

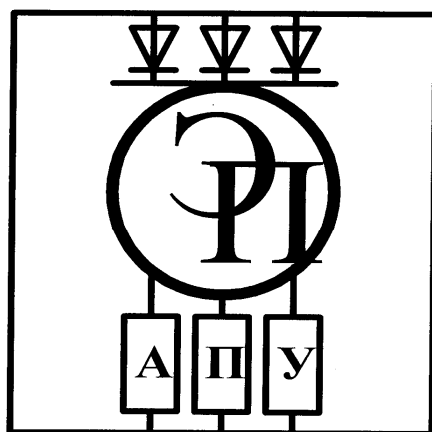
МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электропривод и АПУ»

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

*Методические рекомендации к практическим занятиям
для студентов специальности
6-05-0713-04 «Автоматизация технологических процессов
и производств» очной и заочной форм обучения*

Часть 1



Могилев 2026

УДК 62-83
ББК 31.291
Т33

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Электропривод и АПУ» «22» декабря 2025 г.,
протокол № 5

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

Рецензент канд. техн. наук, доц. Н. В. Герасименко

Методические рекомендации к практическим занятиям предназначены для студентов специальности 6-05-0713-04 «Автоматизация технологических процессов и производств» очной и заочной форм обучения. Содержат основные теоретические положения и формулы, необходимые для расчёта механической части электропривода (составления расчётных схем), статических электромеханических и механических характеристик двигателей постоянного тока в двигательном и тормозных режимах работы.

Учебное издание

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Часть 1

Ответственный за выпуск	А. С. Коваль
Корректор	И. В. Голубцова
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 26 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.

Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2026

Содержание

1 Тема 1. Приведение моментов инерции, масс элементов, жесткостей связей, нагрузок к расчетной скорости. Составление расчетных схем механической части электропривода	4
2 Тема 2. Уравнения движения механической части электропривода. Составление структурных схем механической части электропривода	14
3 Тема 3. Построение тахограмм и нагрузочных диаграмм электропривода	20
4 Тема 4. Расчёт естественных статических электромеханических и механических характеристик двигателя постоянного тока с независимым возбуждением	24
5 Тема 5. Расчёт искусственных статических характеристик двигателя постоянного тока с независимым возбуждением	31
6 Тема 6. Тормозные режимы работы двигателя постоянного тока с независимым возбуждением	43
Список литературы	47

1 Тема 1. Приведение моментов инерции, масс элементов, жесткостей связей, нагрузок к расчетной скорости. Составление расчетных схем механической части электропривода

Цель работы: изучить формулы приведения; научиться составлять расчётные схемы механической части электропривода по заданной кинематической схеме и записывать уравнения движения для типовых расчётных схем механической части электропривода (МЧ ЭП) (двухмассовой диссипативной и консервативной, одномассовой).

Краткие теоретические положения

Непосредственное представление о передаче механической энергии от вала двигателя к рабочему органу, о движущихся массах установки и механических связях между ними дает кинематическая схема установки (рисунок 1). Элементы, движущиеся вращательно, обладают моментом инерции J , кг·м², и связаны между собой связями, обладающими жесткостью кручения C_K , Н·м/рад. Элементы, движущиеся поступательно, обладают массой m , кг, и связаны между собой связями, обладающими жесткостью деформации (растяжения-сжатия) C_D , Н/м.

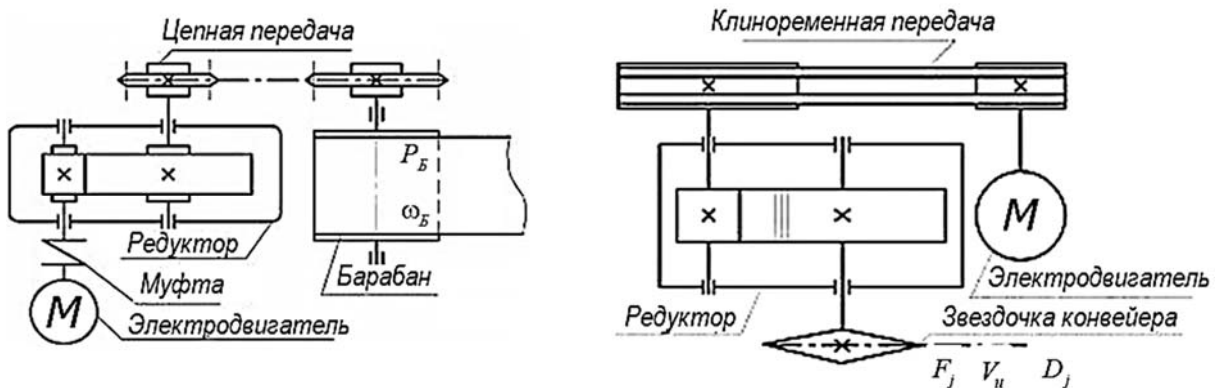


Рисунок 1 – Примеры кинематических схем механизмов

Чтобы оценить влияние параметров элементов на характер движения ЭП, осуществляют приведение этих параметров к одной расчетной скорости, в качестве которой в большинстве случаев принимают 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 – радиуса приведения ρ . 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:

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

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

$$\rho_{1-j} = \frac{V_j}{\omega_1}. \quad (2)$$

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

Общее передаточное отношение определяется произведением передаточных отношений всех механических передач:

$$i = \prod_{j=1}^n i_j. \quad (3)$$

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

$$\rho = \frac{D_{Ш(Б)}}{2 \cdot i_p}. \quad (4)$$

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

Рабочий орган производственной машины реализует полезную работу. К рабочему органу прикладывается нагрузка, преодолевая которую, он совершает полезную работу. Для оценки влияния этой нагрузки на движение ЭП её также необходимо привести к расчетной скорости. 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 радиуса приведения и передаточного отношения:

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

Передача механической энергии от вала двигателя к рабочему органу или обратно связана с потерями в механических передачах. Причина потерь – трение в подшипниках, направляющих, зацеплениях и т. п. Для совершения полез-

ной работы двигатель должен развивать момент на валу, идущий на преодоление момента полезной нагрузки, приложенной к рабочему органу механизма, и на преодоление дополнительной нагрузки, возникающей в результате трения в механических передачах:

$$M_C = M_{ПОЛ} \pm M_{ТР}. \quad (5)$$

Таблица 1 – Формулы приведения к скорости двигателя

Формула приведения	Вращательно движущийся элемент	Поступательно движущийся элемент
Перемещений	$\varphi_{1-j} = \varphi_1 \cdot i_{1-j}$	$\varphi_{1-j} = \frac{S_j}{\rho_{1-j}}$
Скоростей	$\omega_{1-j} = \omega_1 \cdot i_{1-j}$	$\omega_{1-j} = \frac{V_j}{\rho_{1-j}}$
Ускорений	$\varepsilon_{1-j} = \varepsilon_1 \cdot i_{1-j}$	$\varepsilon_{1-j} = \frac{a_j}{\rho_{1-j}}$
Моментов инерции	$J_{1-j} = \frac{J_j}{(i_{1-j})^2}$	$J_{1-j} = m_j \cdot (\rho_{1-j})^2$
Жесткостей связей	$C_{1-j} = \frac{C_j}{(i_{1-j})^2}$	$C_{1-j} = C_j \cdot (\rho_{1-j})^2$

В таблице 2 представлены формулы приведения статических нагрузок (сил и моментов) к расчетной 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	$M_C = \frac{M_j}{i_{1-j}} \cdot \left(2 - \frac{1}{\eta}\right)$	$M_C = F_j \cdot \rho_{1-j} \cdot \left(2 - \frac{1}{\eta}\right)$

Количественно потери энергии в механических передачах оцениваются коэффициентом полезного действия этих передач, который в большинстве случаев зависит от их загрузки, т. е. от передаваемого момента (усилия) (рисунок 2), а для червячных самотормозящих редукторов – от скорости вращения червяка (рисунок 3).

