

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Уфимский государственный авиационный технический университет»**

Кафедра электромеханики

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ВЫБОР ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН МАЛОЙ МОЩНОСТИ

**Практикум по дисциплине
«Электрические машины малой мощности»**



Уфа 2022

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Уфимский государственный авиационный технический университет»

Кафедра электромеханики

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ВЫБОР ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Практикум по дисциплине
«Электрические машины малой мощности»

Учебное электронное издание сетевого доступа

© УГАТУ

Уфа 2022

Автор-составитель А. В. Стыскин

Проектирование и выбор электрических машин малой мощности : практикум по дисциплине «Электрические машины малой мощности» [Электронный ресурс] / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т ; [авт.-сост. : А. В. Стыскин]. – Уфа : УГАТУ, 2022. – URL: https://www.ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El_izd/2022-160.pdf

Цель практикума – закрепление и совершенствование знаний студентов по дисциплине «Основы устройства и эксплуатации базовых машин специальных электромеханических систем» и формирование умений их применять при исследовании характеристик и выборе современных типов вентильных электрических машин малой мощности.

Предназначен для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» профиль подготовки «Электромеханика» и по специальности 13.05.02 Специальные электромеханические системы, изучающих дисциплину «Электрические машины малой мощности».

Рецензент канд. техн. наук, доц. А. Р. Валеев

При подготовке электронного издания использовались следующие программные средства:

- Adobe Acrobat – текстовый редактор;
- Microsoft Word – текстовый редактор.

Авторы-составители: *Стыскин Андрей Владиславович*

Верстка *Р. М. Мухамадиева*

Программирование и компьютерный дизайн *О. М. Толкачёва*

Все права защищены. Книга или любая ее часть не может быть скопирована, воспроизведена в электронной или механической форме, в виде фотокопии, записи в память ЭВМ, репродукции или каким-либо иным способом, а также использована в любой информационной системе без получения разрешения от издателя. Копирование, воспроизведение и иное использование книги или ее части без согласия издателя является незаконным и влечет уголовную, административную и гражданскую ответственность.

Подписано к использованию: 04.08.2022

Объем: 1,65 Мб.

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»

450008, Уфа, ул. К. Маркса, 12.

Тел.: +7-908-35-05-007

e-mail: rik@ugatu.su

ВВЕДЕНИЕ

Согласно требованиям ФГОС ВО 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, утвержденного приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 3 сентября 2015 г. № 955 дисциплина «Электрические машины малой мощности» является дисциплиной *вариативной* части учебного плана.

В ходе освоения дисциплины изучаются основные положения теории электрических машин малой мощности, основные типы электрических машин малой мощности и их применение, а также уметь решать следующие задачи:

– усвоить принципы функционирования и особенности различных типов электрических машин малой мощности;

– усвоить основные принципы выбора и применения различных типов электрических машин малой мощности при разработке оборудования;

– изучить основные принципы исследования характеристик электрических машин малой мощности.

Неотъемлемой частью освоения дисциплины является самостоятельная работа студента (СРС). Самостоятельная работа студента предполагает работу с научной и учебной литературой. Также при самостоятельном изучении материала студентам предлагается написать реферата-конспекта.

Реферат-конспект – это работа, направленная на последовательное изложение содержания первичного документа, отражая все его основные положения.

Реферат-конспект должен представлять собой рукописную работу студента по заданной тематике, с последовательно изложенными теоретическими положениями, таблицами, графиками. Материал должен быть представлен таким образом, чтобы у студента четко закрепился знаниевый результат по данному вопросу.

1. ОСНОВНЫЕ РАЗДЕЛЫ, ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ И ИНДИКАТОРЫ ИХ ОСВОЕНИЯ

№ раздела	Формируемые компетенции	Знать	Уметь	Владеть
1, 2	ПК-1: способность участвовать в планировании, подготовке и выполнении типовых экспериментальных исследований по заданной методике	Основные разновидности, принципы функционирования режимы работы, основные статические характеристики электрических машин малой мощности.	Уметь планировать и производить экспериментальные исследования ЭМММ согласно заданной методике, уметь подбирать измерительную аппаратуру для проведения экспериментов и анализировать полученные данные.	Навыками исследовательской работы; методами анализа режимов работы и полученных характеристик ЭМММ.
3, 4	ПК-2: способность обрабатывать результаты экспериментов	Методы статистической обработки результатов экспериментов, методы интерполяции характеристик.	Составлять отчет по данным, полученным в результате эксперимента.	Навыками анализа характеристик и данных, полученных при испытаниях электрических машин малой мощности.

2. ПЛАН ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

№ раз-дела	№ занятия	Тема	Кол-во часов
1, 2	1, 2, 3	Особенности расчета электрических машин постоянного тока малой мощности. Выбор электродвигателя по заданной мощности и функциональному назначению.	6
3	4	Примеры расчета асинхронных машин малой мощности	2
4	5	Расчет постоянных магнитов для возбуждения машин постоянного тока и синхронных машин с постоянными магнитами	2
Итого			10

Практические занятия посвящены вопросам проектирования машин малой мощности – машин постоянного тока (1, 2 и 3 занятие), асинхронным (4 занятие) и особенностям расчета синхронных машин и расчету постоянных магнитов, применяемых как в машинах постоянного тока, так и в синхронных машинах (5 занятие).

Перед началом практических занятий, студенту рекомендуется повторить соответствующие темы и разделы дисциплины.

На практических занятиях студент должен иметь при себе рабочую тетрадь, конспект лекций, пишущие принадлежности и калькулятор.

После изучения соответствующей темы практического занятия студенту выдается домашнее задание, состоящее из одной задачи, аналогичной тем, которые были решены на аудиторном занятии. В задачу студента входит решение этой задачи дома, для закрепления умений по соответствующей компетенции.

3. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ ПО РАЗДЕЛУ № 2

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА МАЛОЙ МОЩНОСТИ. ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПО ЗАДАННОЙ МОЩНОСТИ И ФУНКЦИОНАЛЬНОМУ НАЗНАЧЕНИЮ

3.1. Методические рекомендации по подготовке к практическим занятиям по разделу № 2

Занятие 1, 2. Раздел 2. Машины постоянного тока малой мощности. Особенности расчета электрических машин постоянного тока малой мощности.

Перед практическими занятиями необходимо повторить разделы соответствующей темы по лекциям и по [1].

В табл. 3.1 даны значения параметров двигателя постоянного тока независимого возбуждения: номинальная мощность двигателя $P_{\text{НОМ}}$, напряжение питания цепи якоря $U_{\text{НОМ}}$, напряжение питания цепи возбуждения $U_{\text{В}}$, частота вращения якоря в номинальном режиме $n_{\text{НОМ}}$, сопротивления цепи якоря Σr и цепи возбуждения $r_{\text{В}}$, приведенные к рабочей температуре, падение напряжения в щеточном контакте при номинальном токе $\Delta U_{\text{Щ}} = 2$ В, номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки $\Delta n_{\text{НОМ}} = 8,0$ %, ток якоря в режиме холостого хода I_0 . Требуется определить все виды потерь и КПД двигателя.

Таблица 3.1

Параметр	Варианты					
	0	1	2–3	4–5	6–7	8–9
$P_{\text{НОМ}}$, кВт	25	40	53	75	16	11
$U_{\text{НОМ}}$, В	440	440	440	440	220	220
$U_{\text{В}}$, В	220	220	220	220	220	ПО
I_0 , А	6,0	7,5	8,0	10,8	8,7	5,8
Σr , Ом	0,30	0,17	0,12	0,70	0,18	0,27
$r_{\text{В}}$, Ом	60	55	42	40	60	27
$n_{\text{НОМ}}$, об/мин	2200	1000	2360	3150	1500	800

Решение варианта 0.

1. Частота вращения в режиме холостого хода

$$n_o = n_{\text{НОМ}} [1 + (\Delta n_{\text{НОМ}} / 100)] = 2200 (1 + 8/100) = 2376 \text{ об/мин.}$$

2. ЭДС якоря в режиме холостого хода (падением напряжения в щеточном контакте пренебрегаем ввиду его незначительной величины в режиме холостого хода)

$$E_{ao} = U_{\text{НОМ}} - I_o \Sigma r = 440 - 6 \cdot 0,3 = 438,2 \text{ В.}$$

3. Момент в режиме холостого хода

$$M_o = 9,55 \cdot E_{ao} \cdot I_o / n_o = 9,55 \cdot 438,2 \cdot 6 / 2376 = 10,6 \text{ Н м.}$$

4. Момент на валу двигателя в режиме номинальной нагрузки

$$M_{2\text{НОМ}} = 9,55 P_{\text{НОМ}} / n_{\text{НОМ}} = 9,55 \cdot 25 \cdot 103 / 2200 = 108,5 \text{ Н м.}$$

5. Электромагнитный момент двигателя при номинальной нагрузке

$$M_{\text{НОМ}} = M_o + M_{2\text{НОМ}} = 10,6 + 108,5 = 119 \text{ Н м.}$$

6. Электромагнитная мощность двигателя в режиме номинальной нагрузки

$$P_{\text{ЭМ.НОМ}} = 0,105 \cdot M_{\text{НОМ}} \cdot n_{\text{НОМ}} = 0,105 \cdot 119 \cdot 2200 = 27\,490 \text{ Вт.}$$

7. ЭДС якоря в режиме холостого хода можно представить как

$$E_{ao} = c_e \Phi n_o, \text{ откуда } c_e \Phi = E_{ao} / n_o = 438,2 / 2376 = 0,185,$$

но так как

$$c_m / c_e = 9,55, \text{ то } c_m \Phi = 9,55 \cdot c_e \Phi = 9,55 \cdot 0,185 = 1,77.$$

Из выражения электромагнитного момента в режиме номинальной нагрузки $M_{\text{НОМ}} = c_m \Phi \cdot I_{\text{АНОМ}}$ определим значение тока якоря в режиме номинальной нагрузки

$$I_{\text{АНОМ}} = M_{\text{НОМ}} / (c_m \Phi) = 119 / 1,77 = 67 \text{ А.}$$

8. Сумма магнитных и механических потерь двигателя пропорциональна моменту холостого хода

$$P_{\text{магн}} + P_{\text{мех}} = 0,105M_o n_o = 0,105 \cdot 10,6 \cdot 2376 = 2644 \text{ Вт.}$$

9. Электрические потери в цепи обмотки якоря

$$P_{a \text{ эл}} = I_{2a \text{ ном}}^2 \Sigma r = 672 \cdot 0,3 = 1347 \text{ Вт.}$$

10. Электрические потери в щеточном контакте якоря

$$P_{\text{щ эл}} = I_{a \text{ ном}} \Delta U_{\text{щ}} = 67 \cdot 2 = 134 \text{ Вт.}$$

11. Мощность, подводимая к цепи якоря, в номинальном режиме

$$P_{1a \text{ ном}} = U_{\text{ном}} I_{a \text{ ном}} = 440 \cdot 67 = 29\,480 \text{ Вт.}$$

12. Ток в обмотке возбуждения

$$I_B = U_B / r_B = 220 / 60 = 3,7 \text{ А.}$$

13. Мощность в цепи возбуждения

$$P_B = U_B I_B = 220 \cdot 3,7 = 814 \text{ Вт.}$$

14. Мощность, потребляемая двигателем в режиме номинальной нагрузки

$$P_{1\text{ном}} = P_{1a \text{ ном}} + P_B = 29\,480 + 814 = 30\,295 \text{ Вт или } 30,3 \text{ кВт.}$$

15. КПД двигателя в номинальном режиме

$$\eta_{\text{ном}} = (P_{\text{ном}} / P_{1\text{ном}}) 100 = 82,5\%.$$

В табл. 3.1. даны значения для вариантов с 0 по 9, при необходимости можно выполнить задание для вариантов 1 = 10, 2 = 11 и т. д.

