

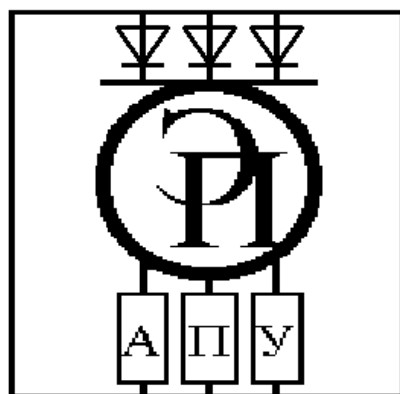
ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электропривод и АПУ»

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИВОДЫ МЕХАТРОННЫХ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

*Методические рекомендации к практическим занятиям
для студентов направления подготовки
15.03.06 «Мехатроника и робототехника»
дневной формы обучения*

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
<http://e.biblio.bru.by/>



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 канд. техн. наук, доц. Б. Б. Скарыно

Рецензент канд. техн. наук, доц. И. В. Лесковец

Предназначены к практическим занятиям для студентов направления подготовки 15.03.06 «Мехатроника и робототехника» дневной формы обучения по дисциплине «Электрические приводы мехатронных и робототехнических устройств». Приведены основные теоретические положения и формулы, необходимые для расчёта механической части электроприводов мехатронных и робототехнических устройств, статических характеристик двигателей постоянного тока с независимым возбуждением и асинхронных двигателей.

Учебно-методическое издание

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИВОДЫ МЕХАТРОННЫХ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Ответственный за выпуск

Г. С. Леневский

Технический редактор

А. А. Подошевка

Компьютерная верстка

М. М. Дударева

Подписано в печать 23.05.2018. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 2,79. Уч.-изд. л.3,06. Тираж 115 экз. Заказ № 355.

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.

© ГУ ВПО «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	5
1.3 Приведение нагрузок к расчётной скорости	6
1.4 Расчётные схемы механической части электропривода	7
1.5 Уравнения движения механической части электропривода ...	9
1.6 Структурные схемы механической части электропривода ...	10
1.7 Построение тахограмм и нагрузочных диаграмм	12
2 Расчёт статических электромеханических и механических характеристик двигателей постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ с НВ) и асинхронных двигателей (АД)	13
2.1 Выражения статической электромеханической и механической характеристик ДПТ с НВ	13
2.2 Естественные статические характеристики ДПТ с НВ	14
2.3 Искусственные статические характеристики ДПТ с НВ	16
2.4 Тормозные режимы работы двигателя постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ с НВ)	20
2.5 Статические электромеханические и механические характеристики асинхронного двигателя (АД)	23
3 Типовые задачи по механике электропривода и их решение....	27
4 Типовые задачи по расчёту статических режимов работы ДПТ с НВ и их решение	36
Список литературы	44
Приложение А. Индивидуальное задание по механике электропривода	45
Приложение Б. Индивидуальное задание по расчёту статических режимов работы двигателя постоянного тока с независимым возбуждением	47



Введение

Закрепить полученные теоретические знания по дисциплине «Электрические приводы мехатронных и робототехнических устройств», а также приобрести практический опыт по расчёту электроприводов мехатронных и робототехнических устройств и его элементов можно 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 токов.

Цель практических занятий – освоить методики расчёта электроприводов мехатронных и робототехнических устройств и его элементов. В частности, в результате решения задач на практических занятиях и самостоятельного выполнения индивидуальных заданий студенты должны научиться осуществлять приведение моментов инерции и масс движущихся элементов кинематической цепи и жёсткостей связей к расчётной скорости; уметь составлять расчётные схемы механической части электропривода и на их основе получать уравнения движения связанных масс; определять полезную нагрузку на валу двигателя; рассчитывать естественные и искусственные статические электромеханические и механические характеристики электродвигателей переменного и постоянного токов; определять параметры питающей сети для формирования требуемой скорости вращения вала двигателя; рассчитывать необходимые тормозные режимы работы; рассчитывать и строить тахограммы и нагрузочные диаграммы электроприводов за цикл работы.

В конце методических рекомендаций приведены типовые задачи по расчёту механической части электропривода и типовые задачи по расчёту статических режимов работы электроприводов постоянного тока.

В приложениях приведены индивидуальные задания по рассматриваемым темам практических занятий.

Ввиду ограниченного объёма в методических рекомендациях приведены материалы только по основным знаковым темам практических занятий: по механике электропривода; по расчёту статических режимов работы двигателей постоянного тока и асинхронных двигателей.



1 Механика электропривода

1.1 Движущиеся массы, моменты инерции, жёсткости связей

Передача механической энергии от вала двигателя к рабочему органу осуществляется посредством механических передач. Непосредственное представление о передаче механической энергии дает кинематическая схема установки. Кинематические схемы различных установок весьма многообразны. 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.

1.2 Приведение параметров элементов к расчётной скорости

Благодаря наличию механических передач элементы кинематической цепи движутся с различными скоростями. Чтобы оценить влияние параметров элементов на характер движения, осуществляют приведение этих параметров к одной расчетной скорости – скорости двигателя.

Параметры вращательно движущихся элементов приводятся к расчетной скорости с помощью передаточного отношения i , а параметры поступательно движущихся элементов – радиуса приведения ρ .

В таблице 1 даны формулы приведения перемещений, скоростей, ускорений, движущихся масс и жесткостей связей к скорости двигателя для вращательно и поступательно движущихся элементов.

Таблица 1 – Формулы приведения к скорости двигателя

Формула приведения	Вращательно движущийся элемент	Поступательно движущийся элемент
Перемещений	$\varphi_{1-j} = \varphi_j \cdot i_{1-j}$	$\varphi_{1-j} = \frac{S_j}{\rho_{1-j}}$
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 помощью передаточного отношения и радиуса приведения:

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

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.

Рабочий орган может быть потребителем механической энергии или её источником. Чаще всего рабочий орган является потребителем энергии. При этом поток механической мощности направлен от двигателя к рабочему органу. Реже рабочий орган может быть источником механической энергии. В этом случае он отдаёт механическую энергию, запасённую механизмом, например, при опускании груза, или поступившую в механизм извне, например, при ветровой нагрузке и т. п. Поток механической мощности при этом направлен от рабочего органа к двигателю.

Суммарный момент статической нагрузки, приведённый к валу двигателя, состоит из момента полезной нагрузки и момента трения в механических передачах:

$$M_C = M_{пол} \pm M_{тр} . \quad (1)$$

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

В таблице 2 даны формулы приведения статических нагрузок (сил и моментов) к расчётной скорости (скорости двигателя) с учетом направления потока механической мощности.

Таблица 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, приведённого к скорости двигателя, от скорости двигателя ($M_C = f(\omega)$) носит название механической характеристики



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):

- 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 передач. Не следует забывать, что КПД механических передач в большинстве случаев зависят от их загрузки, т. е. от передаваемого момента (усилия) (рисунок 2), а для червячных самотормозящих редукторов – от скорости вращения червяка (рисунок 3).

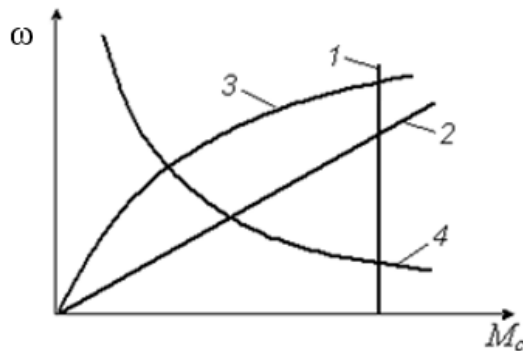


Рисунок 1 – Типовые реактивные нагрузки механической части электропривода

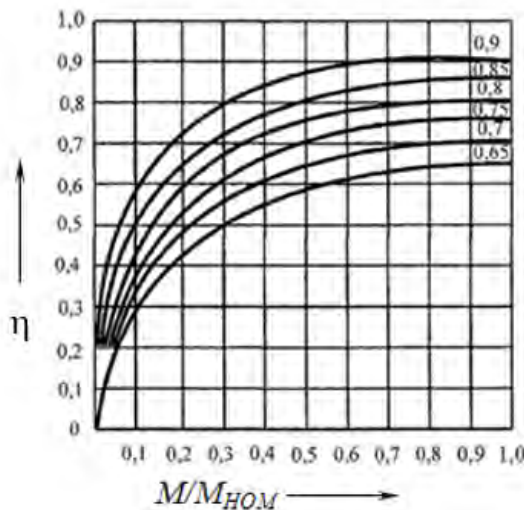


Рисунок 2 – Зависимость КПД передач от загрузки

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.

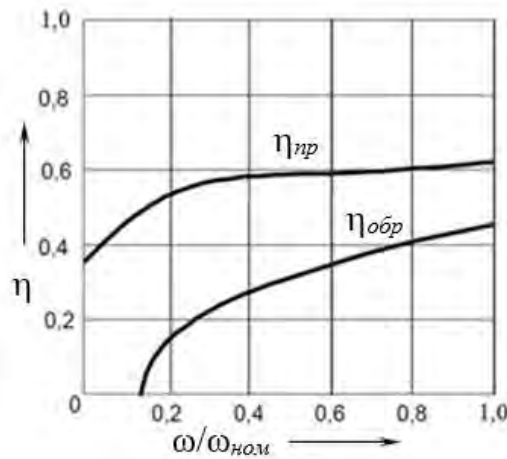


Рисунок 3 – Зависимость КПД червячных передач от скорости вращения червяка

На характер движения электропривода существенное влияние оказывают наиболее податливые элементы (элементы, обладающие наименьшей приведенной жесткостью) кинематической цепи и элементы, обладающие наибольшим приведенным моментом инерции (наибольшей массой).

При последовательном соединении элементов кинематической цепи с приведенной жесткостью C_j эквивалентную жесткость определяют по формуле

$$C_{ЭКВ} = \frac{1}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{C_j}}; \quad (2)$$

при параллельном – по формуле

$$C_{ЭКВ} = \sum_{j=1}^n C_j. \quad (3)$$

В результате упрощения расчётные схемы приводят к одной из следующих расчётных схем: двухмассовая консервативная расчётная схема (рисунок 4); двухмассовая диссипативная расчётная схема (рисунок 5).

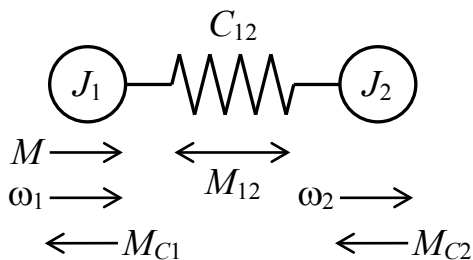


Рисунок 4 – Двухмассовая консервативная расчётная схема механической части ЭП

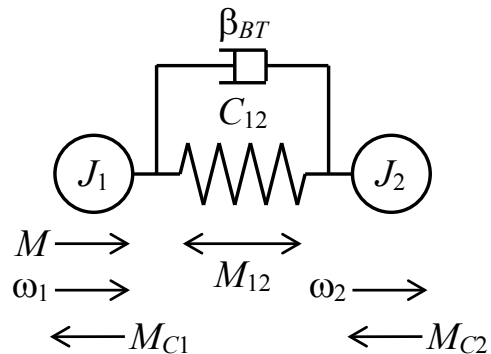


Рисунок 5 – Двухмассовая диссипативная расчётная схема механической части ЭП

Если приведенные жесткости связей большие, то можно считать их абсолютно жесткими. Тогда суммарный приведенный момент инерции определяется как сумма момента инерции двигателя, приведенных моментов инерции вращательно движущихся элементов и приведенных моментов инерции поступательно движущихся элементов кинематической цепи:

$$J_{\Sigma} = J_{\partial} + \sum_j \frac{J_j}{i_{1-j}^2} + \sum_j m \cdot \rho_{1-j}^2. \quad (4)$$

При этом получают одномассовую расчётную схему механической части электропривода, которую иногда называют эквивалентным жёстким приведенным звеном (рисунок 6).