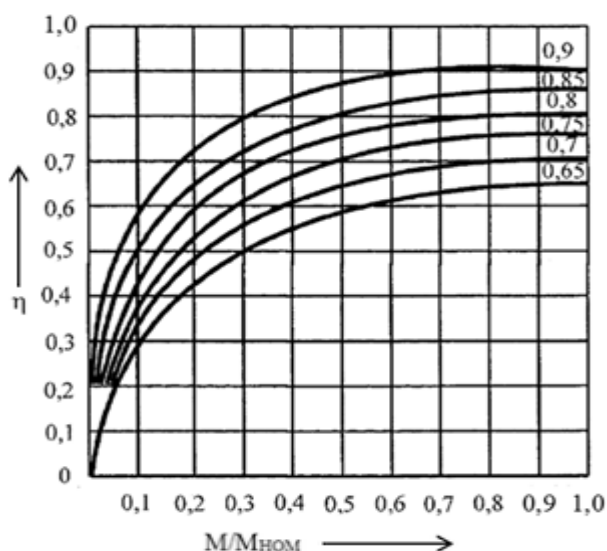


Рисунок 2 – Зависимость КПД механических передач от загрузки

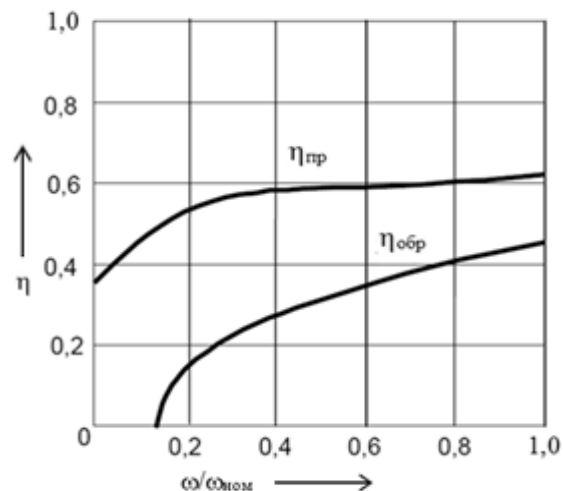


Рисунок 3 – Зависимость КПД червячных передач от скорости червяка

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 определить суммарные приведенные моменты инерции масс и эквивалентные жёсткости связей, а затем составить приближённую расчётную схему механической части электропривода.

При последовательном соединении элементов кинематической цепи с приведенной жёсткостью C_j эквивалентную жёсткость определяют по формуле

$$C_{ЭКВ} = \frac{1}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{C_j}}; \quad (6)$$

при параллельном – по формуле

$$C_{ЭКВ} = \sum_{j=1}^n C_j. \quad (7)$$

В результате упрощения (выделения главных масс и определения эквивалентных жёсткостей связей) расчётные схемы приводят к одной из следующих расчётных схем: к двухмассовой консервативной расчётной схеме (рисунок 4), к двухмассовой диссипативной расчётной схеме (рисунок 5) или одномассовой расчётной схеме механической части электропривода, которую называют эквивалентным жёстким приведенным звеном (рисунок 6).

Суммарный приведенный момент инерции эквивалентного жёсткого приведенного звена определяется как сумма момента инерции двигателя, приведенных моментов инерции вращательно движущихся элементов и приведенных моментов инерции поступательно движущихся элементов кинематической цепи:

$$J_{\Sigma} = J_{д} + \sum_j \frac{J_j}{i_{1-j}^2} + \sum_j m_j \cdot \rho_{1-j}^2. \quad (8)$$

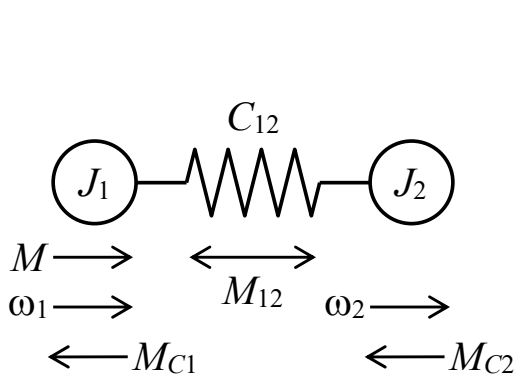


Рисунок 4 – Двухмассовая консервативная расчётная схема механической части электропривода

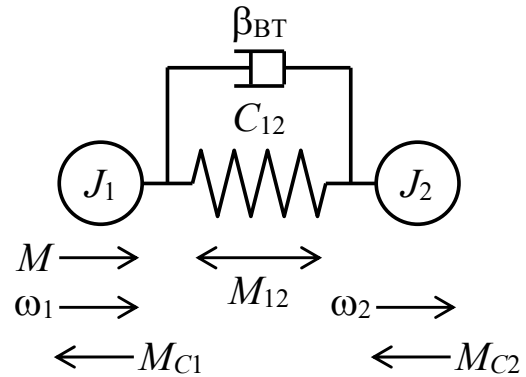


Рисунок 5 – Двухмассовая диссипативная расчётная схема механической части электропривода

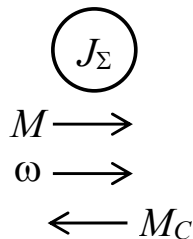


Рисунок 6 – Одномассовая расчётная схема механической части электропривода (эквивалентное жёсткое приведенное звено)

Типовые задачи и их решение

Задача 1. Задан механизм подъёмного устройства, кинематическая схема которого приведена на рисунке 7.

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

Передачное 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.

Требуется 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,

$$i_p = i_1 \cdot i_2 = 5 \cdot 4 = 20.$$

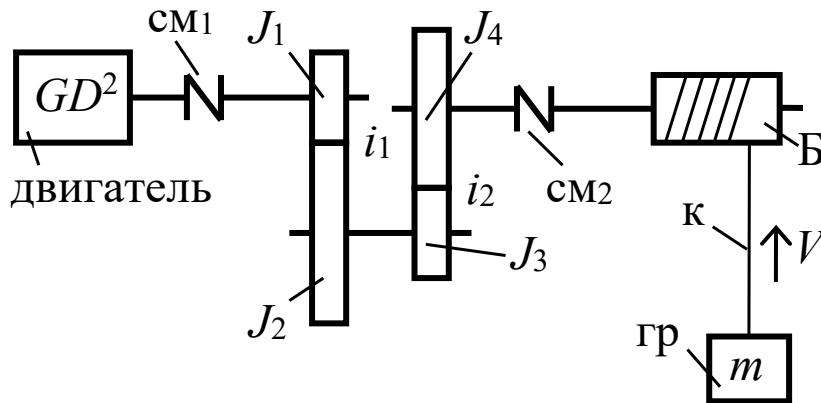


Рисунок 7 – Кинематическая схема механизма

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 теперь 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 7, 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 определяется 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.

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

$$\eta = \eta_{3II}^2 \cdot \eta_{B-K} = 0,9^2 \cdot 0,7 = 0,648.$$

Тогда момент статический, приведенный к валу двигателя, при подъёме груза

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

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 механизма подъёма (см. рисунок 7) 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 $J_{CM1} = 0,12$ кг·м² и $J_{CM2} = 0,2$ кг·м²; момент инерции барабана $J_B = 8,5$ кг·м²; жесткость 1 м кана-

та $C_{1M} = 2 \cdot 10^{11}$ Н/м; высота подъёма и опускания груза $H = 10$ м; жёсткость муфт $C_{CM1} = 2 \cdot 10^{11}$ Н·м/рад и $C_{CM2} = 4 \cdot 10^9$ Н·м/рад.

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

Решение

Момент инерции двигателя определим по формуле

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

Так как кинематическая схема механизма содержит значительное число элементов, пронумеруем эти элементы в направлении от двигателя к рабочему органу (рисунок 8).

Так как элементов значительное количество, то для составления расчётной схемы механической части электропривода все расчёты целесообразно вести в таблице (таблица 3).