Занятие 3. Раздел 2. Машины постоянного тока малой мощности. Выбор электродвигателя по заданной мощности и по функциональному назначению.

Правильность подбора электродвигателя, учитывающая специфику приводного механизма, условия работы и окружающей среды, определяет длительность безаварийной работы и надежность системы «двигатель – нагрузка» [3–5].

В зависимости от потребляемой мощности, а также от ограничений по массе и размерам выбирается тот или иной тип электродвигателя. Выбранный электродвигатель должен удовлетворять следующим условиям:

– обеспечивать момент, достаточный для разгона механизма с заданным ускорением, а при торможении двигателем - замедление механизма;

– при работе в заданном режиме не должен испытывать длительных перегрузок, ведущих к перегреву электродвигателя.

При выборе двигателя следует придерживаться следующих рекомендаций:

1. Электрические и механические параметры приводов ($P_{ном}$, $U_{ном}$, $n_{ном}$, относительная продолжительность рабочего периода, $T_{пуск}$, T_{min} , T_{max} , пределы регулирования числа оборотов и т. п.) должны соответствовать параметрам приводимых ими механизмов во всех режимах их работы в данной установке.

2. Для механизмов, сохраняющих технологическую непрерывность в работе, должен быть обеспечен самозапуск их электродвигателей после кратковременных перерывов (не более 2,5 с), связанных с перерывом питания или понижением напряжения из-за короткого замыкания, при этом применять двигатель большей мощности, чем для непрерывной нормальной работы, не требуется.

3. Для привода механизмов, не требующих регулирования числа оборотов, независимо от их мощности, рекомендуется применять синхронные или асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором.

4. Для привода механизмов, имеющих тяжелые условия пуска или работы, либо требующих изменения числа оборотов, следует применять двигатели с наиболее простыми и экономичными методами пуска или регулирования чисел оборотов, возможными в данной установке.

5. Синхронные двигатели, как правило, должны иметь устройства форсировки возбуждения или компаундирования. Синхронные двигатели в случаях, когда они по своей мощности могут обеспечить регулирование напряжения или режима реактивной мощности в данном узле нагрузки, должны иметь автоматический режим включения.

6. Электродвигатели постоянного тока допускается применять только в тех случаях, когда электродвигатели переменного тока не обеспечивают требуемых характеристик или неэкономичны.

7. Пуск асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором и синхронных двигателей должен производиться, как правило, непосредственным включением в сеть (прямой пуск). При невозможности прямого пуска следует применять пуск через трансформатор или автотрансформатор. В особых случаях допускается пуск с подъемом частоты от нуля.

Мощность электродвигателя всегда относят к определенному режиму работы. При проектировании привода внешние сопротивления и режим работы являются заданными.

Различают три **номинальных режима** работы двигателей:

- продолжительный,
- кратковременный,
- повторно-кратковременный.

При **продолжительном режиме** работы двигатель нагревается до установившейся температуры в отличие от кратковременного, при котором этого не происходит.

При **повторно-кратковременном режиме** происходит пуск и остановка двигателя, при этом нагрев электродвигателя и возможность реализации заданной мощности определяются продолжительностью включения (ПВ) по относительному времени за цикл, равный 10 мин. По величине ПВ различают четыре основных повторно-кратковременных режима работы.

Режим работы является продолжительным (ПВ 100%), если время одного цикла работы превышает 10 мин. При расчете мощности двигателя в повторно-кратковременном режиме работы возможны три случая.

1. Фактический режим работы двигателя соответствует одному из стандартных режимов; нагрузка постоянная.

В этом случае по каталогу выбирается двигатель, мощность которого при заданном ПВ равна требуемой.

2. Фактическая продолжительность включения $PВ_{\phi}$ не совпадает с номинальными значениями $PВ_{н}$; нагрузка постоянная.

В этом случае двигатель выбирается по номинальной мощности

$$P_{н} = P_{\phi} \sqrt{\frac{PВ_{\phi}}{PВ_{н}}},$$

где P_{ϕ} – фактическая мощность,

$PВ_{н}$ – ближайшее стандартное значение ПВ.

3. Значения мощности P переменны в течение цикла.

В этом случае расчет проводится в такой последовательности.

Строится график изменения мощности двигателя во времени за цикл и определяется $PВ_{\phi}$.

Определяется средняя статическая мощность за цикл

$$P_1 = \frac{K \cdot \sum P_i t_i}{t_{\text{ц}}},$$

где K – коэффициент перегрузок при пуске и торможении;
 $K = 1,1-1,3$;

P_i – различные значения статической мощности за соответствующие промежутки t_i времени в течение цикла продолжительностью $t_{\text{ц}}$.

Полученная мощность пересчитывается по вышеприведенному выражению для определения $P_{\text{н}}$, и по величине $P_{\text{н}}$ выбирается двигатель соответствующей мощности.

Строятся *нагрузочные диаграммы механизма* с выбранным двигателем по моменту $T=T(t)$ и по силе тока двигателя $I = I(t)$, после чего определяется средняя квадратичная сила тока

$$I_{\text{э}} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{t_{\text{ц}}}},$$

где I_1, I_2, \dots, I_n – сила тока двигателя (принимается по его характеристике за промежутки времени t_1, t_2, \dots, t_n в пределах цикла продолжительностью $t_{\text{ц}}$).

Для двигателей постоянного тока с параллельным возбуждением и для асинхронных электродвигателей вместо $I_{\text{э}}$ можно определять средний квадратичный момент

$$T_{\text{э}} = \sqrt{\frac{T_1^2 t_1 + T_2^2 t_2 + \dots + T_n^2 t_n}{t_{\text{ц}}}}.$$

Значения $I_{\text{э}}$ или $T_{\text{э}}$, сравниваются с номинальными значениями силы тока $I_{\text{н}}$ или момента $T_{\text{н}}$ предварительно выбранного двигателя с учетом отличия $PВ_{\phi}$ от $PВ_{\text{н}}$:

$$I_{\text{н}} = P_{\text{э}} \sqrt{\frac{PВ_{\phi}}{PВ_{\text{н}}}},$$

$$T_n = T_3 \sqrt{\frac{ПВ_\phi}{ПВ_n}}$$

В случае несоблюдения последних неравенств – двигатель непригоден по нагреву и его следует заменить ближайшим двигателем большей мощности. Формулы для определения расчетной мощности приводного двигателя сведены в табл. 3.2.

Примечания: 1. Ориентировочные значения КПД закрытых передач в масляной ванне приведены для колес, выполненных по 8-й степени точности, а для открытых – по 9-й; при более точном выполнении колес КПД может быть повышен на 1 ... 1,5%; при меньшей точности – соответственно понижен.

2. Для червячной передачи предварительное значение КПД принимают $\eta_{чп} = 0,75 \dots 0,85$. После установления основных параметров передачи значение КПД следует уточнить.

3. Потери в подшипниках на трение оцениваются следующими коэффициентами: для одной пары подшипников качения $\eta_{пк} = 0,99 \dots 0,995$; для одной пары подшипников скольжения $\eta_{пс} = 0,98 \dots 0,99$.

4. Потери в муфте принимаются $\eta_{мвф} = 0,98$.

5. В приводах с параллельными передачами, например, с раздвоенными колесами, значения КПД из табл. 3.2 учитывают только один раз. В задании на СРС момент на выходном валу задан в виде графика нагрузки, который учитывает фактические условия работы привода. Рассмотрим в качестве примера, приведенный на рис. 3.1 график нагрузки привода.

Его следует понимать так:

– в течение суток привод работает 50% времени, т. е. продолжительность его включения $ПВ = 50\%$.

– в течение года привод работает 65% времени и значит общее время работы привода за один год составит $365 \text{ дней} \cdot 24 \text{ часа} \cdot 0,65 \cdot 0,5 = 2847 \text{ часов}$.

За это время в пусковом режиме двигатель работает 0,003% на моменте, который составляет 1,3 от номинала, т. е. требуется мощность, превышающая расчетную в 1,3 раза. На расчетном моменте (на номинальной мощности двигателя) привод работает 20% времени; на моменте 0,7 от номинала 30% времени и на моменте 0,5 от номинала 50% времени.

Анализ графика показывает, если выбрать двигатель по номинальной мощности, то он явно будет недогружен более чем на 50% времени работы, но одновременно он будет и перегружен во время пусков в работу.

Это учтено в конструкции серийно выпускаемых асинхронных электродвигателей и в каталоге дается соотношение пускового момента к номинальному, которое в нашем случае должно быть не менее 1,3. Значения КПД различных передач приведены в табл. 3.3.

