

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Кафедра «Автоматизированного электропривода»

**СБОРНИК КОНТРОЛЬНЫХ ВОПРОСОВ И ЗАДАЧ  
ПО КУРСУ «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД»**

Практикум  
для студентов, обучающихся по направлению  
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

ISBN 978-5-7046-2937-5

© Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2024

УДК 621.3  
ББК 31.291  
С 23

*Утверждено учебным управлением НИУ «МЭИ»  
в качестве учебного издания*

*Подготовлено на кафедре автоматизированного электропривода*

Рецензенты: к. т. н., доц. М. Я. Погребисский  
к. т. н., доц. Н. А. Поляков

**Авторы:** Ю. И. Прудникова, Л. О. Гостева, К. Г. Федорова,  
Д. А. Благодаров, Д. И. Савкин, Л. Н. Рассудов

С 23 Сборник контрольных вопросов и задач по курсу «Электрический привод» [Электронный ресурс]: практикум / Ю. И. Прудникова, Л. О. Гостева, К. Г. Федорова и др. – М.: Издательство МЭИ, 2024. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

Практикум содержит примеры вопросов и задач, рассматриваемых на практических занятиях по курсу «Электрический привод», а также используемых при подготовке к лабораторным работам.

Настоящее пособие предназначено для самостоятельной проработки изучаемых разделов курса студентами института электротехники, обучающихся по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» по программе «Электропривод и автоматика», а также может быть использовано студентами других направлений и программ.

**Минимальные системные требования:**

Компьютер: процессор x86 с тактовой частотой 500 МГц и выше; ОЗУ 512 Мб; 20 Мб на жестком диске; видеокарта SVGA 1280x1024 High Color (32 bit);

Операционная система: Windows XP/7/8 и выше;

Дополнительные программные средства: Adobe Acrobat Reader версии 6 и выше.

ISBN 978-5-7046-2937-5

© Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2024

# ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ .....	4
ПРЕДИСЛОВИЕ.....	5
1. МЕХАНИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА.....	6
1.1. Введение.....	6
1.2. Контрольные вопросы и задания .....	6
1.3. Задачи .....	7
2. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С ДВИГАТЕЛЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА .....	13
2.1. Введение.....	13
2.2. Контрольные вопросы и задания .....	13
2.3. Задачи .....	14
3. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С ДВИГАТЕЛЯМИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА .....	23
3.1. Введение.....	23
3.2. Контрольные вопросы и задания .....	24
3.3. Задачи .....	25
4. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ.....	33
4.1. Введение.....	33
4.2. Контрольные вопросы и задания .....	34
4.3. Задачи .....	35
5. ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕМЕНТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА .....	42
5.1. Введение.....	42
5.2. Контрольные вопросы и задания .....	42
5.3. Задачи .....	43
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....	56

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ

ЭМП	– электромеханический преобразователь
ЭМ	– электрическая машина
ЭП	– электрический привод
ЭД	– электродвигатель
ИО	– исполнительный орган
КПД	– коэффициент полезного действия
МПТ НВ	– машина постоянного тока независимого возбуждения
ДПТ НВ	– двигатель постоянного тока независимого возбуждения
КЗ	– короткое замыкание
ХХ	– холостой ход
АД	– асинхронный двигатель
АД с КЗ	– асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором
АД с ФР	– асинхронный двигатель с фазным ротором
СД	– синхронный двигатель
ПЧ	– преобразователь частоты
ПЧ – АД	– преобразователь частоты – асинхронный двигатель

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В практикуме приведены примеры вопросов и задач по дисциплине «Электрический привод» для подготовки к коллоквиумам по защите лабораторных работ, расчётных графических заданий и/или курсовых проектов, а также к контрольным работами.

Практикум по содержанию соответствует учебной программе курса «Электрический привод», читаемого в НИУ «МЭИ». Прежде, чем решать задачи и отвечать на вопросы каждого из разделов, рекомендуется изучить этот соответствующий материал в учебниках [1, 2]. В задачнике разобраны ключевые, по мнению авторов, задачи с подробно разложенным ходом их решения. При этом авторы намеренно оставили значительную часть материала для самостоятельного разбора обучающимися, чтобы дать им возможность в ходе самостоятельной работы глубже понять изучаемый материал.

Сборник контрольных вопросов и задач окажет помощь студентам в самостоятельном изучении курса, подготовке к экзамену, защите лабораторных работ и успешного прохождения тестов. Пособие будет полезно и преподавателям при составлении заданий контрольных работ, опросе студентов в лаборатории, защите типовых расчетов и курсовых проектов.

*Примечание от авторов: в техническом смысле, говоря об электромеханических преобразователях энергии, правильно употреблять термин «электрическая машина» (ЭМ), так как при различных условиях эксплуатации ЭМ может работать как в двигательном режиме, так и в генераторном. При этом в предложенных для изучения дисциплины «Электрический привод» учебниках чаще будет использован термин «электрический двигатель» с допущением, что электрическая машина работает именно в двигательном режиме. Поэтому для единообразия терминологии, а также принимая указанное допущение, в данной работе везде применительно к электрическим машинам будет использоваться термин «электрический двигатель» (ЭД).*

# 1. МЕХАНИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА

## 1.1. Введение

Приведение в движение исполнительных механизмов и управление их движением для выполнения технологических операций являются основной задачей автоматизированного электропривода (ЭП). Поэтому специалист по автоматизированному электроприводу должен знать общие особенности механической части электромеханических систем, важнейшие элементы, их взаимосвязи, способы идентификации и анализа. Он должен уметь на основе известной кинематики механизма, его технических данных и сведений о технологическом процессе составлять расчетные схемы и рассчитывать параметры механической части электропривода, описывать движение электропривода дифференциальными уравнениями, строить частотные характеристики и переходные процессы механических координат на основе методов механики и теории управления [1].

Рекомендуемые материалы для подготовки:

✓ [1] – «Глава вторая. Основы механики электропривода».

## 1.2. Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение момента инерции тела. Какую размерность имеет момент инерции тела?
2. Поясните физический смысл приведения параметров механической части электропривода. Для чего это нужно?
3. Назовите условия приведения моментов инерции элементов механической части ЭП.
4. Приведите примеры механизмов, осуществляющих преобразование вращательного движения в поступательное, и запишите выражения для их радиуса приведения.
5. Что называется активной нагрузкой ЭП? Приведите примеры механизмов, создающих активную нагрузку ЭП, и изобразите их механические характеристики.
6. Что называется реактивной нагрузкой ЭП? Приведите примеры механизмов, создающих реактивную нагрузку ЭП, и изобразите их механические характеристики.
7. Почему в сфере ЭП часто используют уравнение движения, записанное в виде:  $M - M_c = J(d\omega/dt)$ ?

8. Какое движение называется установившимся, и чем оно отличается от неустановившегося?
9. Каковы особенности расчета приведенного момента нагрузки при различных направлениях потока энергии в механической части ЭП?
10. Что такое динамический момент ЭП?
11. Что такое статическая жесткость механической характеристики ЭП?
12. Как определить скорость установившегося движения при наличии механических характеристик ЭД и исполнительного механизма?
13. Как определить устойчивость установившегося режима работы?

### 1.3. Задачи

1. На рисунке 1.1 приведены механические характеристики ЭД  $\omega(M)$  и механизма  $\omega(M_c)$ . Определите устойчивость в точках 1, 2, 3, 4.

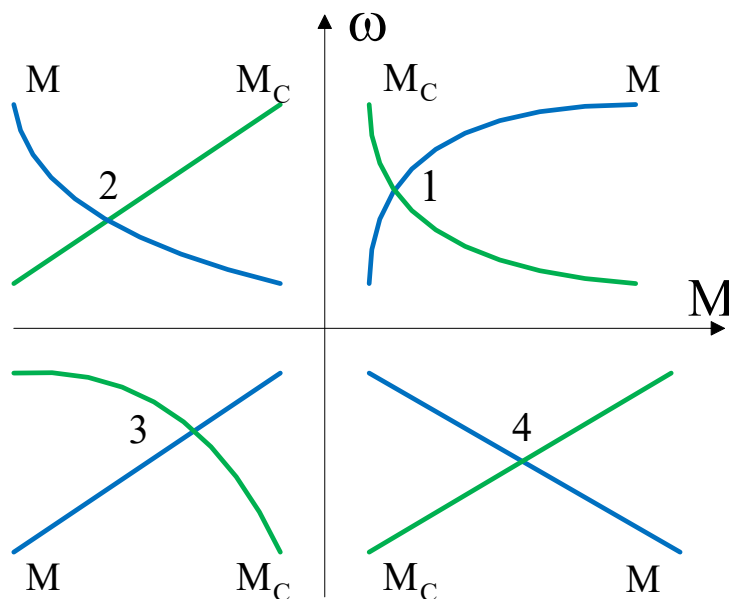


Рис. 1.1. Механические характеристики двигателя и механизма

2. На рисунке 1.2 приведена кинематическая схема ЭП подъемной лебедки. Электродвигатель (ЭД) вращательного движения со скоростью  $\omega$  через одноступенчатый редуктор с парой шестерен ( $z_1$  и  $z_2$ ) приводит во вращение с угловой скоростью  $\omega_b$  барабан подъемной лебедки, который с помощью троса поднимает или опускает с линейной скоростью  $V_{ио}$  груз массой  $m$ . На схеме также показаны соединительные механические муфты (М1) и (М2).

Требуется получить одномассовую расчетную схему при следующих допущениях: все элементы кинематической схемы рис. 1.2 являются абсолютно жесткими и между ними отсутствуют зазоры. В качестве элемента приведения взять вал ЭД, операцию приведения выполнить для случая подъема груза.

Исходные данные: момент инерции двигателя:  $J_{\text{ЭД}} = 0,1 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ; момент инерции муфты (М1)  $J_1 = 0,02 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ; суммарный момент инерции муфты (М2) и барабана  $J_2 = 2 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ; масса груза  $m = 1000 \text{ кг}$ ; радиус барабана лебедки  $R_{\text{Б}} = 0,15 \text{ м}$ ; числа зубцов шестерен редуктора соответственно  $z_1 = 14$ ,  $z_2 = 86$ ; КПД редуктора  $\eta_{\text{Р}} = 0,97$ ; КПД лебедки  $\eta_{\text{Б}} = 0,96$ ; ускорение свободного падения  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ .

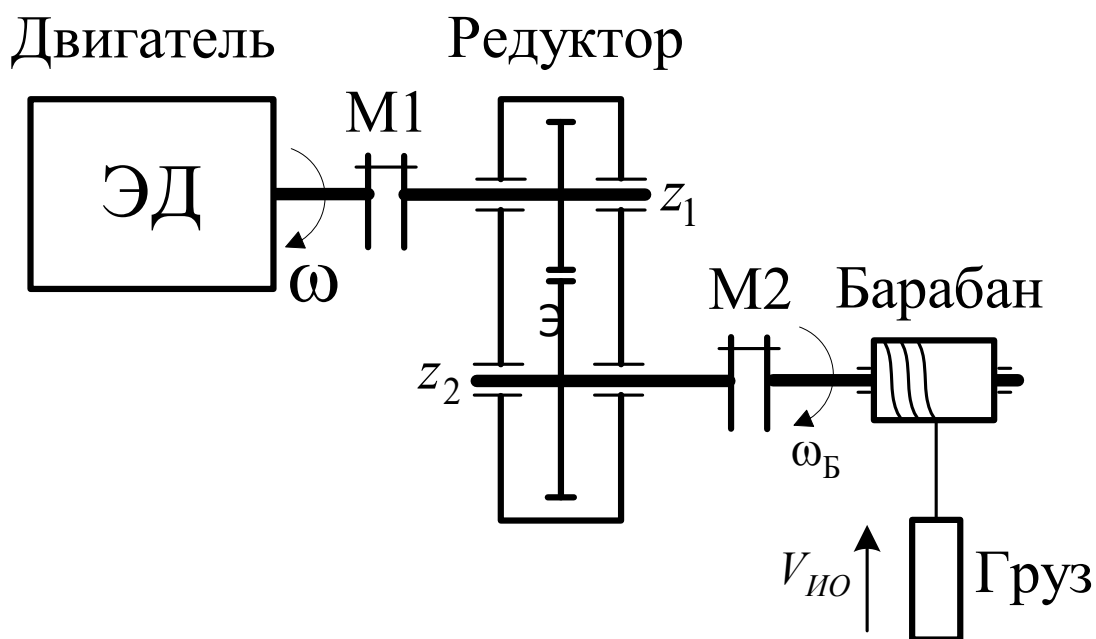


Рис. 1.2. Кинематическая схема ЭП подъемной лебёдки

### Решение.

1. Определяем передаточное число редуктора

$$i = z_2 / z_1 = 86 / 14 = 6,14;$$

и радиус приведения кинематической схемы

$$\rho = V_{\text{ИО}} / \omega = R_{\text{Б}} / i = 0,15 / 6,14 = 0,025 \text{ м.}$$



2. Находим суммарный момент инерции для одномассовой схемы:

$$J = J_{\text{д}} + J_1 + J_2 / i^2 + m p^2 \Rightarrow$$

$$J = 0,1 + 0,02 + 2 / 6,14^2 + 1000 \cdot 0,025^2 = 0,8 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

