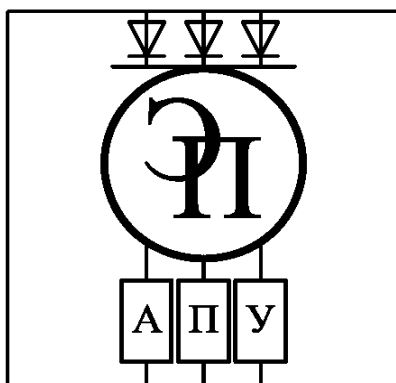


МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок»

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

*Методические рекомендации к практическим занятиям
для студентов специальности
6-05-0714-02 «Технология машиностроения, металлорежущие
станки и инструменты»
очной формы обучения*



Могилев 2026

УДК 62-83
ББК 31.291
А17

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» «22» декабря 2025 г., протокол № 5

Составитель канд. техн. наук, доц. А. С. Коваль

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

Методические рекомендации к практическим занятиям предназначены для студентов специальности 6-05-0714-02 «Технология машиностроения, металло-режущие станки и инструменты» очной формы обучения. Приведены основные теоретические положения, необходимые при расчетах и выборе элементов электрической подсистемы автоматизированных электроприводов технологического оборудования.

Учебное издание

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Ответственный за выпуск	А. С. Коваль
Корректор	И. В. Голубцова
Компьютерная верстка	Е. В. Ковалевская

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 Практическое занятие № 1. Приведение моментов инерции к валу электродвигателя и расчетные схемы механической подсистемы.....	4
2 Практическое занятие № 2. Расчет статических моментов и мощностей механизмов.....	13
3 Практическое занятие № 3. Расчет параметров схем замещения АД с к. з. и фазным ротором.....	18
4 Практическое занятие № 4. Расчет механических характеристик ДПТ НВ.....	21
5 Практическое занятие № 5. Расчет механических характеристик АД с к. з. ротором.....	26
6 Практическое занятие № 6. Расчет мощности и выбор двигателей в нерегулируемом электроприводе.....	28
7 Практическое занятие № 7. Расчет мощности и выбор двигателей и силового преобразователя в регулируемом электроприводе.....	31
8 Практическое занятие № 8. Выбор электрических аппаратов по электрическим параметрам.....	34
Список литературы.....	37

1 Практическое занятие № 1. Приведение моментов инерции к валу электродвигателя и расчетные схемы механической подсистемы

Передача механической энергии от вала двигателя к рабочему органу, как правило, осуществляется посредством механических передач (соединительные муфты, редукторы, ременные передачи и т. п.). С их помощью происходит перераспределение скоростей и нагрузок. 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). В кинематической цепи часть элементов совершают вращательные движения, а часть – поступательные.

Элементы, движущиеся вращательно, имеют момент инерции J , кг·м², и связаны между собой связями, обладающими жесткостью кручения C_K , Н·м/рад. Элементы, движущиеся поступательно, характеризуются массой m , кг, и связаны между собой связями, обладающими жесткостью деформации (растяжения-сжатия) C_D , Н/м.

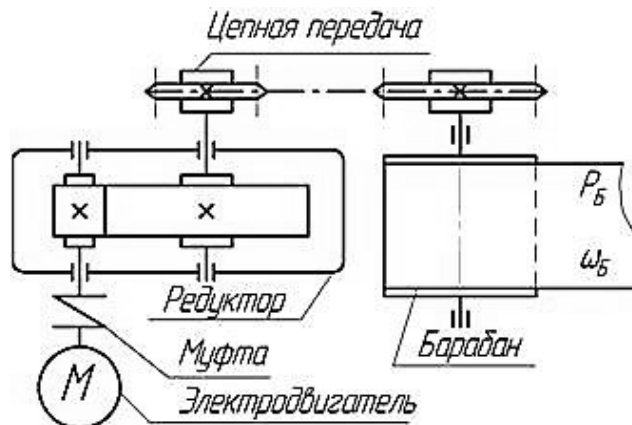


Рисунок 1 – Примеры кинематических схем механизмов

Благодаря наличию механических передач элементы кинематической цепи движутся с различными скоростями и, следовательно, запасают разное количество энергии. Поэтому сопоставлять параметры элементов (моменты инерции, массы, жесткости связей) не представляется возможным. Чтобы оценить влияние параметров элементов на характер движения электропривода, осуществляют приведение этих параметров к одной расчетной скорости.

В качестве расчетной скорости в большинстве случаев целесообразно принимать скорость двигателя, который является первым элементом кинематической цепи.

Параметры вращательно движущихся элементов приводятся к расчетной скорости с помощью передаточного отношения i , а параметры поступательно движущихся элементов – радиуса приведения ρ . Передаточное отношение i_{1-j} между j -м элементом кинематической цепи и первым двигателем определяется как отношение угловых скоростей первого и j -го элементов:

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

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: $\rho_{1-j} = \frac{V_j}{\omega_1}$. Передаточные отношения для механических передач либо заданы, либо их можно легко рассчитать. Для зубчатых передач передаточное отношение может быть найдено как отношение числа зубьев зубчатого колеса и зубчатой шестерни или как отношение диаметров делительных окружностей колеса и шестерни:

$$i_{зп} = \frac{Z_{зк}}{Z_{зш}} = \frac{D_{зк}}{D_{зш}}.$$

Диаметр делительной окружности можно определить как произведение модуля на число зубьев: $D = m \cdot Z$. Для ременных передач передаточное отношение можно найти как отношение диаметров ведомого и ведущего

шкивов: $i_{рп} = \frac{D_{вш}}{d_{вш}}.$

Общее передаточное отношение определяется произведением передаточных отношений всех механических передач:

$$i = \prod_{j=1}^n i_j.$$

Для передач шестерня – зубчатая рейка радиус приведения равен половине диаметра делительной окружности шестерни. Для передачи винт – гайка

$$\rho_{в-г} = \frac{V_г}{\omega_в} = \frac{t_{ш}}{2 \cdot \pi},$$

где $t_{ш}$ – шаг резьбы винта, м.

В таблице 1 даны формулы приведения скоростей, движущихся масс и жесткостей связей к скорости двигателя.

Рабочий орган производственной машины реализует полезную работу. К рабочему органу прикладывается нагрузка, преодолевая которую, он совершает полезную работу. Для оценки влияния этой нагрузки ее также необходимо привести к расчетной скорости (скорости двигателя). Если рабочий орган совершает вращательное движение, то к нему прикладывается момент, если возвратно-поступательное – сила (усилие).

Таблица 1 – Формулы приведения к скорости двигателя

Формула приведения	Вращательно движущийся элемент	Поступательно движущийся элемент
Скоростей	$\omega_{1-j} = \omega_j \cdot i_{1-j}$	$\omega_{1-j} = \frac{V_j}{\rho_{1-j}}$
Моментов инерции	$J_{1-j} = \frac{J_j}{(i_{1-j})^2}$	$J_{1-j} = m_j \cdot (\rho_{1-j})^2$

Моменты и силы, приложенные к рабочему органу, приводятся к скорости двигателя также с помощью радиуса приведения и передаточного отношения:

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

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 отдает механическую энергию, запасенную механизмом, например, при опускании груза. Поток механической мощности при этом направлен от рабочего органа к двигателю. Передача механической энергии от вала двигателя к рабочему органу или обратно связана с потерями в механических передачах. Другими словами, суммарный момент статической нагрузки, приведенный к валу двигателя, состоит из момента полезной нагрузки и момента трения в механических передачах: $M_C = M_{пол} \pm M_{тр}$. Здесь момент полезный и момент трения – моменты, приведенные к скорости двигателя.

В таблице 2 даны 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	$M_C = \frac{M_j}{i_{1-j}} \cdot \eta$	$M_C = F_j \cdot \eta \cdot \rho_{1-j}$

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

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

$$C_{ЭК} = \frac{1}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{C_j}}.$$

При параллельном – по формуле $C_{ЭК} = \sum_{j=1}^n C_j$. В результате упрощения (выделения главных масс и определения эквивалентных жесткостей связей) расчетные схемы приводят, например, к двухмассовой консервативная расчетной схеме (рисунок 2).

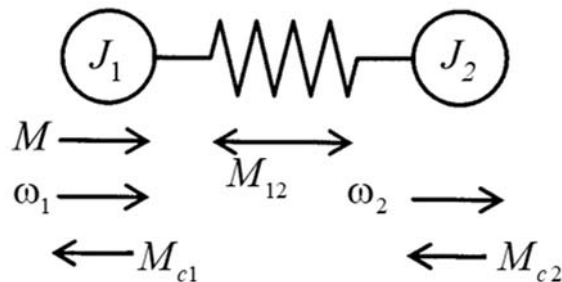


Рисунок 2 – Двухмассовая консервативная расчетная схема

Если пренебречь упругостями в передачах и считать их абсолютно жесткими, то 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:

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

При этом получают одномассовую расчетную схему механической части электропривода, которую иногда называют эквивалентным жестким приведенным звеном (рисунок 3).