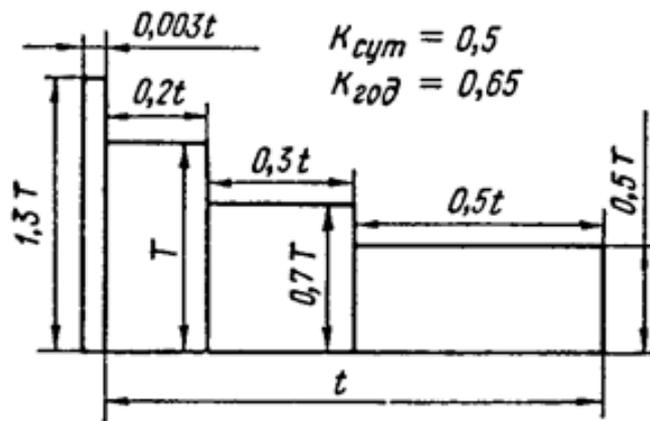


Рис. 3.1. График нагрузки привода

Что касается номинальной мощности, то ее на первом этапе следует подсчитать по формуле через эквивалентный момент с учетом графика нагрузки

$$T_{\text{экв}} = \sqrt[3]{T_1^3 t_1 + T_2^3 t_2 + T_3^3 t_3 + \dots + T_n^3 t_n}.$$

Для нашего конкретного случая

$$T_{\text{экв}} = \sqrt[3]{(1,3)^3 0,003 + (1)^3 0,5 + (0,7)^3 0,3 + (0,5)^3 0,5} = 0,875T$$

и требуемая эквивалентная мощность

$$N_{\text{экв}} = (T \cdot \omega \cdot 0,875) / \eta.$$

Номинальная требуемая мощность

$$N = (T_2 \cdot \omega) / \eta.$$

Подсчитав то и другое значение, можно приступить к выбору мощности электродвигателя. Пусть, например, нам требуется выбрать мощность двигателя ленточного транспортера со следующими параметрами: скорость транспортера – 0,5м/с, усилие на ленте транспортера – 4000 Н, общий КПД привода – 0,81, график нагрузки приведен выше.

Номинальная мощность $N = 4000 \cdot 0,5 / 0,81 = 2470$ Вт = 2,47 кВт. Эквивалентная мощность $N_{\text{экв}} = N \cdot 0,875 = 2,47 \cdot 0,875 = 2,16$ кВт.

Таблица 3.2

Формулы для определения расчетной мощности приводного двигателя

Расположение передач в механизме		Заданные параметры на рабочем органе	Мощность, кВт
Последовательное:		P_p	$P_{дв} = P_p / \eta_m$
		T_p, n_p	$P_{дв} = (1,0472 \cdot 10^{-4} T_p n_p) / \eta_n$
		P_p, V_p	$P_{дв} = P_p V_p \cdot 10^{-4}$
Параллельное:	от одного двигателя приводится в движение рабочих органов несколько	$P_{p1}, P_{p2}, \dots, P_{pn}$	$P_{дв} = (P_{p1} + P_{p2} + \dots + P_{pn}) / n$
		$T_{p1}, T_{p2}, T_{pn};$ n_{p1}, n_{p2}, n_{pn}	$P_{дв} = \frac{1,0472 \cdot 10^{-4} \cdot (T_{p1} n_{p1} + T_{p2} n_{p2} + \dots + T_{pn} n_{pn})}{\eta_m}$
		$F_{p1}, F_{p2}, F_{pn};$ V_{p1}, V_{p2}, V_{pn}	$P_{дв} = \frac{1,0472 \cdot 10^{-4} \cdot (F_{p1} V_{p1} + F_{p2} V_{p2} + \dots + F_{pn} V_{pn})}{\eta_m}$
	От нескольких двигателей приводится в движение один рабочий орган	P_p	$P_{дв1} + P_{дв2} + \dots + P_{двn} = \frac{P_p}{\eta_m}$
		T_p, n_p	$P_{дв1} + P_{дв2} + \dots + P_{двn} = \frac{1,0472 \cdot 10^{-4} \cdot T_p n_p}{\eta_m}$
		P_p, V_p	$P_{дв1} + P_{дв2} + \dots + P_{двn} = P_p V_p \cdot 10^{-4}$
Обозначения			
η_m	коэффициент полезного действия (КПД) привода $\eta_m = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \dots \cdot \eta_k$		
$\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_k$	КПД отдельных последовательно соединенных передач привода (табл.1.2);		
$P_{p1}, P_{p2}, \dots, P_{pn}$	мощность на рабочих органах, кВт;		
$T_{p1}, T_{p2}, \dots, T_{pn}$	моменты на рабочих органах, Нм;		
$P_{дв1}, P_{дв2}, \dots, P_{двn}$	расчетные мощности двигателей, кВт;		
$n_{p1}, n_{p2}, \dots, n_{pn}$	частота вращения рабочих органов, об/мин;		
$V_{p1}, V_{p2}, \dots, V_{pn}$	линейные скорости рабочих органов, м/с;		
$F_{p1}, F_{p2}, \dots, F_{pn}$	силовая нагрузка на рабочие органы, Н		

Таблица 3.3

Средние значения КПД механических передач (без учета потерь)

Тип передачи	Закрытая	Открытая
Зубчатая:		
цилиндрическая	0,96 ... 0,97	0,93 ... 0,95
коническая	0,95 ... 0,97	0,92 ... 0,94
Цепная	0,95 ... 0,97	0,90 ... 0,93
Ременная:		
плоским ремнем	–	0,96 ... 0,98
клиновыми (поликлиновыми) ремнями	–	0,95 ... 0,97
червячная при числе заходов червяка:	0,70...0,75	
$Z_1 = 1$	0,80...0,85	
$Z_1 = 2$	0,80...0,95	
$Z_1 = 4$		
муфта соединительная	0,98	
подшипники качения	0,99	

По каталогу выпускаемых электродвигателей исходя из номинальной мощности необходимо выбрать двигатель мощностью 3 кВт [3]. Исходя из эквивалентной мощности можно выбрать двигатель мощностью 2,2 кВт. Пусть нам требуется электродвигатель с частотой вращения 1500 мин^{-1} (самая оптимальная частота вращения с точки зрения экономичности и рекомендуемая в курсовом проектировании). Для данных двигателей по каталогу отношение пускового момента к номинальному $T_{\text{п}} / T_{\text{н}} = 2$.

Требуемая пусковая мощность по графику нагрузки

$$N_{\text{п}} = 1,3 \cdot 2,47 = 3,21 \text{ кВт.}$$

Серийный электродвигатель мощностью 2,2 кВт обеспечит на пуске мощность $2,2 \cdot 2 = 4 \text{ кВт}$. Таким образом, мы имеем право выбрать двигатель мощностью 2,2 кВт, но он будет перегружен на $(2,47/2,2) - 11,2\%$ по номинальной мощности.

Продолжительность включения нашего двигателя по заданию ПВ = 50% и значит допустима перегрузка по номинальной мощности в пределах, указанных в табл. 3.4. С учетом табл. 3.4 мы окончательно имеем право выбрать электродвигатель мощностью 2,2 кВт, хотя по расчету требуется мощность 2,47 кВт.

И далее в расчетах зубчатых или червячных передач в качестве расчетного можно принимать не номинальный вращающий момент, а эквивалентный.

Таблица 3.4

Таблица пересчета продолжительности включения ЭД и допустимой нагрузки

Продолжительность включения электродвигателя, ПВ %	Допустимая перегрузка по номинальной мощности асинхронных двигателей серии АИР
100%	0%
80%	5%
60%	10%
40%	20%

Варианты домашних заданий, выполняемых в ходе выполнения СРС, представлены в табл. 3.5 [1, 3].

Таблица 3.5

Варианты домашних заданий

№	Марка	P , Вт	U_1 , В	I , А	n , об/мин	J , кг м ²	$R_{я}$	$R_{в}$	t
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	ДПЦЯ-0,6	23	23	40	33000	3,6	0,035	0,1	18
2	ДПЦЯ-0,7	25	25	45	3100	5,6	0,01	0,1	30
3	ДПЦЯ-0,97	42	42	29,3	3000	4	0,014	0,2	20
4	ДПЦЯ-1,5	110	110	16,5	4900	3,6	0,197	0,6	26
5	ДПЦЯ-2,9	27	27	190	3200	26	0,005	0,1	61
6	ДПЦЯ-5	22	22	29	2800	105	0,01	0,1	160
7	ДСПЯ-0,4	26	26	24	3000	1,5	0,12	0,1	18
8	ДСПЯ-0,6	27	27	40	3000	2,1	0,08	0,1	22
9	ДСПЯ-0,8	26	26	44	3000	3	0,01	0,1	30
10	ДСПЯ-1,5	45	45	95	4000	4,7	0,01	0,2	31
11	ДМПЯ-0,37	35	35	13,6	3000	3,8	0,02	0,3	9
12	ДПМЯ-0,62	39	39	22	3000	3,2	0,032	0,3	10
13	ДПМЯ-0,5	110	110	2	3000	12,7	0,03	0,5	7,2
14	ПЯ-50	12	12	7,5	3000	0,17	0,1	0,3	1,5
15	ДПУ-160-180-3	36	36	7	3000	2,17	0,5	0,57	10
16	ДПУ-200-550-3	140	140	5,5	3000	8,84	2,2	0,57	12
17	ДПУ-240-1100-3	122	122	11	3000	18,8	0,53	0,57	25
18	Мо-1000	100	100	13	3000	24,8	0,04	0,57	26
19	Мо-4500	220	220	21	3000	90	0,45	0,57	16
20	ПБВ-100-МГ	60	60	17,1	1000	0,0133	0,3	0,57	12
21	ПБВ-100-ЛГ	60	60	24,6	1000	0,0245	0,05	0,3	25
22	ПБВ-112-МГ	100	100	24,5	1000	0,0408	0,5	0,3	30
23	ПБВ-112-ЛГ	110	110	24,3	1000	0,0691	0,1	0,57	40

4. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ ПО РАЗДЕЛУ № 3

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА АСИНХРОННЫХ МАШИН МАЛОЙ МОЩНОСТИ

4.1. Методические рекомендации по подготовке к практическим занятиям по разделу № 3

Перед практическими занятиями необходимо повторить разделы лекций соответствующей темы и по [2].

Задание на домашнюю работу. Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором серии 4А имеет технические данные, приведенные в табл. 4.1. Варианты далее дублируются.

Определить высоту оси вращения h , число полюсов $2p$, скольжение при номинальной нагрузке $s_{\text{НОМ}}$, момент на валу $M_{\text{НОМ}}$, начальный пусковой $M_{\text{П}}$ и максимальный момент $M_{\text{МАХ}}$, потребляемую двигателем из сети активную мощность $P_{1\text{НОМ}}$, суммарные потери при номинальной нагрузке ΣP , номинальный и пусковой токи $I_{\text{НОМ}}$ и $I_{\text{П}}$ в питающей сети при соединении обмоток статора «звездой» и «треугольником».