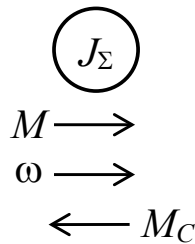


Рисунок 6 – Одномассовая расчётная схема механической части электропривода (эквивалентное жёсткое приведенное звено)

1.5 Уравнения движения механической части электропривода

Движение электропривода определяется действием двух моментов: момента, развиваемого двигателем, и момента сопротивления, а для двухмассовой расчётной схемы ещё и моментом упругого взаимодействия, который возникает из-за наличия податливых связей в кинематической цепи. Суммарный момент равен векторной сумме момента двигателя и момента сопротивления. В отдельных случаях момент двигателя, равно как и момент сопротивления, может быть направлен как в сторону движения ротора (якоря), так и против этого движения. Уравнение, связывающее эти моменты, носит название уравнения движения электропривода. Положительное направление момента сопротивления принимают противоположным положительному направлению момента двигателя.

Уравнения движения двухмассовой консервативной и двухмассовой диссипативной расчётных схем имеют вид:

$$\begin{cases} M - M_{12} - M_{C1} = J_1 \cdot \frac{d\omega_1}{dt}; \\ M_{12} - M_{C2} = J_2 \cdot \frac{d\omega_2}{dt}. \end{cases} \quad (5)$$

Отличие консервативной расчётной схемы от диссипативной состоит в определении момента упругого взаимодействия M_{12} . Для двухмассовой консервативной расчётной схемы

$$M_{12} = C_{12} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2). \quad (6)$$

Для двухмассовой диссипативной расчётной схемы

$$M_{12} = C_{12} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) - \beta_{BT} \cdot (\omega_1 - \omega_2), \quad (7)$$

где C_{12} – приведенная эквивалентная жёсткость связи между первой и второй массами, $C_{12} = C_{ЭКВ}$;

β_{BT} – коэффициент внутреннего вязкого трения, который можно оценить следующим выражением:

$$\beta_{BT} \approx \frac{0,1 \dots 0,3}{\pi} \cdot \sqrt{C_{12} \cdot \frac{J_1 \cdot J_2}{J_1 + J_2}}. \quad (8)$$

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:

$$M - M_C = J_{\Sigma} \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (9)$$

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.

Правую часть уравнения (9) называют динамическим моментом:

$$M_{ДИН} = J_{\Sigma} \cdot \frac{d\omega}{dt}. \quad (10)$$

В зависимости от знака динамического момента различают следующие режимы работы электропривода:

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

1.6 Структурные схемы механической части электропривода

Структурные схемы механической части электропривода могут быть составлены на основании уравнений движения, полученных ранее при переходе из временной области, при нулевых начальных условиях, в область изображений. Уравнения движения механической части электропривода, записанные в операторной форме, будут иметь вид:

– для двухмассовой консервативной расчётной схемы



$$\begin{cases} M(P) - M_{12}(P) - M_{C1}(P) = J_1 \cdot P \cdot \omega_1(P); \\ M_{12}(P) - M_{C2}(P) = J_2 \cdot P \cdot \omega_2(P); \\ M_{12}(P) = \frac{C_{12}}{P} \cdot [\omega_1(P) - \omega_2(P)]; \end{cases} \quad (11)$$

– для двухмассовой диссипативной расчётной схемы

$$\begin{cases} M(P) - M_{12}(P) - M_{C1}(P) = J_1 \cdot P \cdot \omega_1(P); \\ M_{12}(P) - M_{C2}(P) = J_2 \cdot P \cdot \omega_2(P); \\ M_{12}(P) = \left[\frac{C_{12}}{P} + \beta_{BT} \right] \cdot [\omega_1(P) - \omega_2(P)]; \end{cases} \quad (12)$$

– для эквивалентного жёсткого приведенного звена

$$M(P) - M_C(P) = J_\Sigma \cdot P \cdot \omega(P). \quad (13)$$

На основании уравнений (11)–(13) можно составить структурные схемы механической части электропривода. Структурные схемы двухмассовой консервативной, двухмассовой диссипативной расчётных схем и эквивалентного жёсткого приведенного звена представлены соответственно на рисунках 7–9.

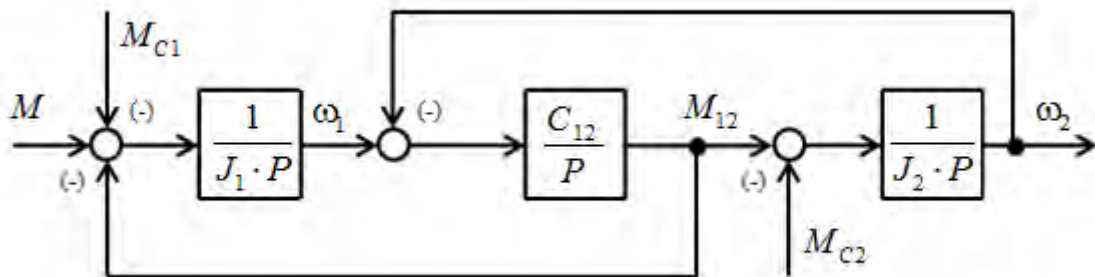


Рисунок 7 – Структурная схема двухмассовой консервативной расчётной схемы механической части электропривода

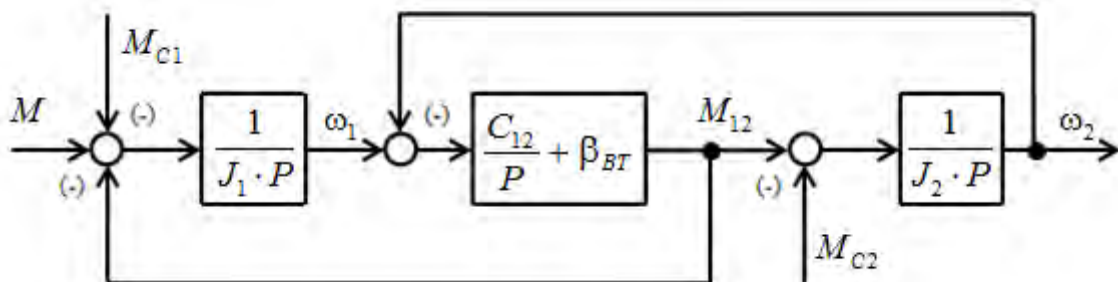


Рисунок 8 – Структурная схема двухмассовой диссипативной расчётной схемы механической части электропривода

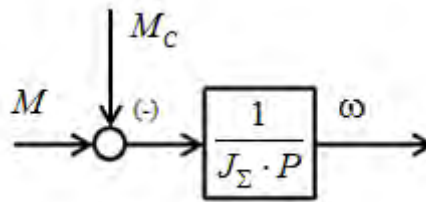


Рисунок 9 – Структурная схема одномассовой расчётной схемы механической части электропривода (эквивалентного жёсткого приведенного звена)

1.7 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, определяются по простым формулам, которые приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Формулы для определения интервалов времени и пути

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

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 $(M_C \pm M_{\text{дин}}) = f(t)$. Для ее построения необходимо определить дополнительно к статическим еще и динамические нагрузки с учетом их знака.

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

2.1 Выражения статической электромеханической и механической характеристик ДПТ с НВ

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

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{k \cdot \Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{k \cdot \Phi} \cdot I_{\text{я}}. \quad (14)$$

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

$$M = k \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}}. \quad (15)$$

Подставляя (15) в уравнение (14), получаем уравнение статической механической характеристики ДПТ с НВ

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{k \cdot \Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{(k \cdot \Phi)^2} \cdot M, \quad (16)$$

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

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

k – конструктивный коэффициент двигателя;

Φ – полезный поток, Вб.

Конструктивный коэффициент двигателя определяется выражением

$$k = \frac{p \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot a}, \quad (17)$$

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 характеристик двигателя могут быть записаны в следующем виде:

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{C} - \frac{R_{\text{я}}}{C} \cdot I_{\text{я}}; \quad (18)$$

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{C} - \frac{R_{\text{я}}}{C^2} \cdot M, \quad (19)$$

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



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), носят название естественные характеристики. Выражения естественных статических электромеханической и механической характеристик имеют вид:

$$\omega = \frac{U_{Яном}}{C_{ном}} - \frac{R_{Я}}{C_{ном}} \cdot I_{Я}; \quad (20)$$

$$\omega = \frac{U_{Яном}}{C_{ном}} - \frac{R_{Я}}{(C_{ном})^2} \cdot M. \quad (21)$$

Параметры, входящие в выражения этих характеристик, определяются следующим образом:

- номинальное напряжение на якоре задается в справочниках;
- сопротивление якорной цепи определяется выражением

$$R_{Я} = k_T \cdot (R_{ОЯ} + R_{ОДП} + R_{КО}) + R_{ЩК}, \quad (22)$$

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 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 $\alpha = 0,004 \text{ 1/}^\circ\text{C}$);

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

Если сопротивления приведены в справочнике уже для нагретого состояния, то при расчете сопротивления якорной цепи следует использовать коэффициент k_T , равный 1.

Сопротивление щеточного контакта определяется по формуле

$$R_{ЩК} = \frac{\Delta U_{Щ}}{I_{Яном}}, \quad (23)$$

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

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

Ток якоря можно найти по формуле

$$I_{Яном} = \frac{P_{2ном}}{\eta_{ном} \cdot U_{Яном}} - \frac{U_{Вном}}{k_T \cdot R_{ОВ}}, \quad (24)$$



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.

Если в справочнике не заданы сопротивления обмоток двигателя, то сопротивление якорной цепи можно оценить по приближенной формуле

$$R_{Я} \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{Яном}}{I_{Яном}} \cdot (1 - \eta_{ном}). \quad (25)$$

Коэффициент ЭДС и момента может быть определен по формуле

$$k \cdot \Phi_{ном} = C_{ном} = \frac{U_{Яном} - I_{Яном} \cdot R_{Я}}{\omega_{ном}}, \quad (26)$$

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:

$$\omega = \pi \cdot n / 30. \quad (27)$$

Из анализа выражений электромеханической и механической характеристик видно, что они линейны (при $\Phi = \text{const}$). Так как характеристики линейны, то для их построения достаточно рассчитать две точки. Обычно для расчета первой точки электромеханической (механической) характеристики принимают $I_{Я} = 0$ ($M = 0$), при этом скорость вала двигателя будет равна скорости идеального холостого хода ($\omega = \omega_0$). Скорость идеального холостого хода определяется выражением

$$\omega_0 = \frac{U_{Я}}{k \cdot \Phi}. \quad (28)$$

Для расчета второй точки электромеханической (механической) характеристики примем скорость равной нулю. При этом имеет место режим короткого замыкания. Ток короткого замыкания определяется выражением

$$I_{КЗ} = \frac{U_{Я}}{R_{Я\Sigma}}. \quad (29)$$

Момент короткого замыкания определяется выражением

$$M_{КЗ} = k \cdot \Phi \cdot \frac{U_{Я}}{R_{Я\Sigma}} = k \cdot \Phi \cdot I_{КЗ}. \quad (30)$$

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 ($\lambda_1 = 2,5 \dots 3$)), и так как статические характеристики есть множество точек установившегося режима работы, то область построения статиче-



ских 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 $[0 \dots M_{доп}]$.

$$I_{Ядоп} = \lambda_1 \cdot I_{Яном}; \quad (31)$$

$$M_{доп} = k \cdot \Phi \cdot I_{Ядоп} = k \cdot \Phi \cdot \lambda_1 \cdot I_{Яном}. \quad (32)$$

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 выражения ЭМХ и МХ подставляют соответственно номинальные значения тока якоря и момента и при этих значениях рассчитывают угловую скорость.