3. Находим приведенный момент нагрузки

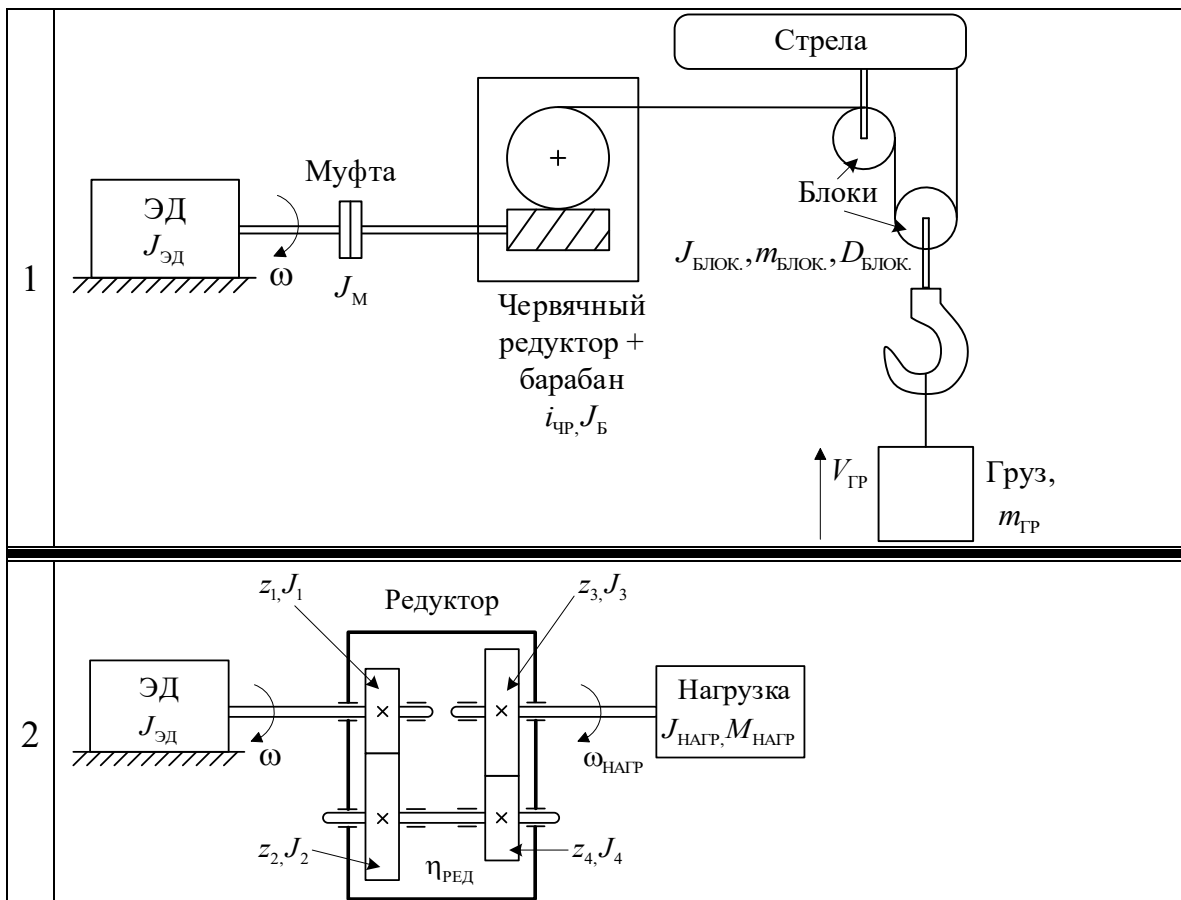
$$M_C = (mgr) / h_p h_b \Rightarrow$$

$$M_C = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,025 / 0,97 \cdot 0,96 = 263 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

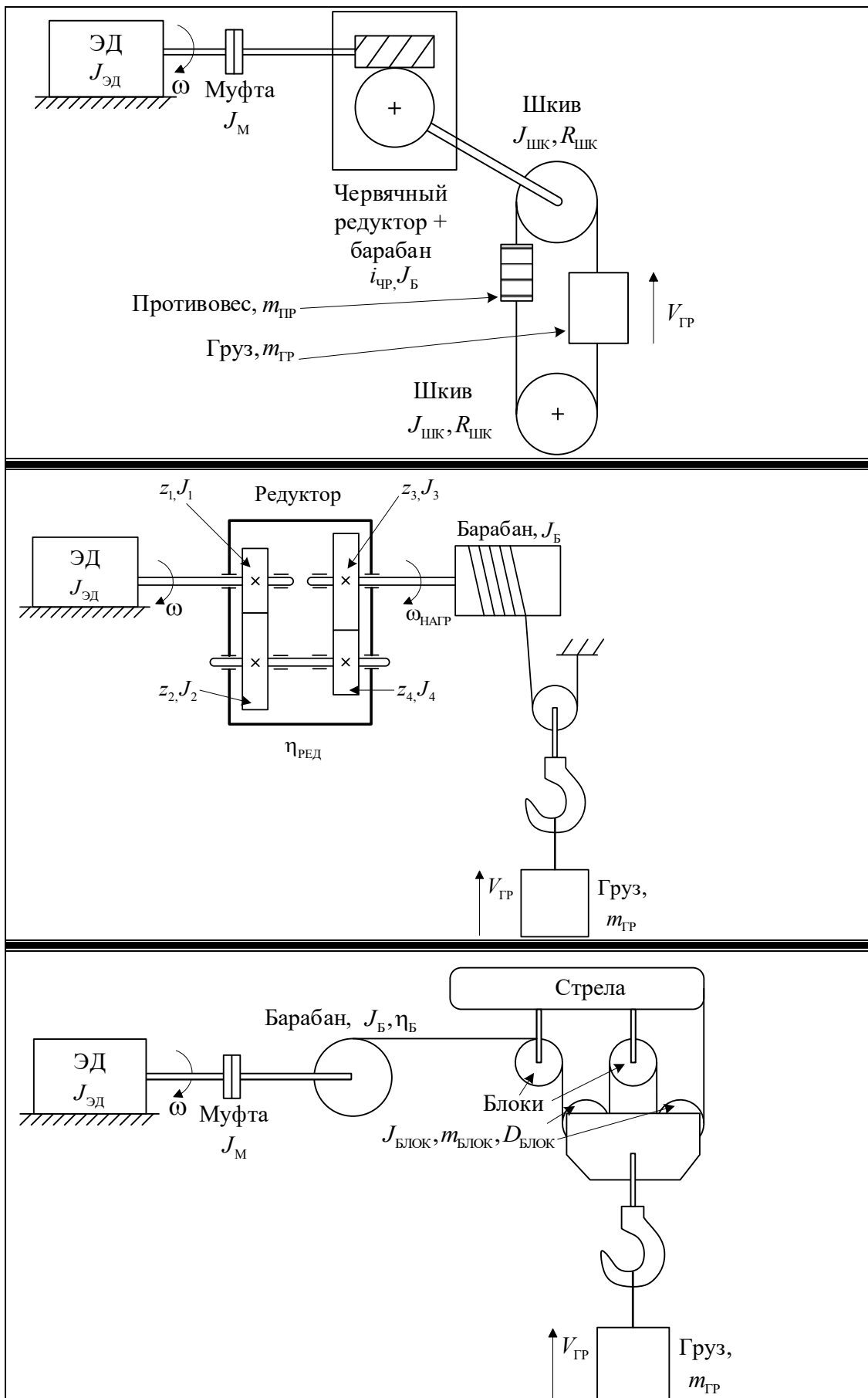
3. Для заданной кинематической схемы (см. табл. 1.1) получить одномассовую расчетную схему. Приведение осуществлять на выбор:

- к валу ЭД (двигательный режим);
- валу механизма.

Таблица 1.1. Варианты кинематических схем



Окончание табл. 1.1



4. Механические характеристики ЭД и исполнительного органа (ИО) заданы уравнениями:

$$\text{ЭД: } \omega = 300 - 2M;$$

$$\text{ИО: } 10\omega = 8M_c + M_c^2.$$

Необходимо определить координаты точки установившегося режима  $\omega_{\text{уст.}}$  и  $M_{\text{уст.}}$  аналитически и геометрически.

5. Заданы временные зависимости моментов ЭД и ИО:

$$\text{ЭД: } M(t) = 30t - 15;$$

$$\text{ИО: } M_c(t) = -25 + 10t,$$

а также начальная угловая частота вращения

$$\omega_{\text{нач.}} = 50 \text{ рад/с}$$

и начальный угол поворота вала ЭД

$$\varphi_{\text{нач.}} = 0.$$

Рассчитать и построить графики  $M_{\text{дин}}(t)$ ,  $\omega(t)$ ,  $\varphi(t)$  при заданных начальных условиях и моменте инерции двигателя  $J_{\text{ЭД}} = 0,8 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ .

6. Динамический момент электропривода  $M_{\text{дин}} = 250 \text{ Н}\cdot\text{м} = \text{const}$ , суммарный приведенный момент инерции  $J_{\Sigma} = 2 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ . Найти время изменения скорости с 50 до 350 рад/с.

7. Постройте график скорости  $\omega(t)$  и угла поворота  $\varphi(t)$  жесткого приведенного механического звена с моментом инерции  $J_{\Sigma} = 1 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ . График зависимости динамического момента ЭП от времени представлен на рис. 1.3.

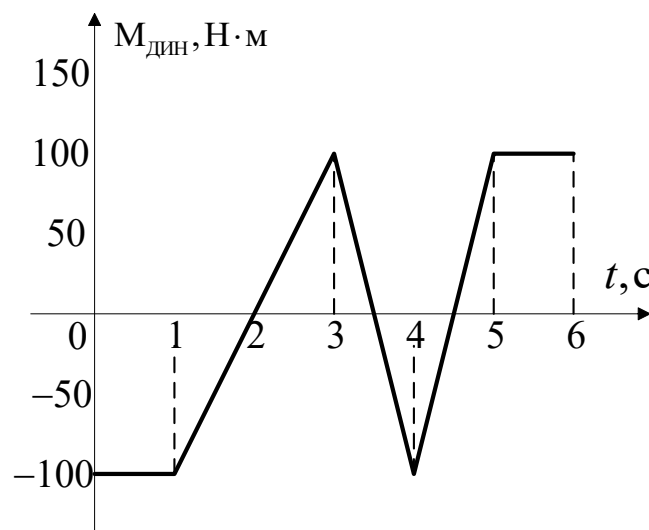


Рис. 1.3. Зависимость динамического момента ЭП от времени

8. Постройте график скорости  $\omega(t)$  и угла поворота  $\varphi(t)$  жесткого приведенного механического звена с моментом инерции  $J_{\Sigma} = 1 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ . График зависимости момента ЭД  $M(t)$  представлен на рис. 1.4, а активный момент сопротивления равен  $50 \text{ Н}\cdot\text{м}$  и начальная угловая частота вращения  $\omega_{\text{нач.}} = 100 \text{ рад/с}$ .

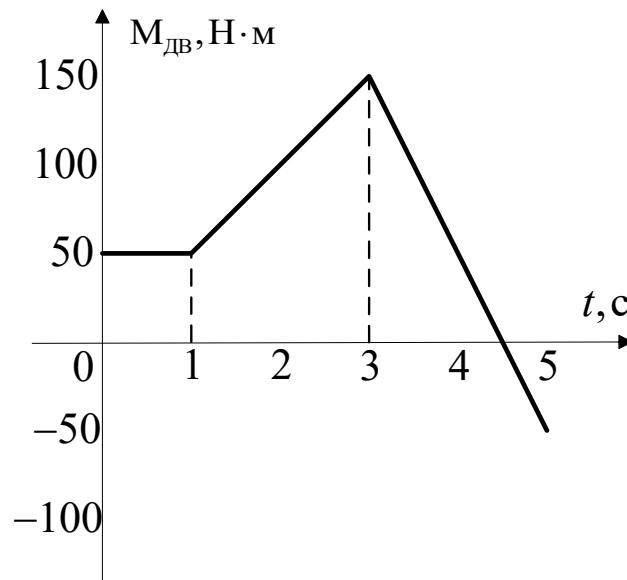


Рис. 1.4. Зависимость момента ЭД от времени

[К началу раздела](#)

[К содержанию](#)

## **2. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С ДВИГАТЕЛЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

### **2.1. Введение**

Долгое время основой электроприводов, где требуется плавное регулирование скорости, был двигатель постоянного тока независимого возбуждения. Дело в том, что построение замкнутых систем управления удобно, когда регулируемые величины (ток якоря) в стационарном режиме постоянны, а не изменяются, например, по синусоидальному закону, как в двигателях, работающих от переменного напряжения. Развитие, а также сокращение стоимости полупроводниковой элементной базы и информационной вычислительной техники позволило во многих случаях сократить применение габаритных ДПТ НВ, имеющих к тому же щеточные контакты, в пользу вентильных электроприводов. В вентильном электроприводе вместо механического коллектора со щетками используется электронный, где самокоммутация производится за счет формирования полупроводниковым преобразователем вектора напряжения двигателя переменного тока на основании информации о положении вала данного двигателя.

Необходимость рассмотрения электроприводов с ДПТ НВ в настоящем курсе актуальна не только в связи с всё ещё широкой их распространенностью, но и тем, что использование подходов к управлению ими актуально и для регулируемых электроприводов с двигателями многих других типов, где, например, за счет использования управления с ориентированием по магнитному полю удастся получить постоянные в стационарном режиме значения координат: тока якоря и магнитного потока.

Рекомендуемые материалы для подготовки:

✓ [1] – «Глава третья. Электроприводы постоянного тока».

### **2.2. Контрольные вопросы и задания**

1. Дайте определение естественной механической характеристики ДПТ НВ.
2. Дайте определение искусственной механической характеристики ДПТ НВ.
3. Перечислите основные способы регулирования скорости ДПТ НВ в разомкнутых системах. Каковы их основные показатели?

4. Какие характеристики ДПТ НВ называются реостатными?
5. Чем продиктовано уменьшение допустимого момента ДПТ НВ при регулировании скорости путём изменения магнитного потока?
6. Перечислите тормозные энергетические режимы ДПТ НВ. На основании достоинств и недостатков каждого способа торможения выделите наиболее предпочтительные сферы применения каждого из них.
7. Опишите физические процессы, протекающие при динамическом торможении ДПТ НВ.
8. Какие технические решения можно использовать для борьбы с реакцией якоря и ее проявлением в ДПТ НВ?
9. При подключении ДПТ НВ ошибочно поменяли местами начало и конец обмотки дополнительных полюсов. Как при этом изменится естественная механическая характеристика?
10. Как изменится жесткость статической механической характеристики ДПТ НВ, работавшего в номинальном режиме, после снижения его тока возбуждения в 2 раза?

### 2.3. Задачи

1. Получить уравнения статических механических и электромеханических характеристик ДПТ НВ при питании от источника напряжения бесконечной мощности и вывести формулы расчета характерных точек характеристик в режимах холостого хода и короткого замыкания. Электромеханическую систему считать линейной.
2. Определить параметры искусственной механической характеристики ДПТ НВ, проходящей через точки  $T_1(M_1, \omega_1)$  и  $T_2(M_2, \omega_2)$ . Соотнести возможные координаты точек  $T_1$  и  $T_2$  и допустимые диапазоны изменения параметров. Механическую характеристику считать линейной.
3. Дан ДПТ НВ со следующими параметрами (табл. 2.1):

**Таблица 2.1. Параметры ДПТ НВ**

Номинальная мощность, $P_H$	0,8 кВт
Номинальная частота вращения, $n_H$	1000 об/мин
Максимальная частота вращения, $n_{\text{МАКС}}$	2500 об/мин

**Окончание табл. 2.1**

Номинальный коэффициент полезного действия, $\eta_H$	75%
Номинальное напряжение, $U_{я.н.}$	110 В
Номинальный ток якоря, $I_{я.н.}$	9 А
Допустимая кратковременная перегрузка по току (10с), $k_I$	4
Активное сопротивление цепи якоря, $R_{я}$	1,04 Ом
Момент инерции, $J$	0,025 кг·м <sup>2</sup>

Определить параметры добавочного резистора  $R_{\Pi}$  для пуска в одну ступень и добавочное сопротивление  $R_T$  для динамического торможения в одну ступень.