Таблица 4.1

Тип двигателя и варианты	$P_{\text{НОМ}}$, кВт	n_2 об/мин	$\eta_{\text{НОМ}}$, %	$\cos\varphi_1$	$I_{\text{П}}/I_{\text{НОМ}}$	$M_{\text{П}}/M_{\text{НОМ}}$	$M_{\text{МАХ}}/M_{\text{НОМ}}$	U_1 , В
4А100S2У3 – 0	4,0	2880	86,5	0,89	7,5	2,0	2,5	220/380
4А160S2У3 – (1)	15,0	2940	88,0	0,91	7,0	1,4	2,2	220/380
4А112М4У3 – (3)	5,5	1445	85,5	0,85	7,0	2,0	2,2	220/380
4А132М4У3 – (4)	11,0	1460	87,5	0,87	7,5	2,2	3,0	220/380
4А200М6У3 – (6)	22,0	975	90,0	0,90	6,5	1,3	2,4	220/380

Решение варианта с двигателем 4А100S2У3:

1. В обозначении типоразмера двигателя цифры, стоящие после обозначения серии 4А, указывают на высоту оси вращения, т. е. $h = 100$ мм.

2. Следующая далее цифра указывает на число полюсов, т. е. $2p = 2$; при частоте переменного тока 50 Гц этому числу полюсов соответствует синхронная частота вращения $n_2 = 3000$ об/мин.

3. Скольжение при номинальной нагрузке определяется номинальной частотой вращения ротора двигателя $s_{\text{ном}} = (n_1 - n_{2\text{ном}}) / n_1$ $s_{\text{ном}} = (3000 - 2880) / 3000 = 0,04$ или 4%.

4. Момент на валу двигателя (полезный момент двигателя) при номинальной нагрузке, т. е. при номинальной частоте вращения 2820 об/мин равен $M_2 = 9,55 P_{\text{ном}} / n_{2\text{ном}} = 9,55 \cdot 4000 / 2880 = 13,26$ Нм.

5. Начальный пусковой момент

$$M_{\text{п}} = M_{\text{ном}} (M_{\text{п}} / M_{\text{ном}}) = 13,26 \cdot 2 = 26,52 \text{ Н м.}$$

6. Максимальный (критический) момент двигателя определяют по его перегрузочной способности

$$M_{\text{max}} = M_{\text{ном}} (M_{\text{max}} / M_{\text{ном}}) = 13,26 \cdot 2,5 = 33,15 \text{ Нм.}$$

7. Номинальный ток в фазной обмотке статора

$$I_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} / (m_1 U_1 \eta_{\text{ном}} \cos \varphi I_{\text{ном}}) = 4000 / (3 \cdot 220 \cdot 0,865 \cdot 0,89) = 7,9 \text{ А.}$$

8. Потребляемая двигателем из сети активная мощность в режиме номинальной нагрузки

$$P_{1\text{ном}} = P_{\text{ном}} / \eta_{\text{ном}} = 4 / 0,865 = 4,6 \text{ кВт.}$$

9. Суммарные потери двигателя при номинальной нагрузке

$$\Sigma P = P_{1\text{ном}} - P_{\text{ном}} = 4,6 - 4,0 = 0,6 \text{ кВт.}$$

10. Линейный ток статора:

– при соединении обмоток статора «звездой»

$$I_{1\text{лY}} = 7,9 \text{ А;}$$

– при соединении обмоток статора «треугольником»

$$I_{1\text{л}\Delta} = 1,73 \cdot I_1 = 1,73 \cdot 7,9 = 13,5 \text{ А.}$$

5. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ ПО РАЗДЕЛУ № 4

РАСЧЕТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ ДЛЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА И СИНХРОННЫХ МАШИН С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

5.1. Методические рекомендации по подготовке к практическим занятиям по разделу № 4

Занятие 5. Перед практическими занятиями необходимо повторить разделы соответствующей темы [1].

Расчет постоянных магнитов для возбуждения синхронных машин и машин постоянного тока разберем на примерах.

1. Постоянный магнит из сплава ЮНДК имеет следующие характеристики: $B_r = 1,02$ Тл; $H_c = 110$ кА/м; $\gamma = 0,6417$. Величина относительной напряженности размагничивающего магнитного поля $\Delta H_m = 0,3$. Магнитная проницаемость материала внешней магнитной цепи равна бесконечности, а площади поперечного сечения магнита и зазора одинаковы.

Определить отношение длины магнита к длине воздушного зазора для оптимально выбранной рабочей точки.

Р е ш е н и е. Коэффициент, характеризующий форму кривой размагничивания

$$a = \frac{2\sqrt{0,6417 - 1}}{0,6417} = 0,938.$$

Относительная проницаемость возврата

$$\mu_B = 1 - a = 0,062.$$

Оптимальная проводимость внешней цепи в относительных единицах

$$\lambda_{\text{вн.отн.}} = \frac{a^{-1} + \mu_B \Delta H_m}{a^{-1} - \Delta H_m} = \frac{1/0,938 + 0,062 \cdot 0,3}{1/0,938 - 0,3} = 1,4158.$$

Масштаб магнитной проницаемости

$$m_\mu = B_r / H_c = 1,02 / (110 \cdot 10^3) = 9,2727 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м.}$$

Магнитная проницаемость воздушного зазора в относительных единицах

$$\mu_o = \frac{\mu_o}{m_\mu} = \frac{1,256 \cdot 10^6}{9,2727 \cdot 10^{-6}} = 0,1354..$$

Отношение длины магнита к длине воздушного зазора

$$\frac{l_M}{\delta} = \frac{\lambda_{\text{вн.опт.}}}{\mu_o} = \frac{1,4158}{0,1354} \approx 14,6.$$

Относительная магнитная индукция

$$\begin{aligned} B_1 &= (a^{-1} - H_m) \lambda_{\text{вн.отн.}} - \sqrt{\lambda_{\text{вн.отн.}} [(a^{-1})^2 - a^{-1}]} = \\ &= \left(\frac{1}{0,938} - 0,3 \right) 1,4158 - \sqrt{1,4158 \left[\left(\frac{1}{0,938} \right)^2 - \frac{1}{0,938} \right]} = 0,768. \end{aligned}$$

Относительная напряженность магнитного поля

$$H_1 = \frac{B_1}{\lambda_{\text{вн.опт.}}} = \frac{0,76}{1,4158} \approx 0,5428.$$

Относительная удельная энергия магнита

$$W_1 = 0,5 B_1 H_1 = 0,5 \cdot 0,76 \cdot 0,5428 = 0,208.$$

Графическое построение решения задачи представлено на рис. 5.1.

При заданной величине внешнего размагничивания ΔH_m режим работы магнита в точке 1 будет оптимальным. При увеличении магнитной проводимости внешней цепи свыше оптимального значения (например, вебер-амперная характеристика, изображаемая прямой OA_2) удельная энергия магнита уменьшается. При данном значении магнитной проводимости внешней цепи относительные значения магнитной индукции напряженности магнитного поля и удельной энергии магнита соответственно равны

$$B_1 = 0,75; H_1 = 0,28; W_1 = 0,5; B_1 H_1 = 0,105.$$

Уменьшение магнитной проводимости внешней цепи недопустимо, так как при этом уменьшается величина ΔH_m .

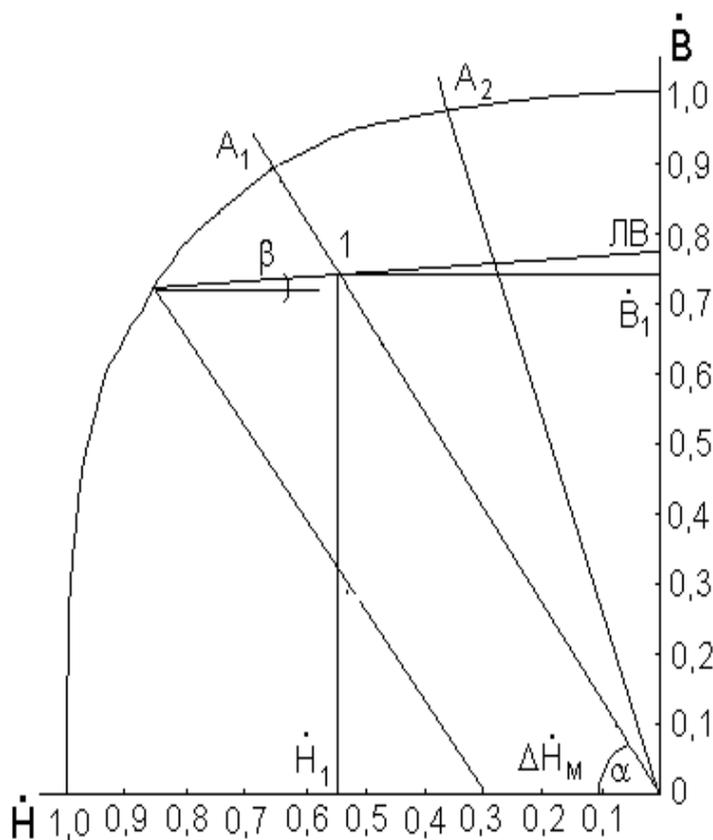


Рис. 5.1. Графическое построение решения примера № 1

2. Внешняя магнитная цепь и внешнее размагничивание имеют те же, что в примере 1, параметры и величины. Определить отношение длины магнита к длине воздушного зазора, если использовать магнит на основе редкоземельных элементов типа КС 37А с параметрами

$$B_r = 0,82 \text{ Тл}; H_c = 560 \text{ кА}; \gamma = 0,28.$$

Р е ш е н и е. Коэффициент, характеризующий форму кривой размагничивания,

$$a = \frac{2\sqrt{\gamma} - 1}{\gamma} = \frac{2\sqrt{0,28} - 1}{0,28} = 0,208.$$

Относительная магнитная проницаемость возврата

$$\mu_g = 1 - a = 1 - 0,208 = 0,792.$$

Оптимальная магнитная проводимость внешней цепи

$$\lambda_{\text{вн.опт.}} = \frac{a^{-1} + \mu_{\text{в}} \Delta H_{\text{м}}}{a^{-1} - \Delta H_{\text{м}}} = \frac{1/0,208 + 0,792 \cdot 0,3}{1/0,208 - 0,3} = 1,119.$$

Относительная магнитная проницаемость воздушного зазора

$$\mu_{\text{o}} = \frac{H_{\text{с}}}{B_{\text{r}}} = \frac{1,256 \cdot 10^6 \cdot 560 \cdot 10^3}{0,82} = 0,857.$$

Отношение длины магнита к длине воздушного зазора

$$\frac{l_{\text{м}}}{\delta} = \frac{\lambda_{\text{вн.опт.}}}{\mu_{\text{o}}} = \frac{1,119}{0,857} = 1,306.$$

Сравнивая между собой магниты ЮНДК с магнитами на основе редкоземельных элементов, видим, что объем последних при прочих равных условиях в ≈ 11 раз меньше. Такое положение объясняется значительно большими удельными энергиями последних.