На рисунках 10 и 11 представлены естественные электромеханические и механические характеристики ДПТ с НВ соответственно в допустимых пределах существования тока якоря и момента в установившемся режиме работы.

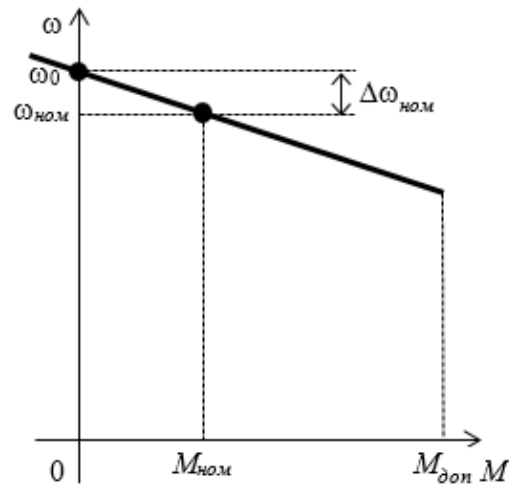
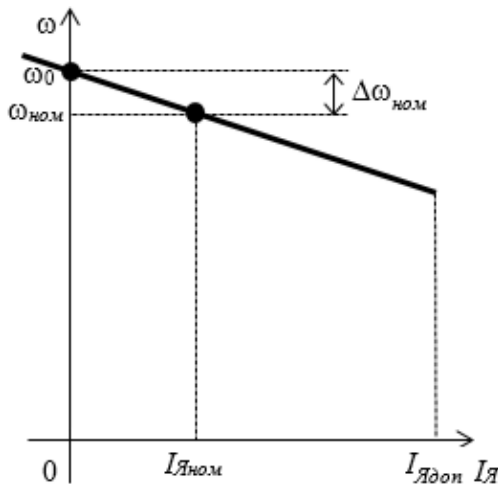


Рисунок 10 – Естественная ЭМХ ДПТ с НВ Рисунок 11 – Естественная МХ ДПТ с НВ

2.3 Искусственные статические характеристики ДПТ с НВ

Вид искусственных характеристик обычно оценивают по их расположению относительно естественной статической характеристики.

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

Характеристики, полученные уменьшением напряжения на якоре ДПТ НВ, называют искусственными характеристиками при пониженном напряжении.

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

$$\omega = \frac{U_{Я}}{C_{НОМ}} - \frac{R_{Я}}{C_{НОМ}} \cdot I_{Я}; \quad (33)$$

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{C_{\text{НОМ}}} - \frac{R_{\text{я}}}{(C_{\text{НОМ}})^2} \cdot M. \quad (34)$$

На рисунке 12 приведены статические электромеханические и механические характеристики ДПТ с НВ при уменьшении напряжения на якоре.

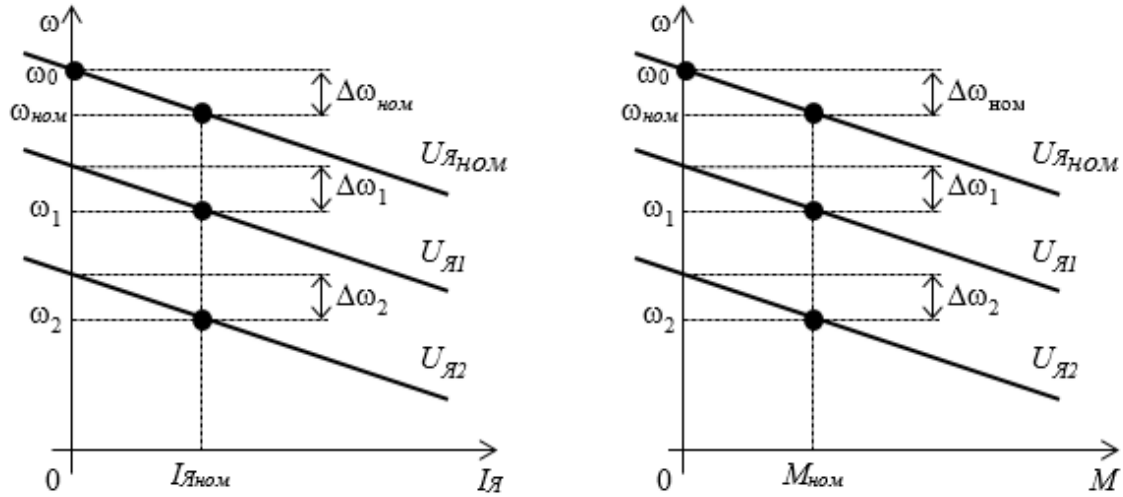


Рисунок 12 – Статические ЭМХ и МХ ДПТ с НВ при изменении напряжения якоря ($U_{\text{я}2} < U_{\text{я}1} < U_{\text{яНОМ}}$)

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 для искусственной характеристики можно определить по формуле

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

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 $\{\Phi = f(I_B)\}$ носит название кривая намагничивания двигателя. На рисунке 13 приведена универсальная кривая намагничивания ДПТ с НВ, где ток возбуждения и поток представлены в относительных единицах (относительно их номинальных значений). Ток возбуждения определяется выражением

$$I_B = \frac{U_B}{R_B}, \quad (35)$$

где U_B – напряжение на обмотке возбуждения, В;
 R_B – сопротивление цепи обмотки возбуждения, Ом.

Ток возбуждения пропорционален напряжению возбуждения и обратно пропорционален сопротивлению цепи возбуждения, значит, уменьшить ток в обмотке возбуждения (а следовательно, и поток двигателя) можно либо уменьшением напряжения возбуждения, либо введением добавочного сопротивления в цепь обмотки возбуждения.

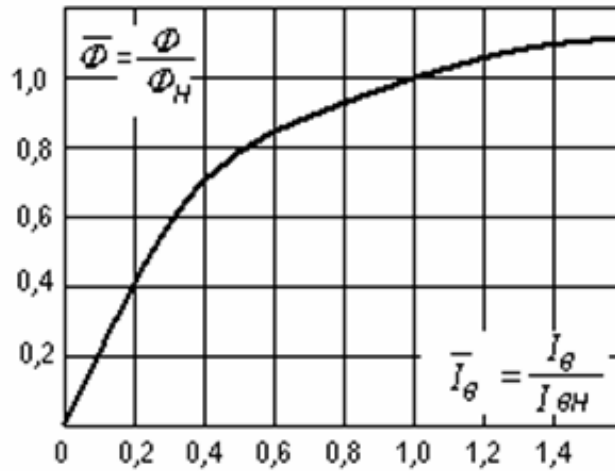


Рисунок 13 – Универсальная кривая намагничивания ДПТ с НВ

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

$$\omega = \frac{U_{Яном}}{k \cdot \Phi} - \frac{R_{Я}}{k \cdot \Phi} \cdot I_{Я}; \quad (36)$$

$$\omega = \frac{U_{Яном}}{k \cdot \Phi} - \frac{R_{Я}}{(k \cdot \Phi)^2} \cdot M. \quad (37)$$

Ослабление потока двигателя можно обеспечить введением в цепь обмотки возбуждения добавочного сопротивления $R_{доб}$ или уменьшением напряжения на обмотке возбуждения. Для расчёта величины добавочного сопротивления вначале необходимо определить значение потока двигателя при заданной угловой скорости и моменте нагрузки. Например, для работы в точке B с моментом M_B и угловой скоростью ω_B требуемый поток Φ' можно найти по формуле

$$\Phi' = \frac{U_{Яном} \pm \sqrt{U_{Яном}^2 - 4 \cdot \omega_B \cdot M_B \cdot R_{Я}}}{k \cdot 2 \cdot \omega_B}.$$

При этом из двух значений потока выбирают значение меньше номинального потока приблизительно во столько раз, во сколько угловая скорость двигателя ω_B больше скорости двигателя при $M = M_B$.

Затем вычисляют его относительное значение по формуле

$$\bar{\Phi}' = \frac{\Phi'}{\Phi_{ном}} = \frac{k \cdot \Phi'}{k \cdot \Phi_{ном}}.$$

По универсальной кривой намагничивания (см. рисунок 13) определяют относительное значение, а затем и реальное по формуле

$$I'_B = \overline{I}_B \cdot I_{\text{норм}}.$$

Величину добавочного сопротивления, включённого в цепь обмотки возбуждения, можно найти по формуле

$$R_{\text{доб}} = \frac{U_{\text{норм}}}{I'_B} - R_B.$$

Величину напряжения возбуждения U_B определяют по формуле

$$U_B = I'_B \cdot R_B.$$

Значение сопротивления приводят к холодному состоянию:

$$R_{\text{доб}(t^\circ\text{C})} = \frac{R_{\text{доб}}}{k_T}.$$

Мощность добавочного сопротивления

$$P_{\text{доб}} = (I'_B)^2 \cdot R_{\text{доб}}.$$

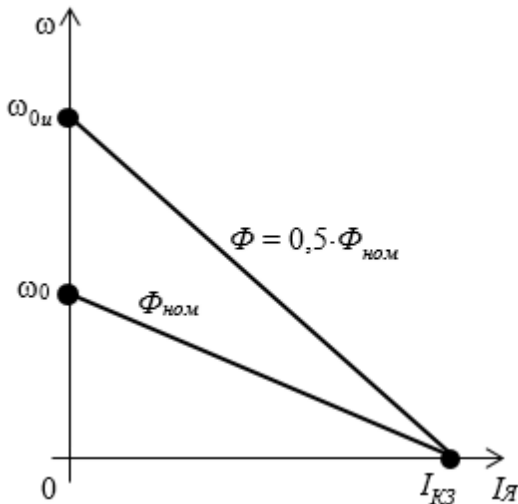


Рисунок 14 – Статические ЭМХ ДПТ с НВ при ослаблении потока возбуждения в 2 раза

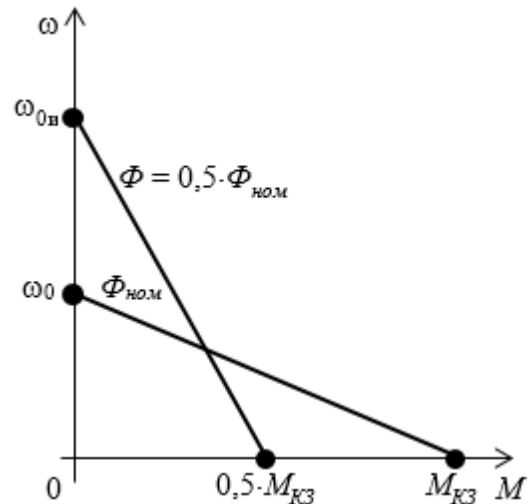


Рисунок 15 – Статические МХ ДПТ с НВ при ослаблении потока возбуждения в 2 раза

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, носит название реостатная характеристика. Выражения реостатных ЭМХ и МХ имеют вид:

$$\omega = \frac{U_{\text{яном}}}{C_{\text{ном}}} - \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{ядоб}}}{C_{\text{ном}}} \cdot I_{\text{я}}; \quad (38)$$

$$\omega = \frac{U_{Яном}}{C_{НОМ}} - \frac{R_{Я} + R_{Ядоб}}{(C_{НОМ})^2} \cdot M, \quad (39)$$

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

На рисунке 16 приведены реостатные электромеханические и механические характеристики ДПТ с НВ.