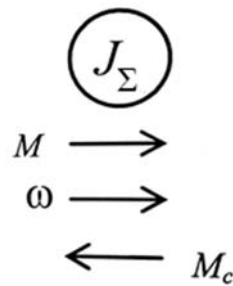


Рисунок 3 – Одномассовая расчетная схема механической части электропривода (эквивалентное жёсткое приведенное звено)

Пример 1 – Задан механизм подъемного устройства, кинематическая схема которого приведена на рисунке 4.

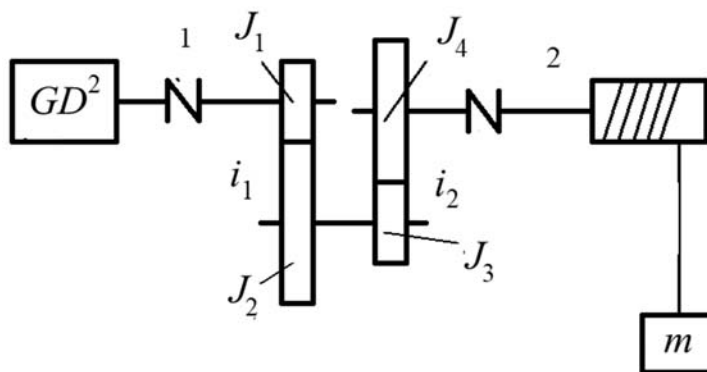


Рисунок 4 – Кинематическая схема механизма

Двигатель через соединительную муфту 1, двухступенчатый цилиндрический редуктор, соединительную муфту 2 и передачу барабан – канат поднимает и опускает груз 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; коэффициент полезного действия каждой пары зубчатой передачи с учетом подшипников – 0,9; коэффициент полезного действия передачи барабан – канат – 0,8; масса груза $m = 1,5$ т.

Определить момент статический, приведенный к валу двигателя при подъеме и при опускании груза.

Решение

Момент статический, приведенный к валу двигателя при подъеме 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.

$$G = m \cdot g = 1500 \cdot 9,81 = 14715 \text{ Н}; \quad \eta = \eta_{\text{шп}}^2 \cdot \eta_{\text{Б-к}} = 0,9^2 \cdot 0,7 = 0,648.$$

Тогда момент статический, приведенный к валу двигателя при подъеме груза, вычисляется следующим образом:

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

Момент статический, приведенный к валу двигателя при опускании груза, определяется по формуле

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

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

Пример 2 – Для приведенной кинематической схемы механизма (см. рисунок 4) составить расчетную схему механической части электропривода, если маховый момент инерции двигателя $GD^2 = 30 \text{ Н·м}^2$; моменты инерции зубчатых шестерен и колес редуктора $J_1 = 0,1 \text{ кг·м}^2$, $J_2 = 1,4 \text{ кг·м}^2$, $J_3 = 0,2 \text{ кг·м}^2$, $J_4 = 2,4 \text{ кг·м}^2$; моменты инерции соединительных муфт $J_{\text{CM1}} = 0,12 \text{ кг·м}^2$ и $J_{\text{CM2}} = 0,2 \text{ кг·м}^2$; момент инерции барабана $J_B = 8,5 \text{ кг·м}^2$; жесткость 1 м каната $C_{1,м} = 2 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}$; высота подъема и опускания груза $H = 10 \text{ м}$; жесткость муфт $C_{\text{CM1}} = 2 \cdot 10^{11} \text{ Н·м/рад}$ и $C_{\text{CM2}} = 4 \cdot 10^9 \text{ Н·м/рад}$. Все остальные связи между элементами считать абсолютно жесткими.

Решение

Момент инерции двигателя определим по формуле

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

Так как кинематическая схема механизма содержит значительное число элементов, пронумеруем эти элементы в направлении от двигателя к рабочему органу (рисунок 5).

Если элементов значительное количество, то для составления расчетной схемы механической части электропривода все расчеты целесообразно вести в таблице 3.

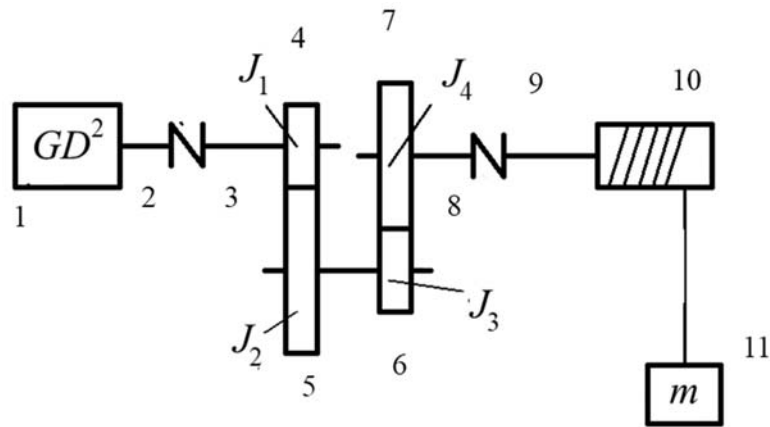


Рисунок 5 – Кинематическая схема с пронумерованными элементами

Таблица 3 – Расчет приведенных моментов инерции и жёсткостей связей

Параметр	Значение параметра										
Номер элемента	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	–	∞	$2 \cdot 10^8$	∞	∞	∞	∞	∞	$4 \cdot 10^9$	∞	–
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.

1 В первой строке помещают порядковые номера элементов кинематической цепи, последовательно начиная от двигателя, и оканчивая рабочим органом.

2 Во второй строке – моменты инерции вращательно движущихся элементов кинематической цепи.

3 В третьей строке – массы поступательно движущихся элементов кинематической цепи.

4 В четвертой и пятой строках – жесткости связей, которыми связаны элементы кинематической цепи друг с другом. Для вращательно движущихся элементов – это жесткости кручения (жесткость соединительных муфт), для поступательно движущихся – жесткость деформации (жесткость растяжения каната).

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

6 В седьмой строке – радиус приведения для поступательно движущихся элементов.

7 В восьмой строке – приведенные моменты инерции элементов:

– для вращательно движущихся элементов расчет ведут по формуле

$$J_{\text{ПР}} = \frac{J_j}{(i_{1-j})^2};$$

– для поступательно движущихся элементов – по формуле

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

8 В девятой строке – приведенные жёсткости связей элементов:

– для вращательно движущихся элементов расчёт ведут по формуле

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

– для поступательно движущихся – по формуле

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

Определим жёсткость всего каната заданной длины:

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

В кинематической цепи содержится три податливых элемента. Приведенные моменты инерции элементов, имеющих абсолютно жёсткие связи, можно просто суммировать. Самым податливым элементом кинематической цепи является канат, т. к. он имеет наименьшую приведенную жёсткость. Поэтому расчётная схема механической части ЭП (рисунок 6) может рассматриваться как двухмассовая консервативная (коэффициент внутреннего вязкого трения не задан).



Рисунок 6 – Двухмассовая консервативная расчетная схема механической части ЭП

Определим эквивалентную жесткость, беря во внимание последовательное соединение податливых элементов (см. рисунок 4):

$$C_{\text{ЭК}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}} = \frac{1}{\frac{1}{C_{12}} + \frac{1}{C_{23}} + \frac{1}{C_{34}}} = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot 10^8} + \frac{1}{10^7} + \frac{1}{4,5 \cdot 10^6}} = 3,056 \cdot 10^6 \text{ Н·м/рад.}$$

Моменты инерции первой и второй масс $J_2 = J_{2_{экв}} = J_{11ПР} = 0,337 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

Ответ. Для заданной кинематической схемы механизма подъема и параметров элементов кинематической цепи расчетная схема механической части электропривода двухмассовая консервативная (рисунок 7).

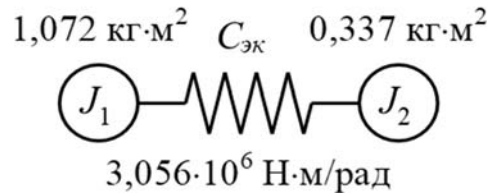


Рисунок 7 – Двухмассовая консервативная расчетная схема механической части ЭП

Если пренебречь упругими свойствами кинематических звеньев, тогда суммарный (эквивалентный) момент инерции, приведенный к скорости двигателя (считая приведенную жесткость 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 расчетная схема механической части будет представлена эквивалентным жестким приведенным звеном (рисунок 8).

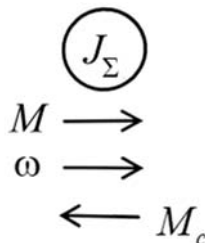


Рисунок 8 – Расчетная схема механической части электропривода

Задание

Для схемы (см. рисунок 4) определить момент инерции механической подсистемы, приведенный к валу двигателя (недостающие данные в соответствии с вариантом выдает преподаватель).