Домашнее задание – изучить приведенный пример и рассчитать характеристики магнита на редкоземельных элементах.

6. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА СТУДЕНТА

Задание для реферата-конспекта. Определить пригодность предложенного двигателя, работающего с графиком длительной нагрузки (рис. 6.1) при постоянной частоте вращения приводного вала в установившемся режиме $n_{\text{НОМ}}$ [1]. Варианты для рефератов приведены в табл. 3.2.

1. Предельная перегрузочная способность двигателя по каталогу

$$\lambda_m = \frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{НОМ}}} = 2 \div 3.$$

Проверку пригодности провести способом средних потерь, эквивалентного тока и эквивалентного момента.

2. Рассчитать и построить кривые нагрева и охлаждения электродвигателя в длительном режиме.

3. Рассчитать и построить естественную характеристику ДПТ НВ.

4. Рассчитать и построить графоаналитическим способом пусковую диаграмму и определить сопротивления пусковых и тормозных резисторов.

6.1. Исходные данные

Расчеты и построения провести для заданного двигателя постоянного тока с дисковым якорем (ДПУ), с полым цилиндрическим немагнитным якорем (ДПЦЯ, ДСПЯ, ДПМЯ, МО) или высокомоментные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов [1].

Исходные данные двигателя:

$P_{\text{НОМ}}$, Вт – номинальная мощность; (число полюсов приведенных двигателей $p = 2$);

$I_{\text{НОМ}}$, А – номинальный ток;

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

$J_{\text{я}}$, кг м², – момент инерции;

$R_{\text{я}}$, (15 °С) – сопротивление якоря при температуре окружающей среды 15 °С, Ом;

m – масса двигателя;

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

n – скорость вращения ротора двигателя, об/мин;

M – момент на валу двигателя, Н.

Нагрузочная диаграмма производственного механизма электропривода $P, M, I = f(t)$, работающего в длительном режиме, показаны на рис. 6.1, принять $K_{запаса} = 1,1 \div 1,3$.

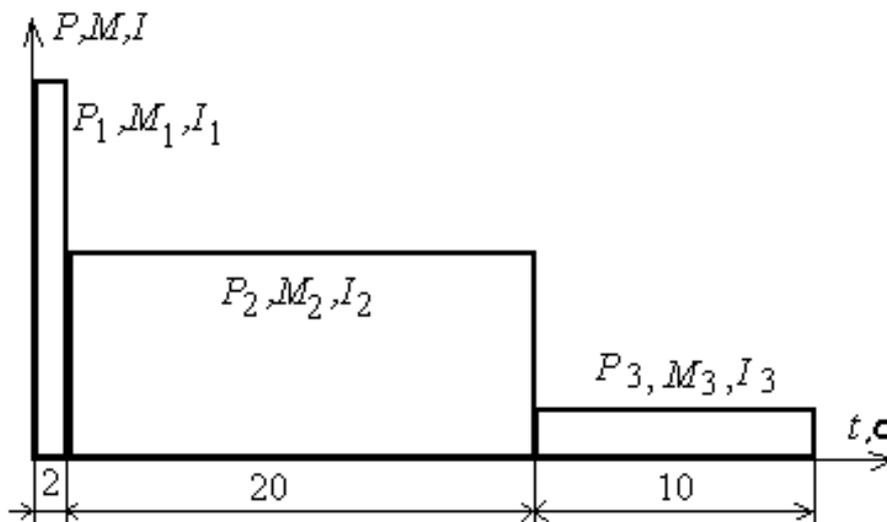


Рис. 6.1. Нагрузочные диаграммы производственного механизма электропривода

Значения мощности, момента и тока нагрузочной диаграммы рассчитать в соответствии с данными своего варианта из табл. 6.1.

Таблица 6.1

$t, с$	P	I	M
2	$2P_{ном}$	$2I_{ном}$	$2M_{ном}$
20	$P_{ном}$	$I_{ном}$	$M_{ном}$
10	$0,2P_{ном}$	$0,2I_{ном}$	$0,2M_{ном}$

6.2. Методические указания к выполнению расчетов в реферате

Современный электропривод представляет собой конструктивное единство электромеханического преобразователя энергии (двигателя), силового преобразователя и устройства управления. Он обеспечивает преобразование электрической энергии в механическую в соответствии с алгоритмом работы технологической установки.

Сфера применения электрического привода в промышленности, на транспорте и в быту постоянно расширяется. Эффективность энергосберегающих технологий, в том числе с помощью робототехнических систем, в значительной мере определяется эффективностью электропривода.

Разработка высокопроизводительных, компактных и экономичных систем привода является приоритетным направлением развития современной техники.

Регулируемый автоматический привод промышленных роботов имеет свои тенденции развития:

- приближение источника движения к исполнительному органу;
- использование специальных более совершенных исполнительных двигателей.

Первое условие предполагает сокращение механических передач, что возможно только при широком диапазоне регулирования скорости. В приводе роботов редуктор, как правило, сохраняется, поскольку исключение механических передач и применение тихоходных двигателей увеличивает размеры и массу электропривода.

В электромеханических промышленных роботах двигатель и редуктор встраивают в сочленение звеньев, поэтому требования к массогабаритным показателям повышены. Кроме того, двигатели таких электроприводов должны обеспечить необходимые статические и динамические характеристики, иметь повышенную перегрузочную способность, уменьшенный момент инерции.

Для высокودинамичных электроприводов небольшой мощности (до 20 кВт) эффективно применение высокомоментных двигателей постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов. Благодаря применению высокоэнергетических постоянных магнитов на основе редкоземельных элементов (например, сплава самарий – кобальт) эти двигатели особенно при малых скоростях (когда условия коммутации тока на коллекторе более легкие) способны развивать большой крутящий момент. Отношение пускового момента такого двигателя к номинальному составляет $8 \div 10$, в то время как у двигателей с электромагнитным возбуждением это отношение не превышает $2 \div 4$. Двигатели находят применение в металлорежущих станках с числовым программным управлением, в приводах роботов и следящих электроприводах различного назначения.

Электромеханические характеристики двигателей постоянного тока независимого возбуждения

Двигатели постоянного тока традиционно являются основой регулируемого электропривода и широко применяются во всех областях техники. Двигатели постоянного тока могут иметь независимое, последовательное или смешанное возбуждение. В зависимости от схемы возбуждения существенно разнятся и электромеханические характеристики двигателей.

Двигатели независимого возбуждения (ДПТ НВ) могут иметь электромагнитное возбуждение (рис. 6.2, *а*) и возбуждение от постоянных магнитов (рис. 6.2, *б*), которые применяют для высокодинамичных двигателей мощностью до 20 кВт. Высокомоментные двигатели постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов (ДСПЯ и ДСЦЯ) обеспечивают перечисленные свойства, а также высокую термоинерционность, и как следствие, возможность длительное время работать с перегрузками.

Реверсирование (изменение направления вращения) двигателей независимого возбуждения осуществляется изменением полярности напряжения, подводимого к якорю двигателя, или напряжения, подводимого к обмотке его возбуждения.

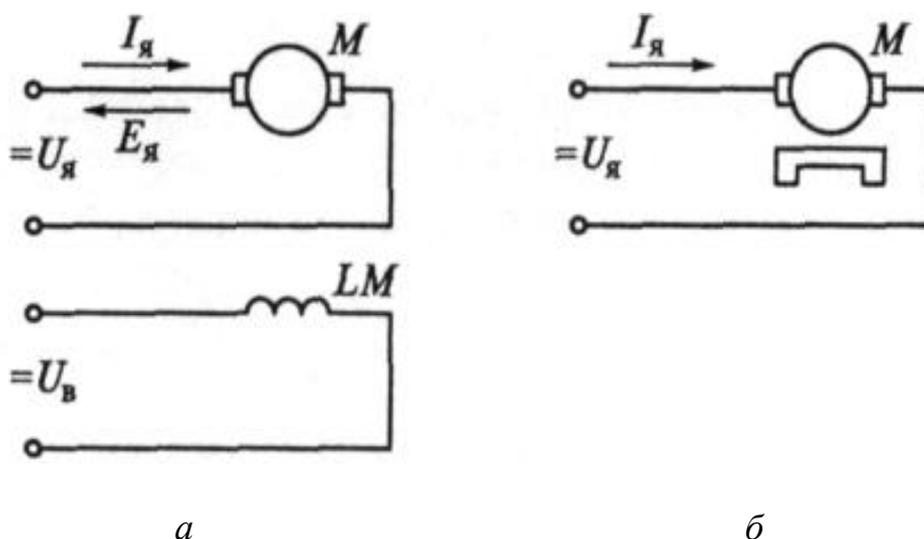


Рис. 6.2. Схема включения двигателей постоянного тока независимого возбуждения:
а – с электромагнитным возбуждением;
б – с возбуждением от постоянных магнитов

Естественная механическая характеристика двигателя постоянного тока независимого возбуждения показана на рис. 6.3.

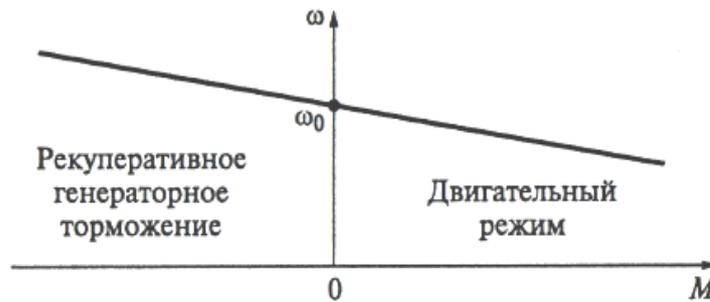


Рис. 6.3. Естественная механическая характеристика двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Для рассматриваемых двигателей жесткость естественной механической характеристики

$$\beta = \frac{C^2}{R} = \frac{(K\Phi)^2}{R}, \quad (1)$$

где c – электромеханическая постоянная;

R – сопротивление в цепи якоря;

Φ – поток возбуждения.

$$\omega = \frac{U_{\text{п}}}{k \Phi} = \frac{U_{\text{п}}}{C}. \quad (2)$$

С учетом (1) получим уравнение механической характеристики при постоянном потоке возбуждения выражение для механической характеристики примет вид

$$\omega = \omega_0 - \frac{M}{\beta}, \quad (3)$$

где M – момент на валу двигателя.

Регулирование частоты вращения ДПТ НВ

Регулирование скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения может проводиться тремя способами:

– введением добавочного резистора в цепь якоря; изменением напряжения питания якорной цепи двигателя при постоянном потоке возбуждения; изменением тока возбуждения, т. е. изменением магнитного потока двигателя.

