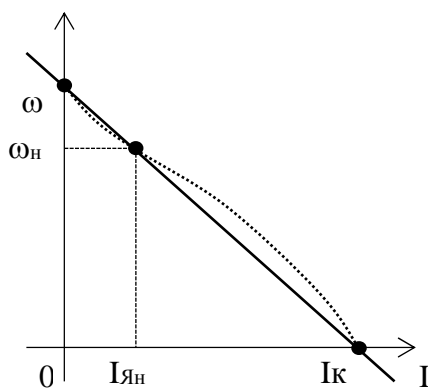


Рисунок 2.2 – Статические ЭМХ ДПТ с НВ

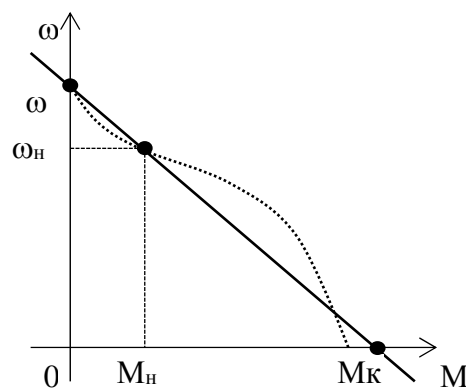


Рисунок 2.3 – Статические МХ ДПТ с НВ



Ввиду того, что ДПТ с НВ имеет определенную перегрузочную способность по току и по моменту (для большинства двигателей общепромышленного применения допустимый ток не превышает трехкратного значения номинального тока якоря ($\lambda_I = 2,5 \dots 3$), и т. к. статические характеристики есть множество точек установившегося режима работы, то область построения статических электромеханических и механических характеристик ДПТ с НВ в двигательном режиме работы должна определяться диапазоном изменения тока якоря в пределах $[0 \dots I_{Ядоп}]$ и момента $[0 \dots M_{доп}]$.

$$I_{Ядоп} = \lambda_I \cdot I_{Яном}, \quad (2.18)$$

$$M_{доп} = k \cdot \Phi \cdot I_{Ядоп} = k \cdot \Phi \cdot \lambda_I \cdot I_{Яном}. \quad (2.19)$$

Поэтому для расчета второй точки электромеханической (механической) характеристики принимают значение тока якоря (момента) из диапазона $[0 \dots I_{Ядоп}]$ ($[0 \dots M_{доп}]$) и рассчитывают угловую скорость, например, в выражение ЭМХ и МХ подставляют номинальные значения тока якоря и момента соответственно и при этих значениях рассчитывают угловую скорость.

На рисунках 2.4 и 2.5 представлены естественные электромеханические и механические характеристики ДПТ с НВ соответственно в допустимых пределах существования тока якоря и момента в установившемся режиме работы.

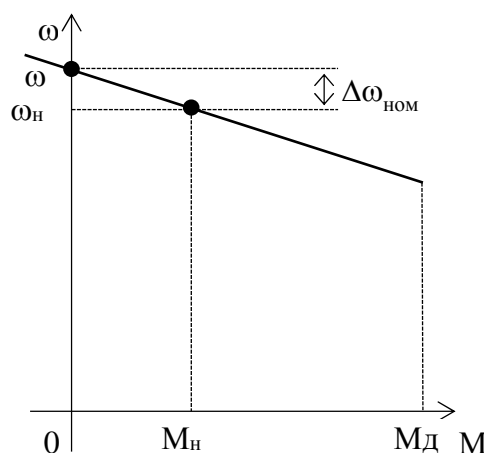
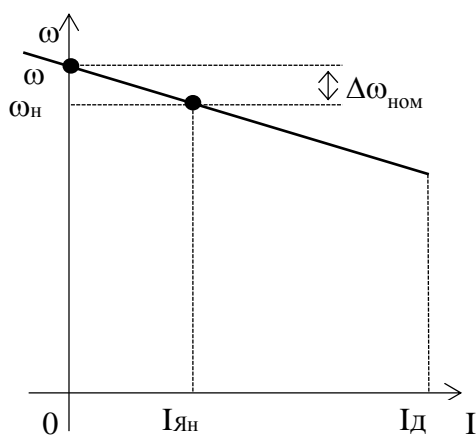


Рисунок 2.4 – Естественная ЭМХ ДПТ с НВ

Рисунок 2.5 – Естественная МХ ДПТ с НВ

2.3 Искусственные статические характеристики ДПТ с НВ

Естественные характеристики (электромеханическая и механическая) определяются номинальными параметрами и нормальной схемой включения ДПТ с НВ. При изменении хотя бы одного из параметров, входящих в выражения механической и электромеханической характеристик (напряжения на якоре, потока двигателя, добавочных сопротивлений) получают характеристики, отличные от естественной. Такие характеристики называют искусственными.



Вид искусственных характеристик обычно оценивают по их расположению относительно естественной статической характеристики, при этом при анализе электромеханической характеристики используют такие параметры, как скорость идеального холостого хода и статическое падение скорости, соответствующее номинальному току якоря.

Скорость идеального холостого хода

$$\omega_0 = \frac{U_{\text{я}}}{k \cdot \Phi} = \frac{U_{\text{я}}}{C}. \quad (2.20)$$

Статическое падение скорости можно определить из выражения электромеханической характеристики ДПТ с НВ:

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{k \cdot \Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{k \cdot \Phi} \cdot I_{\text{я}} = \omega_0 - \Delta\omega,$$

при номинальном токе якоря

$$\Delta\omega_{\text{НОМ}} = \frac{R_{\text{я}}}{k \cdot \Phi} \cdot I_{\text{яНОМ}} = \frac{R_{\text{я}}}{C} \cdot I_{\text{яНОМ}}. \quad (2.21)$$

При анализе механической характеристики используют выражение скорости идеального холостого хода и выражение модуля жесткости механической характеристики.

$$\beta = \left| \frac{dM}{d\omega} \right| = \frac{(k \cdot \Phi)^2}{R_{\text{я}}} = \frac{C^2}{R_{\text{я}}}. \quad (2.22)$$

Характеристика, проходящая через точку идеального холостого хода и параллельная оси абсцисс (момента), будет иметь жесткость, равную бесконечности ($\beta = \infty$), а характеристика, совпадающая с осью ординат (скорости) будет иметь жесткость равную нулю ($\beta = 0$)

С учетом выражения (2.22) статическая механическая характеристика ДПТ с НВ может быть представлена в следующем виде:

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{C} - \frac{M}{\beta} = \omega_0 - \frac{M}{\beta} = \omega_0 - \Delta\omega, \quad (2.23)$$

или

$$M = \beta \cdot (\omega_0 - \omega). \quad (2.24)$$

2.3.1 Искусственные статические характеристики ДПТ с НВ при изменении напряжения на якоре.

Напряжение на якоре ДПТ с НВ можно только уменьшать.



Выражения искусственных статических характеристик электромеханической и механической для этого случая имеют вид:

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{C_{\text{НОМ}}} - \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{НОМ}}} \cdot I_{\text{я}}; \quad (2.25)$$

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{C_{\text{НОМ}}} - \frac{R_{\text{я}}}{(C_{\text{НОМ}})^2} \cdot M. \quad (2.26)$$

На рисунке 2.6 приведены статические электромеханические и механические характеристики ДПТ с НВ при уменьшении напряжения на якоре.

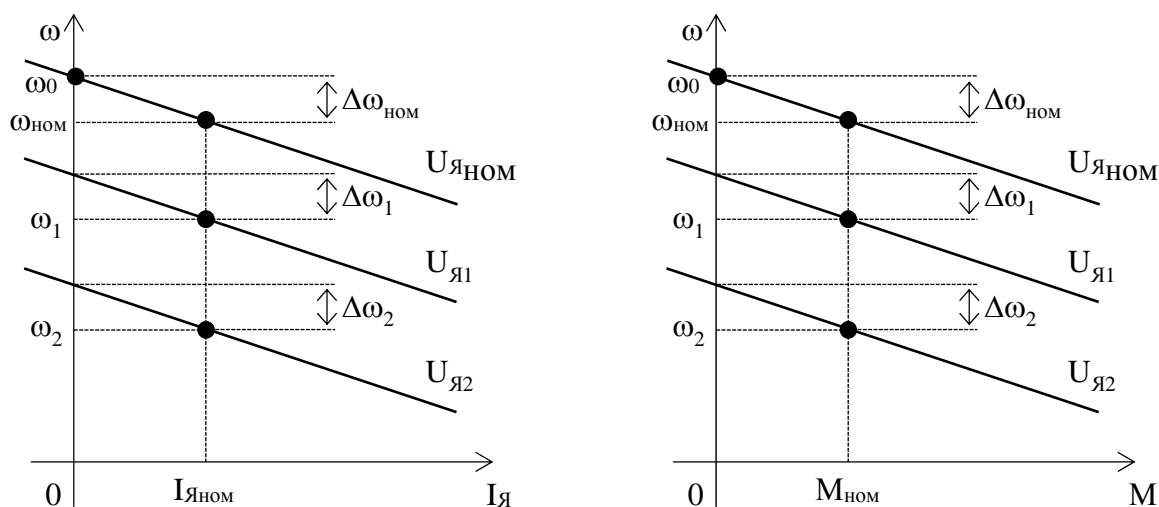


Рисунок 2.6 – Статические ЭМХ и МХ ДПТ с НВ при изменении напряжения якоря, ($U_{\text{я}2} < U_{\text{я}1} < U_{\text{яНОМ}}$)

Расчёт требуемого значения напряжения на якоре ДПТ с НВ для обеспечения требуемой скорости ω_c при моменте M_c осуществляется подстановкой последних в выражение статической механической характеристики. Например, для работы в точке A с моментом M_A и угловой скоростью ω_A требуется уменьшить напряжение на якоре ДПТ с НВ. Тогда требуемое напряжение якоря можно определить по формуле

$$U_{\text{яи}} = C_{\text{НОМ}} \cdot \omega_A + \left(\frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{НОМ}}} \right) \cdot M_A.$$

а искусственную статическую механическую характеристику можно рассчитать и построить по выражению

$$\omega = \frac{U_{\text{яи}}}{C_{\text{НОМ}}} - \frac{R_{\text{я}}}{(C_{\text{НОМ}})^2} \cdot M.$$

2.3.2 Искусственные статические характеристики ДПТ с НВ при изменении магнитного потока.