2 Практическое занятие № 2. Расчет статических моментов и мощностей механизмов

Формулы расчета нагрузок (статической мощности и статического момента нагрузки), приведенных к скорости двигателя для наиболее часто встречаемых механизмов (рабочих органов).

Для механизма подъема кранов (одноконцевые лебедки):

– при подъеме груза

$$P_C = \frac{(G + G_0) \cdot V}{\eta}; \quad M_C = \frac{(G + G_0) \cdot D_B}{2 \cdot i \cdot \eta} = \frac{(G + G_0) \cdot \rho}{\eta};$$

– при опускании груза

$$P_C = (G + G_0) \cdot V \cdot \left(2 - \frac{1}{\eta}\right); \quad M_C = \frac{(G + G_0) \cdot D_B}{2 \cdot i} \cdot \left(2 - \frac{1}{\eta}\right) = (G + G_0) \cdot \rho \cdot \left(2 - \frac{1}{\eta}\right),$$

где G, G_0 – вес полезного груза, подъемного устройства (грузозахватывающего устройства, кабины лифта, скипа, клетки), противовеса, Н;

V – скорость подъема (опускания), м/с;

D_B – диаметр барабана, м;

η – коэффициент полезного действия (КПД) механических передач (при опускании груза для одноконцевой лебедки при $\eta < 0,5$ – силовой, при $\eta > 0,5$ – тормозной спуск груза);

i – передаточное отношение;

ρ – радиус приведения, м.

Для механизмов передвижения мостов кранов (слитковоза)

$$P_C = \frac{2 \cdot K_P \cdot (G + G_0) \cdot V \cdot (\mu \cdot r + f)}{\eta \cdot D_K}; \quad M_{CM} = \frac{2 \cdot K_P \cdot (G + G_0) \cdot (\mu \cdot r + f)}{\eta \cdot D_K} \cdot \rho,$$

где G, G_0 – вес полезного груза и вес механизма, Н;

K_P – коэффициент, учитывающий трение реборд катков о рельсы ($K_P = 1,2 \dots 1,3$ для колес с наружными ребордами, $K_P = 1,4 \dots 1,5$ для колес с внутренними ребордами);

μ – радиус шейки колеса (цапфы), м;

f – коэффициент трения качения;

D_K – диаметр ходового колеса, м;

V – скорость перемещения груза, м/с;

ρ – радиус приведения, м.

Для механизма передвижения тележек кранов, напольных тележек

$$P_C = \frac{K_T \cdot (G + G_0) \cdot V \cdot 7,5}{\eta}; \quad M_C = \frac{K_T \cdot (G + G_0) \cdot 7,5}{\eta} \cdot \rho,$$

где K_T – эмпирический коэффициент ($K_T = 4 \dots 6$ для подшипников качения, $K_T = 6 \dots 8$ для подшипников скольжения).

Для механизма передвижения мостов кранов:

– на подшипниках качения

$$P_C = \frac{K_M \cdot (G + G_0) \cdot V \cdot 7,5}{\eta}; \quad M_C = \frac{K_M \cdot (G + G_0) \cdot 7,5}{\eta} \cdot \rho,$$

где K_M – эмпирический коэффициент, $K_M = 3$.

Для наклонного ленточного конвейера (транспортера)

$$P_C = \frac{(A \cdot L \cdot V + B \cdot L \cdot Q \pm Q \cdot H + C) \cdot K_1 \cdot K_2}{\eta};$$

$$M_C = \frac{P_C}{V} \cdot \rho = \frac{(A \cdot L \cdot V + B \cdot L \cdot Q \pm Q \cdot H + C) \cdot K_1 \cdot K_2}{\eta \cdot V} \cdot \rho,$$

где V – скорость перемещения, м/с;

η – КПД механических передач и механизма;

L – рабочая длина транспортера (конвейера), м;

Q – производительность конвейера (транспортера), Н/с;

H – разности уровней конечных точек транспортера (со знаком «+» при подъеме, со знаком «–» при опускании), м;

A, B, C – коэффициенты, учитывающие холостой ход ленты, груза, мощность на сбрасыватель соответственно;

K_1 – коэффициент, учитывающий добавочные потери в зависимости от длины транспортера $K_1 = 1,2 \dots 1,0$ при $L = 8 \dots 60$ м;

K_2 – коэффициент, учитывающий увеличение трения покоя по сравнению с трением движения (обычно $1,25 \dots 1,50$).

В таблице 4 приведены значения коэффициентов A, B, C в зависимости от ширины ленты транспортера (конвейера).

Для горизонтального транспортера (конвейера)

$$P_C = \frac{Q \cdot f \cdot L}{\eta} \quad \text{или} \quad P_C = \frac{F \cdot V}{\eta} = \frac{(G + G_0) \cdot \mu \cdot V}{\eta}; \quad M_C = \frac{(G + G_0) \cdot \mu}{\eta} \cdot \rho,$$

где G, G_0 – вес полезного груза и вес механизма, Н;

F – тяговое усилие, Н;

V – скорость перемещения, м/с;

η – КПД механических передач и механизма;

μ – коэффициент трения между лентой (цепью) и направляющими опорными роликами;

f – коэффициент трения ($f = 0,08 \dots 0,15$ для подшипников скольжения, $f = 0,01 \dots 0,05$ для подшипников качения).

Таблица 4 – Значения коэффициентов A, B, C

Коэффициент	Ширина ленты, м					
	0,4	0,6	0,7	0,9	1,2	1,5
A	0,012	0,020	0,025	0,030	0,040	0,050
B	0,126	0,114	0,105	0,098	0,037	0,080
C	0,740	1,300	1,850	2,250	3,750	5,200

Для механизмов металлорежущих станков:

– главного движения станков токарной группы (фрезерных, расточных, сверлильных, шлифовальных)

$$P_C = \frac{F_Z}{\eta} \cdot \pi \cdot d \cdot n_{ш}; \quad M_C = \frac{F_Z}{\eta} \cdot \frac{d}{2 \cdot i};$$

– для станков с горизонтально расположенными вращающимися планшайбами или движущимися столами (карусельные, продольно-строгальные, продольно-фрезерные станки)

$$P_C = \frac{F_Z + F_{TP}}{\eta} \cdot V,$$

где F_{TP} – сила трения, Н;

F_Z – тангенциальная составляющая усилия резания, определяемая по эмпирической формуле, Н;

d – диаметр обрабатываемого изделия или инструмента, м;

$n_{ш}$ – частота вращения шпинделя, об/мин.

При вращательном движении исполнительного органа

$$M_C = \frac{F_Z + F_{TP}}{\eta} \cdot \frac{d}{2 \cdot i}.$$

При поступательном движении исполнительного органа

$$M_C = \frac{F_Z + F_{TP}}{\eta} \cdot \rho; \quad F_{TP} = F_N \cdot f = \left[g \cdot (m_{CT} + m_{ДЕТ}) + F_Y \right] \cdot f,$$

где F_Z, F_Y – составляющие усилия резания, соответственно, тангенциальная и радиальная силы, определяемые по эмпирическим формулам, Н;

F_N – сумма сил, действующих нормально к направляющим стола, Н;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

f – коэффициент трения о направляющие (для направляющих скольжения со смазкой $f=0,05\dots0,15$, для направляющих качения с танкетками $f=0,005\dots0,01$);

$m_{СТ}, m_{ДЕТ}$ – масса стола (планшайбы) и детали, кг;

η – КПД механических передач;

ρ – радиус приведения, м.

Для механизмов подачи металлорежущих станков

$$P_C = \frac{F_{\Pi} \cdot V_{\Pi}}{\eta},$$

где F_{Π} – суммарное усилие подачи, Н;

V_{Π} – линейная скорость подачи стола или суппорта, м/с.

Суммарное усилие подачи

$$F_{\Pi} = k \cdot F_X + [F_Z + F_Y + (m_{СТ} + m_{ДЕТ})] \cdot f,$$

где k – коэффициент запаса, учитывающий перекосы, $k = 1,1\dots1,3$;

f – коэффициент трения при движении, $f = 0,05\dots0,15$;

F_X, F_Y, F_Z – составляющие усилия резания, соответственно, тангенциальная, радиальная и сила подачи, Н;

$m_{СТ}, m_{ДЕТ}$ – масса стола (суппорта) и детали, кг;

η – КПД механических передач.

При трогании стола или суппорта с места

$$F_{ТР} = g \cdot (m_{СТ} + m_{ДЕТ}) \cdot f_0 + \alpha_{ПР} \cdot S_{ПР},$$

где f_0 – коэффициент трения в направляющих при трогании с места, $f_0 = 0,2\dots0,3$;

$\alpha_{ПР}$ – удельное усилие прилипания, $\alpha_{ПР} = 5 \cdot 10^3$ Н/м²;

$S_{ПР}$ – площадь прилипания направляющих, м².