**Решение.**

Параметрами резистора являются значение его электрического сопротивления, а также длительная мощность, которую он может выдерживать бесконечно долго при заданных условиях охлаждения, а также пиковая мощность.

Примем следующие допущения:

- 1) скорость электрических переходных процессов в цепи якоря значительно выше скорости механических процессов;
- 2) напряжение сети не может превысить номинальное напряжения якоря ДПТ НВ.

***I. Пусковой резистор***

При выборе номинала пускового резистора  $R_{\Pi}$  необходимо исходить из того, что ток в цепи якоря при нулевой скорости (ток

короткого замыкания  $I_{\text{я.кз}}$ ) не должен превысить предельное значение при подаче на обмотку якоря номинального напряжения  $U_{\text{я.н.}}$ :

$$I_{\text{я.кз}} = \frac{U_{\text{я.н.}}}{R_{\text{я}} + R_{\text{п}}} \leq k_I \cdot I_{\text{я.н.}},$$

где  $k_I$  – кратность предельно допустимого тока относительно номинально. Типовое значение  $k_I = (2 - 2,5)$ , но в некоторых случаях может достигать  $k_I = 4$ . Зададимся максимальным значением  $k_I$ .

Тогда

$$R_{\text{п}} \geq R_{\text{п.мин}} = \frac{U_{\text{я.н.}}}{k_I \cdot I_{\text{я.н.}}} - R_{\text{я}} = \frac{110}{4 \cdot 9} - 1,04 = 2,02 \text{ Ом.}$$

Пусть на предприятии имеется блок резисторов, позволяющий подобрать сопротивление из элементов с сопротивлениями  $R_{\text{эл}} = 0,1$  Ом и точностью  $\Delta = 10\%$ . Номинал сопротивления  $R_{\text{п}}$  должен быть ближайший больший, который превысит  $R_{\text{п.мин}}$  с учетом  $\Delta$ . Количество элементов:

$$N_{\text{п}} = \text{округл}\left[\left(\frac{R_{\text{п.мин}}}{R_{\text{эл}}}\right) + \frac{1}{2}\right] = \text{округл}\left[\left(\frac{2,02}{0,1}\right) + \frac{1}{2}\right] = 23.$$

Пусковое сопротивление:

$$R_{\text{п}} = N_{\text{п}} \cdot R_{\text{эл}} = 23 \cdot 0,1 = 2,3 \text{ Ом.}$$

Длительную и пиковую мощность пускового резистора можно рассчитать исходя из значений номинального и предельного токов ДПТ НВ. Тогда длительная мощность:



$$P_{\text{п.длит}} \geq I_{\text{я.н.}}^2 \cdot R_{\text{п}} = 9^2 \cdot 2,3 = 187 \text{ Вт.}$$

Пиковая мощность (10 с.):

$$P_{\text{п.пик}} \geq (k_I \cdot I_{\text{я.н.}})^2 \cdot R_{\text{п}} = (4 \cdot 9)^2 \cdot 2,3 = 2981 \approx 3 \text{ кВт.}$$

*Примечание. Длительная мощность показывает, какую нагрузку сопротивление выдерживает сколь угодно долго, и определяется эффективностью охлаждения резистора. Пиковая мощность показывает, какую нагрузку резистор может выдержать кратковременно в ходе неадиабатического нагрева, и в большей степени зависит от теплоемкости и теплопроводности материала самого резистора.*

## **II. Резистор для динамического торможения**

При тех же допущениях о скорости переходных процессов номинал сопротивления для динамического торможения выбирается из условия непревышения модулем тока в цепи якоря предельного значения – при любой скорости, на которой в соответствии с технологическим процессом может быть осуществлен переход в режим динамического торможения. В ходе технологического цикла нагрузка на электропривод изменяется. Вместе с ней изменяется и поддерживаемая скорость. Таким образом, если рассчитать динамическое торможение при номинальной нагрузке, то при работе на некоторых этапах технологического цикла с меньшей нагрузкой и попытке осуществить торможение оборудование может выйти из строя (ток превысит предельное значение). За исключением редких случаев оборудование всегда немного недогружено, что задает проектировщикам

электрического двигателя точку максимального КПД при наиболее вероятной нагрузке, несколько ниже номинальной.

В связи с отсутствием информации по конкретному технологическому процессу можно выбрать резистор исходя из максимальной частоты вращения, которую заданный электрический двигатель может механически выдержать. Это значение в ходе технологического цикла превышено точно не будет:

$$\omega_{\text{МАКС}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{\text{МАКС}}}{60}.$$

Ток якоря при работе в режиме динамического торможения при этой скорости не должен по модулю превысить предельное значение. Тогда

$$I_{\text{Я.ПРЕД}} = \frac{-k\Phi_{\text{Н}} \cdot \omega_{\text{МАКС}}}{R_{\text{Я}} + R_{\text{П}}} \geq -k_I \cdot I_{\text{Я.Н.}},$$

$$k\Phi_{\text{Н}} = \frac{U_{\text{Я.Н.}} - I_{\text{Я.Н.}} \cdot R_{\text{Я}}}{\frac{2 \cdot \pi \cdot n_{\text{Н}}}{60}} = \frac{110 - 9 \cdot 1,04}{\frac{2 \cdot \pi \cdot 1000}{60}} = 0,96 \text{ В}\cdot\text{с}.$$

Отсюда:

$$R_{\text{ДТ}} \geq R_{\text{ДТ.МИН}} = \frac{\frac{2 \cdot \pi \cdot n_{\text{МАКС}}}{60} \cdot k\Phi_{\text{Н}}}{k_I \cdot I_{\text{Я.Н.}}} - R_{\text{Я}} = \frac{\frac{2 \cdot \pi \cdot 2500}{60} \cdot 0,96}{36} - 1,04 = 5,94 \text{ Ом}.$$

Принцип выбора резистора для динамического торможения аналогичен выбору пускового:

$$N_{\text{ДТ}} = \text{округл}\left[\left(\frac{R_{\text{ДТ.МИН}} / R_{\text{ЭЛ}}}{100\% - \Delta} + \frac{1}{2}\right)\right] = \text{округл}\left[\left(\frac{5,94 / 0,1}{100\% - 10\%} + \frac{1}{2}\right)\right] = 67,$$

$$R_{\text{дт}} = N_{\text{дт}} \cdot R_{\text{эл}} = 67 \cdot 0,1 = 6,7 \text{ Ом.}$$

Номинальный и предельный токи можно выбрать исходя из соответствующих параметров якорной цепи ДПТ.

Тогда длительная мощность:

$$P_{\text{дт.длит}} \geq I_{\text{я.н.}}^2 \cdot R_{\text{дт}} = 9^2 \cdot 2,3 = 543 \text{ Вт.}$$

Пиковая мощность (10 с.):

$$P_{\text{дт.пик}} \geq (k_I \cdot I_{\text{я.н.}})^2 \cdot R_{\text{дт}} = (4 \cdot 9)^2 \cdot 6,7 = 8683 \approx 8,7 \text{ кВт.}$$

Ответ.

- ✓ Пусковой резистор: 2,3 Ом; не менее 187 Вт; не менее 3 кВт (10 с.);
- ✓ Резистор динамического торможения: 6,7 Ом; не менее 543 Вт; не менее 8,7 кВт (10 сек).

4. Получить характеристики ДПТ НВ (Таблица 2.1) при питании:

- а) от источника напряжения (напряжение ХХ равно  $U_{\text{я.н.}}$ ) ограниченной мощности;
- б) источника напряжения (напряжение ХХ равно  $U_{\text{я.н.}}$ ) неограниченной мощности;
- в) источника тока (ток КЗ равен  $I_{\text{я.н.}}$ ) ограниченной мощности;
- г) источника тока (ток КЗ равен  $I_{\text{я.н.}}$ ) неограниченной мощности.

5. Определить потери в обмотке якоря ДПТ НВ (Таблица 2.1) при добавлении  $R_{\text{доб}} = R_{\text{я}}$  в цепь якоря при номинальной нагрузке. Оценить КПД всей системы.

6. Какой электромагнитный момент развивает ДПТ НВ при питании якоря напряжением -50 В, если значение тока якоря равно 50 А, а угловая частота вращения вала при холостом ходе составляет -50 рад/с? Поясните на электрической схеме.

7. Естественная механическая характеристика ДПТ НВ проходит через точки с координатами (0 Н·м, 110 рад/с) и (10 Н·м, 100 рад/с), а характеристика при питании якорной цепи от управляемого источника напряжения через точки (0 Н·м, 75 рад/с) и (10 Н·м, 60 рад/с). Найти ЭДС управляемого источника напряжения и его внутреннее сопротивление, если номинальное напряжение якоря ДПТ НВ равно 110 В.

8. Скорость холостого хода электропривода с ДПТ НВ на естественной характеристике составляет 100 рад/с. Номинальный электромагнитный момент составляет 10 Н·м. Определить длительно допустимый электромагнитный момент на искусственной характеристике, если скорость холостого хода на ней 150 Н·м, а напряжение на обмотке якоря равно номинальному.

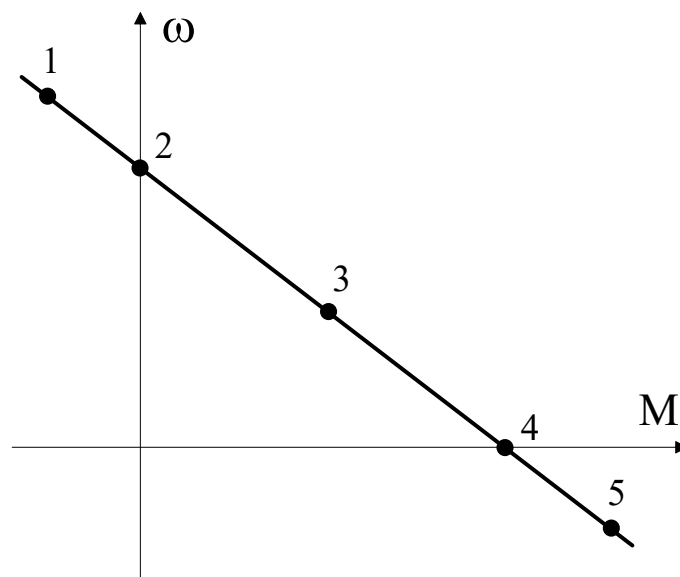
9. Дан ДПТ НВ со следующими данными (табл. 2.2):

**Таблица 2.2. Параметры ДПТ НВ**

Номинальная мощность, $P_H$	1,9 кВт
Номинальная частота вращения, $n_H$	1000 об/мин
Номинальный коэффициент полезного действия, $\eta_H$	80,4%
Номинальное напряжение, $U_{я.н.}$	110 В
Номинальный ток якоря, $I_{я.н.}$	21 А
Активное сопротивление цепи якоря, $R_я$	0,41 Ом
Момент инерции, $J$	0,057 кг·м <sup>2</sup>

Для заданного двигателя (Таблица 2.2) найти значение потока  $k\Phi$ , при котором искусственная характеристика пройдет через точку с координатами ( $M_{эм.н.}$ ,  $1,1 \cdot \omega_H$ ), где  $M_{эм.н.}$  – электромагнитный номинальный момент. Построить эту характеристику и найти длительно допустимый момент при работе на ней.

10. Изобразите диаграммы потоков энергии и составьте баланс мощностей для ДПТ НВ при работе в точках 1, 2, 3, 4, 5 на характеристике, представленной на рис. 2.1.



**Рис. 2.1. Механическая характеристика ДПТ НВ**

**11.** Постройте естественные электромеханическую и механическую характеристики ДПТ НВ типа МП-41, имеющего следующие паспортные данные (табл. 2.3):

**Таблица 2.3. Параметры ДПТ НВ типа МП-41**

Номинальная мощность, $P_H$	12 кВт
Номинальная частота вращения, $n_H$	685 об/мин
Номинальное напряжение, $U_{я.н.}$	220 В
Номинальный ток якоря, $I_{я.н.}$	64 А
Сопротивление якоря и дополнительных полюсов (при температуре 20°C), $R_{я\Sigma}$	0,248 Ом

**12.** Определите внутреннее сопротивление якорной цепи ДПТ НВ, если известно, что электромеханическая характеристика, приведенная на рис. 2.2, снята при напряжении  $U_{я.н.} = 110$  В.

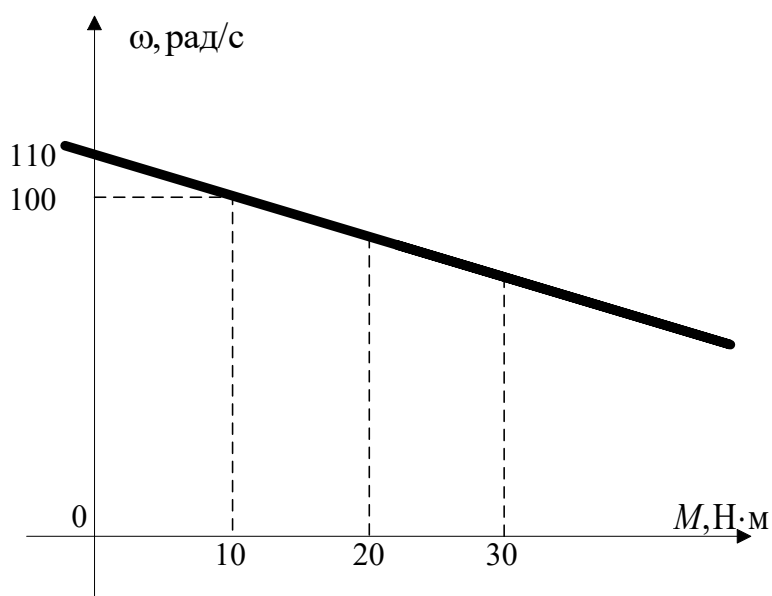


Рис. 2.2. Электромеханическая характеристика ДПТ НВ

13. ДПТ НВ имеет следующие паспортные данные (табл. 2.4):

Таблица 2.4. Параметры ДПТ НВ

Номинальная мощность, $P_H$	16 кВт
Номинальная частота вращения, $\omega_H$	72 рад/с
Номинальное напряжение, $U_{я.н.}$	220 В
Номинальный ток якоря, $I_{я.н.}$	86 А
Сопротивление якоря и дополнительных полюсов (при температуре 20°C), $R_{я\sum}$	0,21 Ом

Как следует изменить напряжение, приложенное к якорю ДПТ НВ, чтобы механическая характеристика прошла через точку с координатами  $\omega_H = 36$  рад/с,  $M_H = 36$  Н·м? Постройте полученные искусственные механическую и электромеханическую характеристики.