Характеристики, полученные ослаблением потока возбуждения, называют искусственными характеристиками при ослабленном потоке.

Поток двигателя определяется током обмотки возбуждения. Зависимость потока двигателя от тока возбуждения $\{\Phi = f(I_B)\}$ называется кривой намагничивания двигателя. Ток возбуждения определяется выражением

$$I_B = \frac{U_B}{R_B}, \quad (2.27)$$

где U_B – напряжение на обмотке возбуждения, В;

R_B – сопротивление цепи обмотки возбуждения, Ом.

Согласно выражению (2.27), ток возбуждения пропорционален напряжению возбуждения и обратно пропорционален сопротивлению цепи возбуждения, значит, уменьшить ток в обмотке возбуждения (а следовательно, и поток двигателя) можно либо уменьшая напряжение возбуждения, либо вводя добавочное сопротивление в цепь обмотки возбуждения.

С ослаблением магнитного потока двигателя скорость его идеального холостого хода возрастает, статическое падение скорости увеличивается. Статические характеристики электромеханических и механических ДПТ с НВ при ослаблении потока двигателя, например в 2 раза, приведены на рисунках 2.7 и 2.8 соответственно. Выражения искусственных статических характеристик электромеханической и механической для этого случая имеют вид:

$$\omega = \frac{U_{Яном}}{k \cdot \Phi} - \frac{R_{Я}}{k \cdot \Phi} \cdot I_{Я}; \quad (2.28)$$

$$\omega = \frac{U_{Яном}}{k \cdot \Phi} - \frac{R_{Я}}{(k \cdot \Phi)^2} \cdot M. \quad (2.29)$$

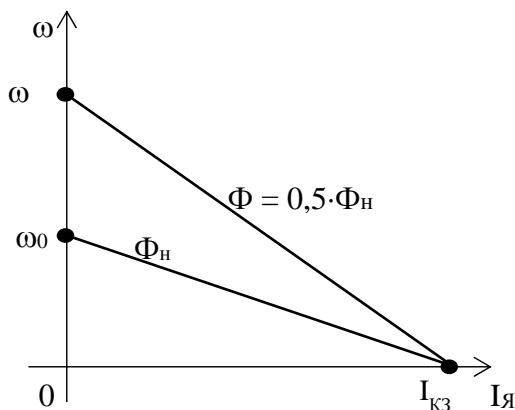


Рисунок 2.7 – Статические электромеханические характеристики ДПТ с НВ при ослаблении потока возбуждения в 2 раза

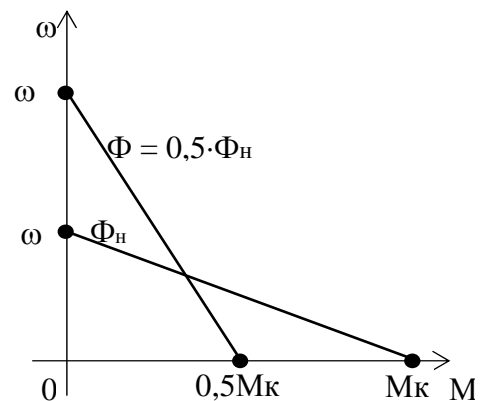


Рисунок 2.8 – Статические механические характеристики ДПТ с НВ при ослаблении потока возбуждения в 2 раза



2.3.3 Искусственные статические характеристики ДПТ с НВ при введении в цепь якоря добавочных сопротивлений.

Искусственная характеристика, полученная введением в цепь якоря добавочного сопротивления (реостата) называется реостатной электромеханической (или механической) характеристикой. Выражения электромеханических и механических реостатных характеристик имеют вид:

$$\omega = \frac{U_{Яном}}{C_{НОМ}} - \frac{R_{Я} + R_{Ядоб}}{C_{НОМ}} \cdot I_{Я}, \quad (2.30)$$

$$\omega = \frac{U_{Яном}}{C_{НОМ}} - \frac{R_{Я} + R_{Ядоб}}{C_{НОМ}^2} \cdot M, \quad (2.31)$$

где $R_{Ядоб}$ – величина добавочного сопротивления, Ом.

При введении в цепь якоря $R_{Ядоб}$ скорость идеального холостого хода не изменяется, все характеристики проходят через точку $\omega = \omega_0$. Статическое падение скорости с увеличением сопротивления якорной цепи возрастает, модуль жесткости статической механической характеристики падает. Механические характеристики с ростом сопротивления якоря становятся мягче. На рисунке 2.9 приведены реостатные электромеханические и механические характеристики ДПТ с НВ.

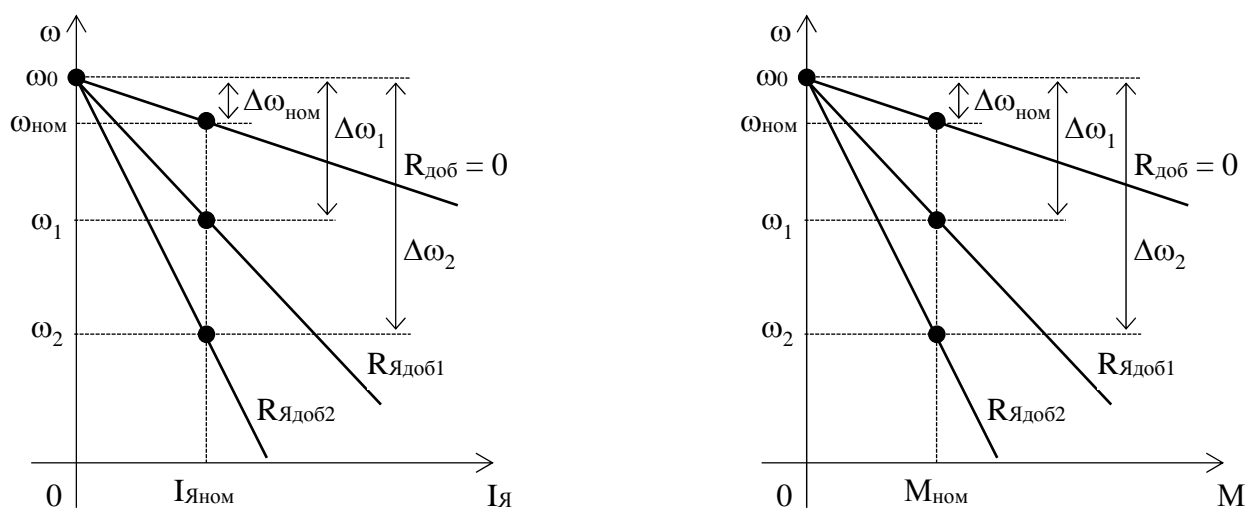


Рисунок 2.9 – Статические ЭМХ и МХ ДПТ с НВ при введении в цепь якоря добавочных сопротивлений ($R_{Ядоб2} > R_{Ядоб1}$)

Расчёт требуемого значения добавочного сопротивления, включённого в цепь якоря ДПТ с НВ для обеспечения требуемой скорости ω_c при моменте M_c , осуществляется подстановкой последних в выражение статической механической характеристики.

2.4 Тормозные режимы работы двигателя постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ с НВ)

Все рассмотренное выше относилось к двигательному режиму работы ДПТ с НВ, когда двигатель потребляет электрическую энергию из сети постоянного тока.

Для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением находят применение следующие тормозные режимы:

- режим торможения противовключением;
- режим динамического торможения;
- режим рекуперативного (генераторного) торможения.

2.4.1 Рекуперативное торможение ДПТ с НВ.

Режим рекуперативного торможения (генераторный режим параллельно с сетью) осуществляется в том случае, когда скорость двигателя оказывается выше скорости идеального холостого хода ω_0 и его ЭДС E больше приложенного напряжения сети $U_{я}$. При этом двигатель работает генератором параллельно с сетью, которой он отдаёт электрическую энергию, ток якоря двигателя и момент изменяют свое направление.