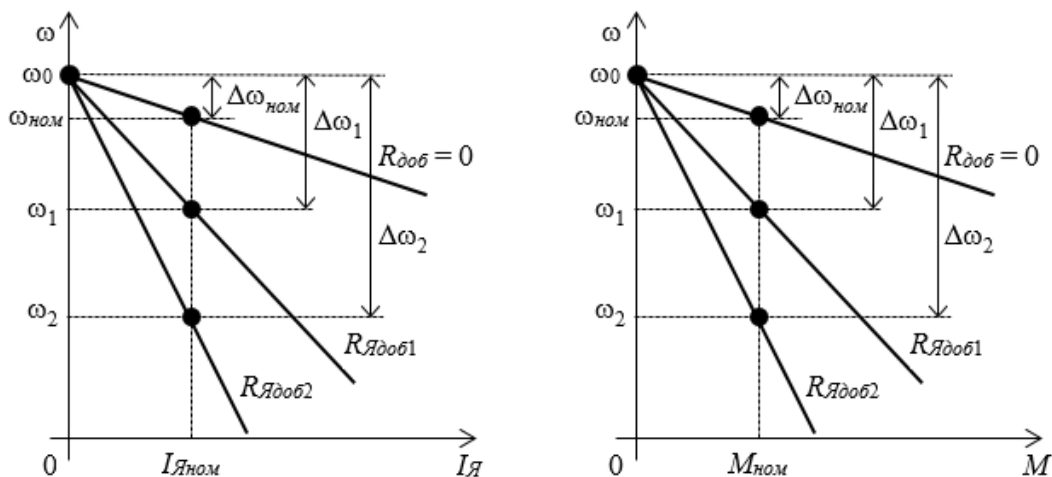


Рисунок 16 – Статические ЭМХ и МХ ДПТ с НВ при введении в цепь якоря добавочных сопротивлений ($R_{Ядоб2} > R_{Ядоб1}$)

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. Например, для работы в точке C с моментом M_C , и угловой скоростью ω_C требуется в цепь якоря ввести добавочное сопротивление. Тогда требуемое сопротивление для искусственной (реостатной) характеристики можно определить по формуле

$$R_{Ядоб} = \frac{C_{НОМ} \cdot (U_{Яном} - C_{НОМ} \cdot \omega_C)}{M_C} - R_{Я}, \quad (40)$$

а искусственную (реостатную) статическую механическую характеристику можно рассчитать и построить по выражению

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

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

Все вышерассмотренное относилось к двигательному режиму работы ДПТ с НВ, когда двигатель потребляет электрическую энергию из сети постоянного тока и, преобразовав её в механическую за вычетом потерь, передаёт исполнительному органу рабочей машины.

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



- 1) режим торможения противовключением;
- 2) режим динамического торможения;
- 3) 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; при этом ток якоря двигателя изменяет свое направление; изменяет свое направление и момент.

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

$$\omega = \frac{U_{Я}}{C} + \frac{R_{Я}}{C^2} \cdot M. \quad (41)$$

Механическая характеристика двигателя в режиме рекуперативного торможения является продолжением механической характеристики двигательного режима в области II квадранта.

Данный способ торможения является весьма экономичным, так как 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 $\omega > \omega_0$.

Ток в якоре двигателя определяется выражением

$$I_{Я} = \frac{E - U_{Я}}{R_{Я}}. \quad (42)$$

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 17). В начале двигатель работая на естественной МХ, при моменте M_C развивал скорость ω_C (т. А), 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 $\omega_{ПВ}$ (т. В). Но переход с рабочей точки А в точку В осуществляется только через точку С, 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 С. 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 противо-



положительное направление вращения путем изменения полярности напряжения, подводимого к якору двигателя (рисунок 18).

В режиме торможения противовключением ток в якоре двигателя определяется выражением

$$I_{\text{я}} = \frac{U_{\text{я}} + E}{R_{\text{я}} + R_{\text{ПВ}}} \quad (43)$$

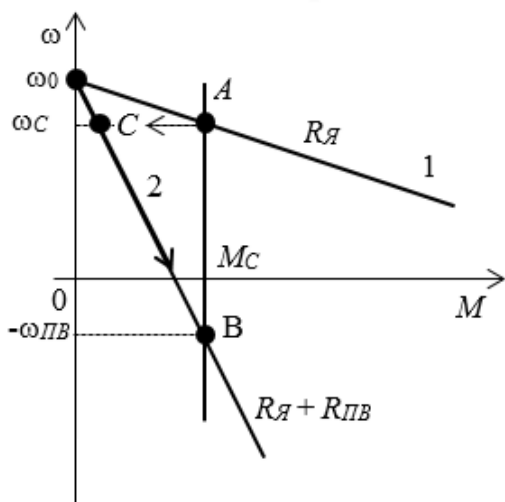


Рисунок 17 – Статические механические характеристики ДПТ с НВ в режиме торможения противовключением при активном моменте нагрузки на валу

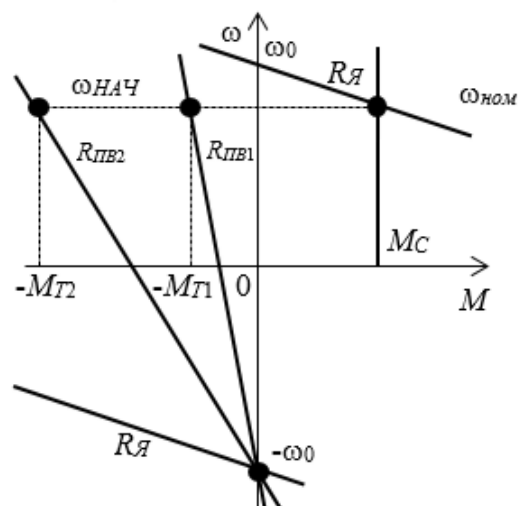


Рисунок 18 – Статические механические характеристики ДПТ с НВ в режиме торможения противовключением при реверсе двигателя ($R_{\text{ПВ1}} > R_{\text{ПВ2}}$)

Для ограничения тока якоря до допустимой для двигателя величины $I_{\text{ядоп}}$ в цепь якоря ДПТ с НВ при торможении противовключением необходимо ввести дополнительное сопротивление

$$R_{\text{ПВ}} = \frac{U_{\text{я}} + E_{\text{max}}}{I_{\text{ядоп}}} - R_{\text{я}}, \quad (44)$$

где E_{max} – максимальное значение ЭДС двигателя, определяемое по формуле

$$E_{\text{max}} = k \cdot \Phi \cdot \omega_{\text{нач}}, \quad (45)$$

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

Данный 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:

$$\omega = -\frac{U_{\text{я}}}{C} + \frac{R_{\text{я}}}{C^2} \cdot M. \quad (46)$$

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).

Величина тормозного сопротивления $R_{ДТ}$ рассчитывается из условия, чтобы при номинальной скорости вращения якоря его ток не превышал бы допустимого значения $I_{Ядоп}$ по условиям коммутации:

$$R_{ДТ} = \frac{E_{\max}}{I_{Ядоп}} - R_{Я}. \quad (47)$$

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

$$\omega = -\frac{R_{Я} + R_{ДТ}}{C^2} \cdot M. \quad (48)$$

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

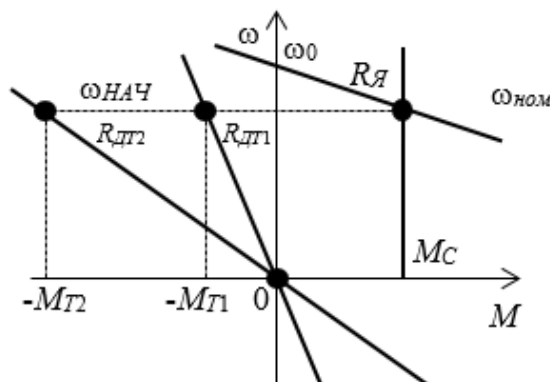


Рисунок 19 – Статические механические характеристики ДПТ с НВ в режиме динамического торможения ($R_{ДТ1} > R_{ДТ2}$)

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

$$M = \frac{3 \cdot U_{\phi}^2 \cdot R'_2 / s}{\omega_0 \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right]} = \frac{3 \cdot U_{\phi}^2 \cdot R'_2 / s}{\omega_0 \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + X_k^2 \right]}, \quad (49)$$



где U_ϕ – действующее значение фазного напряжения сети, В;

R_1, X_1 – сопротивления обмоток статора соответственно активное и индуктивное, Ом;

R'_2, X'_2 – сопротивления обмоток ротора, приведенные к цепи статора, соответственно активное и индуктивное, 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

$$X_k = X_1 + X'_2. \quad (50)$$

Скольжение двигателя

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}. \quad (51)$$

Угловая скорость поля

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p}, \quad (52)$$

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

$$\omega_{НОМ} = \frac{\pi \cdot n_{НОМ}}{30}. \quad (53)$$

Номинальное скольжение двигателя

$$s_{НОМ} = \frac{\omega_0 - \omega_{НОМ}}{\omega_0}. \quad (54)$$

Статическую механическую характеристику АД $\omega = f(M)$ (здесь M – момент электромагнитный) можно построить, используя формулу (49) и уравнение связи между угловой скоростью вала двигателя и скольжением

$$\omega = \omega_0 \cdot (1 - s). \quad (55)$$

С учетом того, что момент электромагнитный по формуле (49) имеет экстремум (критическое значение), то возможна и другая форма записи зависимости $M = f(s)$, называемая формулой Клосса:

$$M = \frac{2 \cdot M_k \cdot (1 + a \cdot s_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2 \cdot a \cdot s_k}, \quad (56)$$

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 следующими выражениями:

$$M_k = \pm \frac{3 \cdot U_\phi^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left(R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_k^2} \right)}; \quad (57)$$

$$s_k = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}}. \quad (58)$$

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 выражениями

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

Обычно в каталогах на асинхронные двигатели не приведены параметры схемы замещения (активные и индуктивные сопротивления фаз обмоток), поэтому вышеуказанные 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 $\lambda = \mu_k$. Умножив номинальный момент двигателя на кратность максимального момента, нетрудно найти значение критического момента.

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

$$s_k = s_{НОМ} \cdot \frac{\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1 + 2 \cdot s_{НОМ} \cdot (\lambda - 1)}}{1 - 2 \cdot s_{НОМ} \cdot (\lambda - 1)}. \quad (59)$$

В то же время для машин большой мощности, у которых $R_1 \approx 0$, можно принять $a \approx 0$. Тогда

$$s_k = s_{НОМ} \cdot \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right). \quad (60)$$

Таким образом, можно рассчитать статическую механическую характеристику асинхронного двигателя $\omega = f(M)$ по каталожным данным.