[К началу раздела](#)

[К содержанию](#)

### 3. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С ДВИГАТЕЛЯМИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

#### 3.1. Введение

Асинхронные электродвигатели (АД) с короткозамкнутым ротором и синхронные двигатели (СД) прежде имели основное применение в массовых нерегулируемых ЭП. Благодаря конструктивной простоте и меньшей металлоемкости подавляющее число нерегулируемых электроприводов малой и средней мощности выполняется на базе асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором (АД с КЗ). Асинхронные двигатели с фазным ротором (АД с ФР) применялись в электроприводах механизмов, требующих регулирования скорости, либо, при необходимости, ограничения пусковых токов, потребляемых из сети электроприводом [1].

В последние десятилетия, в связи с появлением новой полупроводниковой элементной базы и развитием вычислительной техники происходит активное внедрение электроприводов с асинхронными, синхронными и другими типами двигателей в сфере регулируемого электропривода. В частности, благодаря разработке и серийному выпуску электротехнической промышленностью полупроводниковых преобразователей частоты, стали создаваться и широко использоваться регулируемые ЭП с АД с КЗ. Применение таких ЭП, часто называемых частотно-регулируемыми, представляет собой одну из тенденций развития современного общепромышленного регулируемого ЭП.

Специалист в области электропривода должен знать и уметь использовать в практических целях математическое описание электромеханических процессов преобразования энергии в АД с КЗ, статические характеристики ЭП на их основе, определять целесообразность использования таких электроприводов.

Рекомендуемые материалы для подготовки:

- ✓ [1] – «Глава третья. Электроприводы постоянного тока»;
- ✓ [2] – «Глава 5. Электропривод с асинхронными двигателями».

### 3.2. Контрольные вопросы и задания

1. Изобразите схему замещения фазы асинхронного двигателя. Укажите параметры схемы. В чем отличие Т-образной схемы замещения и Г-образной? В какой ветви протекает ток намагничивания?
2. Какое уравнение связывает частоту тока в фазах обмотки ротора с частотой тока в фазах обмотки статора АД?
3. Какие характеристики АД называются естественными? Запишите их основные уравнения. Постройте указанные характеристики, покажите характерные точки. В чем особенность механической характеристики АД?
4. Запишите уравнение линеаризованной характеристики АД на рабочем участке. Чем определяется жёсткость механической характеристики?
5. Как осуществить реверс трехфазного АД? Поясните соответствующими механическими характеристиками.
6. Назовите энергетические режимы работы АД, для каждого из них поясните условия их обеспечения и техническую реализацию.
7. Какие достоинства и недостатки имеют следующие способы регулирования скорости АД: реостатное регулирование введением добавочных сопротивлений в цепь ротора; реостатное регулирование введением добавочных сопротивлений в цепь статора; изменение напряжения на статоре; частотное регулирование?
8. Запишите необходимые уравнения и изобразите семейство искусственных характеристик при реостатном регулировании скорости ЭП с АД введением добавочных сопротивлений в цепь ротора, а также допустимый момент нагрузки.
9. Запишите необходимые уравнения и изобразите семейство искусственных характеристик ЭП с АД при изменении напряжения на статоре, а также допустимый момент нагрузки.
10. Как расчётным способом определяются потери мощности в роторе АД при работе на искусственных характеристиках? Приведите необходимые уравнения. Можно ли указанные потери мощности определить графически по механической характеристике АД?
11. Какие типы преобразователей частоты вы знаете? Приведите их функциональные схемы, укажите характерные особенности.
12. Поясните принцип широтно-импульсной модуляции для инвертора напряжения ПЧ со звеном постоянного тока.



**13.** Запишите типовые частотные законы регулирования, необходимые уравнения и изобразите семейства искусственных механических характеристик частотно-регулируемого ЭП с АД для указанных частотных законов, а также допустимый момент нагрузки.

**14.** Поясните при помощи уравнений и графиков, в чем состоит необходимость введения в частотный закон регулирования скорости ЭП с АД  $I_l R_l$  – компенсации.

**15.** Приведите возможную схему соединения обмоток двухскоростного АД для каждой из скоростей холостого хода и соответствующие механические характеристики.

### 3.3. Задачи

**1.** АД с КЗ имеет следующие паспортные данные (табл. 3.1):

**Таблица 3.1. Параметры АД с КЗ ротором**

Номинальная мощность, $P_H$	7,5 кВт
Номинальное напряжение статора, $U_{1H}$	380/220 В
Число пар полюсов, $p_H$	2
Номинальное скольжение, $s_H$	2,9%
Номинальный коэффициент полезного действия, $\eta_H$	87,5%
Номинальный коэффициент мощности, $\cos \varphi_H$	0,86
Кратность критического момента, $\lambda$ ( $M_{кр}/M_H$ )	3
Кратность пускового момента, $k_M$ ( $M_{п}/M_H$ )	2,2
Кратность пускового тока, $k_I$ ( $I_{п}/I_{1H}$ )	7

Рассчитать значения характерных точек на естественных электромеханической  $\omega(I_1)$  и механической  $\omega(M)$  характеристиках двигателя и построить по этим точкам данные характеристики.

## **Решение.**

### ***I. Точка идеального холостого хода***

$$(\omega = \omega_0, M = 0, I_1 = I_{\text{хх}} \approx 0,35I_1).$$

При известном числе пар полюсов ( $p_{\Pi} = 2$ ) и номинальной частоте статора  $f_{1\text{H}} = 50$  Гц находим  $n_0$  и  $\omega_0$ :

$$n_0 = \frac{60 \cdot f_{1\text{H}}}{p_{\Pi}} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ об/мин},$$

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_0}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1500}{60} = 157 \text{ рад/с}.$$

### ***II. Номинальная точка***

$$(\omega = \omega_{\text{H}}, M = M_{\text{H}}).$$

При известном номинальном скольжении  $s_{\text{H}} = 0,029$  и рассчитанной ранее  $\omega_0 = 157$  оценим  $\omega_{\text{H}}$ :

$$\omega_{\text{H}} = \omega_0 \cdot (1 - s_{\text{H}}) = 157 \cdot (1 - 0,029) = 152,4 \text{ рад/с}.$$

Тогда

$$M_{\text{H}} = \frac{P_{\text{H}}}{\omega_{\text{H}}} = \frac{7500}{152,4} = 49,2 \text{ Н·м}.$$

Номинальный ток  $I_{1\text{H}}$  фазы статора можем рассчитать по следующему выражению:

$$I_{1\text{H}} = \frac{P_{\text{H}}}{3 \cdot U_{1\text{H.Фаз.}} \cdot \eta_{\text{H}} \cdot \cos \varphi_{\text{H}}} = \frac{7500}{3 \cdot 220 \cdot 0,875 \cdot 0,86} = 15,1 \text{ А}.$$

### ***III. Критическая точка***

$$(\omega = \omega_{\text{K}}, M = M_{\text{K}}).$$

$M_K$  определяем из известной кратности критического момента:

$$M_K = \lambda M_H = 3 \cdot 49,2 = 147,6 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Для оценки  $s_K$  воспользуемся упрощенной формулой Клосса, подставив  $M = M_H$  и  $s = s_H$ :

$$M_H = \frac{2M_K}{\frac{s_H}{s_K} + \frac{s_K}{s_H}},$$

получаем  $s_K = 0,16$ .

$$\text{Отсюда } \omega_K = \omega_0 \cdot (1 - s_K) = 157 \cdot (1 - 0,16) = 131,9 \text{ рад/с}.$$

#### ***IV. Пусковая точка***

$$(\omega = 0, M = M_{\Pi}, I_1 = I_{\Pi}).$$

$$M_{\Pi} = k_M \cdot M_H = 2,2 \cdot 49,2 = 108,24 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

$$I_{\Pi} = k_I \cdot I_{\text{IH}} = 7 \cdot 15,1 = 105,7 \text{ А}.$$

2. Асинхронный двигатель (Таблица 3.1) работает от преобразователя напряжения, к обмоткам статора приложено пониженное напряжение  $U_{\text{IФАЗ}} = 0,8 \cdot U_{\text{IH.ФАЗ}}$ . Рассчитать и построить искусственную механическую характеристику при работе с пониженным напряжением.

3. Асинхронный двигатель (Таблица 3.1) работает от преобразователя напряжения. Рассчитать и построить характеристику допустимого момента нагрузки на валу  $M_{\text{доп}}(s)$  в диапазоне изменения скольжения  $s_H < s < s_K$ . Определить, допустимо ли при пониженном напряжении на статоре  $U_{\text{IФАЗ}} = 0,7 \cdot U_{\text{IH.ФАЗ}}$  обеспечить на искусственной характеристике работу двигателя в продолжительном режиме с нагрузкой на валу  $M_C = 0,8 \cdot M_H$ .

4. Для асинхронного двигателя (Таблица 3.1) рассчитать и построить искусственные механические характеристики при работе от преобразователя частоты для случаев:  $f_{\text{ИСК.1}} = 30 \text{ Гц}$ ;  $f_{\text{ИСК.2}} = 40 \text{ Гц}$ ;  $f_{\text{ИСК.3}} = 60 \text{ Гц}$ . Сформулировать во всех случаях реализуемый частотный закон регулирования, а также рассчитать длительно допустимый момент  $M_{\text{доп}}$  при работе на искусственных характеристиках.

5. Асинхронный двигатель с фазным ротором имеет следующие паспортные данные (табл. 3.2):

**Таблица 3.2. Параметры АД с ФР**

Номинальная мощность, $P_H$	17,5 кВт
Номинальное напряжение статора, $U_{1H}$	380/220 В
Номинальная частота вращения, $n_H$	945 об/мин
Номинальный ток фазы статора, $I_{1H}$	43 А
Кратность критического момента, $\lambda$ ( $M_{кр}/M_H$ )	2,5
Параметры схемы замещения фазы двигателя	$R_1 = 0,34 \text{ Ом};$ $X_1 = 0,43 \text{ Ом};$ $R_2 = 0,12 \text{ Ом},$ $X_2 = 0,25 \text{ Ом}$
Коэффициент трансформации, $k$	3

Рассчитать координаты характерных точек на естественных электромеханической  $I_2'(\omega)$  и механической  $M(\omega)$  характеристиках двигателя, а также построить по уравнениям данные характеристики в диапазоне изменения скольжения  $-2,5 < s < 2,5$ .

6. Для АД с ФР (Таблица 3.2) рассчитать добавочное сопротивление  $R_{2д}$ , при включении которого в цепь ротора механическая характеристика пройдет через точку с координатами  $\omega_{и} = 0,6 \cdot \omega_H$ ,  $M_{и} = 0,9 \cdot M_H$ . Определить потери мощности в роторе при работе в заданной точке. Рассчитать и построить эту искусственную реостатную механическую характеристику.

7. Для АД с ФР (Таблица 3.2) рассчитать сопротивление  $R_{2д}$ , включение которого в цепь ротора позволит получить пусковой момент двигателя, равный критическому (максимальному моменту). Рассчитать и построить эту искусственную реостатную механическую характеристику. Определить, допустимо ли работать на данной реостатной характеристике в продолжительном режиме в точке, где скольжение  $s = 0,5$ .

Для решения задач 5–7 авторы рекомендуют особенно внимательно изучить [1] – параграфы 4.1 и 4.2, [2] – параграфы 5.1–5.5.

8. Для асинхронного двигателя (Таблица 3.2) рассчитать и построить механическую характеристику в режиме динамического торможения для случая  $I_{\text{ЭКВ.}}/I_{1\text{н.ФАЗ.}} = 0,7$ . Принять, что сопротивление цепи намагничивания  $x_{\mu} = 9 \cdot x'_2$ .

**Решение.**

Для приближенного построения механической характеристики АД в режиме динамического торможения необходимо рассчитать критическую точку, соответствующую работе двигателя в данном режиме.

Для этого воспользуемся известными уравнениями (см. [1], п. 4.2 и [2], п. 5.9]:

$$M_{\text{к.т.}} = \frac{3I_{\text{ЭКВ.}}^2 X_{\mu}^2}{2\omega_0 (X_{\mu} + X'_2)},$$
$$s_{\text{к.т.}} = \frac{R'_2}{X_{\mu} + X'_2}.$$

Получение числовых результатов по представленным уравнениям авторы оставляют за читателем.

9. Определите частоту тока в роторе асинхронного двигателя в точках 1, 2, 3, 4 и 5 (см. рис. 3.1). Частота тока статора  $f_1 = 50$  Гц; число пар полюсов  $p_{\text{п}} = 2$ .  $\omega_1 = 180$  рад/с;  $\omega_2 = 157$  рад/с;  $\omega_3 = 120$  рад/с;  $\omega_4 = 0$  рад/с;  $\omega_5 = -30$  рад/с.

10. Определите напряжение  $U_1$ , приложенное к статору асинхронного двигателя, для получения искусственной характеристики, показанной на рис. 3.2. Сопротивлением статора можно пренебречь  $R_1 \approx 0$ ; номинальная частота сети  $f_1 = 50$  Гц; номинальное напряжение  $U_{1\text{н}} = 220$  В; частота на искусственной характеристике  $f_{\text{и}} = 25$  Гц; число пар полюсов  $p_{\text{п}} = 2$ .