Тогда момент статический, приведенный к скорости двигателя при движении механизма подачи в процессе резания, вычисляется по формуле

$$M_C = \frac{F_P \cdot \rho}{\eta}.$$

Для механизмов центробежного типа:

– для вентилятора

$$P_C = \frac{Q \cdot H}{\eta \cdot \eta_{МП}};$$

– для насоса

$$P_C = \frac{Q \cdot H \cdot \gamma}{\eta \cdot \eta_{МП}};$$

– для компрессора

$$P_C = \frac{Q}{\eta \cdot \eta_{МП}} \cdot \frac{A_H + A_A}{2},$$

где Q – производительность, м³/с;

H – высота напора (для насоса), равная сумме всасывания и нагнетания, м, или давление (для компрессора), Па;

γ – плотность, кг/м³ (для насоса – удельный вес жидкости, Н/м³);

$\eta_{МП}$ – КПД механических передач;

η – КПД центробежного механизма (для центробежного насоса низкого давления $\eta = 0,5 \dots 0,8$, для вентилятора $\eta = 0,4 \dots 0,9$, для компрессора $\eta = 0,5 \dots 0,7$);

A_H – удельная работа изотермического сжатия, Н·м/м³;

A_A – удельная работа адиабатического сжатия, Н·м/м³.

В таблице 5 приведены средние значения удельной работы в зависимости от давления (для компрессора).

Таблица 5 – Зависимость удельной работы от давления

Давление $H \cdot 9,81 \cdot 10^4$, Па	2	4	6	8	9	10
Удельная работа $\frac{A_H + A_A}{2}$, Н·м/м ³	7300	15500	20700	24700	26350	27850

Зная приведенные статические моменты, необходимые для работы рабочих механизмов, можно определить требуемую для этого мощность:

– при вращательном движении $P_{мех} = M_{ст} \cdot \omega_{ном}$;

– при поступательном движении $P_{мех} = F_{ст} \cdot V_{ном}$.

Задания

1 Слитковоз перемещает слиток массой 200 кг со скоростью 0,5 м/с. Определить необходимую мощность двигателя (недостающие данные в соответствии с вариантом выдает преподаватель).

2 Центробежный насос обеспечивает подачу воды с заданной производительностью и высотой напора. Определить необходимую мощность двигателя (недостающие данные в соответствии с вариантом выдает преподаватель).

3 Практическое занятие № 3. Расчет параметров схем замещения АД с к. з. и фазным ротором

Начальные данные для расчета: $P_{ном}$, $U_{ф.ном}$, $\eta_{ном}$, $\cos \varphi_{ном}$, λ_m , λ_n , λ_i .

Используя эти данные, рассчитываются:

– номинальная угловая скорость $\omega_{ном}$, рад/с, по формуле

$$\omega_{ном} = \frac{\pi \cdot n_{ном}}{30};$$

– номинальный ток статора $I_{1ном}$, А, по формуле

$$I_{1ном} = \frac{P_{ном}}{3 \cdot U_{ф.ном} \cdot \cos \varphi_{ном} \cdot \eta_{ном}};$$

– номинальный момент $M_{ном}$, Н·м, по формуле

$$M_{ном} = \frac{P_{ном}}{\omega_{ном}};$$

– номинальные потери мощности $\Delta P_{ном}$, Вт, по формуле

$$\Delta P_{ном} = \frac{P_{ном} \cdot (1 - \eta_{ном})}{\eta_{ном}};$$

– номинальное скольжение

$$\omega_0 = \frac{\omega_0 - \omega_{ном}}{\omega_0};$$

– синхронная угловая скорость

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30};$$

– номинальные механические потери

$$\Delta P_{мех.ном} = 0,06 \cdot \Delta P_{ном};$$

– добавочные потери

$$\Delta P_{доб.2} = 0,03 \cdot \Delta P_{ном};$$

– момент холостого хода (х. х.)

$$M_0 = \frac{\Delta P_{мех.ном} + \Delta P_{доб.2}}{12,755};$$

– электромагнитный номинальный момент

$$M_{\text{э.ном}} = M_{\text{ном}} + M_0;$$

– номинальные переменные потери мощности в роторе

$$\Delta P_{\text{пер.2,ном}} = M_{\text{э.ном}} \cdot \omega_{\text{ном}} \cdot S_{\text{ном}}.$$

Задаемся коэффициентом загрузки $K_{\text{э.т}} = 0,5 \dots 1$.

Определяем:

– переменные номинальные потери мощности $\Delta P_{\text{ном.пер.}}$, Вт, по формуле

$$\Delta P_{\text{ном.пер.}} = \frac{\Delta P_{\text{ном}}}{1 + K_{\text{э.т}}^2};$$

– постоянные потери мощности

$$\Delta P_{\text{пост}} = \Delta P_{\text{ном}} - \Delta P_{\text{пер.ном}};$$

– переменные номинальные потери мощности в обмотках статора

$$\Delta P_{\text{пер1.ном}} = \Delta P_{\text{пер.ном}} - \Delta P_{\text{пер2.ном}};$$

– активное сопротивление фазы статора R_1 , Ом, по формуле

$$R_1 = \frac{\Delta P_{\text{ном}}}{3 \cdot I_{\text{1ном}}^2};$$

– максимальный электромагнитный момент

$$M_{\text{э.мах}} = \lambda_m M_{\text{ном}} + M_0;$$

– коэффициент

$$b = \frac{U_{\phi.\text{ном}}^2 \cdot S_{\text{ном}}}{\Delta P_{\text{пер2.ном}}} - 2R_1;$$

– сопротивление

$$Z = \frac{U_{\phi.\text{ном}}^2}{2\omega_0 \cdot M_{\text{э.мах}}} - R_1;$$

– приведенное активное сопротивление фазы статора

$$R'_{2,0} = 0,5 \cdot S_{\text{ном}} \cdot (b + \sqrt{b^2 - 4Z^2});$$

– индуктивное сопротивление к. з.

$$X_{k,0} = \sqrt{Z^2 - R_1^2};$$

– критическое скольжение

$$S_k = \frac{R'_{2,0}}{Z};$$

– коэффициент

$$a = \frac{R_1}{R'_{2,0}};$$

– электромагнитный момент по формуле Клосса для найденных параметров и номинального скольжения

$$M_{ном} = \frac{2M_{э.мах} \cdot (1 + a \cdot S_k)}{\frac{S_k}{S_{ном}} + \frac{S_{ном}}{S_k} + 2aS_k}.$$

Сравниваем рассчитанный $M_{э.ном.}$ с $M_{ном.}$ Если погрешность $\Delta m = \frac{M_{ном} - M_{э.ном}}{M_{э.ном}}$ превышает допустимую (5 %...10 %), то изменяем $K_{э.т.}$ и M_0

и повторяем расчет до получения требуемой погрешности.

Затем принимаем $X_{1,0} = X_{2,0}^* = 0,5 X_{k,0}$.

Определяем:

– потери в стали

$$\Delta P_{ст.ном} = \Delta P_{пост} - (\Delta P_{мех.ном} + \Delta P_{доб.2});$$

– ток холостого хода

$$I_0 = I_{1ном} \sqrt{1 - \cos \varphi_{ном}};$$

– эквивалентное активное сопротивление намагничивающего контура

$$R_\mu = \frac{\Delta P_{ст.ном}}{3 \cdot I_0^2}$$

и

$$\sin \varphi_0 = \sqrt{1 - \left(\frac{(R_1 + R_\mu) \cdot I_0}{U_{\phi.ном}} \right)^2};$$

– индуктивное сопротивление намагничивающего контура

$$X_{\mu} = \frac{U_{\phi.ном} \cdot \sin \varphi_0}{I_0}.$$

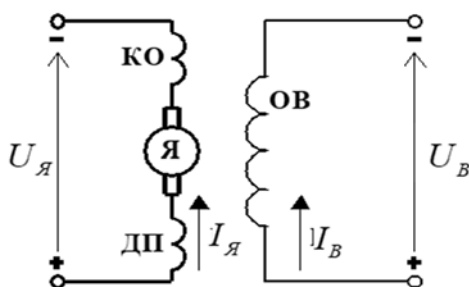
Рассчитанные параметры соответствуют эквивалентной однофазной Т-образной схеме замещения асинхронного двигателя.

Задание

Для асинхронного двигателя (тип в соответствии с вариантом выдает преподаватель) рассчитать параметры Т-образной схемы замещения.

4 Практическое занятие № 4. Расчет механических характеристик ДПТ НВ

Схема включения ДПТ с НВ приведена на рисунке 9.



Я – обмотка якоря; *ДП* – обмотка дополнительных полюсов; *КО* – компенсационная обмотка; *ОВ* – обмотка возбуждения; *Uя* – напряжение якоря, *UB* – напряжение возбуждения; *Iя* – ток якоря, *IB* – ток возбуждения

Рисунок 9 – Схема включения ДПТ с независимым возбуждением

Уравнение статической электромеханической и уравнение статической механической характеристик ДПТ с НВ имеют вид

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

где *Uя* – напряжение на якоре, В;

Rя – сопротивление якорной цепи для нагретого состояния, Ом;

Iя – ток якорной цепи, А;

k – конструктивный коэффициент двигателя;

Φ – полезный поток, Вб.