Чтобы определить скорость, с которой будет вращаться двигатель при заданном моменте нагрузки на валу, в формулу (56) 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 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 (55). Формула В. А. Шубенко имеет вид:

$$I_1 \approx \sqrt{I_0^2 + (I_{1НОМ}^2 - I_0^2) \cdot \frac{M \cdot s}{M_{НОМ} \cdot s_{НОМ}}}, \quad (61)$$

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:

$$I_{1НОМ} = \frac{P_{2НОМ}}{3 \cdot U_{\phiНОМ} \cdot \eta_{НОМ} \cdot \cos \varphi_{НОМ}} = \frac{P_{2НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{ЛНОМ} \cdot \eta_{НОМ} \cdot \cos \varphi_{НОМ}}; \quad (62)$$

$$I_0 \approx I_{1НОМ} \cdot \left(\sin \varphi_{НОМ} - \frac{1}{2 \cdot \mu_k} \cdot \cos \varphi_{НОМ} \right). \quad (63)$$

На рисунке 20 представлен примерный вид статической механической характеристики асинхронного электродвигателя; на рисунке 21 – статическая электромеханическая характеристика асинхронного электродвигателя $\omega = f(I_1)$.

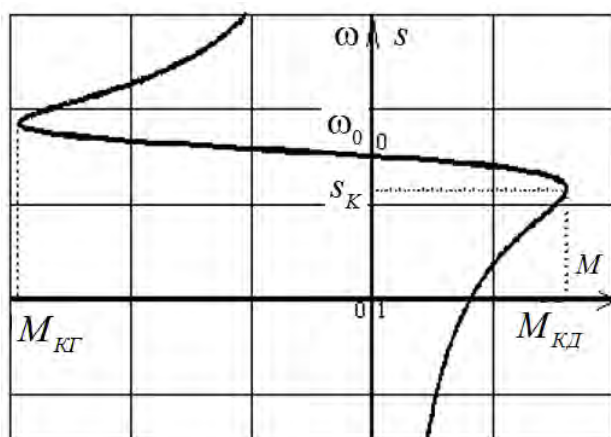


Рисунок 20 – Статическая МХ АД

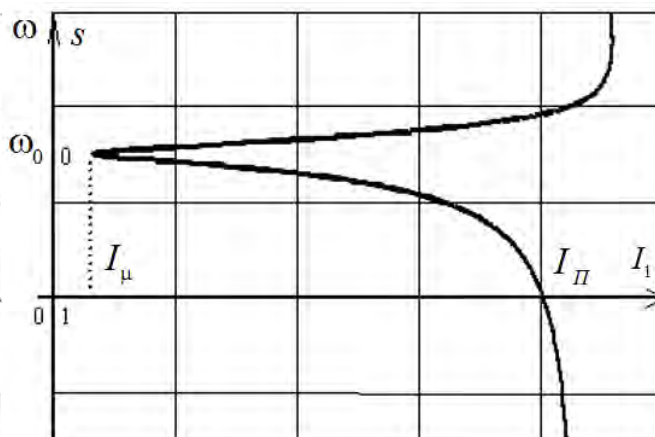


Рисунок 21 – Статическая ЭМХ АД

3 Типовые задачи по механике электропривода и их решение

Задача 1. Задан механизм подъёмного устройства, кинематическая схема которого приведена на рисунке 22. Двигатель D через соединительную муфту $см_1$, двухступенчатый цилиндрический редуктор, соединительную муфту $см_2$ и передачу барабан–канат $Б-к$ поднимает и опускает груз $гp$ массой m . Передаточное отношение первой и второй ступеней цилиндрического редуктора $i_1 = 5$ и $i_2 = 4$ соответственно; диаметр барабана $D_B = 0,6$ м; номинальная частота вращения двигателя 1000 об/мин.

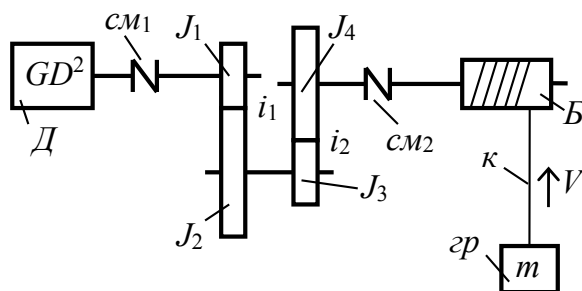


Рисунок 22 – Кинематическая схема механизма

Требуется определить линейную скорость подъёма груза при номинальной скорости вращения двигателя.

Решение

Линейная скорость груза связана с угловой скоростью вала двигателя соотношением

$$V_{гp} = \omega_{дв} \cdot \rho,$$

где ρ – радиус приведения, м.

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

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

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

Угловая скорость двигателя

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

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

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

Определяем теперь линейную скорость подъёма груза:

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

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

Задача 2. Для механизма подъёмного устройства, кинематическая схема которого приведена на рисунке 22, 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

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

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, будет

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

Момент статический, приведенный к валу двигателя при опускании груза

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

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 (см. рисунок 22) составить расчётную схему механической части электропривода, если маховый момент инерции двигателя $GD^2 = 30$ Н·м²; моменты инерции зубчатых шестерен и колес редуктора $J_1 = 0,1$ кг·м², $J_2 = 1,4$ кг·м², $J_3 = 0,2$ кг·м², $J_4 = 2,4$ кг·м²; моменты инерции соединительных муфт $J_{\text{СМ1}} = 0,12$ кг·м² и $J_{\text{СМ2}} = 0,2$ кг·м²; момент инерции барабана ($J_B = 8,5$ кг·м²; жесткость 1 м каната $C_{1\text{м}} = 2 \cdot 10^{11}$ Н/м; высота подъёма и опускания груза $H = 10$ м; жёсткость муфт $C_{\text{СМ1}} = 2 \cdot 10^{11}$ Н·м/рад и $C_{\text{СМ2}} = 4 \cdot 10^9$ Н·м/рад.

Решение

Момент инерции двигателя определим по формуле

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



Так как кинематическая схема механизма содержит значительное число элементов, пронумеруем эти элементы в направлении от двигателя к рабочему органу (рисунок 23). Для составления расчётной схемы механической части электропривода все расчёты целесообразно вести в таблице 4.

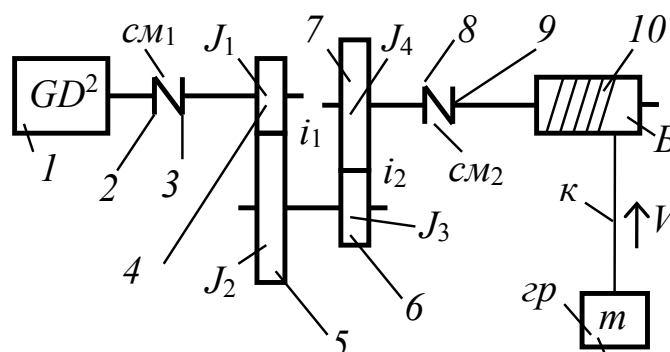


Рисунок 23 – Кинематическая схема с пронумерованными элементами

Таблица 4 – Расчёт приведенных моментов инерции и жёсткостей связей

Параметр	Значение параметра по варианту										
	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 и третьей – моменты инерции вращательно движущихся элементов и массы поступательно движущихся элементов соответственно;
- в четвёртой и пятой – 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 и седьмой – передаточное отношение (между валом двигателя и валом, на котором расположен элемент) для вращательно движущихся элементов и радиус приведения для поступательно движущихся элементов;
- в восьмой – приведенные моменты инерции элементов:

а) для вращательно движущихся элементов

$$J_{пр} = \frac{J_j}{(i_{1-j})^2};$$

б) для поступательно движущихся элементов

$$J_{\text{пр}} = m_j \cdot (\rho_{1-j})^2;$$

– в девятой – приведенные жёсткости связей элементов:

а) для вращательно движущихся элементов

$$C_{\text{пр}} = \frac{C_j}{(i_{1-j})^2};$$

б) для поступательно движущихся элементов

$$C_{\text{пр}} = C_j \cdot (\rho_{1-j})^2.$$

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

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

Так как в кинематической цепи содержится три податливых элемента, то предварительно получим четырёхмассовую расчётную схему механической части электропривода (рисунок 24). Приведенные моменты инерции элементов, имеющих абсолютно жёсткие связи, просто суммируются.

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 25).

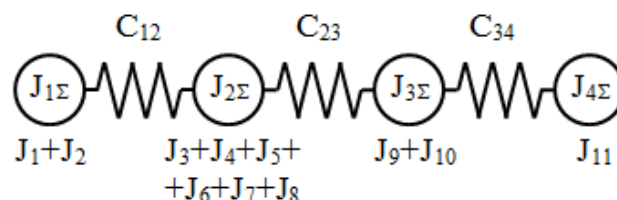


Рисунок 24 – Предварительная расчётная схема механической части ЭП

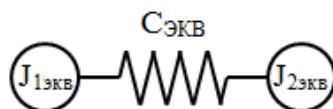


Рисунок 25 – Двухмассовая консервативная расчётная схема механической части ЭП

Определим эквивалентную жёсткость, беря во внимание последовательное соединение податливых элементов (см. рисунок 24):

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

Приведенные моменты инерции первой и второй масс

$$J_1 = J_{1экв} = \sum_{j=1}^{10} J_{jПП} = 0,76 + 0,06 + 0,06 + 0,1 + 0,056 + \\ + 0,008 + 0,006 + 0,0003 + 0,0003 + 0,021 = 1,0716 \text{ кг}\cdot\text{м}^2;$$

$$J_2 = J_{2экв} = J_{11ПП} = 0,337 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

Ответ: для заданной кинематической схемы механизма подъёма и параметров элементов кинематической цепи расчётная схема механической части электропривода двухмассовая консервативная (рисунок 26):

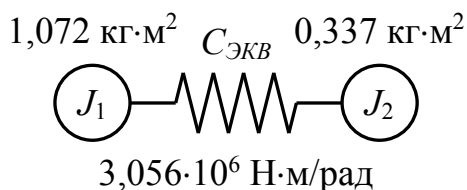


Рисунок 26 – Двухмассовая консервативная расчётная схема механической части ЭП

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:

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

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. По данным задач 3 и 4 проверить возможность перехода от двухмассовой консервативной расчётной схемы механической части к одно-массовой (эквивалентному жёсткому приведенному звену). Если переход возможен, то составить расчётную схему эквивалентного жёсткого приведенного звена и определить его параметры.

Решение

Проверим условия, при которых можно пренебречь упругими свойствами кинематических звеньев.

Определим соотношение масс двухмассовой расчётной схемы:

$$\gamma = \frac{J_1 + J_2}{J_1} = \frac{1,072 + 0,337}{1,072} = 1,314.$$

Как видно, моменты инерции первой и второй масс примерно соизмеримы, поэтому параметр γ не стремится к единице.

Определим собственную частоту колебаний:

$$\Omega_{12} = \sqrt{\frac{C_{12} \cdot (J_1 + J_2)}{J_1 \cdot J_2}} = \sqrt{\frac{3,056 \cdot 10^6 \cdot (1,072 + 0,337)}{1,072 \cdot 0,337}} = 3,5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}.$$

Так как приведенная жёсткость велика, то и собственная частота колебаний двухмассовой расчётной схемы значительна.

Считаем, что к механической части не прикладываются возмущающие воздействия с частотой, близкой к собственной частоте колебаний, поэтому отсутствует условие возникновения резонанса.

Учитывая вышесказанное, можно пренебречь упругими свойствами кинематических звеньев и перейти от двухмассовой расчётной схемы к эквивалентному жёсткому приведенному звену.