При введении добавочного резистора в цепь якоря скорость холостого хода ω_0 остается неизменной, а изменяется наклон механических характеристик, т. е. уменьшается их жесткость (рис. 6.4).

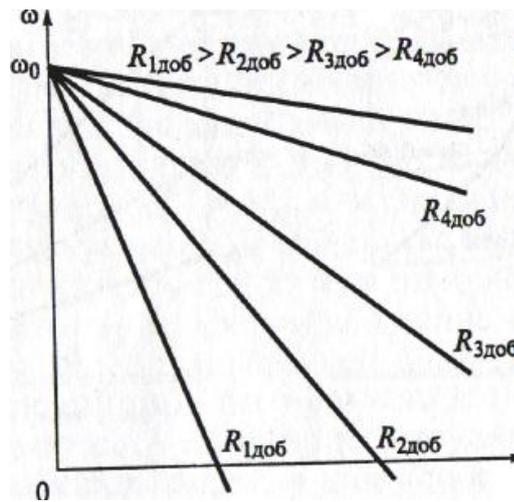


Рис. 6.4. Реостатные механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения: $R_{1доб} > \dots R_{4доб}$ – сопротивления ступеней резистора в якровой цепи двигателя

Данный способ регулирования скорости в настоящее время не используется, поскольку введение добавочного резистора сопряжено с потерями энергии в этом сопротивлении.

Основным способом регулирования скорости двигателей постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ – НВ) является регулирование напряжения, подводимого к якору двигателя (рис. 6.5).

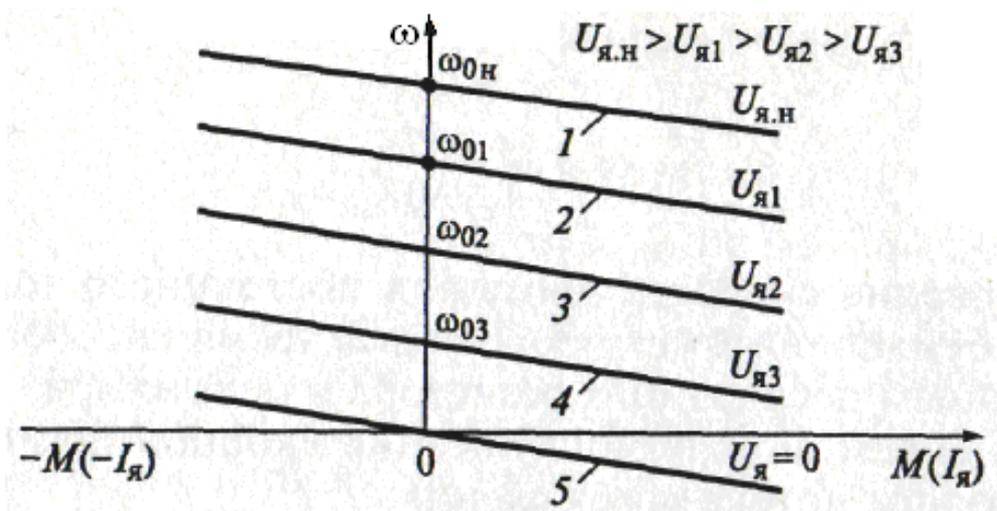


Рис. 6.5. Механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения при регулировании напряжения якоря: 1 – естественная, соответствующая номинальному напряжению якоря и скорости холостого хода ω_{01} ; 2...5 – регулировочные, соответствующие пониженному напряжению питания якоря и пониженной скорости холостого хода

При этом скорость можно лишь уменьшать по сравнению с номинальной скоростью, определяемой естественной характеристикой. При уменьшении напряжения якоря уменьшается скорость холостого хода ω_0 , а жесткость механических характеристик остается постоянной. Механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения представляют собой прямые, пересекающие ось ординат в точке идеального холостого хода, величина которой равна ω_0 . Повышение напряжения питания выше номинального не рекомендуется, так как это может ухудшить коммутацию на коллекторе.

Плавность регулирования, отсутствие дополнительных потерь энергии при регулировании и высокая жесткость механических характеристик составляют основные достоинства этого способа регулирования скорости.

Повышение скорости по сравнению с номинальной проводится уменьшением тока (потока) возбуждения. Механические характеристики для этого способа управления показаны на рис. 6.6.

В зоне I скорость двигателя в диапазоне от нуля I до номинальной скорости $\omega_{0н}$ регулируется изменением напряжения якоря при постоянном потоке возбуждения Φ_n . В зоне II регулирование производится изменением тока (потока) возбуждения I при постоянном номинальном напряжении якоря. Соответственно номинальный момент в зоне I регулирования остается постоянным, а в зоне II снижается пропорционально уменьшению потока.

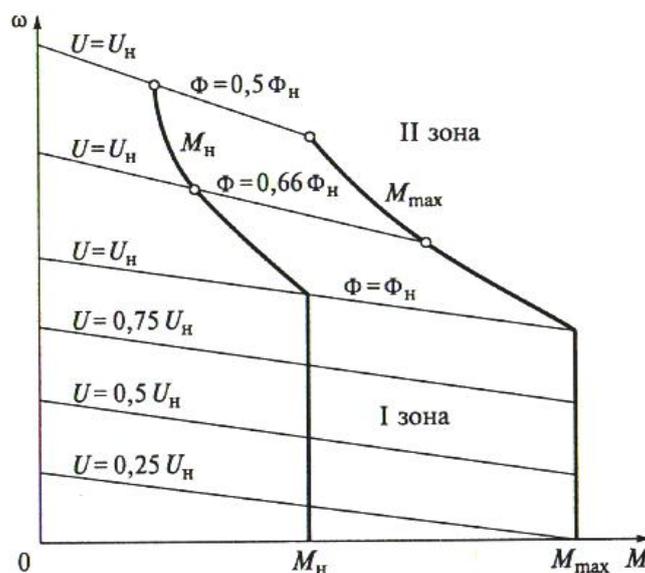


Рис. 6.6. Механические характеристики при двухзонном регулировании скорости двигателя постоянного тока

Максимально допустимая скорость двигателя при ослаблении поля определяется механической прочностью якоря и условиями коммутации на коллекторе. Эта скорость указывается в каталоге на двигатели. Ослабление поля используется и при однозонном регулировании скорости для установления основной (максимальной) скорости. В отличие от синхронных и асинхронных двигатели постоянного тока не имеют жестко определенной номинальной скорости. В каталогах указывают номинальную и максимальную скорости.

Например, если указано, что двигатель мощностью 100 кВт имеет номинальную скорость 1000 об/мин и максимальную 2000 об/мин, то номинальная скорость, например 1600 об/мин, может быть установлена в этих пределах выбором соответствующего значения тока возбуждения. При этом мощность двигателя останется равной 100 кВт. Это удобно при конструировании кинематической схемы рабочей машины.

Тормозные режимы ДПТ НВ

Электродвигатели постоянного тока независимого возбуждения могут работать в *трех тормозных режимах*: режиме рекуперативного торможения, динамического торможения и торможения противовключением.

Режим *рекуперативного генераторного торможения* имеет место, когда скорость двигателя превышает скорость холостого хода, т. е. $\omega > \omega_0$ (рис. 6.7).

При этом ЭДС якоря E_a превышает напряжение питания якорной цепи ($E_a > U_a$) и ток в якорной цепи пойдет под действием ЭДС якоря E_a знак тока будет противоположен знаку напряжения питания. Это означает, что энергия торможения отдается в сеть питания постоянного тока.

Следовательно, существуют три условия существования режима рекуперативного торможения:

1) цепь питания должна обеспечивать возможность протекания тока навстречу напряжению источника питания; это условие особенно важно в случае питания двигателя постоянного тока от полупроводниковых преобразователей, элементы которых обладают односторонней проводимостью тока;

2) источник питания должен быть способен воспринимать отдаваемую двигателем энергию и передавать ее в сеть питания; режим рекуперативного торможения невозможен, если привод получает питание от автономной дизель-генераторной установки;

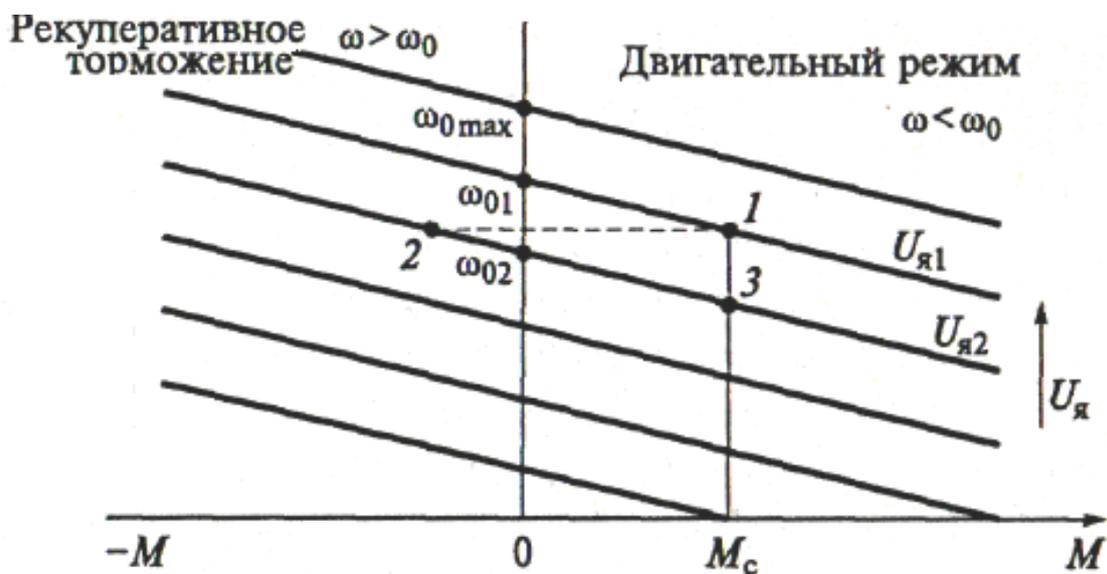


Рис. 6.7. Механические характеристики двигателя постоянного тока в двигательном режиме и режиме рекуперативного торможения

3) для того чтобы рекуперативное торможение было возможно в пределах заданного диапазона регулирования скорости, регулирование должно проводиться путем изменения напряжения, подводимого к якорной цепи двигателя. Основные достоинства рекуперативного торможения: энергетическая эффективность, связанная с полезным использованием энергии торможения; высокая жесткость механических характеристик; плавный переход из двигательного в тормозной режим на одной и той же характеристике. Благодаря такому характеру механических характеристик улучшается качество управления приводом.