Произведение *kΦ* называют коэффициентом ЭДС и электромагнитного момента. При неизменном потоке возбуждения (*Φ* = const) данный коэффициент обозначают символом *C* (т. е. *kΦ* = *C*).

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

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{C} - \frac{R_{\text{я}}}{C} \cdot I_{\text{я}}; \quad \omega = \frac{U_{\text{я}}}{C} - \frac{R_{\text{я}}}{C^2} \cdot M,$$

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

Параметры, входящие в выражения этих характеристик, определяются следующим образом: номинальное напряжение на якоре задается в справочниках и указывается на табличке двигателя.

Сопротивление якорной цепи

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

где $R_{\text{оя}}$ – сопротивление обмотки якоря, Ом;

$R_{\text{одп}}$ – сопротивление обмотки дополнительных полюсов, Ом;

$R_{\text{ко}}$ – сопротивление компенсационной обмотки, Ом;

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

k_T – коэффициент приведения сопротивлений к нагретому состоянию.

Сопротивление щеточного контакта определяется по формуле

$$R_{\text{щк}} = \frac{\Delta U_{\text{щ}}}{I_{\text{яном}}},$$

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

$I_{\text{яном}}$ – номинальный ток якоря двигателя, А.

Номинальный ток якоря приводится в справочнике. Если номинальный ток якоря неизвестен, то его можно найти по формуле

$$I_{\text{яном}} = \frac{P_{2\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}} \cdot U_{\text{яном}}} - \frac{U_{\text{яном}}}{k_T \cdot R_{\text{я}}},$$

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

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

$U_{\text{яном}}$ – номинальное напряжение, В;

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

Коэффициент ЭДС и момента может быть определен из выражения естественной электромеханической характеристики, записанной для номинального режима работы двигателя,

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

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

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. Подставляя в выражение требуемой характеристики два значения тока (момента), определяют угловые скорости, соответствующие этим токам (моментам). По полученным двум точкам на плоскости $\{\omega, I_A\}$ или $\{\omega, M\}$ строят требуемую электромеханическую или механическую характеристику. Обычно для расчета первой точки электромеханической (механической) характеристики принимают $I_A = 0$ ($M = 0$), при этом скорость вала двигателя будет равна скорости идеального холостого хода ($\omega = \omega_0$). Скорость идеального холостого хода определяется выражением $\omega_0 = \frac{U_{\text{я}}}{k \cdot \Phi}$. Для расчета второй точки электромеханической (механической) характеристики примем скорость равной нулю. При скорости, равной нулю, имеет место режим короткого замыкания. Ток короткого замыкания

$$I_{\text{к.з.}} = \frac{U_{\text{я}}}{R_{\Sigma}}.$$

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 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 $[0 \dots I_{\text{ядоп}}]$ и момента $[0 \dots M_{\text{доп}}]$:

$$I_{\text{ядоп}} = \lambda_1 \cdot I_{\text{яном}}; \quad M_{\text{доп}} = k \cdot \Phi \cdot I_{\text{ядоп}} = k \cdot \Phi \cdot I_{\text{яном}} \cdot \lambda_1.$$

Поэтому для расчета второй точки электромеханической (механической) характеристики принимают значение тока якоря (момента) из диапазона $[0 \dots I_{\text{ядоп}}]$, $([0 \dots M_{\text{доп}}])$ и рассчитывают угловую скорость, например, используя номинальные значения тока якоря и момента.

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

Искусственные статические характеристики ДПТ с НВ при изменении напряжения на якоре. Выражения искусственных статических электромеханической и механической характеристик для этого случая имеют вид

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{C_{\text{ном}}} - \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{ном}}} \cdot I_{\text{я}}; \quad \omega = \frac{U_{\text{я}}}{C_{\text{ном}}} - \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{ном}}^2} \cdot M.$$

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

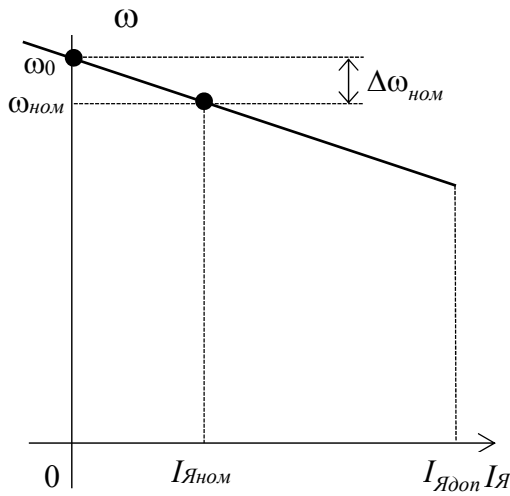


Рисунок 10 – Естественная электромеханическая характеристика ДПТ с НВ

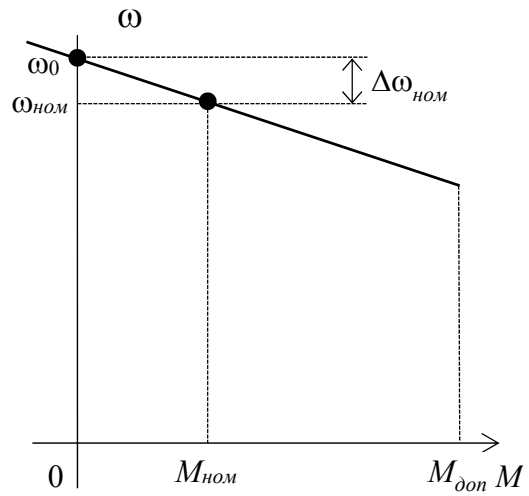


Рисунок 11 – Естественная механическая характеристика ДПТ с НВ

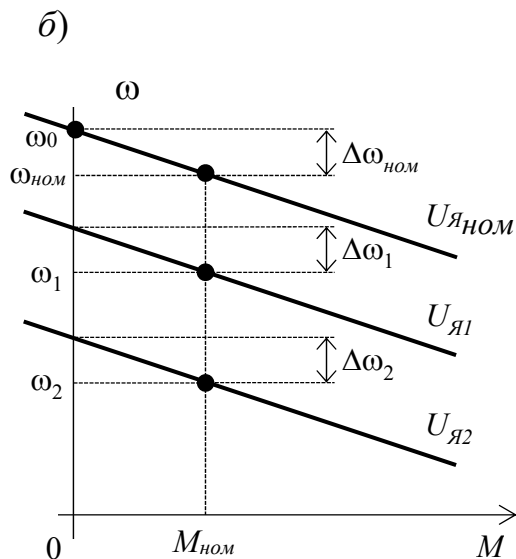
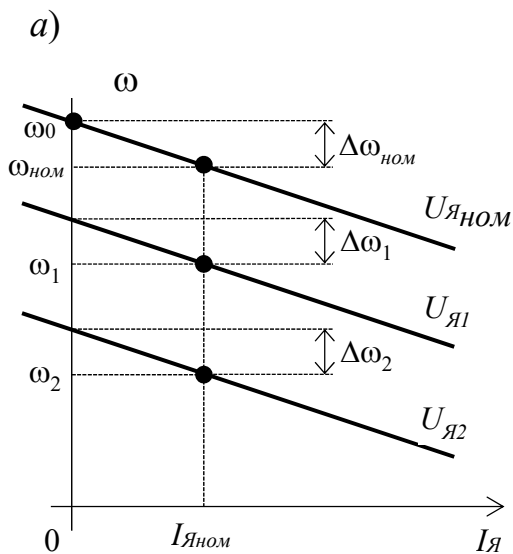


Рисунок 12 – Статические ЭМХ (а) и МХ (б) ДПТ с НВ при изменении напряжения якоря ($U_{я2} < U_{я1} < U_{яном}$)

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

$$\omega = \frac{U_{яном}}{C_{ном}} - \frac{R_{я} + R_{ядоб}}{C_{ном}} \cdot I_{я}; \quad \omega = \frac{U_{яном}}{C_{ном}} - \frac{R_{я} + R_{ядоб}}{C_{ном}^2} \cdot M,$$

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

При введении в цепь якоря $R_{ядоб}$ скорость идеального холостого хода не изменяется. Все реостатные характеристики проходят через точку $\omega = \omega_0$. На рисунке 13 приведены реостатные электромеханические и механические характеристики ДПТ с НВ при введении сопротивления в цепь якоря.