Уравнение механической характеристики двигателя в режиме рекуперативного торможения получается из общего выражения механической характеристики, если изменять в нем знак момента на противоположный:

$$\omega = \frac{U_{я}}{C} + \frac{R_{я}}{C^2} \cdot M. \quad (2.32)$$

Анализ данного выражения показывает, что механическая характеристика двигателя в режиме рекуперативного торможения является продолжением механической характеристики двигательного режима в области II квадранта.

Этот способ торможения является весьма экономичным, т. к. он сопровождается отдачей энергии в сеть. Рекуперативное торможение применяется в приводах транспортных и подъемных механизмов и при некоторых способах регулирования скорости, когда двигатель, переходя к низшим скоростям, проходит значение $\omega > \omega_0$.

В режиме рекуперативного торможения ток в якоре двигателя определяется выражением

$$I_{я} = \frac{E - U_{я}}{R_{я}}. \quad (2.33)$$

2.4.2 Торможение противовключением ДПТ с НВ.

Режим торможения противовключением (генераторный режим последовательно с сетью) получается в том случае, когда обмотки двигателя включены для одного направления вращения, а якорь двигателя под воздействием внешнего момента или сил инерции вращается в противоположную сторону. Это может происходить, например, в приводе подъемника (рисунок 2.10); вначале



двигатель работая на естественной МХ при моменте M_C развивал скорость ω_C (точка A), затем для торможения в цепь якоря вводилось добавочное сопротивление $R_{ПВ}$. Привод переходит работать на искусственную характеристику, и моменту на валу M_C соответствует статическая скорость, равная $\omega_{ПВ}$ (точка B). Но переход с рабочей точки A в точку B осуществляется только через точку C , т. к. при включении двигателя на характеристику 2 он имеет некоторую скорость (в данном случае ω_C), а этой скорости на МХ 2 соответствует точка C . Таким образом, двигатель включен на подъем, а момент, развиваемый грузом, заставляет привод вращаться в сторону спуска груза. Такой же энергетический режим получается и при переключении двигателя для быстрой остановки на противоположное направление вращения путем изменения полярности напряжения, подводимого к якорю двигателя (рисунок 2.11).

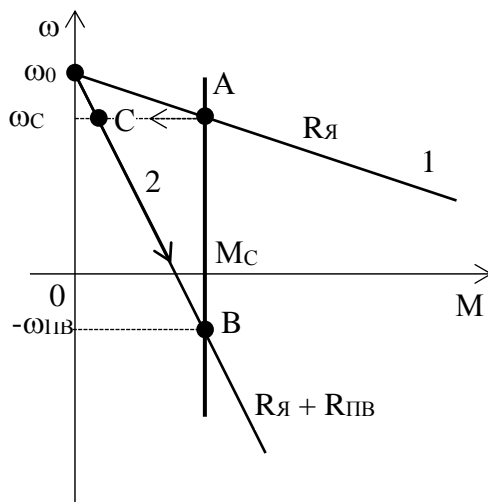


Рисунок 2.10 – Статические механические характеристики ДПТ с НВ в режиме торможения противовключением при активном моменте нагрузки на валу

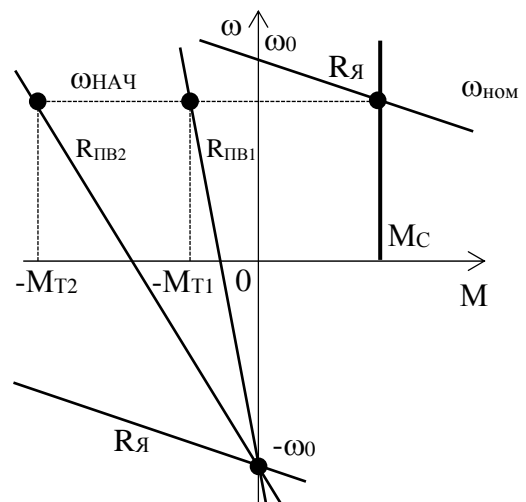


Рисунок 2.11 – Статические механические характеристики ДПТ с НВ в режиме торможения противовключением при реверсе двигателя ($R_{ПВ1} > R_{ПВ2}$)

В первом случае якорь вращается под действием груза в сторону, противоположную действию момента, развиваемого двигателем, поэтому ЭДС двигателя изменит свое направление наоборот и станет согласной приложенному напряжению сети.

Во втором случае благодаря кинетической энергии привода якорь двигателя будет продолжать вращаться в том же направлении и, следовательно, сохранит направление ЭДС, но она теперь будет направлена согласно приложенному напряжению сети. В режиме торможения противовключением ток в якоре двигателя определяется выражением

$$I_{я} = \frac{U_{я} + E}{R_{я} + R_{ПВ}}. \quad (2.34)$$

Для ограничения тока якоря до допустимой для двигателя величины $I_{Ядоп}$ в цепь якоря ДПТ с НВ при торможении противовключением необходимо ввести дополнительное сопротивление $R_{ПВ}$, рассчитываемое по формуле

$$R_{ПВ} = \frac{U_{Я} + E_{\max}}{I_{Ядоп}} - R_{Я}, \quad (2.35)$$

где E_{\max} – максимальное значение ЭДС двигателя, В,

$$E_{\max} = k \cdot \Phi \cdot \omega_{нач}, \quad (2.36)$$

где $\omega_{нач}$ – скорость двигателя до начала торможения, рад/с.

В режиме торможения противовключением к двигателю со стороны сети подводится мощность ($P_{ЭЛ} = U_{Я} \cdot I_{Я}$), а со стороны вала механическая ($P_{МЕХ} = E \cdot I_{Я}$), и вся она расходуется в цепи якоря на потери:

$$P_{ЭЛ} + P_{МЕХ} = I_{Я}^2 \cdot (R_{Я} + R_{ПВ}). \quad (2.37)$$

Этот режим обеспечивает интенсивность торможения при сравнительно мало изменяющемся тормозном моменте, но сопровождается потреблением энергии из сети и значительным нагревом двигателя.

Уравнение статической механической характеристики двигателя в режиме торможения противовключением имеет вид:

$$\omega = -\frac{U_{Я}}{C} + \frac{R_{Я}}{C^2} \cdot M. \quad (2.38)$$

2.4.3 Динамическое торможение ДПТ с НВ.

Режим динамического торможения (генераторный режим независимый от сети) происходит при отключении якоря двигателя от сети и замыкании его на внешнее сопротивление (обмотка возбуждения остается подключенной к сети). При этом кинетическая энергия, запасенная в двигателе и в движущихся частях приводного им механизма, преобразуется в электрическую энергию и выделяется в виде тепла в сопротивлениях цепи якоря, т. е. машина будет работать в режиме генератора, создавая тормозной момент.

Вследствие того, что ЭДС двигателя сохраняет при торможении такой же знак, как и в двигательном режиме, а напряжение извне к якорю не прикладывается, ток якоря определяется по формуле

$$I_{Я} = \frac{E}{R_{Я} + R_{ДТ}}. \quad (2.39)$$



Величина тормозного сопротивления $R_{ДТ}$ рассчитывается из условия, что при номинальной скорости вращения якоря его ток не превышал бы допустимого значения $I_{Доп}$:

$$R_{ДТ} = \frac{E_{\max}}{I_{Я\text{доп}}} - R_{Я}. \quad (2.40)$$

Уравнение механической характеристики двигателя при динамическом торможении может быть получено из общего выражения механической характеристики при $U_{Я} = 0$:

$$\omega = -\frac{R_{Я} + R_{ДТ}}{C^2} \cdot M. \quad (2.41)$$

Анализ выражения (2.41) показывает:

- 1) механические характеристики двигателя при динамическом торможении представляют собой прямые, проходящие через начало координат;
- 2) крутизна характеристики определяется величиной сопротивления цепи якоря;
- 3) тормозной момент возрастает с уменьшением тормозного сопротивления;
- 4) с уменьшением скорости ДПТ тормозной момент уменьшается и при скорости, равной нулю, становится также равен нулю ($\omega = 0, M_T = 0$).

Динамическое торможение используется также для получения посадочных (низких) скоростей при спуске грузов в подъемно-транспортных механизмах.

С энергетической точки зрения этот способ торможения выгоднее торможения противовключением, т. к. в процессе такого торможения из сети потребляется энергия только цепью возбуждения.

2.5 Статические электромеханические и механические характеристики асинхронного двигателя (АД)

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором находят широкое применение в приводах роботов и манипуляторов благодаря простоте их конструкции, надежности в эксплуатации, высоким энергетическим показателям и сравнительно низкой стоимости.

Момент электромагнитный, развиваемый асинхронным двигателем определяется выражением

$$M = \frac{3 \cdot U_{\phi}^2 \cdot R_2' / s}{\omega_0 \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right]} = \frac{3 \cdot U_{\phi}^2 \cdot R_2' / s}{\omega_0 \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + X_k^2 \right]}, \quad (2.42)$$

где U_{ϕ} – действующее значение фазного напряжения сети, В;



R_1, R'_2 – активные сопротивления обмоток фазы статора и фазы ротора соответственно, приведенные к цепи статора, Ом;

X_1, X'_2 – индуктивные сопротивления обмоток фазы статора и фазы ротора соответственно, приведенные к цепи статора, Ом;

X_k – индуктивное фазное сопротивление короткого замыкания, Ом;

s – скольжение двигателя;

ω_0 – угловая скорость поля двигателя, рад/с.