Вторым возможным тормозным режимом является режим динамического торможения. В этом режиме якорь двигателя отключается от источника постоянного тока (рис. 6.8) и замыкается на резистор динамического торможения $R_{дт}$.

Питание обмотки возбуждения при этом должно быть обязательно сохранено. В указанном режиме двигатель M работает как генератор постоянного тока, нагруженный на резистор $R_{дт}$. Энергия торможения расходуется на нагрев резистора $R_{дт}$ и обмотки цепи якоря двигателя. Механические характеристики при динамическом торможении представлены на рис. 6.8.

Недостатки режима динамического торможения: потери энергии торможения, расходуемой на нагрев элементов привода; невозможность торможения привода до его полного останова.

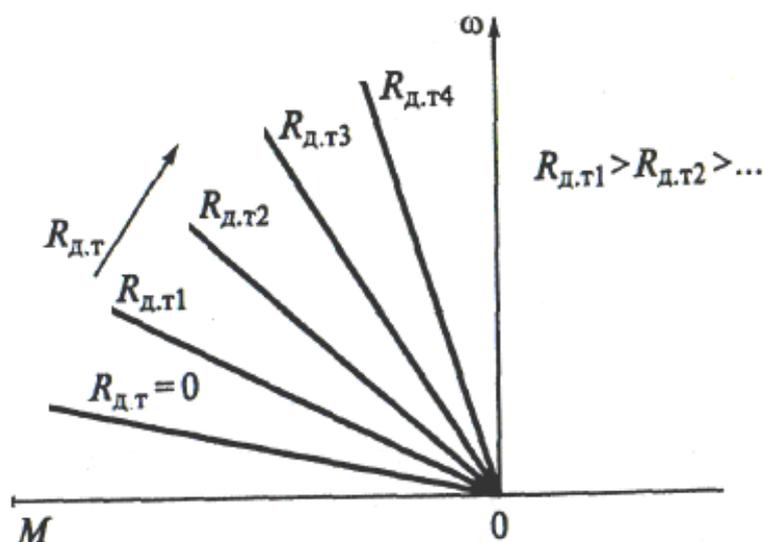


Рис. 6.8. Механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения в режиме динамического торможения

Достоинством режима динамического торможения является его высокая надежность, определяемая тем, что этот режим может осуществляться при исчезновении напряжения питания и в случае выхода из строя источника питания цепи якоря, когда режим рекуперативного торможения становится невозможен. Исходя из этого, динамическое торможение в приводах постоянного тока часто используется в качестве средства аварийного торможения.

Торможение противовключением нехарактерно для двигателей постоянного тока независимого возбуждения. Этот режим может использоваться в приводах малой мощности с широтно-импульсным регулятором тока, позволяющим ограничить ток торможения допустимым значением.

Электроприводы по системе «регулируемый источник питания – двигатель постоянного тока»

Для питания двигателей постоянного тока независимого возбуждения используют регулируемые источники питания:

- тиристорный преобразователь (выпрямитель) с фазовым управлением (система ТП – Д);
- полупроводниковые выпрямители с регулированием выпрямленного напряжения методом широтно-импульсного регулирования (ШИР-Д).

Основной системой регулируемого электропривода с двигателями постоянного тока является система ТП-Д, наиболее распространенные схемы, которой приведены на рис. 6.9.

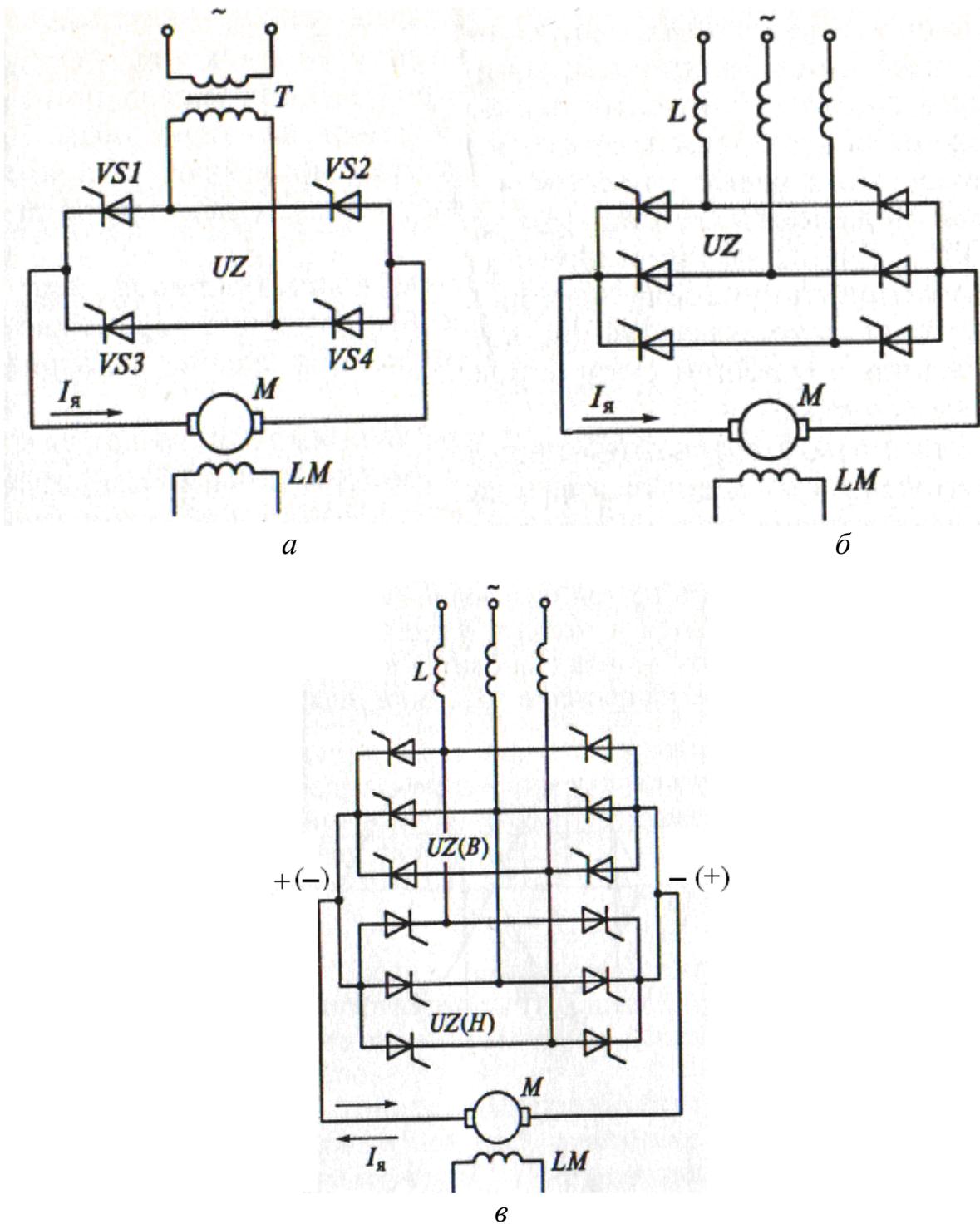


Рис. 6.9. Силовые схемы электроприводов ТП-Д:
a – однофазная мостовая нереверсивная; *б* – трехфазная мостовая нереверсивная;
в – трехфазная мостовая встречно-параллельная реверсивная с отдельным управлением

Основу схем тиристорных преобразователей составляют полупроводниковые приборы – тиристоры. Неполная управляемость тиристоров определяется тем, что включение тиристора контролируется системой импульсно-

фазового управления (СИФУ). При подаче отпирающего импульса на управляющий электрод тиристора он открывается и остается открытым после снятия отпирающего импульса. Закрывается тиристор после изменения полярности напряжения анод – катод и спада тока до нуля. Запирание тиристорov по цепи управления невозможно.

Все это относится к однооперационным тиристорам. Существуют запираемые тиристоры, которые допускают запирание по цепи управления.

Кроме того существуют преобразователи частоты для электроприводов на полевых транзисторах с полностью изолированным затвором [1–3].

Ниже приведены марки типовых электроприводов промышленных роботов:

Тип робота	Тип электропривода тиристорный; транзисторный	Тип двигателя
M10П	«Кемток»	1ПИ
M20-Ц	ЭТЗИ	ДК-1
M20П	ЭШИМ	ЧДПУ-75
M20K8501	ЭТИМ	ЗДПМ; ДПУ-240
M20K8505	ЭПБ-2	2Д8У
M40П	ЭШИМ	ЗДПМ
ТУР-ю	ЭШИР	ПЯ 250; ДПУ-200
ТУР-2,5	ЭШИР	ДДЕ

Например, стандартный привод производства Германии АББ DCS400 – это серия компактных электроприводов постоянного тока нового поколения, рассчитанных на номинальную мощность до 522 кВт. Привод удовлетворяет большинство потребностей машиностроителей, сравним по простоте обращения с аналоговым приводом, обладая при этом всеми преимуществами цифрового, легко встраивается в оборудование, компактен и обладает оптимальным набором функций, прост в установке, настройке и эксплуатации

Область применения: стандартный привод DCS400 можно использовать в различных отраслях промышленности. Среди типичных областей применения можно назвать экструдеры, миксеры, куттеры, волочильные машины, а также прессы.

Эти приводы идеальны в тех случаях, когда требуется простота монтажа, пусконаладки и эксплуатации, а также позволяют сэкономить время и исключить ошибки при наладке.

Функции привода: задатчик скорости с S – образной характеристикой и двумя темпами ускорения – замедления; обратная связь по скорости через тахогенератор, энкодер или по ЭДС якоря двигателя; регулировка скорости двигателя; задание крутящего момента – тока двигателя; внешнее ограничение крутящего момента; регулировка тока; автоматическое ослабление поля; автоматическая оптимизация для тока цепи якоря, тока возбуждения, контроллера скорости, регулятора ЭДС, адаптация потока; монитор скорости; развитая логика управления включением – выключением; дистанционный – местный режим работы; аварийный останов; автоматическое обнаружение последовательности фаз; контроль перегрузки двигателя; функция внутреннего потенциометра двигателя для задания скорости; функция толчкового режима; конфигурируемые макросы приложений.

Управление приводом: аналоговые и дискретные входы и выходы; последовательные шины связи; программный пакет для ПК; съемная панель управления.

Функции мониторинга: самодиагностика; диагностика тиристоров; регистратор неисправностей; защита силовой части (от перегрева, от исчезновения напряжения питания).