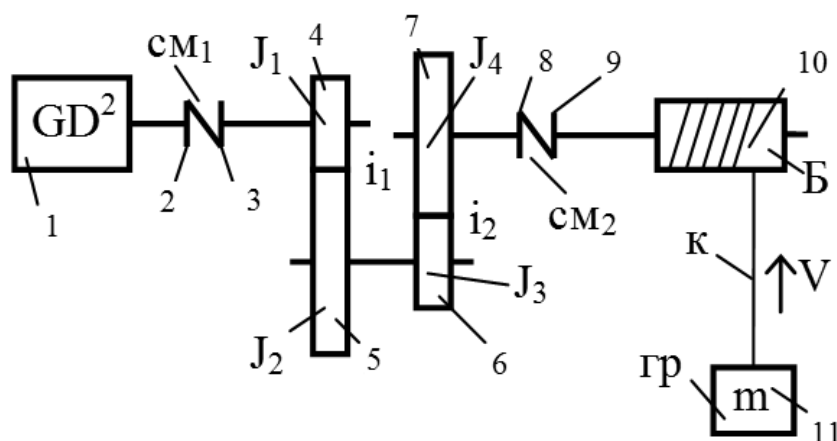


Рисунок 8 – Кинематическая схема с пронумерованными элементами

Таблица 3 – Расчёт приведенных моментов инерции и жёсткостей связей

Параметр	Значение параметра										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
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

$$J_{пр} = \frac{J_j}{(i_{1-j})^2};$$

- б) для поступательно движущихся элементов – по формуле

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

- в девятой строке – приведенные жёсткости связей элементов:

- а) для вращательно движущихся элементов расчёт ведут по формуле

$$C_{пр} = \frac{C_j}{(i_{1-j})^2};$$

- б) для поступательно движущихся – по формуле

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

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:

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

Так как в кинематической цепи содержится три податливых элемента, то

предварительно получим четырёхмассовую расчётную схему механической части электропривода (рисунок 9). Из рисунка видно, что приведенные моменты инерции элементов, имеющих абсолютно жёсткие связи, просто суммируются.

Самым податливым элементом кинематической цепи является канат, т. к. он имеет наименьшую приведенную жёсткость, поэтому перейдём к двухмассовой консервативной (коэффициент внутреннего вязкого трения не задан) расчётной схеме механической части ЭП (рисунок 10).

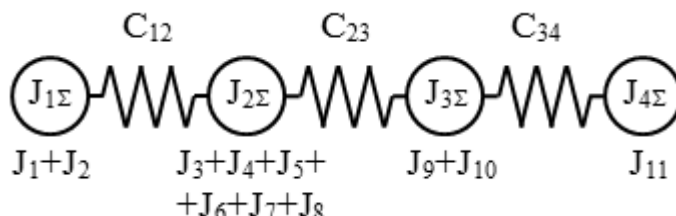


Рисунок 9 – Предварительная расчётная схема механической части ЭП

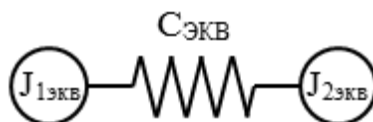


Рисунок 10 – Двухмассовая консервативная расчётная схема механической части ЭП

Определим эквивалентную жёсткость, беря во внимание последовательное соединение податливых элементов (рисунок 9):

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

Приведенные моменты инерции первой и второй масс

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

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

Ответ: для заданной кинематической схемы механизма подъёма и параметров элементов кинематической цепи расчётная схема механической части электропривода двухмассовая консервативная (рисунок 11).

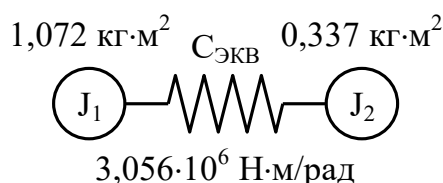


Рисунок 11 – Двухмассовая консервативная расчётная схема механической части ЭП

2 Тема 2. Уравнения движения механической части электропривода. Составление структурных схем МЧ ЭП

Цель работы: изучить уравнения движения двухмассовой консервативной, двухмассовой диссипативной и одномассовой эквивалентной расчётных схем МЧ ЭП; научиться по уравнениям движения составлять структурные схемы (двухмассовой диссипативной и консервативной, одномассовой) МЧ ЭП.

Краткие теоретические положения

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. Уравнения, связывающие эти моменты, называются уравнениями движения электропривода. Положительное направление момента сопротивления принимают противоположным положительному направлению момента двигателя.

Уравнения движения двухмассовой консервативной и двухмассовой диссипативной расчётных схем имеют вид

$$\begin{cases} M - M_{12} - M_{C1} = J_1 \cdot \frac{d\omega_1}{dt}; \\ M_{12} - M_{C2} = J_2 \cdot \frac{d\omega_2}{dt}. \end{cases} \quad (9)$$

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

Для двухмассовой консервативной расчётной схемы

$$M_{12} = C_{12} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2). \quad (10)$$

Для двухмассовой диссипативной расчётной схемы

$$M_{12} = C_{12} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) - \beta_{BT} \cdot (\omega_1 - \omega_2), \quad (11)$$

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:

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

Упругими свойствами кинематических звеньев можно пренебречь в тех случаях, когда соблюдаются следующие условия:

– если $\gamma = \frac{J_1 + J_2}{J_1} \rightarrow 1$, т. е. $J_2 \ll J_1$;

– если $C_{12} \rightarrow \infty$;

– если $J_1 \cong J_2$, т. е. J_1 и J_2 соизмеримы, но C_{12} велика и отсутствует условие возникновения резонанса (т. е. отсутствуют возмущения на механическую часть с частотой, близкой к собственной частоте Ω_{12}).

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

$$M - M_C = J_{\Sigma} \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (13)$$

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.

Структурные схемы МЧ ЭП могут быть составлены на основании уравнений движения 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

$$\begin{cases} M(P) - M_{12}(P) - M_{C1}(P) = J_1 \cdot P \cdot \omega_1(P); \\ M_{12}(P) - M_{C2}(P) = J_2 \cdot P \cdot \omega_2(P); \\ M_{12}(P) = \frac{C_{12}}{P} \cdot [\omega_1(P) - \omega_2(P)]; \end{cases} \quad (14)$$

– для двухмассовой диссипативной расчётной схемы

$$\begin{cases} M(P) - M_{12}(P) - M_{C1}(P) = J_1 \cdot P \cdot \omega_1(P); \\ M_{12}(P) - M_{C2}(P) = J_2 \cdot P \cdot \omega_2(P); \\ M_{12}(P) = \left[\frac{C_{12}}{P} + \beta_{BT} \right] \cdot [\omega_1(P) - \omega_2(P)]; \end{cases} \quad (15)$$

– для эквивалентного жёсткого приведенного звена

$$M(P) - M_{C1}(P) = J_{\Sigma} \cdot P \cdot \omega(P). \quad (16)$$

На основании уравнений (14)–(16) можно составить структурные схемы МЧ ЭП. Структурные схемы представлены на рисунках 12–14.

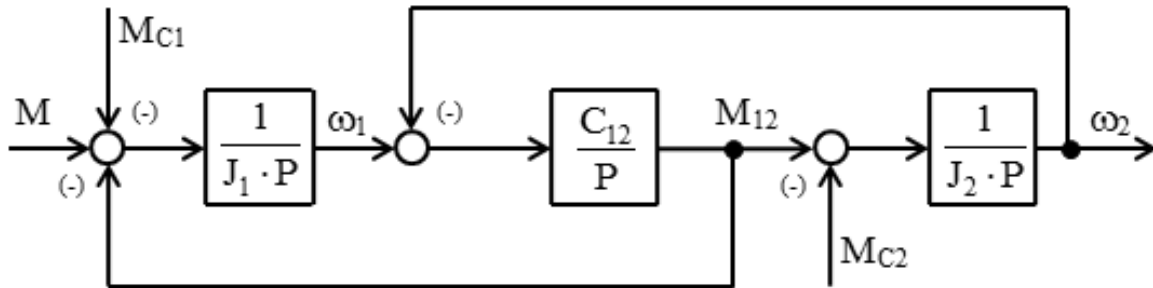


Рисунок 12 – Структурная схема двухмассовой консервативной расчётной схемы механической части электропривода