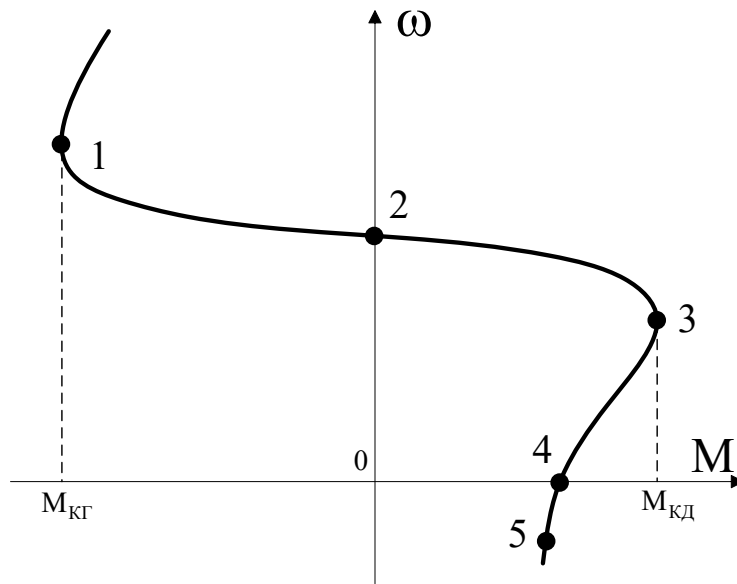


Рис. 3.1. Механическая характеристика АД

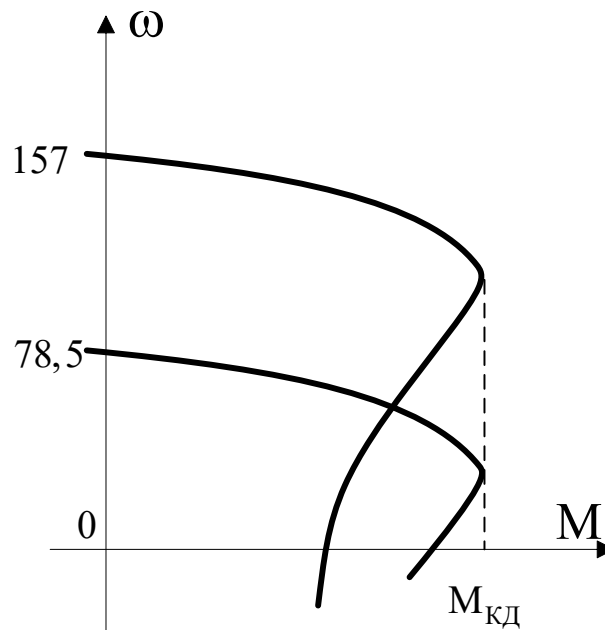


Рис. 3.2. Механические характеристики АД

11. На рисунке 3.3 представлены естественная механическая характеристика асинхронного двигателя в относительных единицах при  $U_{\text{ин.ФАЗ}} = 220 \text{ В}$ ;  $f_{1.\text{н}} = 50 \text{ Гц}$  и искусственные характеристики 1 и 2. По виду искусственных характеристик определить для каждой из них: способ регулирования скорости и изобразить схему подключения двигателя; условия регулирования (найти значения напряжения и частоты  $U_{1\text{н}}$ ,  $f_{1\text{н}}$ ).

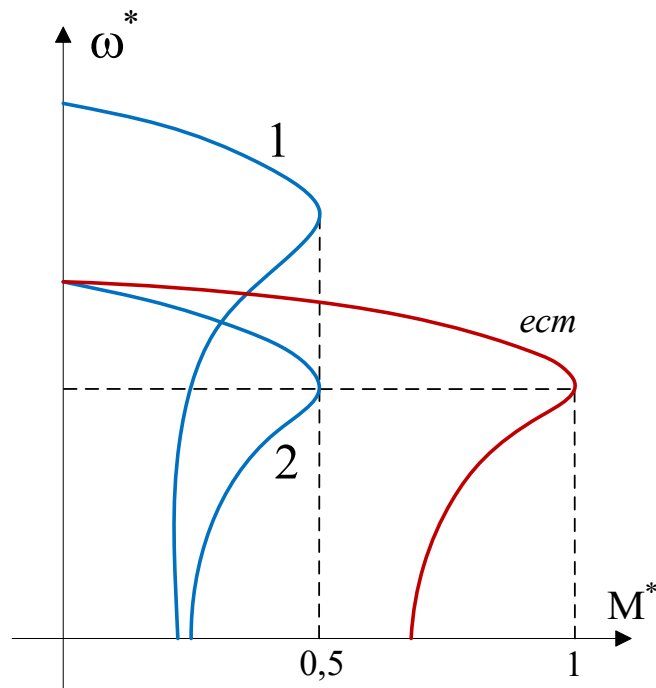


Рис. 3.3. Естественная и искусственные 1, 2 механические характеристики асинхронного двигателя

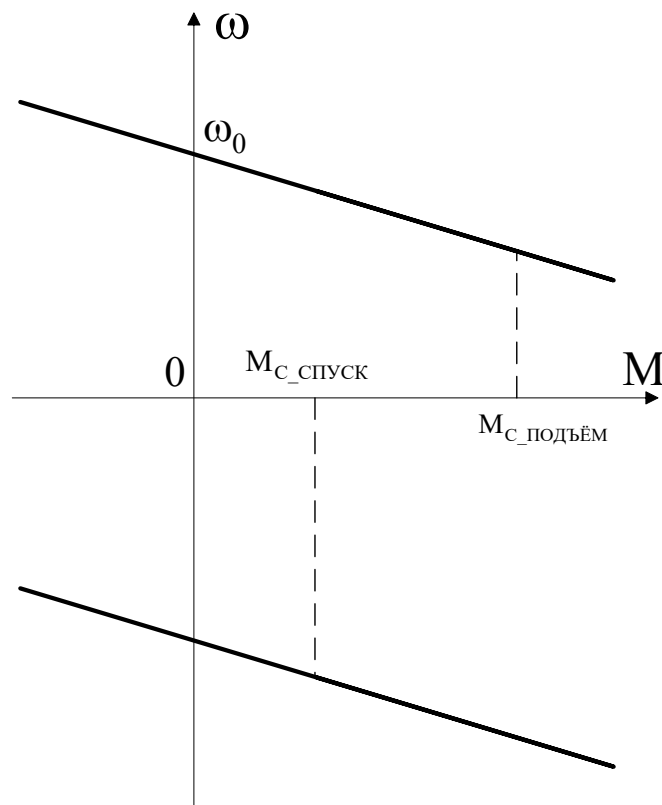
12. Обоснуйте, можно или недопустимо использовать асинхронный электродвигатель с паспортными данными  $U_{1н}, f_{1н}$  в следующих режимах работы:

- а)  $U_1 = 0,5U_{1н}; f_1 = f_{1н};$
- б)  $U_1 = U_{1н}; f_1 = 0,5f_{1н};$
- в)  $U_1 = U_{1н}; f_1 = 1,5f_{1н};$
- г)  $U_1 = 0,5U_{1н}; f_1 = 0,5f_{1н}.$

13. Система «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» (ПЧ–АД) с АД с КЗ (Таблица 3.1) управляет механизмом подъемной лебедкой. Лебедка поднимает/опускает груз массой  $m=400$  кг со скоростью  $V_{мех.} = 1$  м/с; параметры передачи:  $\eta_{мех.} = 0,9; i_{мех.} = 20$ ; радиус барабана:  $R_b = 0,4$  м.

Для режимов подъема/опускания груза (рис. 3.4) определить:

- а) приведенный к валу двигателя момент сопротивления нагрузки  $M_c$ ;
- б) рабочие скорости двигателя и соответствующие им частоты напряжения на выходе преобразователя частоты для удержания груза на нулевой скорости;
- в) величину тормозного сопротивления  $R_{торм.}$  преобразователя частоты для рассеяния мощности генераторного режима при опускании груза.



**Рис. 3.4. Статические моменты нагрузки механизма подъемной лебедки**

[К началу раздела](#)

[К содержанию](#)



## 4. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

### 4.1. Введение

При пуске и останове электродвигателя, при его реверсе, изменении задания на скорость в регулируемом электроприводе, при приложении (или снятии) к валу двигателя механической нагрузки изменяются координаты электропривода: ток, момент, скорость и другие. При этом привод переходит из одного установившегося режима работы с одними параметрами движения в другой установившийся режим с другими параметрами. Однако этот переход не может быть мгновенным, так как ток в двигателе из-за электромагнитной инерционности его цепей не может изменяться мгновенно, также не может изменяться мгновенно скорость рабочего органа из-за механической инерционности движущихся масс электропривода.

Переходным процессом (переходным режимом) электропривода называется протекающий во времени процесс перехода от одного установившегося режима работы (или отключенного состояния) к другому установившемуся состоянию.

Причиной возникновения переходных процессов могут быть:

- изменение управляющего воздействия (включение – отключение электропривода, изменение задания на скорость привода и др.);
- изменение возмущающего воздействия, главным из которых является изменение нагрузки на валу двигателя (изменение  $M_C$ );
- изменение параметров системы.

Изучение переходных процессов для заданного электропривода позволяет оценить длительность характер их протекания, а также механические и электрические нагрузки, возникающие при этом. Кроме того, изучение переходных процессов позволяет оценить входные данные для определения необходимой мощности двигателя и управляющих им устройств, а также степень соответствия возможностей электропривода требованиям технологического процесса [3].

Рекомендуемые материалы для подготовки:

- ✓ [1] – «Глава пятая. Переходные процессы»

## 4.2. Контрольные вопросы и задания

1. Как рассчитать электромеханическую постоянную времени электрического двигателя постоянного тока? От каких параметров двигателя она зависит?

2. Какими уравнениями описываются переходные процессы  $\omega(t)$ ,  $M(t)$  в электроприводе постоянного тока без учета индуктивности якорной цепи при «мгновенном» изменении воздействующего фактора? Каков характер протекания данных переходных процессов:

а) при  $M = \text{const}$ ,  $M_c = \text{const}$ ;

б)  $M_c = \text{const}$ ,  $M$  линейно зависит от  $\omega$ ,  $\beta < 0$ ?

Как для всех указанных случаев оценить время переходного процесса?

3. Как влияет момент сопротивления и его характер (активный, реактивный) на протекание переходных процессов в динамических режимах электрического привода?

4. Какими уравнениями описываются переходные процессы  $\omega(t)$ ,  $M(t)$  в электроприводе постоянного тока без учета индуктивности якорной цепи при «медленном» изменении задающего воздействия. Каков характер протекания данных переходных процессов:

а) при  $M_c = 0$ ;

б)  $M_c = \text{const}$ ?

Как влияет характер момента сопротивления (активный, реактивный) на протекание указанных переходных процессов?

5. Что такое динамическая механическая характеристика? Что влияет на её вид?

6. Каков характер протекания переходных процессов в электроприводе постоянного тока с учетом индуктивности якорной цепи? При каких условиях переходной процесс будет колебательным, а при каких апериодическим?

7. Как скажется на колебательности разомкнутой электромеханической системы электропривода с ДПТ НВ увеличение:

а) момента инерции механизма;

б) сопротивления якорной цепи?

8. Что такое подчиненное регулирование при формировании переходных процессов в замкнутых структурах электропривода? Исходя

из каких соображений осуществляется настройка на технический оптимум?

### 4.3. Задачи

1. Оцените время пуска по механической характеристике на рис. 4.1.

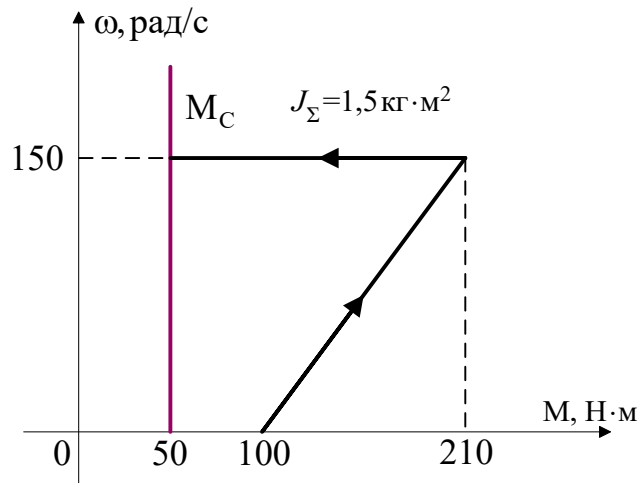


Рис. 4.1. Переходной процесс в осях механической характеристики

#### Решение.

Для решения задачи воспользуемся уравнением движения:

$$M_{\text{д}} - M_{\text{с}} = J_{\Sigma} \cdot \frac{d\omega}{dt},$$

которое можно привести к виду:

$$M_{\text{д}} - M_{\text{с}} = J_{\Sigma} \cdot \frac{\Delta\omega}{\Delta t},$$

где  $\Delta\omega = \omega_{\text{кон.}} - \omega_{\text{нач.}} = 150 - 0 = 150$  рад/с,

а  $\Delta t = t_{\text{пуск.}}$ .

Для задач такого типа целесообразно момент двигателя усреднить для всего участка пуска. Тогда получим:

$$M_{\text{д}} = M_{\text{ср}} = \frac{210 + 100}{2} = 155 \text{ Н·м.}$$

$$\text{В итоге получаем: } t_{\text{пуск.}} = \frac{J_{\Sigma} \cdot \Delta\omega}{M_{\text{ср.}} - M_{\text{с}}} = \frac{1,5 \cdot 150}{155 - 50} = 2,14 \text{ с.}$$

2. Оцените время пуска вентилятора, момент сопротивления которого является нелинейной функцией от скорости  $M_C = (10 + \omega^2)$ . Момент двигателя зависит от скорости линейно  $M = (202 - 4\omega)$ . Суммарный приведенный момент инерции двигателя с вентилятором  $J_\Sigma = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .

3. Изобразите графики переходного процесса  $\omega(t)$  и  $M(t)$  для характеристик, изображенных на рис. 4.2 и рис. 4.3. Какой тип торможения реализован? Какой характер момента сопротивления (активный, реактивный)?