Индуктивное фазное сопротивление короткого замыкания

$$X_k = X_1 + X'_2. \quad (2.43)$$

Скольжение двигателя – это относительный параметр, характеризующий отставание или опережение скорости вала двигателя скорости поля по отношению к скорости поля:

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}. \quad (2.44)$$

Угловая скорость поля

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p}, \quad (2.45)$$

где f – частота напряжения питающей сети, Гц;

p – число пар полюсов двигателя.

Номинальную угловую скорость двигателя можно определить, зная номинальную частоту вращения $n_{НОМ}$, об/мин, по выражению

$$\omega_{НОМ} = \frac{\pi \cdot n_{НОМ}}{30}. \quad (2.46)$$

Номинальное скольжение двигателя

$$s_{НОМ} = \frac{\omega_0 - \omega_{НОМ}}{\omega_0}. \quad (2.47)$$

Статическую механическую характеристику АД $\omega = f(M)$ (здесь M – момент электромагнитный) можно построить, используя формулу (2.42) и уравнение связи между угловой скоростью вала двигателя и скольжением:

$$\omega = \omega_0 \cdot (1 - s). \quad (2.48)$$

С учетом того, что момент электромагнитный по формуле (2.42) имеет экстремум (критическое значение), то возможна и другая форма записи зависимости $M = f(s)$, называемая формулой Клосса:



$$M = \frac{2 \cdot M_k \cdot (1 + a \cdot s_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2 \cdot a \cdot s_k}, \quad (2.49)$$

где M_k – максимальное (критическое) значение момента, Н·м;

s_k – критическое скольжение, соответствующее M_k ;

a – параметр, $a = R_1/R'_2$.

Момент критический и скольжение критическое определяются выражениями:

$$M_k = \pm \frac{3 \cdot U_\phi^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot (R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_k^2})}; \quad (2.50)$$

$$s_k = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}}. \quad (2.51)$$

Для асинхронных двигателей большой мощности ($P_{2НОМ} > 100$ кВт) сопротивление R_1 невелико, тогда можно считать, что $R_1 \ll X_k$ и $a \cdot s_k \ll 1$. Уравнение механической характеристики в этом случае будет определяться как

$$M = \frac{2 \cdot M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}; \quad s_k = \pm \frac{R'_2}{X_k}; \quad M_k = \pm \frac{3 \cdot U_\phi^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot X_k}; \quad \omega = \omega_0 \cdot (1 - s).$$

Обычно в каталогах на асинхронные двигатели не приведены параметры схемы замещения (активные и индуктивные сопротивления фаз обмоток), поэтому вышеприведенные формулы имеют ограниченное применение для расчета статических характеристик АД. В каталогах на асинхронные двигатели, помимо номинальных данных ($P_{2НОМ}$, $n_{НОМ}$, $\cos\phi_{НОМ}$, $\eta_{НОМ}$ и др.), приводится также кратность максимального момента в двигательном режиме по отношению к номинальному моменту $\mu_k = M_k/M_{НОМ}$. Кратность максимального момента иногда обозначают как $\lambda = \mu_k$. Умножив номинальный момент двигателя на кратность максимального момента, нетрудно найти значение критического момента, используемого в формуле (2.49).

Значение s_k в каталогах не приводится, но оно может быть найдено по известным параметрам асинхронного двигателя.

При этом для машин малой мощности, у которых $R_1 \approx R'_2$, можно принять $a \approx 1$, тогда

$$s_k = s_{НОМ} \cdot \frac{\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1 + 2 \cdot s_{НОМ} \cdot (\lambda - 1)}}{1 - 2 \cdot s_{НОМ} \cdot (\lambda - 1)}, \quad (2.52)$$

а для машин большой мощности, у которых $R_1 \approx 0$, можно принять $a \approx 0$, тогда



$$s_k = s_{НОМ} \cdot \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right). \quad (2.53)$$

Таким образом, используя приведенные формулы, можно рассчитать статическую механическую характеристику асинхронного двигателя $\omega = f(M)$ по каталожным данным. Для этого необходимо, изменяя скольжение в требуемых пределах с определенным шагом, вычислять значения момента и значения скорости. Рассчитанная таким образом характеристика будет представлять собой зависимость угловой скорости вала асинхронного двигателя от момента на его валу.

Чтобы определить скорость, с которой будет вращаться двигатель при заданном моменте нагрузки на валу, в формулу (2.49) необходимо подставить вместо M заданное значение момента статического M_C и решить его относительно скольжения. Следует иметь в виду, что решение даст два значения скольжения. Необходимо для дальнейших расчетов выбрать нужное значение s (оно должно быть больше нуля, но меньше s_k). Затем для выбранного значения s по (2.48) определить угловую скорость двигателя.

Статическую электромеханическую характеристику асинхронного двигателя $\omega = f(I_1)$ можно рассчитать, используя приближенную формулу, предложенную В. А. Шубенко – зависимость $I_1 = f(s)$ и формулу связи угловой скорости и скольжения двигателя. Формула В. А. Шубенко имеет вид:

$$I_1 \approx \sqrt{I_0^2 + \left(I_{1НОМ}^2 - I_0^2 \right) \cdot \frac{M \cdot s}{M_{НОМ} \cdot s_{НОМ}}}, \quad (2.54)$$

где I_1 – ток фазы статора, А;

$I_{1НОМ}$ – номинальный ток фазы статора двигателя, А;

I_0 – ток холостого хода двигателя, А;

$M, M_{НОМ}$ – момент двигателя при скольжении s , который определяется при расчете механической характеристики, и номинальный момент двигателя соответственно, Н·м;

$s, s_{НОМ}$ – скольжение двигателя текущее и номинальное соответственно.

Номинальный ток статора и ток холостого хода можно определить по каталожным данным асинхронного двигателя по следующим формулам:

$$I_{1НОМ} = \frac{P_{2НОМ}}{3 \cdot U_{ФНОМ} \cdot \eta_{НОМ} \cdot \cos \varphi_{НОМ}} = \frac{P_{2НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{ЛНОМ} \cdot \eta_{НОМ} \cdot \cos \varphi_{НОМ}}; \quad (2.55)$$

$$I_0 \approx I_{1НОМ} \cdot \left(\sin \varphi_{НОМ} - \frac{1}{2 \cdot \mu_k} \cdot \cos \varphi_{НОМ} \right). \quad (2.56)$$



3 Энергетика и основы выбора мощности электропривода

Производственные механизмы по характеру изменения нагрузки на валу двигателя могут быть отнесены к нескольким группам с типовыми рабочими режимами. Наиболее характерными для промышленных электроприводов являются три режима:

1) **продолжительный режим** работы, характеризующийся тем, что рабочий период в этом режиме столь велик, что температура двигателя достигает своего установившегося значения;

2) **кратковременный режим**, характеризующийся тем, что в рабочий период температура двигателя не успевает достигнуть установившегося значения, а пауза столь длительна, что температура двигателя снижается до температуры окружающей среды;

3) **повторно-кратковременный режим**, характеризующийся тем, что в рабочий период температура двигателя не достигает установившегося значения, а во время паузы двигатель не успевает охладиться до температуры окружающей среды.

Для различных режимов работы производственных механизмов выпускаются соответствующие двигатели различных номинальных режимов работы. Основными номинальными режимами работы электрических двигателей считаются режимы S1, S2, S3.

Номинальным длительным режимом работы (S1) электрического двигателя называется режим работы его при неизменной нагрузке, продолжающийся до тех пор, пока превышения температуры всех частей электродвигателя достигнут установившегося значения.

Номинальным кратковременным режимом работы (S2) электрического двигателя называется режим, при котором период неизменной номинальной нагрузки чередуется с периодом отключения двигателя; при этом периоды нагрузки не настолько длительны, чтобы превышения температуры двигателя могли достигнуть установившихся значений, а периоды остановки настолько длительны, что все части его охлаждаются до температуры окружающей среды. Для кратковременного режима работы выпускаются электродвигатели со стандартными продолжительностями рабочего периода $t_{РАБ} = 15, 30, 60, 90$ мин.

Номинальным повторно-кратковременным режимом работы (S3) электрического двигателя называется режим, при котором кратковременные периоды неизменной номинальной нагрузки (рабочие периоды) чередуются с периодами отключения двигателя (паузами), причем как рабочие периоды, так и паузы не настолько длительны, чтобы превышения температуры частей двигателя могли достигнуть установившихся значений. При номинальном повторно-кратковременном режиме работы S3 продолжительность цикла составляет 10 мин. Повторно-кратковременный режим работы характеризуется относительной продолжительностью включения:

$$ПВ = \frac{t_P}{t_P + t_O} \cdot 100 \% = \frac{t_P}{T_{Ц}} \cdot 100 \% ,$$

где t_P – время работы;

t_O – время паузы;

$T_{Ц}$ – время цикла.