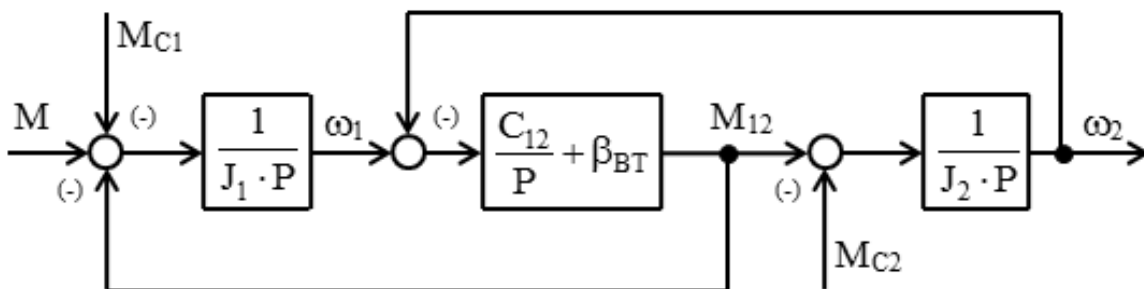


Рисунок 13 – Структурная схема двухмассовой диссипативной расчётной схемы механической части электропривода

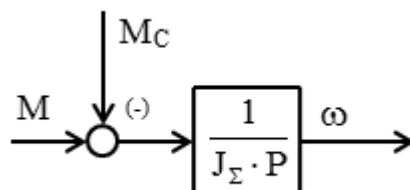


Рисунок 14 – Структурная схема одномассовой расчётной схемы механической части электропривода (эквивалентного жёсткого приведенного звена)

Типовые задачи и их решение

Задача 1. По данным задачи 3 (см. тему 1) 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 2. По данным задачи 1 проверить возможность перехода от двухмассовой консервативной расчётной схемы механической части к одномассовой (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 15).

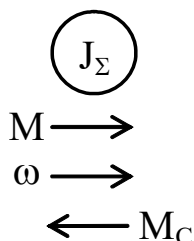


Рисунок 15 – Расчётная схема механической части электропривода

Ответ: на основании приведенных расчётов возможен переход к одномассовой расчётной схеме, которая имеет следующий вид (рисунок 16).

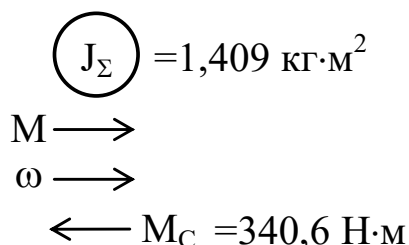


Рисунок 16 – Расчётная схема эквивалентного жёсткого приведенного звена

Задача 3. Полагая все кинематические связи механической части электропривода механизма подъёма (см. рисунок 8, кинематическая схема) 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 2).

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

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

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

3 Тема 3. Построение тахограмм и нагрузочных диаграмм ЭП

Цель работы: изучить виды диаграмм электропривода; научиться рассчитывать и строить тахограммы и нагрузочные диаграммы упрощённые и уточнённые (с учётом действия момента динамического) электропривода.

Краткие теоретические положения

Тахограмма движения ЭП $\omega = f(t)$ – зависимость угловой скорости ротора (якоря) двигателя от времени за цикл работы. Для её построения необходимо рассчитать скорости, ускорения и интервалы времени, соответствующие установившимся и переходным режимам работы (разгон, торможение). Угловые скорости и ускорения определяются по формулам приведения. Интервалы времени (при линейных кинематических передачах ($i = \text{const}$, $\rho = \text{const}$)), соответствующие разгону и торможению при постоянном ускорении (равноускоренное движение) и движению привода с постоянной скоростью (равномерное движение), определяются по простым формулам, которые приведены в таблице 4.

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.

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.

Таблица 4 – 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)	$S_{P(T)} = \frac{a_{\text{доп}} \cdot t_{P(T)}^2}{2}$	$\varphi_{P(T)} = \frac{\varepsilon_{\text{доп}} \cdot t_{P(T)}^2}{2}$
Путь, проходимый рабочим органом при движении с постоянной скоростью	$S_Y = S_{\Sigma} - S_P - S_T$ S_{Σ} – весь путь	$\varphi_Y = \varphi_{\Sigma} - \varphi_P - \varphi_T$ φ_{Σ} – весь путь
Время движения рабочего органа с постоянной скоростью $V(\omega)$	$t_Y = \frac{S_Y}{V}$	$t_Y = \frac{\varphi_Y}{\omega}$

Типовые задачи и их решение

Задача 1. 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 $1,5 \text{ м/с}^2$.

Решение

Так как груз при подъёме совершает поступательное движение, то для построения тахограммы воспользуемся формулами для определения интервалов времени и пути для поступательного движения (см. таблицу 4).

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:

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

Путь, проходимый грузом за время разгона и время торможения,

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

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

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 имеет следующий вид (рисунок 17).

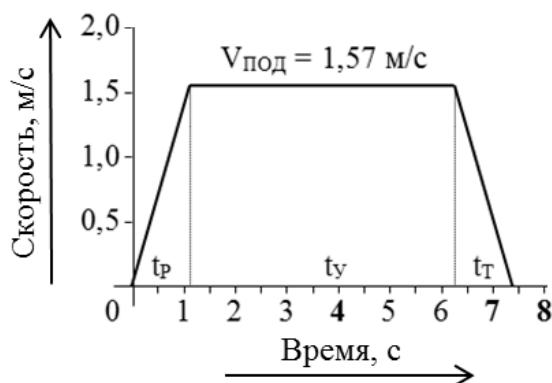


Рисунок 17 – Тахограмма движения для режима подъёма груза

Задача 2. 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):

$$M_c^{\uparrow} = 340,6 \text{ Н·м.}$$

Время разгона, время движения с установившейся скоростью и время торможения определены в задаче 1. Время подъёма груза на высоту 10 м

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

Тогда нагрузочная диаграмма механизма для режима подъёма груза будет иметь следующий вид (рисунок 18).

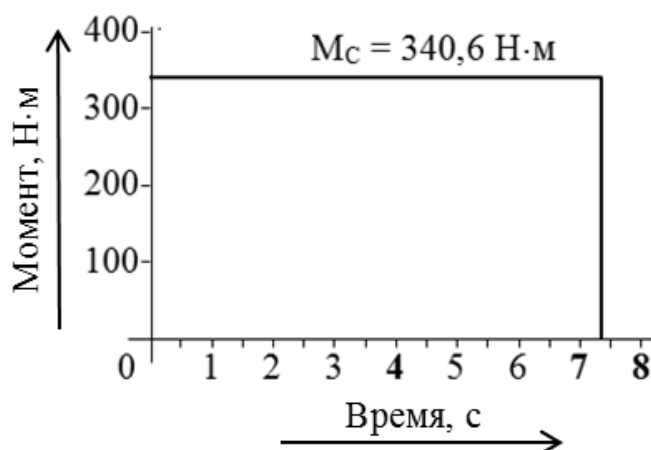


Рисунок 18 – Нагрузочная диаграмма механизма для режима подъема груза

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

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

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

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

Тогда уточнённая нагрузочная диаграмма (с учётом динамических нагрузок) будет иметь следующий вид (рисунок 19).

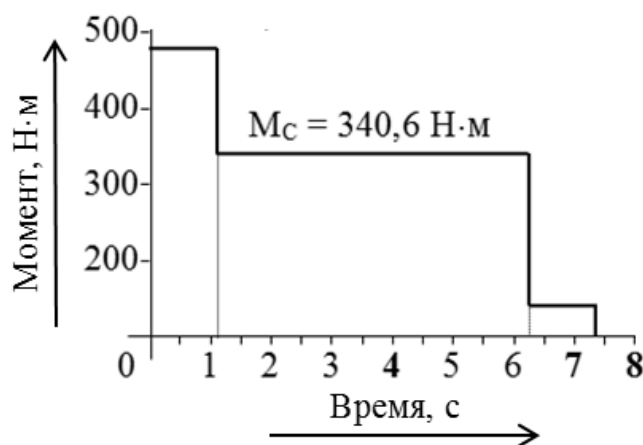


Рисунок 19 – Уточнённая нагрузочная диаграмма электропривода

Ответ: нагрузочная диаграмма механизма и уточнённая нагрузочная диаграмма для режима подъема груза приведены на рисунках 18 и 19 соответственно.

4 Тема 4. Расчёт естественных статических электромеханических и механических характеристик двигателя постоянного тока с независимым возбуждением

Цель работы: изучить естественные статические механические и электромеханические характеристики ДПТ с НВ; научиться рассчитывать и строить статические МХ и ЭМХ ДПТ с НВ (по паспортным данным) электропривода.