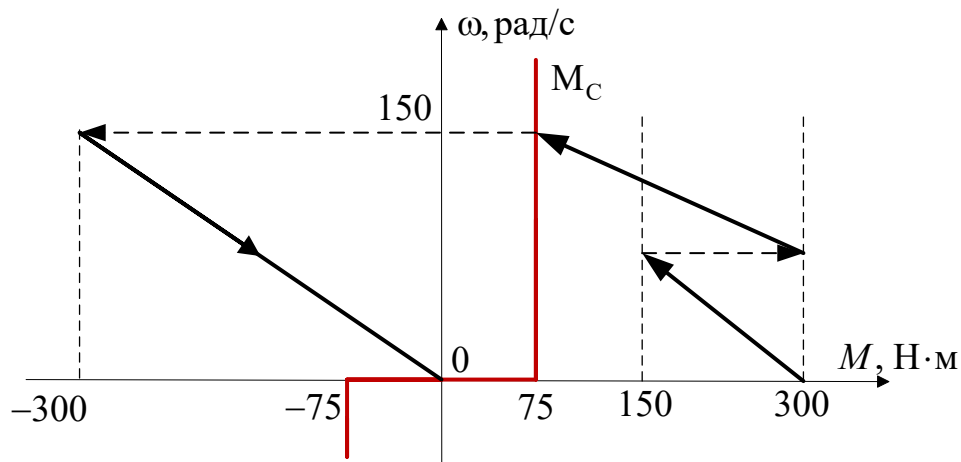


Рис. 4.2. Переходной процесс в осях механической характеристики (пуск, торможение)

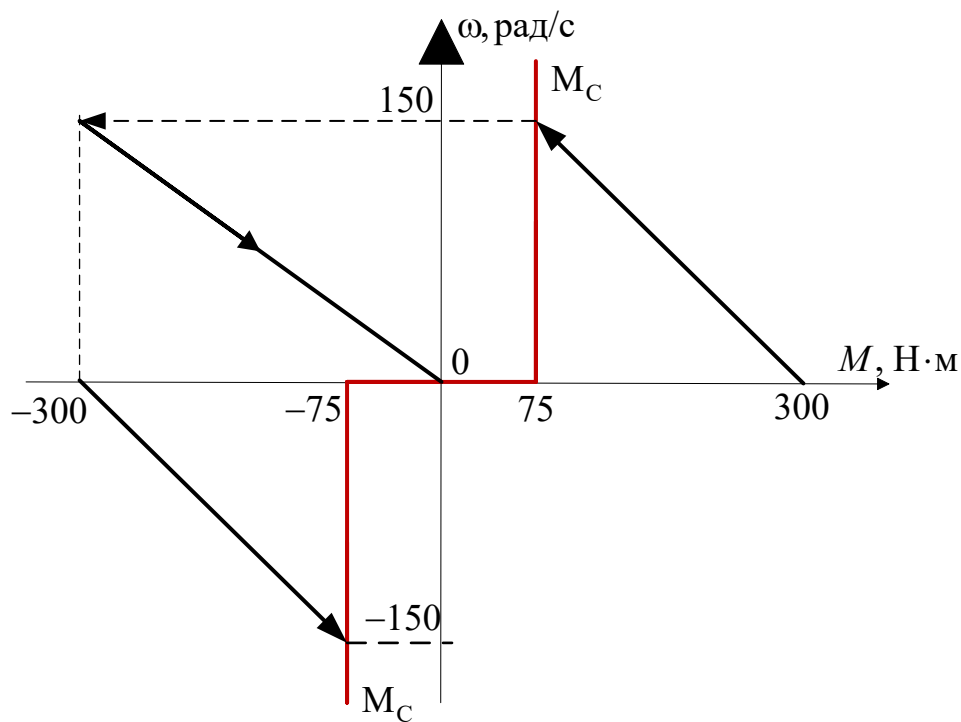


Рис. 4.3. Переходной процесс в осях механической характеристики (пуск, торможение, реверс)

4. На рисунке 4.4 представлена силовая часть релейно-контакторной схемы управления ДПТ НВ. Укажите, какие контакторы замкнуты для каждого этапа пуска/торможения процессов на рис. 4.2 и рис. 4.3.

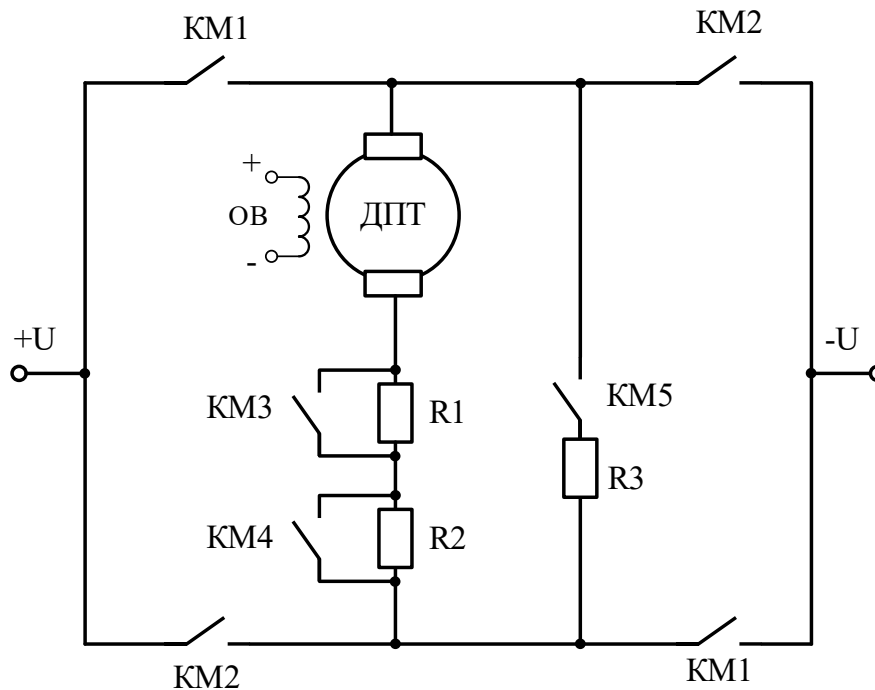


Рис. 4.4. Схема управления ДПТ НВ

5. Дан АД с КЗ ротором со следующими параметрами (табл. 4.1):

Таблица 4.1. Параметры АД с КЗ ротором

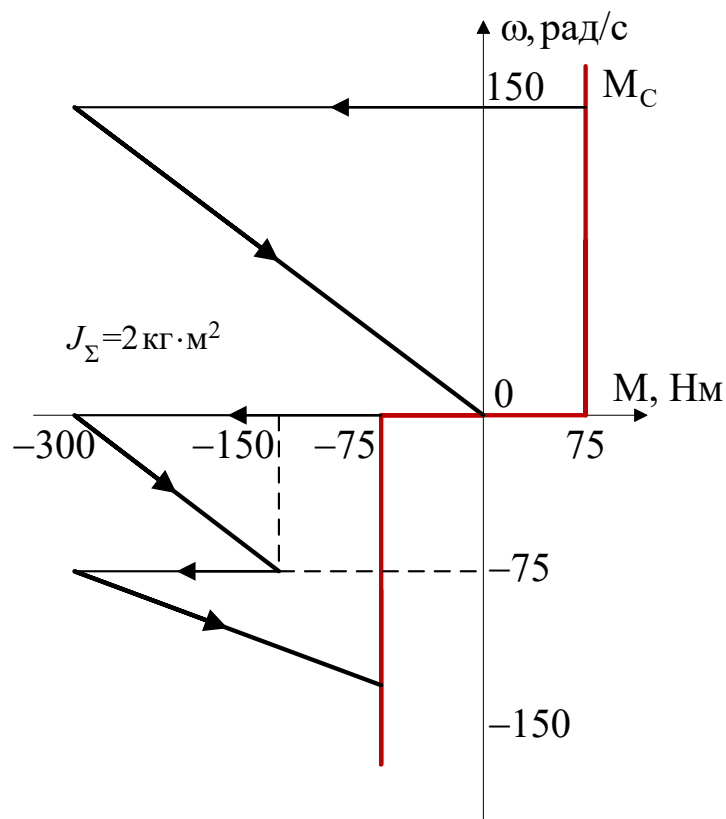
Номинальная мощность, $P_H$	55 кВт
Номинальное напряжение статора, $U_{1H}$	380/220 В
Номинальная частота вращения, $n_H$	1470 об/мин
Номинальный коэффициент полезного действия, $\eta_H$	92,5%
Кратность критического момента, $\lambda$ ( $M_{кр}/M_H$ )	2,6
Кратность пускового момента, $k_M$ ( $M_{п}/M_H$ )	2,2
Момент инерции, $J_\Sigma$	0,2 кг·м <sup>2</sup>

Построить графики изменения  $\omega(t)$  и  $M(t)$  при плавном частотном пуске с моментом, превышающим номинальный в 1,5 раза. Рассмотреть случай пуска на холостом ходу.

6. Рассчитать постоянные времени и построить графики переходного процесса для процесса на рис. 4.5. Заполнить табл. 4.2 с соответствующими показателями переходного процесса.

**Таблица 4.2. Показатели переходного процесса**

№ участка	$\omega_{\text{НАЧ.}}$ , рад/с	$\omega_{\text{КОН.}}$ , рад/с	$M_{\text{НАЧ.}}$ , Н·м	$M_{\text{КОН.}}$ , Н·м	$T_M$ , с
1					
2					
3					



**Рис. 4.5. Переходной процесс в осях механической характеристики (торможение, реверс)**

7. ДПТ НВ имеет номинальные данные, указанные в табл. 4.3:

**Таблица 4.3. Параметры ДПТ НВ**

Номинальная мощность, $P_H$	4,6 кВт
Номинальная частота вращения, $n_H$	975 об/мин
Номинальный коэффициент полезного действия, $\eta_H$	80,4%

**Окончание табл. 4.3**

Номинальное напряжение, $U_{я.н}$	115 В
Номинальный ток якоря, $I_{я.н}$	39,1 А
Активное сопротивление цепи якоря, $R_я$	0,07 Ом
Индуктивность цепи якоря, $L_я$	0,0003 Гн
Момент инерции, $J_\Sigma$	0,3 кг·м <sup>2</sup>

Определить электромеханическую и электрическую постоянные времени и указать характер переходного процесса (колебательный или апериодический).

**8.** Для быстрой остановки ДПТ НВ (Таблица 4.3), работающего в номинальном режиме, применяют динамическое торможение. Рассчитайте дополнительное сопротивление, которое необходимо включить в цепь якоря, если известно, что перегрузочная способность двигателя равна 2 ( $I_{доп.} = 2 \cdot I_N$ ). Постройте механическую и электромеханическую характеристики ДПТ НВ в режиме динамического торможения и определите время торможения. Суммарный момент инерции ДПТ и механизма  $J_\Sigma = 1,6$  кг·м<sup>2</sup>, момент статической нагрузки реактивный.

**9.** Сравните время пуска ДПТ НВ (Таблица 4.3) при различном числе пусковых ступеней  $N = 1, 2, \dots, 7$ . Дайте рекомендации по выбору числа пусковых ступеней.

**10.** Изобразите динамическую механическую характеристику и график переходного процесса по частоте вращения и моменту при пуске ДПТ НВ (Таблица 4.3) вхолостую, если напряжение, приложенное к якорю, изменяется по закону, показанному на рис. 4.6.

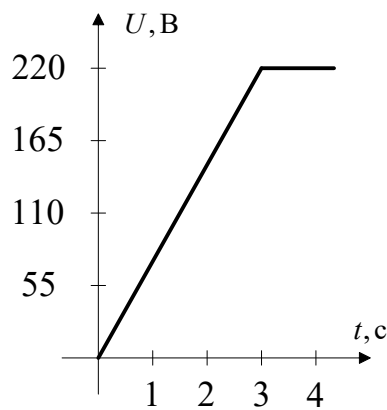


Рис. 4.6. Закон изменения напряжения

11. ДПТ НВ имеет следующие номинальные данные (табл. 4.4):

Таблица 4.4. Параметры ДПТ НВ

Номинальная мощность, $P_H$	4,8 кВт
Номинальная частота вращения, $n_H$	1500 об/мин
Номинальное напряжение, $U_{я.Н}$	220 В
Номинальный ток якоря, $I_{я.Н}$	24,2 А
Активное сопротивление цепи якоря, $R_я$	0,38 Ом
Индуктивность цепи якоря, $L_я$	0,2 Гн
Момент инерции, $J_\Sigma$	0,5 кг·м <sup>2</sup>

Определить характер изменения скорости ДПТ при пуске, если кратность пусковых тока и момента двигателя равна 2 ( $I_{\text{ПУСК}} = 2 \cdot I_H$ ,  $M_{\text{ПУСК}} = 2 \cdot M_H$ ).

**Решение.**

**I. Определение номинальных параметров заданного двигателя**

$$\omega_H = 2\pi n_H / 60 = 2 \cdot 3,14 \cdot 1500 / 60 = 157 \text{ рад/с},$$

$$M_H = P_H / \omega_H = 4800 / 157 = 30,6 \text{ Н·м}.$$



$$\kappa\Phi_H = (U_{я.Н} - I_{я.Н}R_{я}) / \omega_H = (220 - 24,2 \cdot 0,38) / 157 = 1,34 \text{ В}\cdot\text{с}.$$

## ***II. Определение скорости холостого хода***

$$\omega_0 = U_{я.Н} / \kappa\Phi_H = 220 / 1,34 = 164 \text{ рад/с}.$$

## ***III. Расчёт величины суммарного активного сопротивления цепи якоря, при котором пусковые ток и момент будут в два раза превышать их номинальные значения***

$$R_{\Sigma} = U_{я.Н} / (2 \cdot I_{я.Н}) = 220 / 2 \cdot 24,2 = 4,54 \text{ Ом}.$$

## ***IV. Расчёт электромеханической ( $T_M$ ) и электрической ( $T_{я}$ ) постоянных времени***

$$T_M = J / \beta = J\omega_0 / M_{\text{ПУСК}} = J\omega_0 / (2 \cdot M_H) \Rightarrow$$

$$T_M = 0,5 \cdot 164 / (2 \cdot 30,6) = 1,34 \text{ с}.$$

$$T_{я} = L_{я} / R_{я} = 0,2 / 4,54 = 0,044 \text{ с}.$$

Так как  $T_M = 1,34 \text{ с}$ ,  $4 \cdot T_{я} = 4 \cdot 0,044 = 0,176 \text{ с}$ , то  $T_M > 4 \cdot T_{я}$ , следовательно, переходный процесс будет иметь монотонный (апериодический) характер.

[К началу раздела](#)

[К содержанию](#)

## **5. ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕМЕНТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

### **5.1. Введение**

Основное назначение электропривода – преобразовывать электрическую энергию в механическую и обратно и управлять этим процессом. В связи с этим энергетические показатели и характеристики электропривода имеют первостепенное значение, тем более что электропривод потребляет 60–65% электроэнергии, производимой в стране.

Вследствие этого специалисту в области электропривода важно уметь проводить оценку энергетической эффективности электропривода, оценивать потери в статических и динамических режимах работы, знать и уметь применять способы и системы управления для повышения энергосбережения средствами электропривода, а также выбирать элементы электропривода с точки зрения тепловых режимов работы.

Рекомендуемые материалы для подготовки:

- ✓ [1] – «Глава шестая. Энергетика»;
- ✓ [1] – «Глава седьмая. Элементы проектирования электропривода».

### **5.2. Контрольные вопросы и задания**

1. Назовите основные энергетические показатели электропривода.
2. Зачем необходима информация об энергетических показателях ЭП?
3. Что характеризует КПД электрического двигателя?
4. Как взаимосвязаны потери энергии и потери мощности?
5. Что такое цикловой КПД?
6. Перечислите и охарактеризуйте энергетические режимы работы электрического двигателя.
7. Изобразите энергетическую диаграмму ЭД. Прокомментируйте каждый из представленных в ней видов потерь мощности? Какие из них относятся к постоянным потерям, а какие – к переменным?