Промышленностью выпускаются двигатели номинального режима работы S3 со следующими стандартными значениями $ПВ_{СТ}$: = 15, 25, 40, 60 %.

По графику нагрузочной диаграммы ($M_C = f(t)$), построенной для характерного цикла работы, можно определить режим работы промышленной установки, а также какого номинального режима работы следует выбрать двигатель. Условия нагрева электрических двигателей для различных режимов неодинаковы, в связи с чем и методы выбора двигателей по мощности различны. Для каждого из режимов работы существуют свои расчетные формулы для определения требуемой мощности двигателя.

Если в нагрузочной диаграмме механизма отсутствуют паузы (периоды отключения двигателя), то такой механизм работает в продолжительном режиме и для него следует выбирать двигатель номинального длительного режима работы S1.

Если нагрузка в течение периода работы постоянная (колебания момента на валу двигателя не более 10 % от его среднего значения) или нагрузка изменяется, но при этом продолжительность периода с неизменной нагрузкой больше, чем три постоянные времени нагрева ($t_{РАБ} > 3T_{НАГ}$), то расчетную мощность двигателя $P_{РАСЧ}$, Вт, при известной его скорости определяют по выражению

$$P_{РАСЧ} = M_{C_{\max}} \cdot \omega_{НОМ} , \quad (3.1)$$

где $M_{C_{\max}}$ – максимальное значение статического момента, Н·м;

$\omega_{НОМ}$ – номинальная угловая скорость двигателя, рад/с.

Постоянная времени нагрева двигателя $T_{НАГ}$ может составлять от нескольких десятков минут до нескольких часов в зависимости от типа двигателя. Для двигателей общепромышленного назначения средней мощности постоянная времени нагрева лежит в пределах от 20 до 90 мин. Постоянная времени охлаждения $T_{ОХЛ}$ несколько больше постоянной времени нагрева.

За время работы двигатель нагреется до установившейся температуры если время работы двигателя больше, чем три постоянные времени нагрева ($t_{РАБ} > 3T_{НАГ}$).

Чтобы двигатель во время работы не перегревался, по каталогу следует выбрать двигатель номинального режима работы S1с требуемой номинальной скоростью и с ближайшей большей номинальной мощностью $P_{ДВ.НОМ} \geq P_{РАСЧ}$.

Если в нагрузочной диаграмме механизма отсутствуют паузы и нагрузка изменяется относительно $3T_{НАГ}$, то такой механизм работает в продолжительном режиме и для него следует выбирать двигатель номинального длительного режима работы S1. Расчетную мощность двигателя находят по выражению



$$P_{РАСЧ} = M_{ЭКВ} \cdot \omega_{НОМ} , \quad (3.2)$$

где $M_{ЭКВ}$ – эквивалентное значение статического момента, Н·м;

$\omega_{НОМ}$ – номинальная угловая скорость двигателя, рад/с.

Эквивалентное значение статического момента для такого режима работы находят по выражению

$$M_{ЭКВ} = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + \dots + M_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + \dots + M_n^2 \cdot t_n}{T_{Ц}}} , \quad (3.3)$$

где M_1, M_2, \dots, M_n – значения статических моментов из нагрузочной диаграммы, Н·м;

t_1, t_2, \dots, t_n – значения интервалов времени, соответствующие заданным статическим моментам.

Двигатель для данного режима работы следует выбрать номинального режима работы $S1$ с требуемой номинальной скоростью и с ближайшей большей номинальной мощностью $P_{ДВ.НОМ} \geq P_{РАСЧ}$.

Если в нагрузочной диаграмме механизма есть паузы и время цикла больше 10 мин ($T_{Ц} = \Sigma t_P + \Sigma t_O > 10$ мин), при этом длительность работы механизма невелика ($t_{РАБ} < 3T_{НАГ}$), а длительность пауз такова, что двигатель не успевает остыть до температуры окружающей среды ($t_{ПАУЗ} < 3T_{ОХЛ}$), то для такого механизма следует выбирать двигатель номинального длительного режима работы $S1$, но при расчете мощности необходимо учитывать изменение теплоотдачи двигателя при изменениях скорости, пусках, торможениях и остановках. Изменение теплоотдачи двигателя в расчетных формулах учитывают коэффициентами ухудшения охлаждения двигателя. Расчетную мощность двигателя определяют по выражению (3.2). Эквивалентное значение статического момента для такого режима работы определяют по выражению

$$M_{ЭКВ} = \sqrt{\frac{M_{П}^2 \cdot t_{П} + M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + \dots + M_n^2 \cdot t_n + M_{Т}^2 \cdot t_{Т}}{\beta_{П} \cdot t_{П} + t_1 + t_2 + \dots + t_n + \beta_{Т} \cdot t_{Т} + \beta_{О} \cdot t_{О}}} , \quad (3.4)$$

где $M_{П}, M_{Т}$ – значения моментов при пуске и торможении, Н·м;

$t_{П}, t_{Т}, t_{О}$ – времена пуска, торможения и паузы;

$\beta_{О}$ – коэффициент, учитывающий ухудшение условий охлаждения во время паузы;

$\beta_{П}, \beta_{Т}$ – коэффициенты, учитывающие ухудшение условий охлаждения во время пуска и торможения, $\beta_{П} = \beta_{Т} = (1 + \beta_{О})/2$.

При расчетах обычно принимают следующие значения $\beta_{О}$: 0,25...0,35 – для двигателей открытого и защищенного исполнения с вентилятором на валу; 0,30...0,55 – для закрытых обдуваемых двигателей с ребристой поверхностью; 0,70...0,98 – для двигателей закрытого исполнения без обдува; 1,0 – для двигателей с независимой вентиляцией от отдельного вентилятора.



Для данного режима работы следует выбрать двигатель номинального режима работы S1c требуемой номинальной скоростью, с принятым способом охлаждения, с ближайшей большей номинальной мощностью $P_{ДВ.НОМ} \geq P_{РАСЧ}$.

Если в нагрузочной диаграмме механизма есть паузы и время цикла не больше 10 мин ($T_{Ц} = \Sigma t_P + \Sigma t_O \leq 10$ мин), то для такого механизма следует выбирать двигатель номинального повторно-кратковременного режима работы S3. Расчетную мощность двигателя $P_{РАСЧ(ПВСТ)}$, Вт, определяют по выражению

$$P_{РАСЧ(ПВСТ)} = \omega_{НОМ} \cdot M_{ЭКВ} \cdot \sqrt{\frac{ПВ_{РАСЧ}}{ПВ_{СТ}}}, \quad (3.5)$$

где $M_{ЭКВ}$ – эквивалентное значение статического момента, Н·м;

$\omega_{НОМ}$ – номинальная угловая скорость двигателя, рад/с;

$ПВ_{РАСЧ}$ – расчетное значение продолжительности включения, %;

$ПВ_{СТ}$ – стандартное значение продолжительности включения, %.

Эквивалентное значение момента $M_{ЭКВ}$, Н·м, для этого режима работы

$$M_{ЭКВ} = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_{P1} + M_2^2 \cdot t_{P2} + \dots + M_n^2 \cdot t_{Pn}}{T_{Ц} - t_O}}, \quad (3.6)$$

где M_1, M_2, \dots, M_n – значения моментов из нагрузочной диаграммы, Н·м;

t_1, t_2, \dots, t_n – значения интервалов времени, соответствующие заданным статическим моментам;

$T_{Ц}$ – время цикла;

t_O – суммарное время пауз.

Продолжительность включения расчетную определяют по выражению

$$ПВ_{РАСЧ} = \frac{\Sigma t_P}{\Sigma t_P + \Sigma t_O} \cdot 100 \% = \frac{\Sigma t_P}{T_{Ц}} \cdot 100 \%, \quad (3.7)$$

где Σt_P – суммарное время работы; $\Sigma t_P = t_{P1} + t_{P2} + \dots + t_{Pn}$;

Σt_O – суммарное время пауз; $\Sigma t_O = t_{O1} + t_{O2} + \dots + t_{On}$;

$T_{Ц}$ – время цикла.

Продолжительность включения стандартную выбирают из ряда (15, 25, 40, 60 %), принимая ближайшее большее значение по отношению к расчетной продолжительности включения.

Для данного режима работы следует выбрать двигатель номинального режима работы S3 с принятой в расчетах стандартной продолжительностью включения $ПВ_{СТ}$, с требуемой номинальной скоростью, с ближайшей большей номинальной мощностью $P_{ДВ.НОМ(ПВСТ)} \geq P_{РАСЧ(ПВСТ)}$.

Если в нагрузочной диаграмме есть паузы, причем продолжительность работы механизма невелика ($t_{РАБ} < 3T_{НАГ}$), а продолжительность пауз достаточна



для охлаждения двигателя до температуры окружающей среды ($t_{ПВЗ} > 3T_{ОХЛ}$), то такой механизм работает в кратковременном режиме. Для такого механизма выбирают двигатель номинального кратковременного режима работы S2.