Краткие теоретические положения

Статическая ЭМХ ДПТ с НВ представляет собой зависимость угловой скорости от тока якоря $\{\omega = f(I_{я})\}$, а статическая МХ – от момента электромагнитного $\{\omega = f(M)\}$ в установившемся режиме работы.

Уравнения статических ЭМХ и МХ ДПТ с НВ

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

где $U_{я}$ – напряжение на якоре, В;

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

$I_{я}$ – ток якорной цепи, А;

Φ – полезный поток, Вб;

k – конструктивный коэффициент двигателя.

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

где p – число пар полюсов двигателя;

N – число активных проводников обмотки якоря;

a – число параллельных ветвей обмотки якоря.

ЭДС двигателя пропорциональна его угловой скорости, а электромагнитный момент – току якоря, причем коэффициент пропорциональности один и тот же $(k \cdot \Phi)$. Поэтому произведение $(k \cdot \Phi)$ иногда называют коэффициентом ЭДС и момента (электромагнитного). При неизменном потоке возбуждения ($\Phi = \text{const}$) данный коэффициент обозначают символом C (т. е. $k \cdot \Phi = C$). С учетом этого уравнения статических ЭМХ и МХ ДПТ с НВ могут быть записаны в виде

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

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

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

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 и указывается на табличке двигателя;
- сопротивление якорной цепи

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

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 сопротивлений к нагретому состоянию.

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

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, $\theta = 75$ °С для класса изоляции В, $\theta = 90$ °С для класса изоляции F.

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

У двигателей небольшой мощности компенсационная обмотка может отсутствовать. Тогда в формуле (22) следует принять $R_{КО} = 0$.

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, $\Delta U_{Щ} = 0,6$ В для медно-графитовых и $\Delta U_{Щ} = 2$ В для графитовых щеток;

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

Если номинальный ток якоря неизвестен, то его 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.

В случае если в справочнике не заданы сопротивления обмоток, 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 из выражения естественной ЭМХ, записанной для номинального режима работы,

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

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:

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

Скорость идеального холостого хода определяется выражением

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

Ток короткого замыкания определяется при $\omega = 0$:

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

Момент короткого замыкания определяется как

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

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 ($\lambda_I = 2,5 \dots 3$) 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 $[0 \dots M_{доп}]$.

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

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

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 $\{\omega, I_{Я}\}$ или $\{\omega, M\}$ строят требуемую электромеханическую или механическую характеристику.

Поэтому в качестве первой расчётной точки принимают скорость идеального холостого хода ω_0 , а 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 соответственно номинальные значения тока якоря и момента и при этих значениях рассчитывают угловую скорость.

На рисунках 20 и 21 представлены естественные ЭМХ и МХ ДПТ с НВ соответственно в допустимых пределах существования тока якоря и момента в установившемся режиме работы.

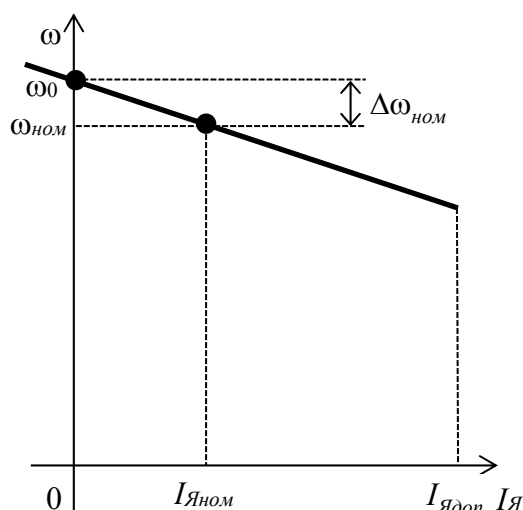


Рисунок 20 – Естественная электромеханическая характеристика ДПТ с НВ

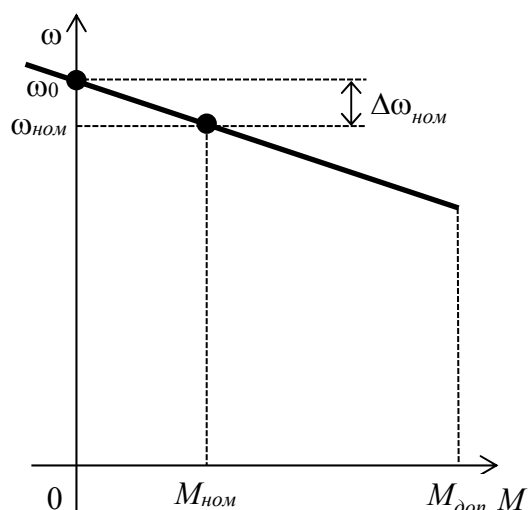


Рисунок 21 – Естественная механическая характеристика ДПТ с НВ

Типовые задачи 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 и возбуждения $U_{Яном} = U_{Вном} = 220$ 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 ДПТ с НВ можно найти по формуле

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

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;

k_T – коэффициент приведения сопротивлений к нагретому состоянию.

Коэффициент приведения сопротивлений к нагретому состоянию

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

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:

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

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

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

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

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

Вычислим номинальную угловую скорость, зная частоту вращения вала двигателя:

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

Сопротивление якорной цепи определяется выражением

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

где $R_{ЩК}$ – сопротивление щеточного контакта, Ом.

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

$$R_{ЩК} = \frac{\Delta U_{Щ}}{I_{Яном}} = \frac{0,6}{22,2} = 0,027 \text{ Ом.}$$

Тогда сопротивление якорной цепи, с учетом коэффициента приведения сопротивлений к нагретому состоянию, величина которого определена в задаче 1, будет

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

Номинальный коэффициент ЭДС и момента тогда

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

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

Задача 3. Для ДПТ с НВ 2ПН132МУХЛ4 (параметры – см. задачу 1) определить номинальный электромагнитный момент и номинальный момент на валу, а также момент потерь вращения.

Решение

Номинальный электромагнитный момент двигателя будет

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

Момент номинальный на валу определим как

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

Тогда момент потерь вращения

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

Ответ: номинальный электромагнитный момент равен 27,3 Н·м, номинальный момент на валу – 25,5 Н·м, момент потерь вращения – 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

Скорость идеального холостого хода

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

Статическое падение скорости при номинальном токе якоря

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

Модуль жесткости естественной механической характеристики

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

Ответ: скорость идеального холостого хода равна 178,9 рад/с, статическое падение скорости – 21,3 рад/с, модуль жесткости – 1,28 Н·м·с/рад.

5 Тема 5. Расчёт искусственных статических характеристик двигателя постоянного тока с независимым возбуждением

Цель работы: изучить искусственные статические МХ и ЭМХ ДПТ с НВ; научиться рассчитывать и строить искусственные статические МХ и ЭМХ ДПТ с НВ и определять параметры питающей сети и двигателя для обеспечения его работы при заданном моменте нагрузки с заданной угловой скоростью.

Краткие теоретические положения

При изменении хотя бы одного из параметров, входящих в выражения МХ и ЭМХ (напряжения на якоре, потока двигателя, добавочных сопротивлений), получают характеристики, отличные от естественной. Такие характеристики называют искусственными.

Искусственные статические характеристики ДПТ с НВ при изменении напряжения на якоре

Напряжение на якоре ДПТ с НВ можно только уменьшать.