Тогда суммарный (эквивалентный) момент инерции, приведенный к скорости двигателя (считая приведенную жёсткость каната равной бесконечности), определим как

$$J_{\Sigma} = J_1 + J_2 = 1,072 + 0,337 = 1,409 \text{ кг}\cdot\text{м}^2,$$

суммарный момент нагрузки, приведенный к скорости двигателя,

$$M_C = M_{C1} + M_{C2} = 119,9 + 220,7 = 340,6 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

а расчётная схема механической части будет представлена эквивалентным жёстким приведенным звеном (рисунок 27):

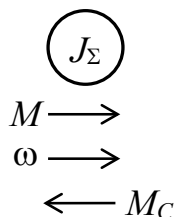


Рисунок 27 – Расчётная схема механической части электропривода

Ответ: на основании приведенных расчётов возможен переход к одномассовой расчётной схеме, которая имеет вид (рисунок 28):

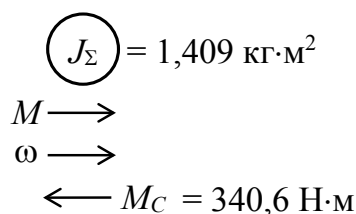


Рисунок 28 – Расчётная схема эквивалентного жёсткого приведенного звена

Задача 6. Полагая все кинематические связи механической части электропривода механизма подъёма (см. кинематическую схему на рисунке 22) абсолютно жёсткими, определить момент двигателя, обеспечивающий подъём груза с ускорением $a = 1,5 \text{ м/с}^2$.

Решение

Так как все кинематические связи считаем абсолютно жёсткими, то расчётной схемой механической части электропривода будет эквивалентное жёсткое приведенное звено (см. решение задачи 5).

Для эквивалентного жёсткого приведенного звена дифференциальное уравнение движения имеет вид:

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

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 будет

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

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

Задача 7. 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 (см. таблицу 3).

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 определим, 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 теперь 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

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

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 имеет вид (рисунок 29).

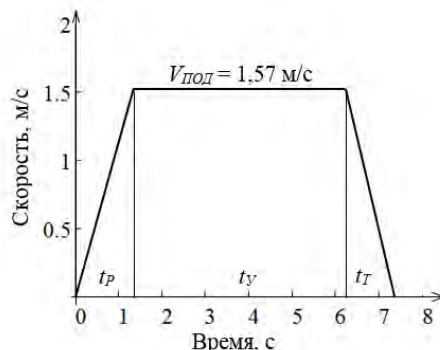


Рисунок 29 – Тахограмма движения для режима подъёма груза

Задача 8. 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 определен 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 7. Время подъёма груза на высоту 10 м можно найти, суммируя время разгона, время движения с установившейся скоростью и время торможения:

$$t_{\text{под}} = t_p + t_y + t_r = 1,05 + 5,31 + 1,05 = 7,41 \text{ с.}$$

Тогда нагрузочная диаграмма механизма для режима подъёма груза будет иметь следующий вид (рисунок 30).

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 31).

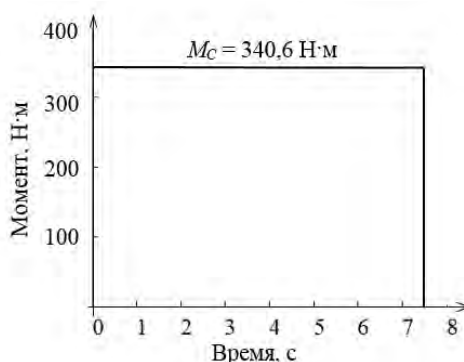


Рисунок 30 – Нагрузочная диаграмма механизма для режима подъёма груза

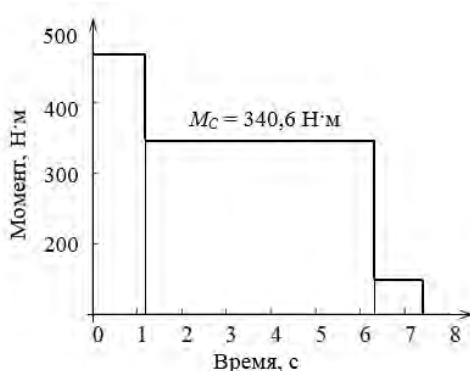


Рисунок 31 – Уточнённая нагрузочная диаграмма электропривода

Ответ: нагрузочная диаграмма механизма и уточнённая нагрузочная диаграмма для режима подъёма груза приведены на рисунках 30 и 31 соответственно.

4 Типовые задачи по расчёту статических режимов работы ДПТ с НВ и их решение

Задача 1. Двигатель постоянного тока с независимым возбуждением 2ПН132МУХЛ4 имеет следующие каталожные параметры:

- номинальная мощность на валу $P_{2ном} = 4$ кВт;
 - номинальное напряжение якоря $U_{Яном} = 220$ В;
 - номинальное напряжение возбуждения $U_{Вном} = 220$ В;
 - номинальный КПД двигателя равен 79 %;
 - сопротивление обмотки якоря $R_{ОЯ} = 0,56$ Ом;
 - сопротивление обмотки дополнительных полюсов $R_{ОДП} = 0,34$ Ом;
 - сопротивление обмотки возбуждения $R_{ОВ} = 134$ В;
 - номинальная частота вращения вала $n_{ном} = 1500$ об/мин;
 - класс изоляции обмоток – F;
 - сопротивления обмоток приведены для температуры 20 °С.
- Требуется определить номинальный ток якоря.

Решение

Номинальный ток якоря для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением можно найти по формуле

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

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

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

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

$R_{\text{ОВ}}$ – сопротивление обмотки возбуждения, Ом;

k_T – коэффициент приведения сопротивлений к нагретому состоянию.

Определим вначале коэффициент приведения сопротивлений к нагретому состоянию по формуле

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

где t° – температура при измерении сопротивлений, $t^\circ = 20$ °С;

α – температурный коэффициент, для меди $\alpha = 0,004$ 1/°С;

θ – расчётное значение температуры, определяемое классом изоляции,

$\theta = 90$ °С в случае класса изоляции F .

Тогда

$$k_T = [1 + 0,004 \cdot (90 - 20)] = 1,28.$$

Теперь определим ток якоря:

$$I_{\text{Яном}} = \frac{4 \cdot 10^3}{0,79 \cdot 220} - \frac{220}{1,28 \cdot 134} = 22,2 \text{ А.}$$

Ответ: номинальный ток якоря равен 22,2 А.

Задача 2. Для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением 2ПН132МУХЛ4 (параметры – см. задачу 1) определить номинальный коэффициент ЭДС и момента.

Решение

Выражение для определения номинального коэффициента ЭДС имеет вид:

$$k \cdot \Phi_{\text{ном}} = C_{\text{ном}} = \frac{U_{\text{Яном}} - I_{\text{Яном}} \cdot R_{\text{Я}}}{\omega_{\text{ном}}},$$

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

$R_{\text{Я}}$ – сопротивление якорной цепи двигателя, Ом.

Вычислим номинальную угловую скорость, зная частоту вращения вала двигателя:

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{ном}}}{30} = \frac{\pi \cdot 150}{30} = 157 \text{ рад/с.}$$



Сопротивление якорной цепи определяется выражением

$$R_{\text{я}} = k_T \cdot (R_{\text{оя}} + R_{\text{одп}} + R_{\text{ко}}) + R_{\text{щк}},$$

где $R_{\text{щк}}$ – сопротивление щеточного контакта, Ом.

Сопротивление щеточного контакта при условии, что щётки двигателя медно-графитовые (принимая падение напряжения $\Delta U_{\text{щ}} = 0,6$ В), можно найти по формуле

$$R_{\text{щк}} = \frac{\Delta U_{\text{щ}}}{I_{\text{яном}}} = \frac{0,6}{22,2} = 0,027 \text{ Ом.}$$

Тогда сопротивление якорной цепи, с учетом коэффициента приведения сопротивлений к нагретому состоянию, будет

$$R_{\text{я}} = 1,28 \cdot (0,56 + 0,34 + 0) + 0,027 = 1,18 \text{ Ом.}$$

Номинальный коэффициент ЭДС и момента тогда

$$k \cdot \Phi_{\text{ном}} = C_{\text{ном}} = \frac{220 - 22,2 \cdot 1,18}{157} = 1,23 \text{ В·с/рад.}$$

Ответ: номинальный коэффициент ЭДС и момента равен 1,23 В·с/рад.

Задача 3. Для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением 2ПН132МУХЛ4 (параметры – см. задачу 1) определить номинальный электромагнитный момент и номинальный момент на валу, а также момент потерь вращения при номинальной угловой скорости вала двигателя.

Решение

При решении задачи воспользуемся данными задач 1 и 2. Тогда номинальный электромагнитный момент двигателя будет

$$M_{\text{ном}} = C_{\text{ном}} \cdot I_{\text{яном}} = 1,23 \cdot 22,2 = 27,3 \text{ Н·м.}$$

Момент номинальный на валу определим как

$$M_{\text{вном}} = \frac{P_{2\text{ном}}}{\omega_{\text{ном}}} = \frac{4 \cdot 10^3}{157} = 25,5 \text{ Н·м.}$$

Тогда момент потерь вращения

$$\Delta M = M_{\text{ном}} - M_{\text{вном}} = 27,3 - 25,5 = 1,8 \text{ Н·м.}$$

Ответ: номинальный электромагнитный момент двигателя равен 27,3 Н·м, номинальный момент двигателя на валу равен 25,5 Н·м, момент потерь вращения равен 1,8 Н·м.

Задача 4. Для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением 2ПН132МУХЛ4 (параметры – см. задачу 1) определить скорость идеального



холостого хода, статическое падение скорости при номинальном токе якоря и модуль жёсткости естественной механической характеристики.

Решение

При решении задачи воспользуемся данными задач 1 и 2. Скорость идеального холостого хода

$$\omega_0 = \frac{U_{\text{Яном}}}{k \cdot \Phi_{\text{ном}}} = \frac{U_{\text{Яном}}}{C_{\text{ном}}} = \frac{220}{1,23} = 178,9 \text{ рад/с.}$$

Статическое падение скорости при номинальном токе якоря

$$\Delta\omega_{\text{ном}} = \frac{R_{\text{Я}}}{k \cdot \Phi} \cdot I_{\text{Яном}} = \frac{R_{\text{Я}}}{C} \cdot I_{\text{Яном}} = \frac{1,18}{1,23} \cdot 22,2 = 21,3 \text{ рад/с.}$$

Модуль жесткости естественной механической характеристики

$$\beta = \left| \frac{dM}{d\omega} \right| = \frac{(k \cdot \Phi)^2}{R_{\text{Я}}} = \frac{C^2}{R_{\text{Я}}} = \frac{1,23^2}{1,18} = 1,28 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с/рад.}$$

Ответ: скорость идеального холостого хода ДПТ с НВ равна 178,9 рад/с, статическое падение скорости при номинальном токе якоря составляет 21,3 рад/с, модуль жесткости равен 1,28 Н·м·с/рад.

Задача 5. Для ДПТ с НВ 2ПН132МУХЛ4 (параметры – см. задачу 1) определить скорость идеального холостого хода, ток короткого замыкания и момент короткого замыкания при напряжении на якоре двигателя 50 В.