Ввиду ограниченного объема методических рекомендаций формулы для расчета мощности двигателя для рассматриваемого режима работы не приводятся. Ознакомиться с методикой расчета мощности и выбора двигателя для номинального кратковременного режима работы можно по литературе, приведенной в конце методических рекомендаций.

Таким образом, производится расчет мощности двигателя по нагреву в зависимости от номинального режима работы. После того как двигатель выбран по каталогу, его необходимо проверить по условиям перегрузочной способности, а асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором – и по условиям пуска.

Чтобы выбранный двигатель подходил по перегрузочной способности, должно выполняться условие

$$M_{ДВ.ДОП.} \geq M_{Сmax}, \quad (3.8)$$

где $M_{ДВ.ДОП.}$ – допустимый максимальный момент двигателя, Н·м;

$M_{Сmax}$ – максимальный статический момент (из нагрузочной диаграммы), Н·м.

Для асинхронных двигателей допустимый максимальный момент следует определять с учетом возможного снижения напряжения питающей сети:

$$M_{ДВ.ДОП.} = M_k \cdot \left(\frac{U_1}{U_{1НОМ}} \right)^2, \quad (3.9)$$

где M_k – критический (максимальный) момент АД, Н·м;

U_1 – пониженное (заданное) напряжение питающей сети, В;

$U_{1НОМ}$ – номинальное напряжение питающей сети, В.

Критический момент асинхронного двигателя можно определить по каталожным данным. Как правило, в каталогах приводится кратность критического (максимального) момента по отношению к номинальному.

$$M_k = \mu_k \cdot M_{НОМ} = \mu_k \cdot \frac{P_{2НОМ}}{\omega_{НОМ}} = \left(\frac{M_k}{M_{НОМ}} \right) \cdot \frac{P_{2НОМ}}{\omega_{НОМ}}, \quad (3.10)$$

где $P_{2НОМ}$ – мощность на валу номинальная, Вт;

$\omega_{НОМ}$ – угловая скорость номинальная, рад/с.

Если в процессе работы асинхронного привода напряжение питающей сети уменьшится, например на 20 %, то условие пригодности двигателя по перегрузочной способности будет иметь вид:



$$M_{ДВ.ДОП.} = M_k \cdot \left(\frac{U_1}{U_{1НОМ}} \right)^2 = M_k \cdot \left(\frac{0,8 \cdot U_{1НОМ}}{U_{1НОМ}} \right)^2 = M_k \cdot 0,64 \geq M_{C \max}.$$

Условие пригодности выбранного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по условиям пуска имеет вид:

$$M_{ДВ.ПУСК} \geq M_{C.ПУСК}, \quad (3.11)$$

где $M_{ДВ.ПУСК}$ – момент двигателя при пуске, Н·м;

$M_{C.ПУСК}$ – статический момент при пуске (из $M_C = f(t)$), Н·м.

Для асинхронных двигателей пусковой момент также следует определять с учетом возможного снижения напряжения питающей сети:

$$M_{ДВ.ПУСК.} = M_{П} \cdot \left(\frac{U_1}{U_{1НОМ}} \right)^2, \quad (3.12)$$

где $M_{П}$ – момент асинхронного двигателя при пуске, Н·м.

Момент двигателя при пуске можно определить по каталожным данным. Как правило, в каталогах приводится кратность пускового момента по отношению к номинальному.

$$M_{П} = \mu_{П} \cdot M_{НОМ} = \mu_{П} \cdot \frac{P_{2НОМ}}{\omega_{НОМ}} = \left(\frac{M_{П}}{M_{НОМ}} \right) \cdot \frac{P_{2НОМ}}{\omega_{НОМ}}, \quad (3.13)$$

где $P_{2НОМ}$ – мощность на валу номинальная, Вт;

$\omega_{НОМ}$ – угловая скорость номинальная, рад/с.

Если в процессе работы асинхронного привода напряжение питающей сети уменьшится, например на 20 %, то условие пригодности двигателя по условиям пуска будет иметь вид:

$$M_{ДВ.ПУСК.} = M_{П} \cdot \left(\frac{U_1}{U_{1НОМ}} \right)^2 = M_{П} \cdot \left(\frac{0,8 \cdot U_{1НОМ}}{U_{1НОМ}} \right)^2 = M_{П} \cdot 0,64 \geq M_{C \max}.$$

Электрические двигатели общепромышленного применения рассчитаны на работу с температурой окружающей среды $\theta_{ОКР} = 40$ °С. Если температура окружающей среды отличается от температуры, на которую рассчитана эксплуатация двигателя, то выбранный двигатель следует проверить на пригодность работы в этих изменившихся условиях.

Условия пригодности двигателя для работы при повышении температуры окружающей среды имеет вид:



$$M_{НОМ} = \frac{P_{2НОМ}}{\omega_{НОМ}} \geq M_{ЭКВ} \cdot \frac{\theta_{ДОП} - \theta_{ОКР}}{\theta_{ДОП} - 40}, \quad (3.14)$$

где $M_{ЭКВ}$ – эквивалентный момент, определенный по нагрузочной диаграмме с учетом режима работы, Н·м;

$\theta_{ДОП}$ – допустимая температура двигателя, определяемая классом изоляции, °С;

$\theta_{ОКР}$ – температура окружающей среды, в которой эксплуатируется двигатель, °С;

4 Типовые задачи по механике электропривода и их решение

Задача 1. Задан механизм подъёмного устройства, кинематическая схема которого приведена на рисунке 4.1.

Двигатель через соединительную муфту $см_1$, двухступенчатый цилиндрический редуктор, соединительную муфту $см_2$ и передачу барабан–канат (Б-к) поднимает и опускает груз массой m .

Передаточное отношение первой и второй ступени цилиндрического редуктора соответственно $i_1 = 5$ и $i_2 = 4$; диаметр барабана $D_B = 0,6$ м; номинальная частота вращения двигателя – 1000 об/мин.

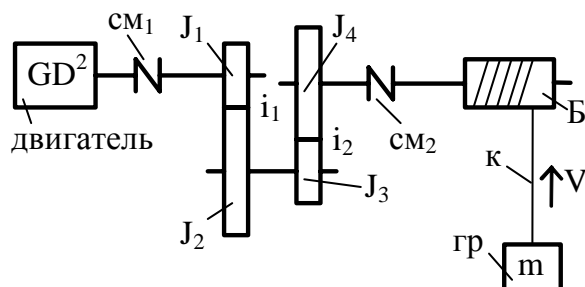


Рисунок 4.1 – Кинематическая схема механизма

Определить линейную скорость подъёма груза при номинальной скорости вращения двигателя.

Решение

Линейная скорость груза связана с угловой скоростью вала двигателя соотношением

$$V_{ГР} = \omega_{ДВ} \cdot \rho,$$

где ρ – радиус приведения, м.

$$\rho = \frac{D_B}{2 \cdot i_p},$$

где i_p – передаточное отношение редуктора, $i_p = i_1 \cdot i_2 = 5 \cdot 4 = 20$.

Тогда

$$\rho = \frac{0,6}{2 \cdot 20} = 0,015 \text{ м.}$$

Угловая скорость двигателя связана с его частотой вращения следующим соотношением:

$$\omega_{ДВ} = \frac{\pi \cdot n_{ДВ}}{30},$$

где $n_{ДВ}$ – частота вращения вала двигателя, об/мин.

Тогда

$$\omega_{ДВ} = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 104,7 \text{ рад/с.}$$

Определяем линейную скорость подъёма груза:

$$V_{ГР} = 104,7 \cdot 0,015 = 1,57 \text{ м/с.}$$

Ответ: Линейная скорость груза равна 1,57 м/с.

Задача 2. Для механизма подъёмного устройства, кинематическая схема которого приведена на рисунке 4.1, определить момент статический, приведенный к валу двигателя при подъёме и при опускании груза, если коэффициент полезного действия каждой пары зубчатой передачи с учетом подшипников равен 0,9, коэффициент полезного действия передачи барабан – канат равен 0,8, масса груза $m = 1,5$ т.

Остальные данные см. в задаче 1.

Решение

Момент статический, приведенный к валу двигателя, при подъёме груза определяем по формуле

$$M_C^\uparrow = \frac{G \cdot D_B}{2 \cdot i_p \cdot \eta} = \frac{G \cdot \rho}{\eta},$$

где G – вес поднимаемого груза, Н;

η – общий КПД механических передач.



$$G = m \cdot g = 1500 \cdot 9,81 = 14715 \text{ Н.}$$

$$\eta = \eta_{\text{шп}}^2 \cdot \eta_{\text{Б-к}} = 0,9^2 \cdot 0,7 = 0,648.$$

Тогда момент статический, приведенный к валу двигателя при подъёме груза, рассчитываем следующим образом:

$$M_C^{\uparrow} = \frac{14715 \cdot 0,015}{0,648} = 340,6 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Момент статический, приведенный к валу двигателя при опускании груза, определяем как

$$M_C^{\downarrow} = G \cdot \rho \cdot \left(2 - \frac{1}{\eta}\right) = 14715 \cdot 0,015 \cdot \left(2 - \frac{1}{0,648}\right) = 100,8 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Ответ: момент статический, приведенный к валу двигателя, при подъёме груза равен 340,6 Н·м, при опускании – 100,8 Н·м.