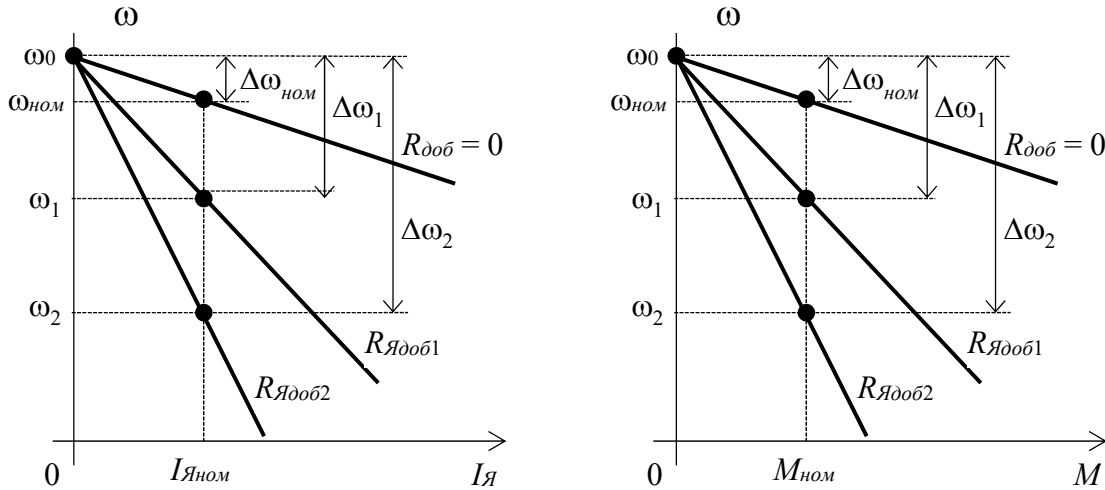


Рисунок 13 – Статические электромеханическая и механическая характеристики ДПТ с НВ при введении в цепь якоря добавочных сопротивлений ($R_{ядоб2} > R_{ядоб1}$)

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. Поток двигателя только уменьшают, уменьшая ток возбуждения.

С ослаблением магнитного потока двигателя скорость его идеального холостого хода возрастает, статическое падение скорости увеличивается, т. к. скорость идеального холостого хода и статическое падение скорости обратно пропорциональны потоку двигателя. Выражения искусственных статических электромеханической и механической характеристик для этого случая имеют вид

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

Задание

Рассчитать и построить естественную и искусственные статические электромеханическую и механическую характеристики для двигателя (тип двигателя и способ регулирования скорости в соответствии с вариантом выдает преподаватель).

5 Практическое занятие № 5. Расчет механических характеристик АД с к. з. ротором

Механическая характеристика АД рассчитывается по формуле Клосса:

– по уточненной

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

– по упрощенной

$$M = \frac{2 \cdot M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}},$$

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 двигателя определяются следующими выражениями:

$$M_k = \pm \frac{3 \cdot U_\phi^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot (R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_k^2})}; \quad s_k = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}}$$

либо при расчете по упрощенной формуле

$$s_k = \pm \frac{R'_2}{X_k},$$

где RU_ϕ – действующее значение фазного напряжения сети, В;

ω_0 – угловая скорость поля двигателя, рад/с;

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

X_k – индуктивное фазное сопротивление короткого замыкания, Ом; $X_k = X_1 + X'_2$;

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

Скольжение двигателя

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

Угловая скорость поля

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p},$$

где f – частота напряжения питающей сети, Гц;

p – число пар полюсов двигателя.

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

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

В то же время для машин большой мощности, у которых $R_1 \approx 0$, можно принять $a \approx 0$. Тогда $s_k = s_{HOM} \cdot (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1})$.

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

Статическую электромеханическую характеристику асинхронного двигателя $\omega = f(I_1)$ можно рассчитать, используя приближенную формулу, предложенную В. А. Шубенко,

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

где I_1 – ток фазы статора, А;

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

I_0 – ток холостого хода двигателя, А;

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

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

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

$$I_{1HOM} = \frac{P_{2HOM}}{3 \cdot U_{\phi HOM} \cdot \eta_{HOM} \cdot \cos \varphi_{HOM}} = \frac{P_{2HOM}}{\sqrt{3} \cdot U_{ЛHOM} \cdot \eta_{HOM} \cdot \cos \varphi_{HOM}};$$

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

На рисунке 14 представлен примерный вид статической механической характеристики асинхронного электродвигателя; на рисунке 15 – статическая электромеханическая характеристика асинхронного электродвигателя $\omega = f(I_1)$.

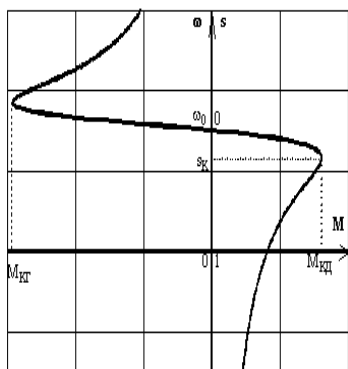


Рисунок 14 – Статическая механическая характеристика АД

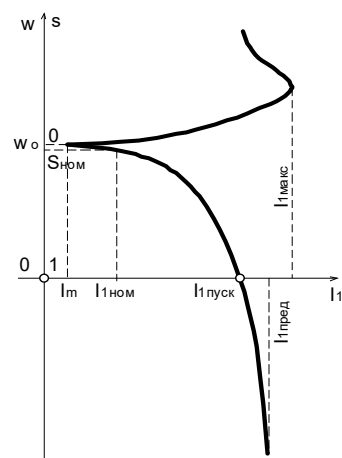


Рисунок 15 – Статическая электромеханическая характеристика АД

Задание

Рассчитать и построить естественную статическую электромеханическую и механическую характеристики для двигателя (тип двигателя в соответствии с вариантом выдает преподаватель).

6 Практическое занятие № 6. Расчет мощности и выбор двигателей в нерегулируемом электроприводе

При выборе двигателя необходимо, чтобы его мощность соответствовала мощности, требуемой для выполнения технологического процесса рабочей машины. Основой для выбора двигателя по мощности служат нагрузочные диаграммы и тахограммы изменения скорости рабочего механизма, приведенные к валу двигателя за цикл работы. Эти диаграммы рассчитываются на основании технологических данных, характеризующих работу рабочего механизма. По тахограмме выбирают номинальную скорость двигателя, а по нагрузочной диаграмме предварительно оценивается номинальный момент двигателя и классифицируется по нагреву двигателя режим работы двигателя ($S1...S8$). При известной номинальной скорости и номинальном моменте двигателя расчетная номинальная мощность двигателя определяется как $P_{рас.ном} = M_{ном} \cdot \omega_{ном}$.

Пример нагрузочной диаграммы нерегулируемого электропривода без учета динамических режимов работы с постоянным моментом нагрузки и переменным моментом нагрузки показан на рисунке 16.

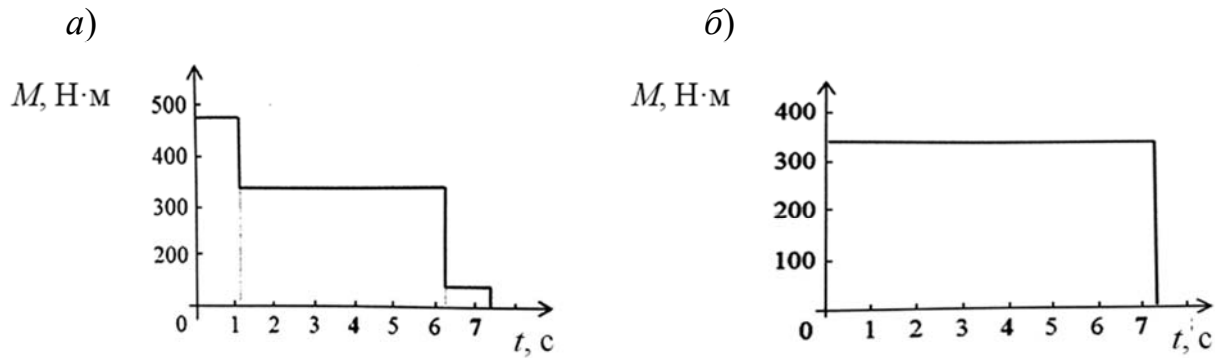


Рисунок 16 – Нагрузочная диаграмма электропривода при переменном (а) и постоянном (б) моментах нагрузки

Расчет мощности, предварительный выбор и проверка двигателя состоят в следующем.

1 Определяется расчетный номинальный момент для выбора двигателя. Для нагрузочной диаграммы (см. рисунок 16, б) $M_{ном} = M_{см}$. Если нагрузочная диаграмма имеет вид, представленный на рисунке 16, а, то момент определяется как среднеквадратичная величина:

$$M_{см.экв} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N M_{см.i}^2 \cdot t_i}{\sum_{i=1}^m t_i}},$$

где $M_{см.i}$ – момент двигателя на i -м участке нагрузочной диаграммы электропривода;

t_i – временной интервал i -го участка нагрузочной диаграммы с постоянным моментом нагрузки.

Соответственно, расчетный номинальный момент двигателя берется с некоторым запасом:

$$M_{ном} \geq k \cdot M_{см.экв},$$

где $M_{см.экв}$ – эквивалентный момент нагрузки;

k – коэффициент запаса, учитывающий динамические режимы работы двигателя, когда он работает с повышенным моментом, не отраженные на нагрузочной диаграмме, $k = 1,1 \dots 1,3$.