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

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

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

Расчёт требуемого значения напряжения на якоре ДПТ с НВ для обеспечения требуемой скорости $\omega_{\text{с}}$ при моменте $M_{\text{с}}$ осуществляется подстановкой последних в выражение статической механической характеристики. Например, для работы в точке *A* (рисунок 22) 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

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

а искусственную статическую механическую характеристику можно рассчитать и построить по выражению

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

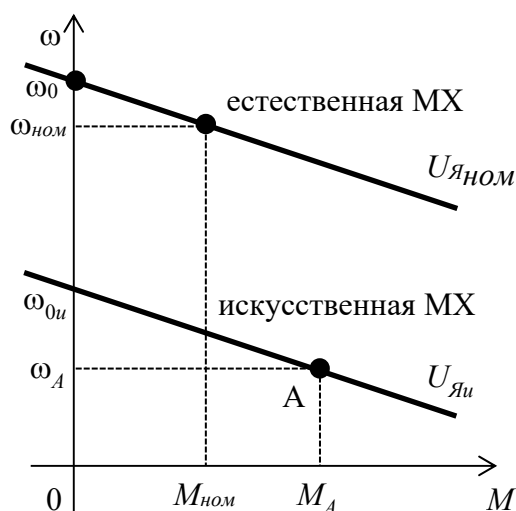


Рисунок 22 – Искусственная МХ ДПТ с НВ при напряжении якоря $U_{Яи}$

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 23 приведена универсальная кривая намагничивания ДПТ с НВ, где ток возбуждения и поток представлены в относительных единицах (относительно их номинальных значений). Как видно из кривой намагничивания, увеличение тока возбуждения не вызывает существенного увеличения потока двигателя, при этом только лишь возрастают потери в цепи обмотки возбуждения, что может привести к ее чрезмерному нагреву и выходу из строя. Поэтому поток двигателя только уменьшают, уменьшая ток возбуждения.

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.

Согласно выражению (35), ток возбуждения пропорционален напряжению возбуждения и обратно пропорционален сопротивлению цепи возбуждения, значит, уменьшить ток в обмотке возбуждения (а следовательно, и поток двига-

теля) можно, либо уменьшая напряжение возбуждения, либо вводя добавочное сопротивление в цепь обмотки возбуждения.

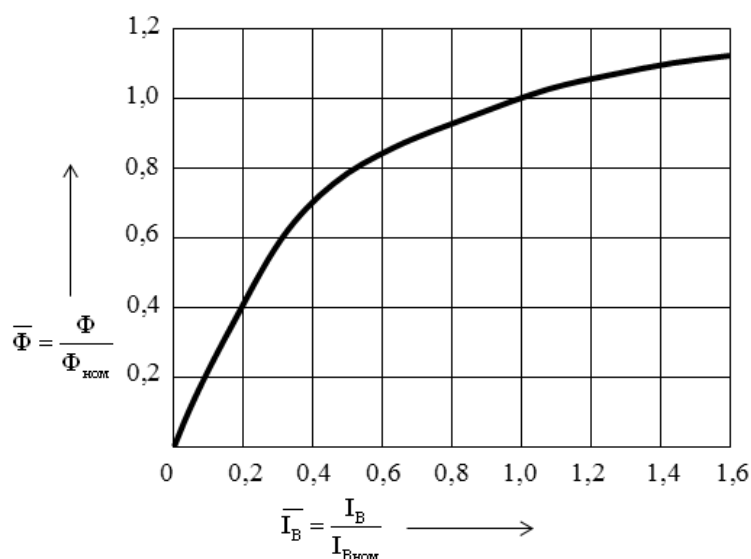


Рисунок 23 – Универсальная кривая намагничивания ДПТ с НВ

Для расчёта величины добавочного сопротивления, включённого в цепь обмотки возбуждения, вначале необходимо найти значение потока двигателя при заданной угловой скорости и моменте нагрузки, для чего подставляют эти значения в выражение статической механической характеристики и определяют поток двигателя. Например, для работы в точке B (рисунок 24) с моментом M_B и угловой скоростью ω_B требуется уменьшить поток двигателя. Требуемый поток Φ' можно определить по формуле

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

При этом из двух значений потока выбирают то значение, которое меньше номинального потока приблизительно во столько раз, во сколько угловая скорость двигателя ω_B больше скорости двигателя при $M = M_B$ при работе его на естественной характеристике при номинальном потоке.

Для выбранного значения потока Φ' вычисляют его относительное значение по формуле

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

По универсальной кривой намагничивания (см. рисунок 23) определяют относительное значение и вычисляют реальное значение тока возбуждения по формуле

$$I'_B = \bar{I}_B \cdot I_{B\text{ном}}.$$

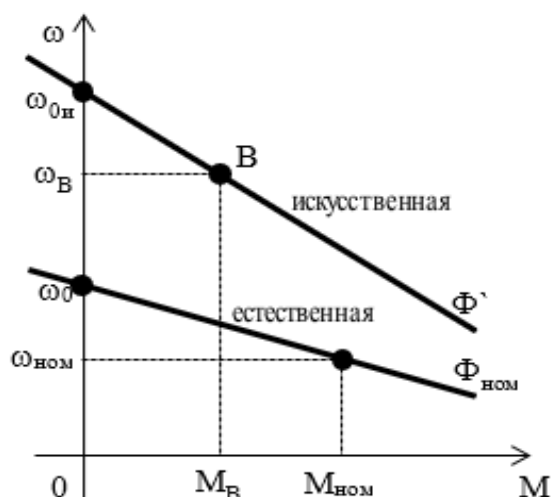


Рисунок 24 – Искусственная МХ ДПТ с НВ при ослаблении потока двигателя

Величину добавочного сопротивления, включённого в цепь обмотки возбуждения, находят по формуле

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

При необходимости величину напряжения возбуждения U_B определяют по формуле

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

Для выбора добавочного сопротивления по справочнику его значение следует привести к холодному состоянию по формуле

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

Мощность добавочного сопротивления

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

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

Искусственная характеристика, полученная введением в цепь якоря добавочного сопротивления (реостата), носит название «реостатная электромеханическая (или механическая) характеристика». Выражения электромеханических и механических реостатных характеристик имеют вид

$$\omega = \frac{U_{\text{Яном}}}{C_{\text{НОМ}}} - \frac{R_{\text{Я}} + R_{\text{Ядоб}}}{C_{\text{НОМ}}} \cdot I_{\text{Я}}; \quad (36)$$

$$\omega = \frac{U_{\text{Яном}}}{C_{\text{НОМ}}} - \frac{R_{\text{Я}} + R_{\text{Ядоб}}}{(C_{\text{НОМ}})^2} \cdot M, \quad (37)$$

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

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 МХ. Например, для работы в точке C (рисунок 25) с моментом M_C и угловой скоростью ω_C требуется в цепь якоря ввести добавочное сопротивление, величину которого можно определить по формуле

$$R_{\text{Ядоб}} = \frac{C_{\text{НОМ}} \cdot (U_{\text{Яном}} - C_{\text{НОМ}} \cdot \omega_C)}{M_C} - R_{\text{Я}}, \quad (38)$$

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

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

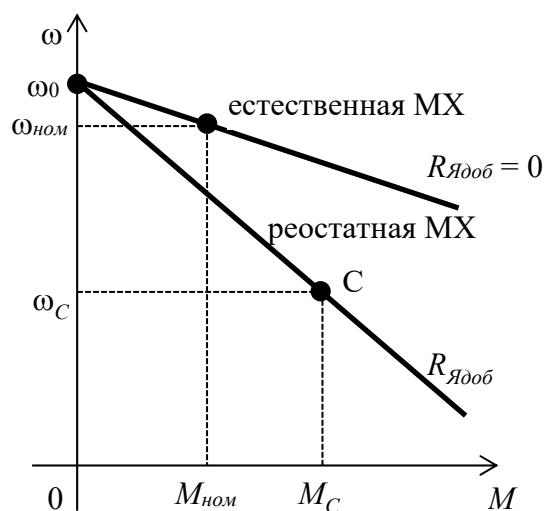


Рисунок 25 – Реостатная МХ ДПТ с НВ при введении в цепь якоря $R_{\text{Ядоб}}$

Определив требуемое значение $R_{\text{Ядоб}}$ по (38), не стоит забывать, что оно найдено для нагретого состояния. Для выбора добавочного сопротивления из справочника необходимо знать ток и величину сопротивления, соответствующую холодному состоянию. Привести сопротивление к холодному состоянию можно, используя формулу

$$R_{Ядооб(t^0C)} = \frac{R_{Ядооб}}{k_T}, \quad (39)$$

а ток определить по формуле

$$I_R = \frac{M_C}{C_{НОМ}}. \quad (40)$$

Искусственные статические характеристики ДПТ с НВ при шунтировании якоря

Искусственные характеристики ДПТ с НВ могут быть получены путём шунтирования якорной обмотки.