Задача 3. Для приведенной кинематической схемы механизма подъёма (см. рисунок 4.1) составить расчётную схему механической части электропривода, если маховый момент инерции двигателя $GD^2 = 30 \text{ Н}\cdot\text{м}^2$; моменты инерции зубчатых шестерен и колес редуктора $J_1 = 0,1 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $J_2 = 1,4 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $J_3 = 0,2 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $J_4 = 2,4 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; моменты инерции соединительных муфт $J_{\text{СМ1}} = 0,12 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ и $J_{\text{СМ2}} = 0,2 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; момент инерции барабана $J_B = 8,5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; жесткость 1 м каната $C_{1м} = 2 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}$; высота подъёма и опускания груза $H = 10 \text{ м}$; жёсткость муфт $C_{\text{СМ1}} = 2 \cdot 10^{11} \text{ Н}\cdot\text{м/рад}$ и $C_{\text{СМ2}} = 4 \cdot 10^9 \text{ Н}\cdot\text{м/рад}$.

Все остальные связи между элементами считать абсолютно жесткими. Недостающие данные см. в задачах 1 и 2.

Решение

Момент инерции двигателя определяем следующим образом:

$$J_{\text{ДВ}} = \frac{GD^2}{4 \cdot g} = \frac{30}{4 \cdot 9,81} = 0,76 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

Так как схема механизма содержит значительное число элементов, пронумеруем эти элементы (рисунок 4.2).



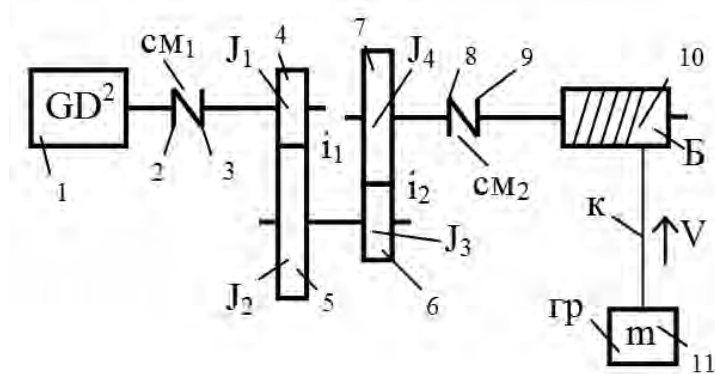


Рисунок 4.2 – Кинематическая схема с пронумерованными элементами

Для составления расчётной схемы механической части электропривода все расчёты целесообразно свести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Расчёт приведенных моментов инерции и жёсткостей связей

Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
J , кг·м ²	0,76	0,06	0,06	0,1	1,4	0,2	2,4	0,1	0,1	8,5	–
m , кг	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1500
C , Н·м/рад	–	∞	$2 \cdot 10^8$	∞	∞	∞	∞	∞	$4 \cdot 10^9$	∞	–
C , Н/м	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	$2 \cdot 10^{10}$
i , о. е.	–	1	1	1	5	5	20	20	20	20	
ρ , м	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,015
$J_{пр}$, кг·м ²	0,76	0,06	0,06	0,1	0,056	0,008	0,006	0,0003	0,0003	0,021	0,337
$C_{пр}$, Н·м/рад	–	∞	$2 \cdot 10^8$	∞	∞	∞	∞	∞	$1 \cdot 10^7$	∞	$4,5 \cdot 10^6$

Принцип заполнения таблицы следующий:

– в первой строке помещают порядковые номера элементов кинематической цепи, последовательно начиная от двигателя, оканчивая рабочим органом;

– во второй строке – моменты инерции вращательно движущихся элементов кинематической цепи;

– в третьей строке – массы поступательно движущихся элементов кинематической цепи;

– в четвёртой и пятой строках – жёсткости связей, которыми связаны элементы кинематической цепи друг с другом. Для вращательно движущихся элементов – это жёсткости кручения (жёсткость соединительных муфт), для поступательно движущихся – жёсткость деформации (жёсткость растяжения каната);

– в шестой строке – передаточное отношение (между валом двигателя и валом, на котором расположен элемент) для вращательно движущихся элементов кинематической цепи;

– в седьмой строке – радиус приведения для поступательно движущихся элементов;

– в восьмой строке – приведенные моменты инерции элементов:

а) для вращательно движущихся элементов расчёт ведут по формуле

$$J_{ПП} = \frac{J_j}{i_{1-j}^2};$$

б) для поступательно движущихся элементов – по формуле

$$J_{ПП} = m_j \cdot \rho_{1-j}^2;$$

– в девятой строке – приведенные жёсткости связей элементов:

а) для вращательно движущихся элементов расчёт ведут по формуле

$$C_{ПП} = \frac{C_j}{i_{1-j}^2};$$

б) для поступательно движущихся – по формуле

$$C_{ПП} = C_j \cdot \rho_{1-j}^2.$$

Так как по условию задана жёсткость 1 м каната и высота подъёма, а расчётную схему механической части электропривода обычно составляют для нижнего уровня положения груза, то определяем жёсткость всего каната заданной длины:

$$C_K = \frac{C_{1м}}{H} = \frac{2 \cdot 10^{11}}{10} = 2 \cdot 10^{10} \text{ Н/м.}$$

Так как в кинематической цепи содержится три податливых элемента, то предварительно получим четырёхмассовую расчётную схему механической части электропривода (рисунок 4.3). Из рисунка видно, что приведенные моменты инерции элементов, имеющих абсолютно жёсткие связи, просто суммируются.

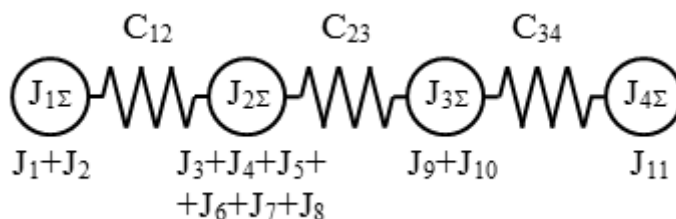


Рисунок 4.3 – Предварительная расчётная схема механической части ЭП

Самым податливым элементом кинематической цепи является канат, так как он имеет наименьшую приведенную жёсткость, поэтому перейдём к двухмассовой консервативной (коэффициент внутреннего вязкого трения не задан) расчётной схеме механической части ЭП (рисунок 4.4).

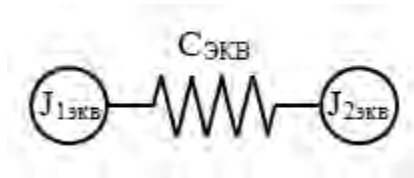


Рисунок 4.4 – Двухмассовая консервативная расчётная схема механической части ЭП

Определяем эквивалентную жёсткость, принимая во внимание последовательное соединение податливых элементов:

$$C_{ЭКВ} = \frac{1}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{C_j}} = \frac{1}{\frac{1}{C_{12}} + \frac{1}{C_{23}} + \frac{1}{C_{34}}} = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot 10^8} + \frac{1}{10^7} + \frac{1}{4,5 \cdot 10^6}} = 3,05 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{м/рад}.$$

Приведенные моменты инерции первой и второй масс:

$$J_1 = J_{1ЭКВ} = J_{jПП} = 0,76 + 0,06 + 0,06 + 0,1 + 0,056 + \\ + 0,008 + 0,006 + 0,0003 + 0,0003 + 0,021 = 1,0716 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \\ J_2 = J_{2ЭКВ} = J_{11ПП} = 0,337 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Ответ: для заданной кинематической схемы механизма подъёма и параметров элементов кинематической цепи расчётная схема механической части электропривода двухмассовая консервативная (рисунок 4.5).

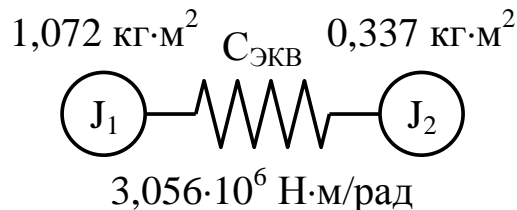


Рисунок 4.5 – Двухмассовая консервативная расчётная схема механической части ЭП

Задача 4. По данным задачи 3 составить и записать дифференциальные уравнения движения механической части электропривода механизма подъёма.

Решение

Уравнения движения двухмассовой консервативной расчётной схемы механической части электропривода имеют вид:

$$\begin{cases} M - M_{12} - M_{C1} = J_1 \cdot \frac{d\omega_1}{dt}; \\ M_{12} - M_{C2} = J_2 \cdot \frac{d\omega_2}{dt}; \\ M_{12} = C_{ЭКВ} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2). \end{cases}$$

Приведенные моменты инерции первой и второй масс, а также эквивалентная приведенная жёсткость определены в задаче 3. Найдём составляющие статической нагрузки, приведенной к скорости двигателя.