2 Определяется номинальная скорость двигателя. Для нерегулируемого электропривода $\omega_{ном} = \omega_{рас}$.

3 Определяется расчетная мощность двигателя: $P_{ном} = M_{ном} \cdot \omega_{ном}$.

4 Из каталога выбирается двигатель ближайшей большей мощности, имеющий конструктивное исполнение, соответствующее условиям работы данной рабочей машины.

5 Осуществляется проверка выбранного двигателя по перегрузочной способности. Для выбранного двигателя (с известным теперь приведенным моментом инерции) строится зависимость момента двигателя от времени на основании уравнения механического движения. Находится $M_{\max}$ и проверяется условие для $M_{кр}$ выбранного двигателя с учетом возможного снижения напряжения питания на 10 %: $M_{кр.дон} = 0,81M_{кр} \geq M_{\max}$.

6 Проверка выбранного двигателя по нагреву.

Если нагрузочная диаграмма рабочего механизма имеет вид, представленный на рисунке 16, б, то проверка по нагреву выбранного двигателя не нужна.

Если момент нагрузки меняется во времени, то АД в этом случае работает с меняющимся магнитным потоком и проверку двигателя на нагрев необходимо выполнять по методу средних потерь или методом эквивалентных токов (справедливо и для других типов двигателей с меняющимся магнитным потоком при работе).

В последнем случае необходимо рассчитать изменение тока двигателя за цикл работы. Затем найти среднеквадратичный ток, эквивалентный действительно меняющемуся во времени току по условиям нагрева, по выражению

$$I_{ст.эв} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N I_{см.i}^2 \cdot t_i}{\sum_{i=1}^N t_i \cdot \beta_{ох.i}}},$$

где $\beta_{ох.i}$ – коэффициент охлаждения самовентилируемого двигателя на i -м участке ($\beta_{ох.i} = 0,98$ для самовентилируемых двигателей).

Тогда условие проверки двигателя по нагреву примет вид $I_{ном} \geq I_{ст.эв}$.

Если режим работы двигателя повторно-кратковременный, отличающийся от стандартного ПВ, то эквивалентный ток необходимо пересчитать к стандартному ПВ:

$$I_{эв}(ПВ_{ст}) = I_{ст.эв}(ПВ) \sqrt{\frac{ПВ}{ПВ_{ст}}}.$$

Если выполняется условие $I_{ном}(ПВ_{ст}) \geq I_{эв}(ПВ_{ст})$, то двигатель удовлетворяет условиям нагрева.

Задание

Нагрузочная диаграмма двигателя имеет вид, представленный на рисунке 16, а. Режим работы S1. Выбрать двигатель по мощности (необходимые данные в соответствии с вариантом выдает преподаватель).

7 Практическое занятие № 7. Расчет мощности и выбор двигателей и силового преобразователя в регулируемом электроприводе

Выбор двигателя по мощности для регулируемого по скорости электропривода должен быть выполнен так, чтобы нагрузка двигателя при работе на любой скорости не превышала допустимую по условиям нагрева.

В этом случае двигатель использован по мощности наиболее полно. Достигается это в первую очередь выбором соответствующего способа регулирования скорости. Все способы регулирования скорости по условию допустимой нагрузки двигателя делятся на две основные группы. Это способы регулирования скорости при постоянном моменте, у которых допустимой нагрузкой двигателя при всех скоростях является постоянный момент, определяющий номинальный момент двигателя. Вторая группа – это способы регулирования при постоянной мощности, у которых максимальной нагрузкой является нагрузка постоянной мощностью, равной номинальной при всех скоростях. Как правило, эти способы регулирования скорости связаны с ослаблением магнитного потока двигателя.

При регулировании скорости с постоянством момента мощность нагрузки возрастает с увеличением скорости по линейному закону. В этом случае номинальной скорости двигателя соответствует максимальная скорость из заданного диапазона регулирования. Номинальный момент двигателя равен моменту нагрузки. Номинальная мощность выбираемого двигателя $P_{ном} = M_{ном} \cdot \omega_{ном}$. Таким образом номинальная мощность двигателя равна максимально возможной, и во всем диапазоне регулирования двигатель по моменту загружен полностью, соответственно, ток двигателя не превышает номинальное значение. Если момент нагрузки принимает различные значения при регулировании скорости, то необходимо построить нагрузочную диаграмму изменения приведенных к валу двигателя моментов нагрузки в соответствии с технологическим циклом работы рабочего механизма и определить режим работы двигателя и эквивалентный момент в соответствии с этим режимом. Затем выбрать расчетный номинальный момент двигателя и номинальную мощность двигателя, по которой из каталога с учетом режима работы выбирается двигатель. После этого необходима проверка выбранного двигателя по нагреву. Регулируемые электроприводы обеспечивают регулирование скорости с постоянством момента нагрузки при поддержании постоянного потока двигателя. Поэтому проверка по нагреву может быть выполнена по диаграмме изменения момента двигателя. Для этого рассчитывается нагрузочная диаграмма работы механизма с учетом параметров выбранного двигателя и режима работы; определяется эквивалентный момент с учетом ухудшения условий охлаждения:

$$M = \sqrt{\frac{\sum M_i^2 \cdot t_i}{\sum \beta_{ox,i} \cdot t_i}},$$

где M_i – момент двигателя на i -м участке нагрузочной диаграммы электропривода;

$\beta_{ox,i}$ – коэффициент охлаждения самовентилируемого двигателя на участке ($\beta_{ox,i} = 0,98$ для самовентилируемых двигателей);

t_i – временной интервал i -го участка.

Двигатель выбран правильно, если выполняется условие $M_{э\kappa\beta} \leq M_{ном}$.

Проверяется условие перегрузочной способности двигателя $M_{max} \leq M_{max доп}$.

При регулировании скорости с постоянством мощности регулирование скорости происходит вверх от номинальной (ослабление потока двигателя). Номинальная скорость, как правило, выбирается равной минимальной скорости из диапазона регулирования. Поскольку номинальная мощность двигателя определяется постоянной мощностью нагрузки $P_{ном.нагр} = M_{ст} \cdot \omega_{мех.мин}$, то номинальный момент

двигателя должен быть $M_{ном} = \frac{P_{ном.нагр}}{\omega_{мех.мин}}$. Двигатель при этом будет загружен пол-

ностью во всем диапазоне регулирования скорости вверх от номинальной и работает в нормальном тепловом режиме.

Очевидно, что с ростом скорости при этом регулировании должен уменьшаться момент нагрузки. Как правило, этот способ регулирования в системах регулируемого электропривода используется для расширения возможностей в качестве дополнения к способу регулирования с постоянством момента (двухзонное регулирование скорости). При использовании двухзонного частотно-регулируемого асинхронного электропривода на основе АД с к. з. ротором проверка выбранного двигателя по нагреву с использованием метода эквивалентного момента может быть выполнена на основе нагрузочной диаграммы по скорректированному выражению для эквивалентного момента:

$$M = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N M_i^2 \cdot t_i + \alpha^2 \sum_{j=1}^Q M_j^2 \cdot t_j}{\sum_{i=1}^m \beta_{ox,i} \cdot t_i}},$$

где N – число временных интервалов нагрузочной диаграммы электропривода, где асинхронный двигатель работает при постоянном потоке ($\omega \leq \omega_{ном}$);

Q – число временных интервалов нагрузочной диаграммы электропривода, где асинхронный двигатель работает при ослабленном потоке ($\omega \geq \omega_{ном}$);

$$\alpha = \frac{f_1}{f_{1ном}};$$

m – число рабочих интервалов в нагрузочной диаграмме при $\omega \leq \omega_{ном}$.

Область работы регулируемого электропривода задается в 4 квадрантах плоскости в координатах момента в функции скорости. В этих квадрантах реализуются управляемые пускотормозные режимы работы двигателя с помощью соответствующего исполнения силового преобразователя. Это преобразователь частоты в регулируемых приводах переменного тока либо управляемый преобразователь напряжения (тиристорный, транзисторный) в приводах постоянного тока. При выборе силового преобразователя сначала надо определиться с необходимыми режимами работы двигателя для реализации всех технологических требований, предъявляемых к функционированию конкретного механизма в данной окружающей среде, и, соответственно, определиться с преобразователем, силовая схема которого может реализовать эти режимы работы.