8. Как соотносятся потери энергии при прямом и частотном пусках асинхронного двигателя при времени переходного процесса ( $t_1$ ) много большем электромеханической постоянной времени ЭД ( $t_1 \gg T_M$ )?
9. Чем определяются потери энергии в переходных процессах при быстрых изменениях воздействующего фактора и при плавном изменении  $\omega_0$ ? Укажите способы уменьшения указанных потерь энергии.
10. Какие исходные данные используются при расчете мощности ЭД для заданного технологического процесса?
11. Опишите последовательность расчета мощности и предварительного выбора ЭД.
12. Какими проверками можно подтвердить правильность выбора ЭД для заданного технологического процесса?
13. Запишите любую известную вам тепловую модель ЭД.
14. Какие основные физические величины входят в уравнение теплового баланса для ЭД?
15. Как соотносятся тепловые постоянные времени нагрева и охлаждения для самовентилируемых двигателей?
16. Перечислите основные аналитические методы проверки электрического двигателя по нагреву.
17. Какие ограничения накладывает использование методов эквивалентных величин?

### 5.3. Задачи

1. Дана нагрузочная диаграмма для ЭП с АД (режим работы – продолжительный) с номинальными данными:  $P_H = 2,7$  кВт;  $\eta_H = 0,9$ ;  $n_H = 955$  об/мин;  $R_1/R'_2 = 0,4$ . Определите величину постоянных и переменных потерь в установившихся режимах, а также потери энергии за цикл и цикловой КПД (рис. 5.1).

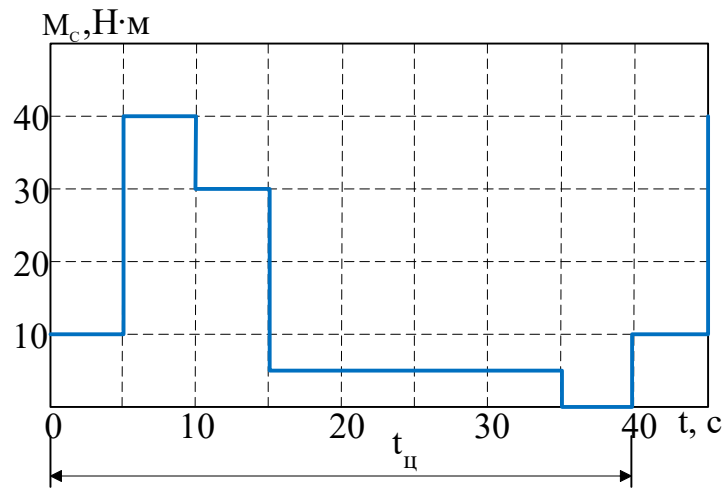


Рис. 5.1. Нагрузочная диаграмма

### Решение.

Исходя из заданных параметров АД сначала определим  $n_0$  и  $\omega_0$ .  
Так как  $n_H = 955$  об/мин, то  $n_0 = 1000$  об/мин. Отсюда  $\omega_0 = 104,7$  рад/с.

$$\text{Тогда } s_H = \frac{n_0 - n_H}{n_0} = \frac{1000 - 955}{1000} = 0,045.$$

$$M_H = P_H / (2 \cdot \pi \cdot n_H / 60) = 2700 / 100 = 27 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Потери мощности  $\Delta P$  представляют собой сумму двух составляющих – постоянных  $K$  и переменных  $V$  потерь:

$$\Delta P_{\Sigma} = K + V.$$

Так как постоянные потери изменяются в зависимости от нагрузки мало, то принимаем их неизменными и равными номинальным постоянным потерям. Для получения постоянных потерь мощности находим полные потери в асинхронном двигателе в номинальном режиме:

$$\Delta P_H = P_H \frac{(1 - \eta_H)}{\eta_H} = 2700(1 - 0,9) / 0,9 = 300 \text{ Вт}.$$

Переменные потери в номинальном режиме:

$$V_H = M_H \omega_0 s_H (1 + R_1 / R_2') = 27 \cdot 104,7 \cdot 0,045 (1 + 0,4) = 178 \text{ Вт}.$$

Тогда, постоянные потери мощности в асинхронном двигателе будут определяться по формуле:

$$K = \Delta P_H - V_H = 300 - 178 = 122 \text{ Вт.}$$

Определим переменные и полные потери, а также полезную энергию и потери энергии для каждого участка нагрузочной диаграммы по формулам:

$$V_i = M_i \omega_0 s_i (1 + R_1 / R'_2),$$

$$\Delta P_{\Sigma i} = K + V_i,$$

$$W_i = P_i t_i = M_i \omega_i t_i,$$

$$\Delta W_i = \Delta P_{\Sigma i} t_i.$$

Рассмотрим каждый участок нагрузочной диаграммы. Момент, развиваемый электрическим двигателем, можно определить напрямую из диаграммы ( $M_i = M_{Ci}$ ). Так как характеристика асинхронного двигателя на рабочем участке практически линейна, скольжение изменяется пропорционально изменению момента.

1 участок:  $M_1 = 10 \text{ Н·м}$ ;  $s_1 = 0,017$ ;  $\omega_1 = 103 \text{ рад/с}$ ;  $t_1 = 5 \text{ с}$ .

$$V_1 = M_1 \omega_0 s_1 (1 + R_1 / R'_2) = 25 \text{ Вт},$$

$$\Delta P_{\Sigma 1} = K + V_1 = 147 \text{ Вт},$$

$$W_1 = P_1 t_1 = M_1 \omega_1 t_1 = 10 \cdot 103 \cdot 5 = 5150 \text{ Дж},$$

$$\Delta W_1 = \Delta P_{\Sigma 1} t_1 = 147 \cdot 5 = 735 \text{ Дж}.$$

2 участок:  $M_2 = 40 \text{ Н·м}$ ;  $s_2 = 0,067$  рад/с;  $t_2 = 5 \text{ с}$ .

$$V_2 = M_2 \omega_0 s_2 (1 + R_1 / R'_2) = 393 \text{ Вт},$$

$$\Delta P_{\Sigma 2} = K + V_2 = 515 \text{ Вт},$$

$$W_2 = P_2 t_2 = M_2 \omega_2 t_2 = 40 \cdot 98 \cdot 5 = 19600 \text{ Дж},$$

$$\Delta W_2 = \Delta P_{\Sigma 2} t_2 = 513 \cdot 5 = 2575 \text{ Дж}.$$

3 участок:  $M_3 = 30 \text{ Н·м}$ ;  $s_3 = 0,05$ ;  $\omega_3 = 99 \text{ рад/с}$ ;  $t_3 = 5 \text{ с}$ .

$$V_3 = M_3 \omega_0 s_3 (1 + R_1 / R'_2) = 220 \text{ Вт},$$

$$\Delta P_{\Sigma 3} = K + V_3 = 342 \text{ Вт},$$

$$W_3 = P_3 t_3 = M_3 \omega_3 t_3 = 30 \cdot 99 \cdot 5 = 14850 \text{ Дж},$$

$$\Delta W_3 = \Delta P_{\Sigma 3} t_3 = 342 \cdot 5 = 1710 \text{ Дж}.$$

$$4 \text{ участок: } M_4 = 5 \text{ Н·м; } s_4 = 0,008; \omega_1 = 104 \text{ рад/с; } t_4 = 20 \text{ с.}$$

$$V_4 = M_4 \omega_0 s_4 (1 + R_1 / R_2') = 6 \text{ Вт},$$

$$\Delta P_{\Sigma 4} = K + V_4 = 128 \text{ Вт},$$

$$W_4 = P_4 t_4 = M_4 \omega_4 t_4 = 5 \cdot 104 \cdot 20 = 10400 \text{ Дж},$$

$$\Delta W_4 = \Delta P_{\Sigma 4} t_4 = 128 \cdot 20 = 2560 \text{ Дж}.$$

$$5 \text{ участок: } M_5 = 0 \text{ Н·м; } s_5 = 0; \omega_5 = \omega_0 = 104,7 \text{ рад/с; } t_5 = 5 \text{ с.}$$

$$V_5 = 0 \text{ Вт},$$

$$\Delta P_{\Sigma 5} = K + V_5 = K = 122 \text{ Вт},$$

$$W_5 = 0 \text{ Дж},$$

$$\Delta W_5 = \Delta P_{\Sigma 5} t_5 = 122 \cdot 5 = 610 \text{ Дж}.$$

Определяем полезную энергию и потери энергии за цикл:

$$W_{\Pi} = \int_0^{t_{\Pi}} P(t) dt = \sum W_i = 50000 \text{ Дж},$$

$$\Delta W_{\Pi} = \int_0^{t_{\Pi}} \Delta P_{\Sigma}(t) dt = \sum \Delta W_i = 8190 \text{ Дж}.$$

Определяем цикловой КПД:

$$\eta_{\Pi} = \frac{W_{\Pi}}{W_{\Pi} + \Delta W_{\Pi}} = \frac{\int_0^{t_{\Pi}} P(t) dt}{\int_0^{t_{\Pi}} P(t) dt + \int_0^{t_{\Pi}} \Delta P(t) dt} = \frac{\sum W_i}{\sum W_i + \sum \Delta W_i} \Rightarrow$$

$$\eta_{\Pi} = \frac{50000}{50000 + 8190} = 0,86.$$

2. Асинхронный двигатель RA132 SB2 имеет следующие паспортные данные (табл. 5.1):

**Таблица 5.1. Параметр АД с КЗ ротором RA132 SB2**

Номинальная мощность, $P_H$	7,5 кВт
Номинальное напряжение статора, $U_{1H}$	380/220 В
Номинальная частота вращения, $n_H$	2895 об/мин
Номинальный ток фазы статора, $I_{1H}$	15 А
Отношение активных сопротивлений, $R_1/R'_2$	1,1
Номинальный коэффициент полезного действия, $\eta_H$	87%
Номинальный коэффициент мощности, $\cos \varphi_H$	0,89
Кратность критического момента, $\lambda$ ( $M_{кр}/M_H$ )	3,2
Кратность пускового момента, $k_M$ ( $M_{п}/M_H$ )	2,5
Кратность пускового тока, $k_I$ ( $I_{п}/I_{1H}$ )	7,0
Момент инерции двигателя, $J_{дв.}$	0,015 кг·м <sup>2</sup>
Суммарный момент инерции, $J_{\Sigma}$	$5 \cdot J_{дв.}$

Определить время частотного пуска АД вхолостую, чтобы полные потери при пуске сократились в 5 раз по сравнению с потерями при прямом пуске, и найти эти потери.

### Решение.

Потери энергии при переходных процессах определяется запасом кинетической энергии и скольжением в начальном и конечном положении. При пуске вхолостую:  $s_{нач.} = 1$ ,  $s_{кон.} = 0$ . Определим переменные потери в двигателе при прямом пуске:

$$\Delta W_{\text{пр0}} = \frac{J_{\Sigma} \omega_0^2}{2} (1 + R_1 / R'_2) (s_{\text{нач}}^2 - s_{\text{кон}}^2) \Rightarrow$$

$$\Delta W_{\text{пр0}} = 0,075 \cdot 314^2 \cdot (1 + 1,1) (1^2 - 0^2) / 2 = 7764 \text{ Дж.}$$

Потери энергии при частотном пуске определяются по формуле:

$$\Delta W_{\text{пл}} = \Delta W_{\text{пр0}} \frac{2T_{\text{м}}}{t_1}.$$

По условию задачи потери при частотном пуске должны быть меньше потерь при прямом пуске в 5 раз, тогда время линейного нарастания скорости  $\omega_0$  от нуля до установившейся скорости:

$$t_1 = \frac{\Delta W_{\text{пр0}}}{\Delta W_{\text{пл}}} \cdot 2T_{\text{м}} = \frac{\Delta W_{\text{пр0}}}{\Delta W_{\text{пр0}}/5} \cdot 2T_{\text{м}} = 10T_{\text{м}}.$$

А время частотного пуска будет равно:

$$t_{\text{чп}} = t_1 + 3T_{\text{м}} = 13T_{\text{м}}.$$

Определим электромеханическую постоянную времени  $T_{\text{м}}$ :

$$T_{\text{м}} = \frac{J_{\Sigma}}{|\beta|} = J_{\Sigma} \frac{(\omega_0 - \omega_{\text{н}})}{M_{\text{н}}} = 0,075 \cdot (314 - 303) / 24,75 = 0,033 \text{ с.}$$

Следовательно, потери энергии при частотном пуске и время частотного пуска будут равны:

$$\Delta W_{\text{пл}} = \Delta W_{\text{пр0}} \frac{2T_{\text{м}}}{t_1} = 7764 \cdot 2 \cdot 0,033 / (10 \cdot 0,033) = 1553 \text{ Дж,}$$

$$t_{\text{чп}} = 13T_{\text{м}} = 13 \cdot 0,033 = 0,43 \text{ с.}$$



3. Дана нагрузочная диаграмма (рис. 5.2) исполнительного органа механизма, сделать предварительный выбор двигателя. Известно, что  $\omega_{уст} = 140$  рад/с.

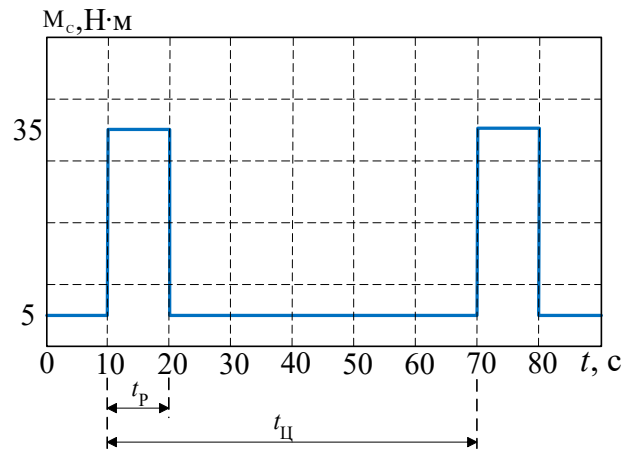


Рис. 5.2. Нагрузочная диаграмма

#### Решение.

Для предварительного выбора двигателя необходимо определить эквивалентный момент нагрузки  $M_{с.э.}$ . Так как в исходных данных указано, что момент нагрузки  $M_c$  изменяется во времени, то  $M_{с.э.}$  определяется как среднеквадратичная величина:

$$M_{с.э.} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_{ci}^2 t_i)}{t_{ц}}},$$

где  $M_{ci}$ ,  $t_i$ , — соответственно момент и длительность  $i$ -го участка нагрузочной диаграммы;  $n$  — число участков цикла.