Выражения статических электромеханических и механических характеристик при шунтировании якоря ДПТ с НВ имеют вид

$$\omega = \frac{\alpha \cdot U_{ЯНОМ}}{C_{НОМ}} - \frac{R_Я + \alpha \cdot R_{Ядооб}}{C_{НОМ}} \cdot I_Я; \quad (41)$$

$$\omega = \frac{\alpha \cdot U_{ЯНОМ}}{C_{НОМ}} - \frac{R_Я + \alpha \cdot R_{Ядооб}}{(C_{НОМ})^2} \cdot M, \quad (42)$$

где α – коэффициент деления напряжения,

$$\alpha = \frac{R_{Ш}}{R_{Ш} + R_{П}}.$$

При выбранных конкретных значениях $R_{П1}$ и $R_{Ш1}$ статическая механическая характеристика 1 (рисунок 26) определяется по точкам A и B с координатами

$$M_A = \frac{-U_{ЯНОМ}}{R_{Ш1}} \cdot C_{НОМ}; \quad \omega_A = \omega_0 \cdot \left(1 + \frac{R_Я}{R_{Ш1}}\right);$$

$$M_B = \frac{U_{ЯНОМ}}{R_{П1}} \cdot C_{НОМ}; \quad \omega_B = \omega_0 \cdot \left(-\frac{R_Я}{R_{П1}}\right).$$

При заданном моменте нагрузки (статическом моменте M_C) и заданной скорости ω_C (см. рисунок 26, точка C) определение требуемых значений $R_{П1}$ и $R_{Ш1}$ производят в следующем порядке:

– задаются требуемым значением жёсткости искусственной характеристики:

$$\beta_C = \frac{\Delta M_C}{\Delta \omega_C} = \frac{M_B - M_C}{\omega_C + \omega_B}; \quad (43)$$

– через точку C проводят прямую, тангенс угла которой определяется выражением (43), до пересечения с характеристикой 2 (последняя проводится через начало координат параллельно естественной характеристике);

– соединяя точку B с точкой идеального холостого хода ($\omega = \omega_0, M = 0$), прямой 3 контролируют достаточность рабочей области при возможных колебаниях момента на валу;

– определяют искомые значения $R_{П1}$ и $R_{Ш1}$:

$$R_{П1} = \frac{M_B}{C_{НОМ} \cdot U_{ЯНОМ}};$$

$$\alpha = \frac{R_{Ш1}}{R_{Ш1} + R_{П1}} = \frac{C_{НОМ}^2 \cdot \omega_0 + R_{Я} \cdot M_C}{C_{НОМ} \cdot U_{ЯНОМ} - R_{П1} \cdot M_C};$$

$$R_{Ш1} = R_{П1} \left(\frac{\alpha}{1 - \alpha} \right)$$

или при известных ω_C, β_C и M_C

$$R_{П1} = \frac{U_{ЯНОМ} \cdot (C_{НОМ}^2 - R_{Я} \cdot \beta_C)}{C_{НОМ} \cdot (M_C + \omega_C \cdot \beta_C)};$$

$$\alpha = \frac{R_{Ш1}}{R_{Ш1} + R_{П1}} = \frac{C_{НОМ} \cdot (\beta_C \cdot \omega_C + M_C)}{\beta_C \cdot U_{ЯНОМ}};$$

$$R_{Ш1} = R_{П1} \left(\frac{\alpha}{1 - \alpha} \right).$$

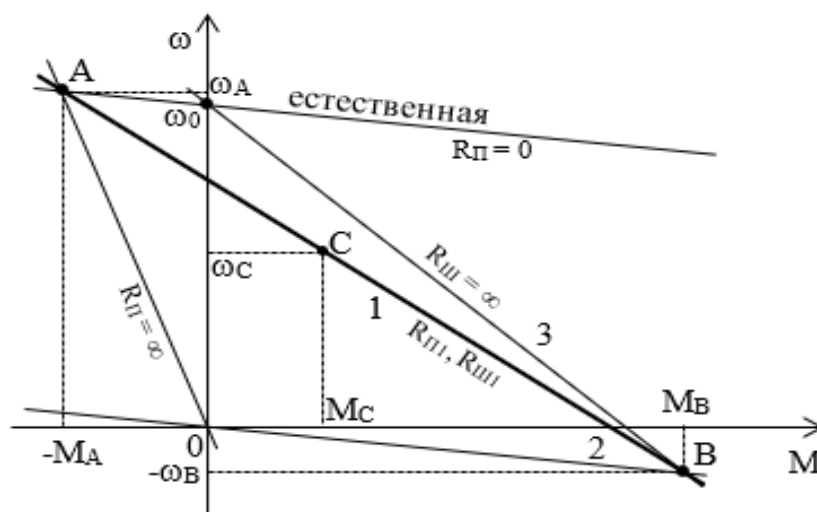


Рисунок 26 – Статические МХ ДПТ с НВ при шунтировании якоря

Типовые задачи и их решение

Задача 1. Для ДПТ с НВ 2ПН132МУХЛ4 (параметры – см. задачу 1 темы 4) 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 (см. тему 4). 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 определим по формуле

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

Момент короткого замыкания при заданном напряжении определим по формуле

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

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

Задача 2. Для ДПТ с НВ 2ПН132МУХЛ4 (параметры – см. задачу 1 темы 4) 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 характеристики (точку идеального холостого хода):

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

– определим вторую точку характеристики (точку номинального режима работы):

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

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

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

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

Ответ: статическая электромеханическая характеристика представлена на рисунке 27.

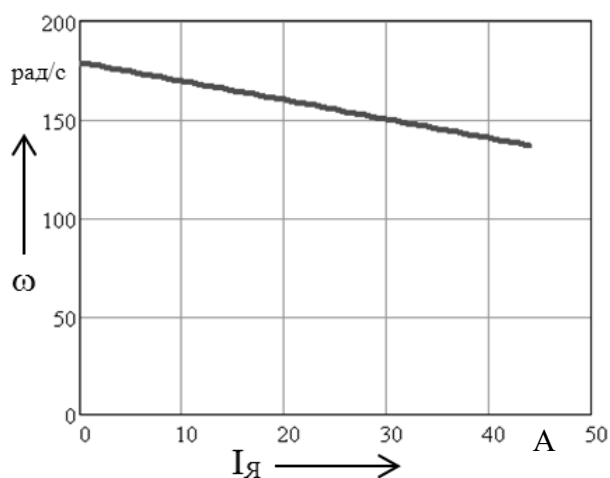


Рисунок 27 – Естественная электромеханическая характеристика ДПТ с НВ

Задача 3. Для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением 2ПН132МУХЛ4 (параметры – см. задачу 1 темы 4) определить угловую скорость, с которой будет работать ДПТ с НВ на естественной характеристике при нагрузке на валу, равной 20 Н·м.

Решение

При решении задачи воспользуемся данными предыдущих задач. Угловую скорость двигателя, с которой он будет работать в установившемся режиме работы при $M_c = 20$ Н·м, определим, подставив в выражение статической механической характеристики момент, равный моменту нагрузки:

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

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

Задача 4. 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 :

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

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

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 следующий вид (рисунок 28).

Выражение реостатной механической характеристики

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

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

– точку идеального холостого хода: $M = 0$, $\omega = \omega_0 = 178,9 \text{ рад/с;}$

– точку статического режима работы: $M = M_C = 30,6 \text{ А}$, $\omega = \omega_C = 78,5 \text{ рад/с}$.

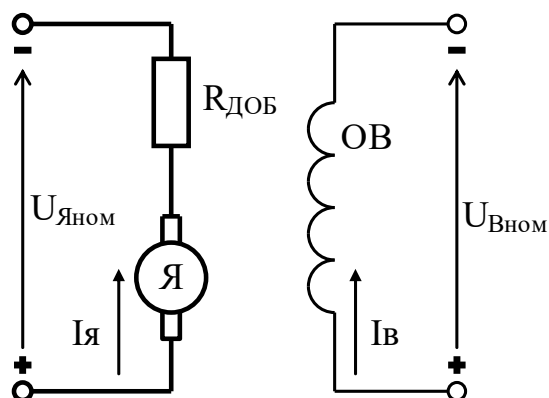


Рисунок 28 – Схема включения ДПТ с НВ при введении $R_{ДОб}$ в цепь якоря

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

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

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 $[0 \dots M_{доп}]$.