Затем по номинальным данным выбранного двигателя выбирают по электрическим показателям конкретный преобразователь. Для привода постоянного тока преобразователь напряжения выбирают по напряжению $U_{ном.преоб} \geq U_{ном}$; по номинальному току $I_{ном.преоб} \geq I_{ном}$; по максимальному току перегрузки (при максимальной длительности этого тока перегрузки) $I \geq I_{ном}$. При работе преобразователя на обмотку возбуждения ДПТ его выбирают по номинальному напряжению обмотки возбуждения. При выборе преобразователя частоты условия выбора следующие:

$$P_{ном.преоб} \geq P_{ном}; U_{вых.мах.пр} \geq U_{ном}; I_{ном.преоб} \geq I_{рас}; M_{мах.пр.} \geq M_{мах},$$

где $P_{ном}$, $U_{ном}$ – номинальная мощность и напряжение асинхронного двигателя;

$P_{ном.преоб.}$, $I_{ном.преоб.}$ – номинальная мощность и номинальный ток преобразователя.

При выборе преобразователя используют следующее:

$U_{вых.мах.пр}$ – максимальное выходное напряжение преобразователя;

$M_{мах.пр}$ – максимальный момент двигателя, допускаемый преобразователем;

$M_{мах}$ – максимальный момент двигателя по нагрузочной диаграмме электропривода;

$I_{рас.}$ – расчетный ток преобразователя, определяемый как $I_{рас} = I_{дв} \cdot \frac{\lambda_m}{k_I}$;

k_I – коэффициент перегрузки инвертора преобразователя частоты по току, который принимают равным 1,36...1,6;

$I_{дв}$ – расчетный ток двигателя, приведенный к напряжению сети, питающей преобразователь частоты, $I_{дв} = I_{дв.Уном} \cdot \frac{U_{ном}}{U_c}$;

$I_{дв.Уном}$ – расчетное значение тока статора АД при номинальном напряжении, $I_{дв.Уном} = \sqrt{1 - (1 - m^2) \cdot \cos^2 \varphi_{ном}}$;

$$m = \frac{M_{с.мах}}{M_{ном}};$$

$M_{ном}$ – номинальный момент двигателя,

$M_{с.мах}$ – максимальное значение статического момента на нагрузочной диаграмме;

$\cos \varphi_{ном}$ – номинальный коэффициент мощности двигателя.

Задание

Нагрузочная диаграмма двигателя имеет вид, представленный на рисунке 16, а. Режим работы S1. Скорость регулируется при постоянном моменте нагрузки. Выбрать двигатель по мощности (необходимые данные в соответствии с вариантом выдает преподаватель).

8 Практическое занятие № 8 Выбор электрических аппаратов по электрическим параметрам

Номинальное напряжение и ток аппаратов должны соответствовать напряжению и допустимому длительному току цепи.

Для трехфазных электроприемников переменного тока

$$I_{ном} = P_{ном} / 1,73 U_{ном.лин} \cos \varphi_{ном} \eta_{ном}.$$

Для электроприемников постоянного тока

$$I_{ном} = P_{ном} / U_{ном} \eta_{ном},$$

где $P_{ном}$ – номинальная мощность электроприемника или группы электроприемников.

Выбор конкретных электрических аппаратов по электрическим параметрам производится в соответствии со следующими правилами.

Рубильники, пакетные выключатели, тумблеры, кнопки, конечные выключатели.

Выбор производится:

– по номинальному напряжению сети:

$$U_{ном} \geq U_{сети},$$

где $U_{ном}$ – номинальное напряжение аппарата;

$U_{сети}$ – номинальное напряжение сети;

– по длительному расчетному току цепи:

$$I_{ном} \geq I_{длит},$$

где $I_{ном}$ – номинальный ток аппарата;

$I_{длит}$ – длительный расчетный ток цепи.

Под длительным расчетным током в общем случае понимается не номинальный ток отдельного электроприемника, а действительно протекающий по линии ток.

Магнитные пускатели, контакторы.

Выбор производится:

– по номинальному напряжению сети:

$$U_{ном} = U_{сети},$$

где $U_{ном}$ – номинальное напряжение катушки аппарата;

– по номинальному току нагрузки (длительно расчетный ток цепи) силовых и вспомогательных контактов:

$$I_{ном} \geq I_{ном.нагр},$$

где $I_{ном}$ – номинальный ток аппарата для конкретного режима работы;

– по мощности электродвигателя исполнительного механизма (для магнитных пускателей). Этот выбор предполагает наличие в справочниках таблиц, в которых конкретному двигателю указывается конкретный тип пускателя;

– по номинальному напряжению силовых и вспомогательных контактов аппарата: $U_{ном.конт} \geq U_{сети}$;

– по режиму работы (АС1, АС2, АС3, АС4 для аппарата переменного тока и ДС1, ДС2, ДС3, ДС4, ДС5 для аппарата постоянного тока);

– по числу включений в час с учетом коммутационной и механической износостойкости.

Реле напряжения.

Выбор производится:

– по номинальному напряжению сети:

$$U_{ном} = U_{сети},$$

где $U_{ном.}$ – номинальное напряжение катушки аппарата;

– по току, коммутируемому контактами:

$$I_{ном} \geq I_{ном.нагр},$$

где $I_{ном.}$ – номинальный ток, коммутируемый контактами (зависит в том числе от характера нагрузки – индуктивная и т. д., от режима работы – включения, отключения);

– по напряжению контактов:

$$U_{\text{конт}} \geq U_{\text{сети}},$$

где $U_{\text{конт}}$ – допустимое напряжение контактов;

– по числу и исполнению контактов;

– по создаваемым выдержкам времени (для реле времени).

Предохранители.

Выбор производится:

– по номинальному напряжению сети:

$$U_{\text{ном}} \geq U_{\text{сети}},$$

где $U_{\text{ном.}}$ – номинальное напряжение предохранителя;

– по длительному расчетному току линии:

$$I_{\text{ном.вст}} \geq I_{\text{длит}},$$

где $I_{\text{ном.вст}}$ – номинальный ток плавкой вставки;

– по условиям пуска асинхронных двигателей (с короткозамкнутым ротором):

$$I_{\text{ном.вст}} = \frac{I_{\text{пуск}}}{\alpha},$$

где α – коэффициент, зависящий от условий пуска (продолжительность пуска), $\alpha = 1,5 \dots 2,2$.

Для двигателя с фазным ротором, если $I_{\text{пуск}} \leq 3 I_{\text{ном.}}$:

$$I_{\text{ном.вст}} \geq (1 \dots 1,25) I_{\text{ном.дв.}}$$

Автоматические выключатели.

Выбор производится по следующим условиям:

$$U_{\text{ном.авт}} \geq U_{\text{сети}}; \quad I_{\text{ном.авт}} \geq I_{\text{длит}},$$

где $I_{\text{длит}}$ – длительный расчетный ток линии.

$$I_{\text{ном.расц}} \geq I_{\text{длит}},$$

где $I_{\text{ном.расц}}$ – номинальный ток теплового расцепителя.

Для двигателей, работающих в длительном режиме работы, $I_{\text{ном.расц}}$ должен равняться номинальному току. Для режимов работы двигателей, отличных от

длительного, эффективная защита не обеспечивается при таком выборе и необходима, например, терморезисторная защита.

$$I_{уст.мах расц} \geq (1,5...1,8)I_{пуск},$$

где $I_{уст.мах.расц.}$ – ток установки расцепителя защиты от короткого замыкания (электромагнитный расцепитель);

$I_{пуск}$ – пусковой ток двигателя с короткозамкнутым ротором.

Для асинхронных двигателей с фазным ротором

$$I_{уст.мах расц} \geq (2,5...3)I_{ном.двиг}.$$

Для группы асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором

$$I_{уст.мах расц.} \geq (1,5...1,8)I_{ном.двиг} \cdot [\sum I_{ном.дв} + (I_{пуск} - I_{ном.дв})],$$

где $(I_{пуск} - I_{ном.дв})$ берется для двигателя самого мощного;

$\sum I_{ном.дв}$ – сумма номинальных токов, одновременно работающих двигателей.

Тепловые реле.

Выбираются по номинальному току и номинальному току двигателя продолжительного режима работы, а также по номинальному напряжению:

$$U_{ном.реле} \geq U_{сети}; \quad I_{ном.реле} = I_{ном.дв}.$$

Для двигателей, работающих в повторно-кратковременном режиме, рекомендуется использовать встроенные блоки защиты с терморезисторами для защиты от перегрузки (в устройствах встроенной тепловой защиты). Для двигателей, работающих в кратковременном режиме, тепловая защита не используется, за исключением случаев возможной работы двигателя на упор.

Задание

Выбрать необходимые электрические аппараты для релейно-контактной схемы управления двигателем (принципиальная схема управления двигателем и необходимые данные в соответствии с вариантом выдается преподавателем).

Список литературы

1 **Фираго, Б. И.** Расчеты по электроприводу производственных машин и механизмов / Б. И. Фираго. – Мн. : Техноперспектива, 2012. – 639 с.

2 **Фираго, Б. И.** Теория электропривода: учеб. пособие / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Мн. : Техноперспектива, 2004. – 527 с.

3 **Скарыно, Б. Б.** Электрические приводы мехатронных и робототехнических устройств / Б. Б. Скарыно. – Могилев : Бел.-Рос. ун-т, 2018. – 47 с.