По данным нагрузочной диаграммы исполнительного органа механизма расчетный момент двигателя равен (коэффициент запаса принимаем равным  $\kappa_3 = 1,2$ ):

$$M_{расч.} = \kappa_3 M_{с.э.} = 1,2 \cdot \sqrt{\frac{(35^2 \cdot 10 + 5^2 \cdot 50)}{10 + 50}} = 18 \text{ Н·м.}$$

Для рассматриваемого графика движения расчетная скорость двигателя  $\omega_{расч.}$  будет равна скорости исполнительного органа механизма  $\omega_{уст}$ . Расчетная частота вращения электродвигателя:

$$n_{расч.} = \frac{60 \omega_{расч.}}{2\pi} = \frac{60 \cdot 140}{2\pi} = 1338 \text{ об/мин.}$$

Определяем расчетную мощность двигателя:

$$P_{расч.} = M_{расч.} \omega_{расч.} = 18 \cdot 140 \approx 2,5 \text{ кВт.}$$

По полученным расчетным данным производим предварительный выбор электродвигателя. Так как в условиях задачи не указано, какой именно тип электрического двигателя необходим, предложим несколько на выбор. По каталогам выбираем электродвигатели ближайшей большей мощности и скорости. Полученным расчетным данным соответствуют следующие двигатели.

- ✓ Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором 4АМ100S4У3:  $P_H = 3$  кВт;  $n_H = 1420$  об/мин.
- ✓ Двигатель постоянного тока П41:  $P_H = 3,2$  кВт;  $n_H = 1500$  об/мин.
- ✓ Асинхронный двигатель с фазным ротором 5АНК160М4:  
 $P_H = 7,5$  кВт;  $n_H = 1421$  об/мин.

4. Дан АД с КЗ ротором (Таблица 5.1). На рисунке 5.3 приведены циклограмма и тахограмма работы электропривода. Определите все виды потерь в установившихся режимах.

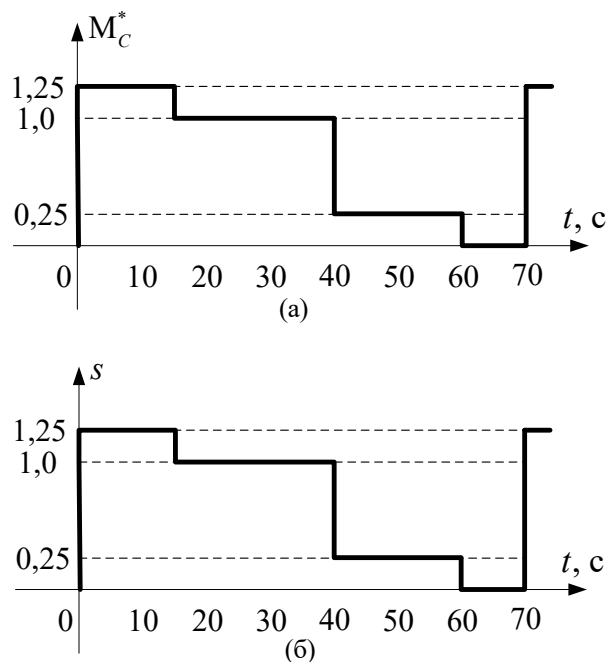


Рис. 5.3. Циклограмма (а) и тахограмма (б) работы электропривода в относительных единицах

5. Электропривод пресса работает со следующим циклом:

- период работы:  $t_p = 2$  с,  $P_p = P_H$ ,  $\eta_H = 88$  %;
- период остановки:  $t_o = 10$  с;  $P_o = 0,3 \cdot P_H$ ;  $\eta = 30$  %.

Определите цикловой КПД, сравните с номинальным.

6. Оценить полные потери энергии при динамическом торможении вхолостую АД с короткозамкнутым ротором и сравнить с потерями в номинальном режиме за то же время, если  $J_\Sigma = 1$  кг·м<sup>2</sup>;  $M_K = 200$  Н·м;  $M_{II} = 120$  Н·м;  $M_H = 100$  Н·м;  $\omega_H = 150$  рад/с;  $R_1/R'_2 = 1$ ;  $\eta_H = 85\%$ , а механическая характеристика АД при динамическом торможении показана на рис. 5.4.

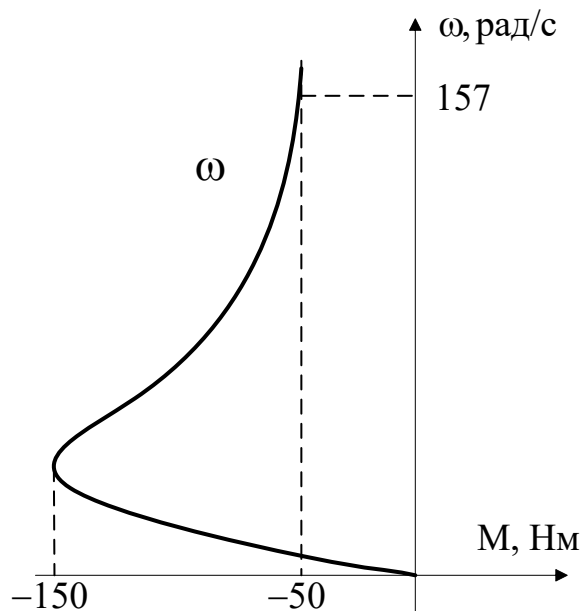


Рис. 5.4. Механическая характеристика АД

7. На рисунке 5.5 приведена статическая механическая характеристика асинхронного двигателя. Определите потери энергии при динамическом торможении и при реверсе вхолостую. Известно, что  $R_1/R'_2 = 0,5$ , недостающие данные взять из механической характеристики.

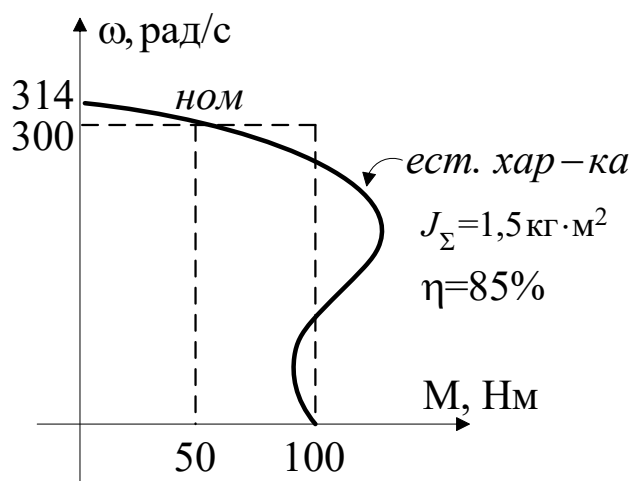


Рис. 5.5. Статическая механическая характеристика АД

8. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором имеет следующие паспортные данные (табл. 5.2):

Таблица 5.2. Параметр АД с КЗ ротором

Номинальная мощность, $P_H$	55 кВт
Номинальное напряжение статора, $U_{IH}$	380/220 В
Номинальная частота вращения, $n_H$	1470 об/мин
Номинальный коэффициент полезного действия, $\eta_H$	92,5%
Кратность критического момента, $\lambda$ ( $M_{KP}/M_H$ )	2,6
Кратность пускового момента, $k_M$ ( $M_P/M_H$ )	2,2
Момент инерции двигателя, $J_{дв.}$	0,2 кг·м <sup>2</sup>

Оцените потери энергии:

- при пуске на холостом ходу;
- динамическом торможении;
- торможении противовключением;
- реверсе;
- плавном частотном пуске с моментом, превышающим номинальный в 2,5 раза.

9. Определите время частотного пуска электропривода на холостом ходе, чтобы полные потери не превышали 3 кДж. Двигатель имеет следующие паспортные данные (табл. 5.3):

**Таблица 5.3. Параметр АД с КЗ ротором**

Номинальная мощность, $P_H$	7,5 кВт
Номинальное напряжение статора, $U_{1H}$	380/220 В
Номинальная частота вращения, $n_H$	950 об/мин
Отношение активных сопротивлений, $R_1/R'_2$	1,0
Момент инерции двигателя, $J_{дв.}$	2 кг·м <sup>2</sup>

10. Дан ДПТ НВ со следующими паспортными данными (табл. 5.4):

**Таблица 5.4. Параметры ДПТ НВ**

Номинальная мощность, $P_H$	2 кВт
Частота вращения в точке холостого хода, $\omega_0$	100 рад/с
Номинальное напряжение, $U_{я.н}$	220 В
Номинальный ток якоря, $I_{я.н}$	10 А
Активное сопротивление цепи якоря, $R_{я}$	0,5 Ом
Момент инерции суммарный, $J_{\Sigma}$	0,1 кг·м <sup>2</sup>

Определите потери энергии в якорной цепи при пуске вхолостую, если напряжение, приложенное к якорю, изменяется по закону, показанному на рис. 5.6:

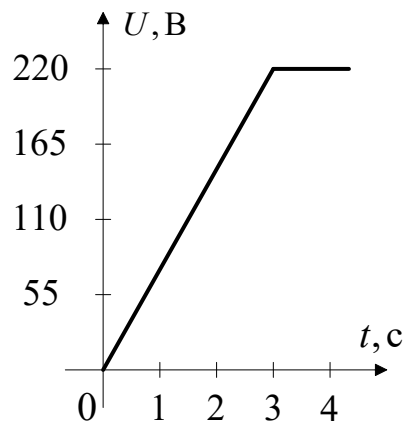


Рис. 5.6. Закон изменения  $U(t)$

11. Оценить требуемую номинальную мощность ЭД, если в циклической нагрузочной диаграмме исполнительного органа рабочей машины три участка:

- 30 Н·м, 5 мин.;
- 70 Н·м, 2 мин.;
- 15 Н·м, 3 мин.

Частота вращения исполнительного органа  $n = 3000$  об/мин.

Произведите выбор ЭД по каталожным данным, предложите возможные варианты для различных параметров питающей сети (постоянное напряжение/переменное напряжение).

12. ДПТ НВ типа 2ПФ–200 имеет следующие паспортные данные (табл. 5.5):

Таблица 5.5. Параметры ДПТ НВ типа 2ПФ–200

Номинальная мощность, $P_H$	30 кВт
Номинальная частота вращения, $n_n$	2200 об/мин
Номинальное напряжение, $U_{я.н}$	440 В
Номинальный ток якоря, $I_{я.н}$	74 А
Номинальный коэффициент полезного действия, $\eta_H$	90 %

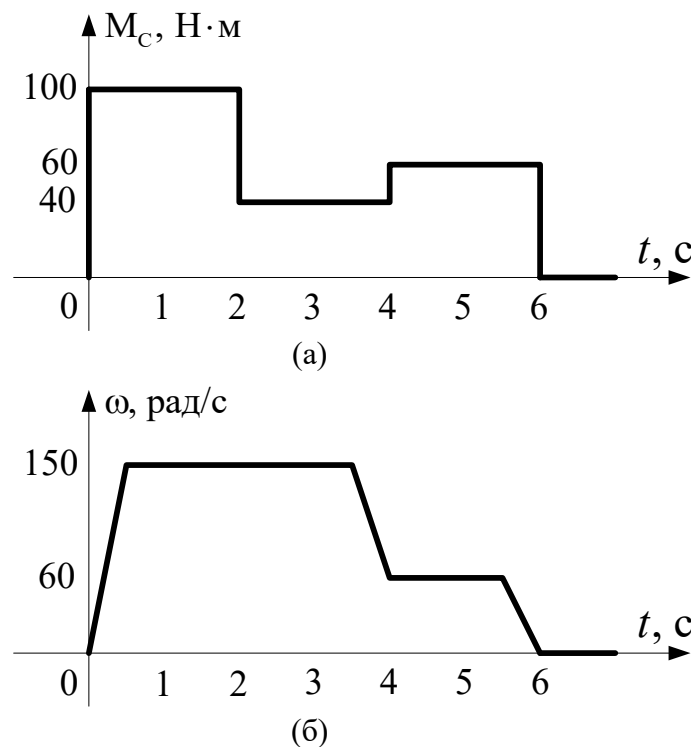
Оценить тепловой режим двигателя при его работе по следующему циклу:

- первый участок  $t_1 = 10$  мин, момент нагрузки  $M_{C1} = 100$  Н·м;
- второй участок  $t_2 = 25$  мин, момент нагрузки  $M_{C2} = 150$  Н·м;
- третий участок  $t_3 = 25$  мин, момент нагрузки  $M_{C3} = 200$  Н·м.

За время цикла магнитный поток в ЭД не изменяется.

**13.** На рисунке 5.7 приведены нагрузочная диаграмма и тахограмма исполнительного органа рабочей машины. Известны следующие параметры условий работы: напряжение питающей сети 230/400 В, климатическое исполнение УЗ.

Произведите выбор ЭД по каталожным данным, постройте нагрузочную диаграмму и произведите первичную проверку выбранного ЭД.



**Рис. 5.7.** Нагрузочная диаграмма (а) и тахограмма (б) исполнительного органа рабочей машины

[К началу раздела](#)

[К содержанию](#)

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильинский, Н. Ф. Основы электропривода / Н. Ф. Ильинский – М. : Издательский дом МЭИ, 2017. – URL:

<https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785383011331.html>

(дата обращения: 26.12.2023)

2. Москаленко, В. В. Электрический привод / В. В. Москаленко – М. : ИНФРА-М, 2020.
3. Кувшинов, А. А. Теория электропривода. Часть 3: Переходные процессы в электроприводе: учебное пособие / А. А. Кувшинов, Э. Л. Греков. – Оренбург : ОГУ, 2017.



*Учебное электронное издание*

Прудникова Юлия Ивановна  
Гостева Лидия Олеговна  
Федорова Ксения Георгиевна  
Благодаров Дмитрий Анатольевич  
Савкин Дмитрий Игоревич  
Рассудов Лев Николаевич

*Редактор Е. Б. Бурдюкова*

При разработке учебного электронного издания были использованы: пакет программ Microsoft Office с предустановленным компонентом MathType, векторный графический редактор Visio, а также web-технологии HTML, pdf.

---

Дата подписания – 28.12.2023

Объём издания – 1,23 Мбайт

Тираж – 10 электронных оптических дисков CD-ROM

Издательство МЭИ  
111250, Москва, Красноказарменная, д. 14, стр. 1  
[izdatmpei@gmail.com](mailto:izdatmpei@gmail.com)