Решение

При решении задачи воспользуемся данными задач 1 и 2. Скорость идеального холостого хода при напряжении на якоре 50 В

$$\omega_0 = \frac{U_{\text{Я}}}{k \cdot \Phi_{\text{ном}}} = \frac{U_{\text{Я}}}{C_{\text{ном}}} = \frac{50}{1,23} = 40,7 \text{ рад/с.}$$

Ток короткого замыкания при заданном напряжении

$$I_{\text{КЗ}} = \frac{U_{\text{Я}}}{R_{\text{Я}}} = \frac{50}{1,18} = 42,4 \text{ А.}$$

Момент короткого замыкания при заданном напряжении

$$M_{\text{КЗ}} = k \cdot \Phi_{\text{ном}} \cdot I_{\text{КЗ}} = C_{\text{ном}} \cdot I_{\text{КЗ}} = 1,23 \cdot 42,4 = 52,2 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Ответ: при напряжении на якоре 50 В скорость идеального холостого хода равна 40,7 рад/с, ток короткого замыкания равен 42,4 А, момент короткого замыкания равен 52,2 Н·м.

Задача 6. Для ДПТ с НВ 2ПН132МУХЛ4 (параметры – см. задачу 1) рассчитать и построить естественную электромеханическую характеристику для



двигательного режима работы, учитывая двукратную перегрузочную способность двигателя по току.

Решение

Для расчёта естественной электромеханической характеристики воспользуемся выражением

$$\omega = \frac{U_{\text{Яном}}}{C_{\text{ном}}} - \frac{R_{\text{Я}}}{C_{\text{ном}}} \cdot I_{\text{Я}},$$

а также данными, рассчитанными в предыдущих задачах, а именно:

– определим первую точку (точку идеального холостого хода):

$$I_{\text{Я}} = 0; \omega = \omega_0 = \frac{220}{1,23} = 178,9 \text{ рад/с};$$

– определим вторую точку (точку номинального режима работы):

$$I_{\text{Я}} = I_{\text{Яном}} = 22,2 \text{ А}; \omega = \omega_{\text{ном}} = \frac{\pi \cdot 1500}{30} = 157 \text{ рад/с}.$$

Определим предельно допустимый ток якоря двигателя в установившемся режиме работы, учитывая двукратную перегрузочную способность двигателя:

$$I_{\text{Ядоп}} = \lambda_1 \cdot I_{\text{Яном}} = 2 \cdot 22,2 = 44,4 \text{ А}.$$

По двум точкам (идеального холостого хода и номинального режима работы) построим статическую электромеханическую характеристику в первом квадранте плоскости $\{I_{\text{Я}}, \omega\}$ для интервала изменения тока $[0 \dots I_{\text{Ядоп}}]$.

Ответ: статическая электромеханическая характеристика представлена на рисунке 32.

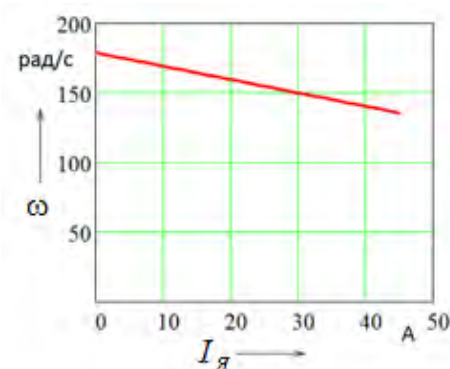


Рисунок 32 – Естественная электромеханическая характеристика ДПТ с НВ

Задача 7. Для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением 2ПН132МУХЛ4 (параметры – см. задачу 1) определить угловую скорость, с которой будет работать двигатель постоянного тока с независимым возбуждением на естественной характеристике при нагрузке на валу, равной 20 Н·м.

Решение

При решении задачи воспользуемся данными предыдущих задач. Угловую скорость двигателя определим, подставив в выражение статической механиче-



ской характеристики момент, равный моменту нагрузки ($M_C = 20 \text{ Н}\cdot\text{м}$):

$$\omega_{уст} = \omega_0 - \frac{M_C}{\beta} = 178,9 - \frac{20}{1,28} = 163,3 \text{ рад/с.}$$

Ответ: установившаяся скорость вала двигателя при нагрузке 20 Н·м будет равна 163,3 рад/с.

Задача 8. Для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением 2ПН132МУХЛ4 (параметры – см. задачу 1) определить величину сопротивления, включенного в якорную цепь двигателя, для обеспечения работы двигателя со скоростью $0,5 \cdot \omega_{НОМ}$ при моменте нагрузки на валу $1,2 \cdot M_{НОМ}$. Привести схему включения двигателя для этого случая и построить реостатную механическую характеристику.

Решение

При решении задачи воспользуемся данными предыдущих задач. Определим вначале момент нагрузки M_C и требуемую статическую угловую скорость ω_C :

$$M_C = 1,2 \cdot M_{ВНОМ} = 1,2 \cdot 25,5 = 30,6 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$\omega_C = 0,5 \cdot \omega_{НОМ} = 0,5 \cdot 157 = 78,5 \text{ рад/с.}$$

Требуемое добавочное сопротивление для искусственной (реостатной) характеристики можно найти по формуле

$$R_{ДОБ} = \frac{C_{НОМ} \cdot (U_{ЯНОМ} - C_{НОМ} \cdot \omega_C)}{M_C} - R_{Я} = \frac{1,23 \cdot (220 - 1,23 \cdot 78,5)}{30,6} - 1,18 = 2,85 \text{ Ом.}$$

Для выбора добавочного сопротивления из справочника приведём его сопротивление к холодному состоянию по формуле

$$R_{ДОБ(t^{\circ}C)} = \frac{R_{ДОБ}}{k_T} = \frac{2,85}{1,28} = 2,2 \text{ Ом.}$$

Схема включения двигателя постоянного тока с независимым возбуждением для этого случая имеет вид (рисунок 33).

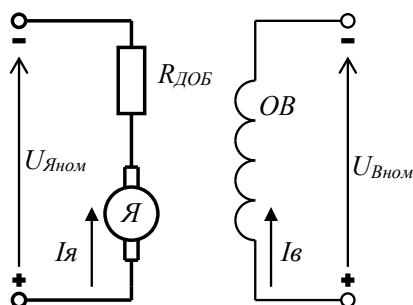


Рисунок 33 – Схема включения ДПТ с НВ при введении $R_{ДОБ}$ в цепь якоря



Выражение реостатной механической характеристики

$$\omega = \frac{U_{\text{яном}}}{C_{\text{НОМ}}} - \frac{R_{\text{Я}} + R_{\text{ДОБ}}}{(C_{\text{НОМ}})^2} \cdot M.$$

Для построения реостатной механической характеристики определим две точки этой характеристики, а именно:

- точку идеального холостого хода: $M = 0$; $\omega = \omega_0 = 178,9$ рад/с;
- точку статического режима работы: $M = M_C = 30,6$ А; $\omega = \omega_C = 78,5$ рад/с.

Определим предельно допустимый момент двигателя в установившемся режиме работы, учитывая двукратную перегрузочную способность двигателя:

$$M_{\text{доп}} = \lambda_1 \cdot M_{\text{ном}} = 2 \cdot 27,3 = 54,6 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

По двум точкам (идеального холостого хода и статического режима работы) построим реостатную механическую характеристику в первом квадранте плоскости $\{M, \omega\}$ для интервала изменения момента двигателя от нуля до предельно допустимого значения $[0 \dots M_{\text{доп}}]$.

Ответ: для обеспечения работы двигателя со скоростью $0,5 \cdot \omega_{\text{НОМ}}$ при моменте нагрузки на валу $1,2 \cdot M_{\text{НОМ}}$ в якорную цепь двигателя нужно ввести добавочное сопротивление $R_{\text{ДОБ}}$, величина которого в холодном состоянии равна 2,2 Ом. Статическая механическая характеристика при этом приведена на рисунке 34 (характеристика 2). Схема включения ДПТ с НВ при введении $R_{\text{ДОБ}}$ в цепь якоря отображена на рисунке 34.

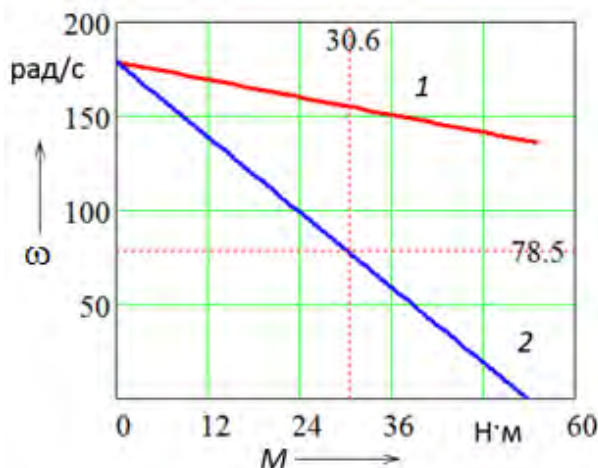


Рисунок 34 – Естественная механическая характеристика 1 и реостатная механическая характеристика ДПТ с НВ при введении в цепь якоря $R_{\text{ДОБ}} = 2,85$ Ом

Задача 9. Для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением 2ПН132МУХЛ4 (параметры – см. задачу 1) определить величину напряжения на якоре двигателя для обеспечения работы двигателя со скоростью $0,3 \cdot \omega_{\text{НОМ}}$ при моменте нагрузки на валу $1,5 \cdot M_{\text{НОМ}}$.

Решение

При решении задачи воспользуемся данными предыдущих задач. Определим вначале момент нагрузки M_C и требуемую статическую угловую скорость ω_C :



$$M_C = 1,5 \cdot M_{Вном} = 1,5 \cdot 25,5 = 38,25 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$\omega_C = 0,3 \cdot \omega_{ном} = 0,3 \cdot 157 = 47,1 \text{ рад/с.}$$

Требуемое напряжение на якоре найдём по формуле

$$U_{я} = C_{НОМ} \cdot \omega_C + \left(\frac{R_{я}}{C_{НОМ}} \right) \cdot M_C = 1,23 \cdot 47,1 + \left(\frac{1,18}{1,23} \right) \cdot 38,25 = 94,6 \text{ В.}$$

Ответ: для обеспечения работы двигателя со скоростью $0,3 \cdot \omega_{НОМ}$ при моменте нагрузки на валу $1,5 \cdot M_{НОМ}$ на якорь двигателя необходимо подать напряжение, равное 94,6 В.

Задача 10. Двигатель постоянного тока с независимым возбуждением 2ПН132МУХЛ4 (параметры – см. задачу 1) работает на естественной механической характеристике с моментом статическим, приведенным к валу двигателя равным $1,4 \cdot M_{НОМ}$. Якорь двигателя отключают от сети и замыкают на сопротивление $R_{ДТ}$, обмотка возбуждения остается подключенной к сети. Определить величину сопротивления $R_{ДТ}$, которое необходимо включить, чтобы обеспечить начальный тормозной момент двигателя, равный $2 \cdot M_{НОМ}$.