Ответ: для обеспечения работы двигателя со скоростью $0,5 \cdot \omega_{ном}$ при моменте нагрузки на валу $1,2 \cdot M_{ном}$ в якорную цепь двигателя нужно ввести добавочное сопротивление $R_{ДОб}$, величина которого в холодном состоянии равна 2,2 Ом. Статическая механическая характеристика при этом приведена на рисунке 29 (характеристика 2). Схема включения ДПТ с НВ при введении $R_{ДОб}$ в цепь якоря отображена на рисунке 28.

Задача 5. Для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением 2ПН132МУХЛ4 (параметры – см. задачу 1 темы 4) определить величину напряжения на якоре двигателя для обеспечения работы двигателя со скоростью $0,3 \cdot \omega_{ном}$ при моменте нагрузки на валу $1,5 \cdot M_{ном}$.

Решение

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

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

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

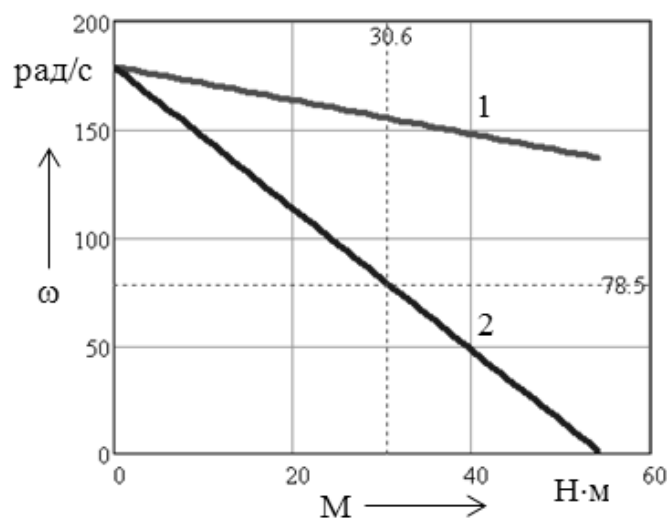


Рисунок 29 – Естественная механическая характеристика (1) и реостатная механическая характеристика ДПТ с НВ при введении в цепь якоря $R_{доб} = 2,85 \text{ Ом}$

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.

6 Тема 6. Тормозные режимы работы двигателя постоянного тока с независимым возбуждением

Цель работы: изучить способы торможения ДПТ с НВ; научиться рассчитывать и строить статические характеристики для тормозных режимов работы и определять параметры двигателя и питающей сети для обеспечения торможения двигателя с заданной интенсивностью.

Краткие теоретические положения

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.

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, при переключении двигателя на противоположное направление вращения путем изменения полярности напряжения, подводимого к якорю двигателя (рисунок 30).

В этом случае, благодаря кинетической энергии привода, якорь двигателя будет продолжать вращаться в том же направлении и, следовательно, он сохранит направление ЭДС, но она теперь будет направлена согласно приложенному к якорю напряжению. В режиме торможения противовключением ток в якоре двигателя определится выражением

$$I_{\text{я}} = -\frac{U_{\text{я}} + E}{R_{\text{я}} + R_{\text{ПВ}}}. \quad (44)$$

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 $R_{\text{ПВ}}$, рассчитываемое по формуле

$$R_{\text{ПВ}} = \frac{U_{\text{я}} + E_{\text{max}}}{I_{\text{ядоп}}} - R_{\text{я}}, \quad (45)$$

где E_{max} – максимальное значение ЭДС двигателя,

$$E_{\text{max}} = k \cdot \Phi \cdot \omega_{\text{нач}}, \quad (46)$$

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

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

$$P_{\text{эл}} + P_{\text{мех}} = I_{\text{я}}^2 \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{ПВ}}). \quad (47)$$

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

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

Динамическое торможение ДПТ с НВ

Режим динамического торможения (генераторный режим независимо 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

$$I_{\text{я}} = -\frac{E}{R_{\text{я}} + R_{\text{ДТ}}}. \quad (49)$$

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

$$R_{\text{ДТ}} = \frac{E_{\text{max}}}{I_{\text{ядоп}}} - R_{\text{я}}. \quad (50)$$

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

$$\omega = -\frac{R_{\text{я}} + R_{\text{ДТ}}}{C^2} \cdot M. \quad (51)$$

Механические характеристики двигателя при динамическом торможении (рисунок 31) представляют собой прямые, проходящие через начало координат. С энергетической точки зрения этот способ торможения выгоднее торможения противовключением, т. к. в процессе такого торможения из сети потребляется энергия только цепью возбуждения.

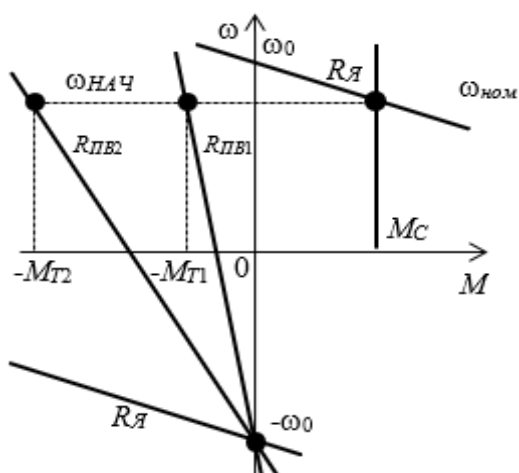


Рисунок 30 – Статические механические характеристики ДПТ с НВ в режиме торможения противовключением при реверсе двигателя ($R_{ЛВ1} > R_{ЛВ2}$)

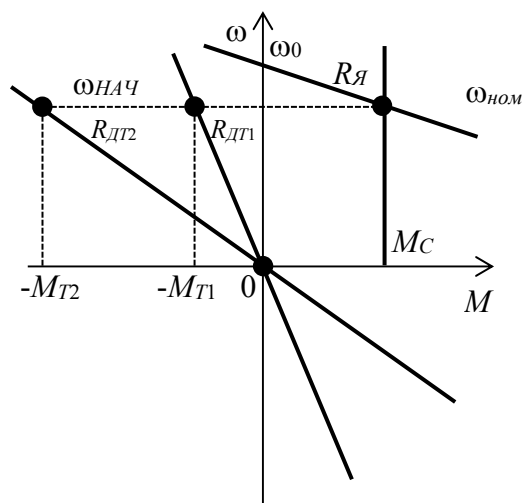


Рисунок 31 – Статические механические характеристики ДПТ с НВ в режиме динамического торможения ($R_{ДТ1} > R_{ДТ2}$)

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 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:

$$\omega = \frac{U_{Я}}{C} + \frac{R_{Я}}{C^2} \cdot M. \quad (52)$$

Этот способ торможения весьма экономичен, т. к. он сопровождается отдачей энергии в сеть. Ток в якоре двигателя определится выражением

$$I_{Я} = \frac{E - U_{Я}}{R_{Я}}. \quad (53)$$

Типовые задачи и их решение

Задача 1. Двигатель постоянного тока с независимым возбуждением 2ПН132МУХЛ4 (параметры – см. задачу 1 темы 4) 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

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

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 **Фираго, Б. И.** Теория электропривода : учеб. пособие / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – 2-е изд. – Мн. : Техноперспектива, 2007. – 585 с.
- 2 **Ключев, В. И.** Теория электропривода : учебник / В. И. Ключев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
- 3 **Онищенко, Г. Б.** Теория электропривода : учебник / Г. Б. Онищенко. – М. : ИНФА-М, 2018. – 384 с.
- 4 **Онищенко, Г. Б.** Теория электропривода : учебник / Г. Б. Онищенко. – М. : ИНФРА-М, 2020. – 294 с.
- 5 **Фираго, Б. И.** Расчёты по электроприводу производственных машин и механизмов : учеб. пособие / Б. И. Фираго. – Мн. : Техноперспектива, 2012. – 639 с.
- 6 **Москаленко, В. В.** Электрический привод : учеб. пособие / В. В. Москаленко. – М. : Мастерство ; Высш. шк., 2000. – 368 с.