Так как в первую массу входят все элементы кинематической цепи за исключением груза, то статический момент, приложенный к первой массе, будет определяться потерями энергии в передачах, которые можно учесть через коэффициент полезного действия всех механических передач, а ко второй массе приложен статический момент, обусловленный полезной нагрузкой, приведенной к скорости двигателя. На основании вышесказанного рассчитаем составляющие статической нагрузки, приложенные к первой и второй массам:

$$M_{C1} = \frac{G \cdot \rho}{\eta} - G \cdot \rho = G \cdot \rho \cdot \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) = 14715 \cdot 0,015 \cdot \left(\frac{1}{0,648} - 1 \right) = 119,9 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{C1} = G \cdot \rho = 14715 \cdot 0,015 = 220,7 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

С учётом приведенных вычислений составляющих статической нагрузки, а также расчёта моментов инерции и эквивалентной жёсткости, приведенных к скорости двигателя (см. задачу 3), можно уравнения движения электропривода переписать с численными значениями соответствующих параметров.

Ответ: дифференциальные уравнения движения механической части электропривода (двухмассовая консервативная расчётная схема) механизма подъёма имеют вид:

$$\begin{cases} M - M_{12} - 119,9 = 1,072 \cdot \frac{d\omega_1}{dt}; \\ M_{12} - 220,7 = 0,337 \cdot \frac{d\omega_2}{dt}; \\ M_{12} = 3,056 \cdot 10^6 \cdot (\varphi_1 - \varphi_2). \end{cases}$$

Задача 5. Полагая все кинематические связи механической части электропривода механизма подъёма (кинематическая схема на рисунке 4.1) абсолютно жёсткими, определить момент двигателя, обеспечивающий подъём груза с ускорением $a = 1,5 \text{ м/с}^2$.



Решение

Для эквивалентного жёсткого приведенного звена дифференциальное уравнение движения имеет вид:

$$M - M_C = J_{\Sigma} \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{дин}}.$$

Чтобы обеспечить подъём груза с заданным ускорением, двигатель должен развивать момент, равный сумме статического момента, приведенного к валу двигателя, и динамического момента, обусловленного заданным ускорением, т. е.

$$M = M_C + M_{\text{дин}} = M_C + J_{\Sigma} \cdot \frac{d\omega}{dt},$$

где $d\omega/dt$ – заданное угловое ускорение, рад/с²; $d\omega/dt = \varepsilon$.

Заданное угловое ускорение вала двигателя ε определим, зная линейное ускорение груза, по формуле приведения ускорений:

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{a}{\rho} = \frac{1,5}{0,015} = 100 \text{ рад/с}^2.$$

Тогда необходимый момент двигателя

$$M = 340,6 + 1,409 \cdot 100 = 481,5 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Ответ: момент двигателя, обеспечивающий подъём груза с заданным ускорением, равен 481,5 Н·м.

Задача 6. Построить тахограмму движения (зависимость линейной скорости груза от времени) для подъёма груза на расстояние 10 м, при этом ускорение при разгоне и торможении принять равным 1,5 м/с².

Решение

Так как груз при подъёме совершает поступательное движение, то для построения тахограммы воспользуемся формулами для определения интервалов времени и пути для поступательного движения рабочего органа.

Полагая разгон груза равноускоренным, определим время разгона груза от состояния покоя до скорости, равной скорости подъёма:

$$t_p = \frac{V_{\text{кон}} - V_{\text{нач}}}{a_{\text{доп}}} = \frac{1,57 - 0}{1,5} = 1,05 \text{ с}.$$

Время торможения до полного останова рассчитаем, аналогично полагая



торможение равнозамедленным:

$$t_T = \frac{V_{\text{кон}} - V_{\text{нач}}}{-a_{\text{доп}}} = \frac{0 - 1,57}{-1,5} = 1,05 \text{ с.}$$

Определим путь, проходимый грузом за время разгона и время торможения:

$$S_P = \frac{a_{\text{доп}} \cdot t_P^2}{2} = \frac{1,5 \cdot 1,05^2}{2} = 0,83 \text{ м;}$$

$$S_T = \frac{a_{\text{доп}} \cdot t_T^2}{2} = \frac{1,5 \cdot 1,05^2}{2} = 0,83 \text{ м.}$$

Так как часть пути груз проходит за время разгона и время торможения, то оставшийся путь груз пройдет, двигаясь равномерно с установившейся скоростью:

$$S_y = H - S_P - S_T = 10 - 0,83 - 0,83 = 8,34 \text{ м.}$$

Время установившегося движения при равномерном движении груза определим как

$$t_y = \frac{S_y}{V_{\text{кон}}} = \frac{S_y}{V_{\text{под}}} = \frac{8,34}{1,57} = 5,31 \text{ с.}$$

По рассчитанным данным изобразим тахограмму движения груза при его подъёме на высоту 10 м.

Ответ: тахограмма движения (зависимость линейной скорости груза от времени) для подъёма груза на расстояние 10 м представлена на рисунке 4.6.

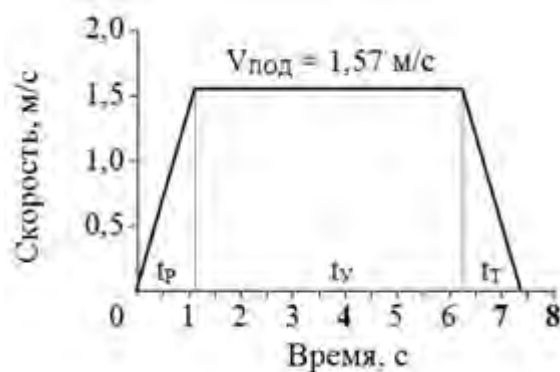


Рисунок 4.6 –Тахограмма движения для режима подъёма груза

Задача 7. Построить нагрузочную диаграмму механизма (зависимость статического момента, приведенного к валу двигателя от времени) и уточнённую нагрузочную диаграмму с учетом динамических нагрузок за время

подъёма груза на расстояние 10 м.

Решение

Момент статический, приведенный к скорости двигателя, при подъёме груза определён ранее (см. задачу 1): $M_C^\uparrow = 340,6 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Время разгона, время движения с установившейся скоростью и время торможения определены в задаче 6. Время подъёма груза на высоту 10 м можно найти, суммируя время разгона, время движения с установившейся скоростью и время торможения.

$$t_{\text{ПОД}} = t_P + t_V + t_T = 1,05 + 5,31 + 1,05 = 7,41 \text{ с.}$$

Тогда нагрузочная диаграмма механизма для режима подъёма груза будет иметь следующий вид (рисунок 4.7).

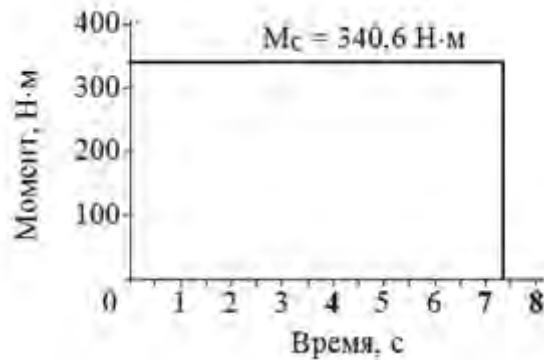


Рисунок 4.7 – Нагрузочная диаграмма механизма для режима подъёма груза

При разгоне момент двигателя будет равен сумме статического момента, приведенного к скорости двигателя, и динамического, обусловленного заданным ускорением рабочего органа (груза).

$$M^P = M_C + M_{\text{дин}} = 340,6 + 140,9 = 481,5 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

При торможении момент двигателя будет равен разности статического момента и динамического:

$$M^T = M_C - M_{\text{дин}} = 340,6 - 140,9 = 199,7 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Тогда уточнённая нагрузочная диаграмма (с учётом динамических нагрузок) будет иметь следующий вид (рисунок 4.8).

Ответ: нагрузочная диаграмма механизма и уточнённая нагрузочная диаграмма для режима подъёма груза приведены на рисунках 4.7 и 4.8 соответственно.

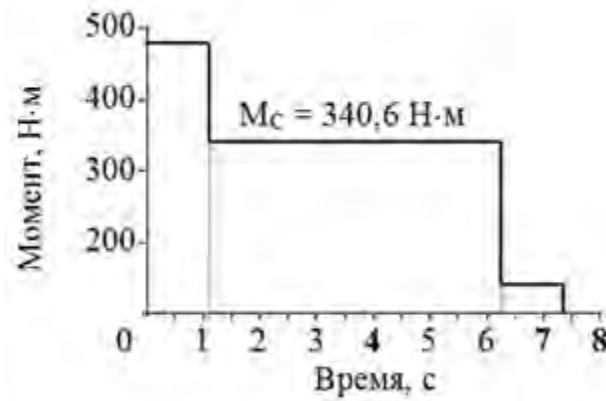


Рисунок 4.8 – Уточнённая нагрузочная диаграмма электропривода

Список литературы

1 **Онищенко, Г. Б.** Электрический привод : учебник для студентов учреждений высш. проф. образования / Г. Б. Онищенко. – 3-е изд., испр. и доп. – Москва : Академия, 2013. – 288 с.

2 **Шичков, Л. П.** Электрический привод : учебник и практикум для академического бакалавриата / Л. П. Шичков. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Юрайт, 2018. – 330 с.