Решение

При решении задачи воспользуемся данными предыдущих задач. Определим вначале момент нагрузки M_C и начальный тормозной момент $M_{ДОП}$:

$$M_C = 1,4 \cdot M_{Вном} = 1,4 \cdot 25,5 = 37,5 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{ДОП} = 2 \cdot M_{Вном} = 2 \cdot 25,5 = 51 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

При данной нагрузке угловая скорость вала двигателя (а это и есть начальная скорость для режима динамического торможения) при его работе на естественной механической характеристике будет определяться выражением

$$\omega_{НАЧ} = \omega_0 - \frac{M_C}{\beta} = 178,9 - \frac{37,5}{1,28} = 149,6 \text{ рад/с.}$$

Величина тормозного сопротивления $R_{ДТ}$ рассчитывается из условия, чтобы при начальной скорости вращения вала двигателя его момент не превышал бы допустимого значения $M_{ДОП}$:

$$R_{ДТ} = \frac{C_{ном}^2 \cdot \omega_{НАЧ}}{M_{ДОП}} - R_{я} = \frac{1,23^2 \cdot 149,6}{51} - 1,18 = 3,25 \text{ Ом.}$$



Для выбора добавочного сопротивления из справочника приведём его сопротивление к холодному состоянию по формуле

$$R_{ДТ(t^0C)} = \frac{R_{ДТ}}{k_T} = \frac{3,25}{1,28} = 2,5 \text{ Ом.}$$

Ответ: величина сопротивления $R_{ДТ}$, на которое необходимо замкнуть якорную цепь двигателя, чтобы обеспечить начальный тормозной момент двигателя, равный $2 \cdot M_{НОМ}$ в режиме динамического торможения, равна 2,5 Ом.

Список литературы

- 1 **Онищенко, Г. Б.** Электрический привод : учебник / 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.
- 3 **Фираго, Б. И.** Теория электропривода : учебное пособие / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – 2-е изд. – Минск : Техноперспектива, 2007. – 585 с.
- 4 **Ключев, В. И.** Теория электропривода : учебник для вузов / В. И. Ключев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Энергоатомиздат, 2001. – 704 с. : ил.
- 5 **Ильинский, Н. Ф.** Общий курс электропривода / Н. Ф. Ильинский, В. Ф. Козаченко. – Москва : Энергоатомиздат, 1992. – 543 с.
- 6 **Москаленко, В. В.** Электрический привод : учебник / В. В. Москаленко. – Москва : Высшая школа, 1991. – 430 с.
- 7 **Москаленко, В. В.** Электрический привод : учебное пособие / В. В. Москаленко. – Москва : Мастерство ; Высшая школа, 2000. – 368 с.
- 8 **Фираго, Б. И.** Векторные системы управления электроприводами : учебное пособие для студентов учреждений высшего образования по специальности «Автоматизированные электроприводы» / Б. И. Фираго, Д. С. Васильев. – Минск : Вышэйшая школа, 2016. – 158 с.: ил.
- 9 **Фираго, Б. И.** Расчеты по электроприводу производственных машин и механизмов : учебное пособие для вузов по специальности «Автоматизированные электроприводы» / Б. И. Фираго. – Минск : Техноперспектива, 2012. – 639 с.: ил.
- 10 Справочник по электрическим машинам: в 2 т. / Под общ. ред. И. П. Копылова и Б. К. Клокова. – Москва: Энергоатомиздат, 1988. – Т. 1. – 456 с.: ил.



Приложение А (обязательное)

Индивидуальное задание по механике электропривода

Задан механизм подъёмного устройства, кинематическая схема которого представлена на рисунке А.1. Исходные данные, в соответствии с вариантом задания, приведены в таблицах А.1 и А.2.

Двигатель D через соединительную муфту $с_{M1}$, двухступенчатый цилиндрический редуктор, соединительную муфту $с_{M2}$ и передачу барабан–канат $Б-к$ поднимает и опускает груз $гp$ массой m . Заданы: маховый момент инерции двигателя GD^2 ; передаточное отношение первой и второй ступеней цилиндрического редуктора i_1 и i_2 соответственно; моменты инерции зубчатых шестерен и колес редуктора J_1, J_2, J_3, J_4 ; моменты инерции соединительных муфт $J_{с_{M1}}$ и $J_{с_{M2}}$; момент инерции барабана J_B ; диаметр барабана D_B ; номинальная частота вращения двигателя 1000 об/мин; коэффициент полезного действия каждой пары зубчатой передачи с учетом подшипников равен 0,9; коэффициент полезного действия передачи барабан – канат равен 0,8. Жесткость 1 м каната $C_{(1м)} = 2 \cdot 10^8$ Н·м. Высота подъема и опускания груза равна H . Все остальные связи между элементами считать абсолютно жесткими.

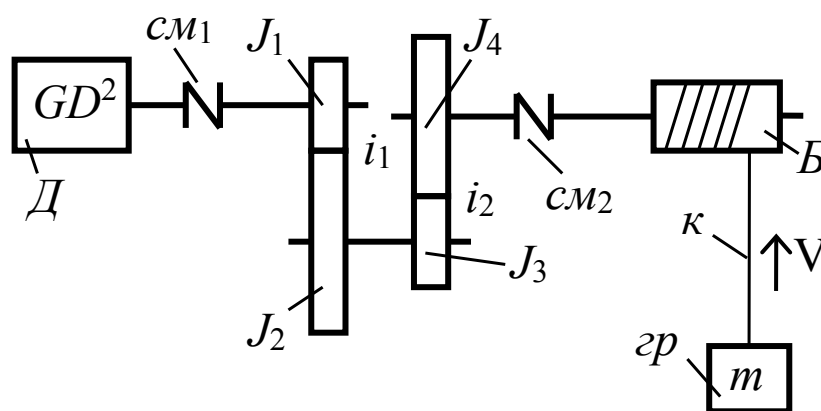


Рисунок А.1 – Кинематическая схема механизма

Требуется:

- 1) определить линейную скорость подъема груза при номинальной скорости вращения двигателя;
- 2) определить момент статический, приведенный к валу двигателя, при подъеме и опускании груза;
- 3) составить расчётную схему механической части ЭП;
- 4) записать уравнения движения;
- 5) определить суммарный (эквивалентный) момент инерции, приведенный к валу двигателя (считая приведенную жёсткость каната равной бесконечности);

6) определить момент двигателя, обеспечивающий подъём груза с ускорением, равным $1,5 \text{ м/с}^2$;

7) начертить тахограмму движения (зависимость линейной скорости груза от времени) для подъёма груза на расстояние H , м, при этом ускорение при разгоне и торможении принять равным $1,5 \text{ м/с}^2$;

8) построить нагрузочную диаграмму (зависимость момента на валу двигателя от времени) с учетом динамических нагрузок за время подъёма груза на заданное расстояние.

Таблица А.1 – Исходные данные для индивидуального задания

Параметры	Последняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
m , т	1,0	0,9	1,5	2,3	0,1	2,5	0,75	1,1	0,5	1,2
H , м	20	15	7	10	15	5	10	12	15	8
D_B , см	24	18	32	14	22	22	16	24	30	12
i_1	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	4,7	5,8	4,8	6,1	2,5
i_2	5,5	4,0	4,5	6,1	7,0	2,8	5,8	5,0	4,0	4,2
J_B , кг·м ²	4,9	3,2	5,8	9,4	6,6	4,2	6,8	5,3	7,5	6,7

Таблица А.2 – Исходные данные для индивидуального задания

Параметры	Предпоследняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
J_1 , кг·м ²	0,11	0,19	0,25	0,35	0,97	1,11	1,25	0,85	0,35	0,47
J_2 , кг·м ²	2,4	2,1	1,8	2,0	2,4	2,3	1,9	2,1	1,4	3,9
J_3 , кг·м ²	1,1	0,9	0,8	1,7	1,6	2,1	1,4	1,3	0,9	1,1
J_4 , кг·м ²	2,1	2,4	1,8	2,8	4,1	3,8	6,2	5,4	3,8	4,2
J_{CM1} , кг·м ²	0,10	0,12	0,18	0,12	0,21	0,27	0,13	0,11	0,19	0,19
J_{CM2} , кг·м ²	0,40	0,22	0,31	0,18	0,14	0,31	0,26	0,21	0,20	0,35
GD^2 , Н·м ²	15	22	20	25	18	25	23	17	12	15



Приложение Б (обязательное)

Индивидуальное задание по расчёту статических режимов работы двигателя постоянного тока с независимым возбуждением

В соответствии с вариантом задания выбрать из справочника двигатель постоянного тока с независимым возбуждением и выписать все его параметры. Исходные данные приведены в таблицах Б.1 и Б.2.

Требуется:

1) рассчитать и построить естественные электромеханическую и механическую характеристики выбранного двигателя (максимальное значение тока якоря принять равным $2 \cdot I_{ЯНОМ}$);

2) определить величину сопротивления, включенного в якорную цепь двигателя, для обеспечения работы двигателя со скоростью $A \cdot \omega_{НОМ}$ при моменте нагрузки на валу $B \cdot M_{НОМ}$. Привести схему двигателя для этого случая и построить реостатную механическую характеристику;

3) определить напряжение, которое необходимо подать на якорь двигателя, для обеспечения работы двигателя со скоростью $A \cdot \omega_{НОМ}$ при моменте нагрузки на валу $B \cdot M_{НОМ}$. Построить полученную механическую характеристику;

4) двигатель работает на естественной механической характеристике с моментом статическим, приведенным к валу двигателя, равным $C \cdot M_{НОМ}$. Якорь двигателя отключают от сети и замыкают на сопротивление $R_{ДОБ}$, обмотка возбуждения остается подключенной к сети. Определить:

а) величину сопротивления $R_{ДОБ}$, которое необходимо включить, чтобы обеспечить начальный тормозной момент двигателя, равный $D \cdot M_{НОМ}$;

б) скорость, с которой будет вращаться двигатель после окончания переходного процесса, если коэффициент полезного действия механизма равен 0,85, а момент нагрузки $C \cdot M_{НОМ}$ – активный;

5) решение п. 4 проиллюстрировать графиками статических механических характеристик;

6) определить величину сопротивления, включенного в цепь обмотки возбуждения двигателя, для обеспечения работы двигателя со скоростью $C \cdot \omega_{НОМ}$ при моменте нагрузки на валу $A \cdot M_{НОМ}$. Привести схему двигателя для этого случая и построить статические электромеханическую и механическую характеристики;

7) определить величину сопротивления противовключением, включённого в цепь якоря двигателя, чтобы момент, допустимый при реверсе и номинальной нагрузке на валу, не превысил величину $D \cdot M_{НОМ}$.



Таблица Б.1 – Исходные данные для индивидуального задания

Параметры	Последняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип двигателя	2ПН	2ПФ	2ПБ	2ПФ	2ПН	2ПО	2ПФ	2ПБ	2ПН	2ПФ
Номинальное напряжение якоря, В	220	220	220	440	440	220	440	440	220	220
<i>A</i>	0,8	0,7	0,4	1,0	0,5	0,8	0,7	0,3	0,9	0,6
<i>B</i>	1,2	1,8	1,5	0,9	1,2	1,5	0,8	1,2	1,8	1,3
<i>C</i>	1,4	0,9	1,5	1,4	1,2	0,9	1,6	1,5	1,0	1,4
<i>D</i>	1,4	2,0	2,5	2,4	2,6	2,8	3,0	1,8	2,4	2,8

Таблица Б.2 – Исходные данные для индивидуального задания

Параметры	Предпоследняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Высота оси вращения	132	180	200	250	225	100	160	180	200	280
Номинальная частота вращения, об/мин	1500	750	1500	1000	1500	1000	1500	1500	750	1500
Условная длина сердечника	L	M	M	M	L	M	L	M	L	L
<i>Примечания</i>										
1 Технические данные двигателей приведены в [10, таблицы 10.11–10.17].										
2 При отсутствии двигателей с заданной номинальной частотой вращения следует принимать их значения: 1600 (вместо 1500), 1050 (вместо 1000), 800 или 850 (вместо 750) об/мин										