Контроль состояния двигателя: обрыв в цепи обратной связи по скорости; перегрев (оценка с помощью РТС-термистора); длительная перегрузка (I_{2t}); превышение заданной скорости; заклинивание вала двигателя; превышение максимально допустимого тока якоря; перенапряжение в цепи якоря; ток возбуждения меньше минимально допустимого; превышение максимально допустимого тока возбуждения.

Семейство комплектных микропроцессорных электроприводов постоянного тока SIMOREG DC MASTER 6RA70 имеет подходящие типы как для высоко комплексных приводных задач, так и для стандартных решений. Приводы высоко динамичны: время возбуждения либо время нарастания вращающего момента находится в пределах до 10 мс.

И это в диапазоне мощностей от 6,3 до 2000 кВт для запитки через якорь или внешним магнитным полем, для приводов, работающих в одном или четырех квадрантах.

Диапазон номинальных токов у SIMOREG DC MASTER от 15 до 2000 А и может быть расширен до 10000 А (путем параллельного соединения преобразователей, максимально – 5 блоков); диапазон напряжений – от 400 В до 830 В. Напряжения питающей сети 50/60 Гц.

Стандартные функции скоростного электропривода, построенного на современной микропроцессорной базе.

Цифровая система импульсно-фазового управления (СИФУ) реверсивного тиристорного преобразователя цепи тока якоря.

Цифровое построение всех контуров регулирования обеспечивает высокие точность и быстродействие поддержания регулируемых параметров.

Установка параметров может также производиться с помощью персонального компьютера с использованием удобных меню – для быстрого ввода в эксплуатацию, а также для простой визуализации при исполнении SIMOVIS.

Приводы SIMOREG DC MASTER полностью интегрированы в мир автоматизации, подходят для любой системы ЧПУ и прекрасно общаются с другими частями системы независимо от того, произведены ли они фирмой SIEMENS или другими изготовителями.

6.3. Методика выполнения основных разделов реферата

Методику расчета рассмотрим на примере электропривода на двигателе постоянного тока с исходными номинальными данными: $P_n = 35$ кВт, $U_n = 220$ В, $I_n = 185$ А, $n_n = 57$ об/мин, $R_{\text{я}} = 0,059$ Ом, $\lambda_m = 2 \div 3$. Нагрузочная диаграмма (рис. 6.1) производственного механизма имеет параметры, которые сведены в табл. 6.2.

Таблица 6.2

$t_1, \text{с}$	$P_1, \text{кВт}$	$I_1, \text{А}$	$t_2, \text{с}$	$P_2, \text{кВт}$	$I_2, \text{А}$	$t_3, \text{с}$	$P_3, \text{кВт}$	$I_3, \text{А}$
2	70	270	20	35	185	10	7	27

Определение пригодности выбранного двигателя:

А. Определим пригодность двигателя способом средних потерь.

Мощность, потребляемая из сети,

$$P_{1n} = U_n \cdot I_n = 220 \cdot 185 = 40,7, \text{ кВт.}$$

Суммарные потери

$$\sum p_H = P_{1H} - P_{2H} = 40,7 - 35 = 5,7, \text{ кВт.}$$

Переменные потери

$$p_{HM} = I_H^2 (R_{я75^\circ\text{C}} + R_B),$$

где $R_{я75^\circ\text{C}} = r_{я75^\circ\text{C}} (1 + \alpha_R \tau)$;

α_R – температурный коэффициент сопротивления, $\alpha_R = 0,004$;

R_B – сопротивление обмотки возбуждения,

$R_B = 0,5 R_{я} = 0,028, \text{ Ом};$

$$p_{HM} = 185^2 (0,06 + 0,028) = 3, \text{ кВт.}$$

$$R_{я75^\circ\text{C}} = 0,059 (1 + 0,004 \cdot 60) = 0,06, \text{ Ом.}$$

Постоянные потери

$$p_c = \sum P_H - P_{MH} = 5,7 - 3 = 2,7, \text{ кВт.}$$

Коэффициент полезного действия двигателя

$$\eta = \frac{P_H \cdot 10^3}{I_H \cdot U_H} = \frac{35 \cdot 10^3}{185 \cdot 220} = 0,86.$$

Определим переменные потери для нагрузки отдельных участков нагрузочной диаграммы

$$p_{M1} = p_{MH} \cdot \frac{P1^2}{P2H^2} = 3 \frac{70^2}{35^2} = 12, \text{ кВт},$$

$$p_{M2} = 3 \frac{35^2}{35^2} = 3, \text{ кВт}, \quad p_{M3} = 3 \frac{7^2}{35^2} = 0,1, \text{ кВт},$$

$$\begin{aligned} \sum p_{cp} &= \frac{(p_{M1} + p_c)t_1 + (p_{M2} + p_c)t_2 + (p_{M3} + p_c)t_3}{t_1 + t_2 + t_3} = \\ &= \frac{(12 + 2,7)2 + (3 + 2,7)20 + (0,1 + 2,7)10}{32} = 5,36, \text{ кВт} \end{aligned}$$

следовательно $\sum p_H \approx \sum p_{cp}$, т. е. найденные потери энергии приблизительно равны (меньше) номинальных выбранного двигателя, т. е. двигатель выбран правильно.

Б. Определение пригодности двигателя способом эквивалентных величин.

Эквивалентный ток согласно нагрузочной диаграмме (см. табл. 6.2) равен

$$I_{\text{э}} = \sqrt{\frac{I_1^2 \cdot t_1 + I_2^2 \cdot t_2 + I_3^2 \cdot t_3}{t_1 + t_2 + t_3}} = \sqrt{\frac{270^2 \cdot 2 + 185^2 \cdot 20 + 27^2 \cdot 10}{2 + 20 + 10}} = 161,08, \text{ А},$$

следовательно $I_{\text{э}} = 161 \text{ А} \leq I_{\text{н}} = 185 \text{ А}$, двигатель выбран правильно.

Эквивалентный момент двигателя можно рассчитать по формуле

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + M_3^2 t_3}{t_1 + t_2 + t_3}},$$

номинальный момент двигателя $M_{\text{ном}} = 9550 \frac{P_{\text{н}}}{n_{\text{н}}}$, Нм,

значения момента нагрузки по участкам диаграммы $M_i = 9550 \frac{P_i}{n_{\text{н}}}$, Нм,

$$M_{\text{ном}} = \frac{9550 \cdot 35}{579} = 577,29 \text{ Нм},$$

$$M_1 = \frac{9550 \cdot 70}{579} = 1155 \text{ Нм},$$

$$M_2 = \frac{9550 \cdot 35}{579} = 577,29 \text{ Нм},$$

$$M_3 = \frac{9550 \cdot 7}{579} = 115,5 \text{ Нм},$$

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{1155^2 \cdot 2 + 577,5^2 \cdot 20 + 115,5^2 \cdot 10}{32}} = 544 \text{ Нм}.$$

Кратность момента по нагрузочной диаграмме

$$\frac{M_{i \text{ max}}}{M_{\text{н}}} = \frac{1155}{577,29} = 2,0 < M_{\text{н}} \text{ по каталогу},$$

$$M_{\text{э}} = 461,18 < M_{\text{н}} = 577,29 \text{ Нм},$$

следовательно, двигатель пригоден для привода данного механизма.

Построение кривых нагревания и охлаждения электрического двигателя

Переменные потери вызывают нагрев электрического двигателя, что ограничивает его предельно допустимую мощность. Поэтому главным критерием для выбора мощности электрического двигателя является нагрев изоляции обмоток, который в зависимости от класса изоляции допускается от 90 °С до 180 °С и более.

Данную температуру называют установившейся $\tau_{\text{уст}}$ или допустимой. Нагрев двигателя зависит от его весовой теплоемкости, теплоотдачи и времени работы.

Если в момент включения электродвигателя его температура равна температуре окружающей среды, т. е. начальное превышение температуры электродвигателя над окружающей средой $\tau_0 = 0$ °С, то

$$\tau = \frac{Q}{A} \left(1 - e^{-\frac{A}{C}t} \right), \quad (4)$$

$$\text{при } t = \infty \quad \tau = \tau_{\text{уст}} = \frac{Q}{A} (1 - e^{-\infty}) = \frac{Q}{A}; \quad \frac{C}{A} = T, \quad (5)$$

где Q – общее количество тепла, выделенного в электродвигателе, Дж/с;
 A – теплоотдача электродвигателя, Дж/град;
 t – время работы двигателя, с;
 $T = T_{\text{н}}$ – постоянная времени нагрева (рис. 6.10, а).

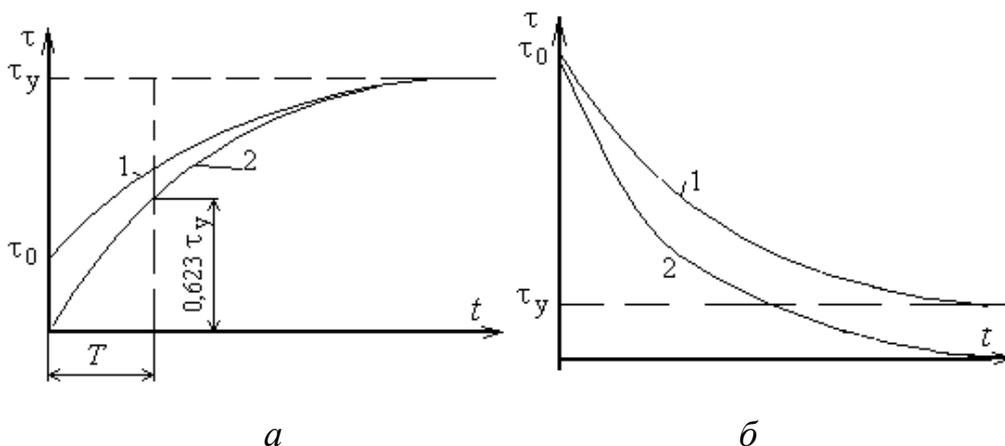


Рис. 6.10. Кривые изменения температуры:
 1 – кривая нагрева при $\tau_0 \neq 0$, 2 – кривая нагрева при $\tau_0 = 0$

Если двигатель отключить от сети, то он остывает согласно рис. 6.10, б и выражению

$$\tau = \tau_0 e^{-\frac{t}{T_{\text{ох}}}}, \quad (6)$$

где $T_{\text{ох}}$ – постоянная времени охлаждения, $T_{\text{ох}} = \frac{T_{\text{н}}}{\beta_0}$,

τ_0 – начальная разность температур двигателя и окружающей среды в момент снятия нагрева;

β_0 – коэффициент ухудшения охлаждения при неподвижном потоке,

$\beta_0 = 1$ для двигателей с независимой вентиляцией; $\beta_0 = 0,95 \div 0,98$ без принудительного охлаждения;

$\beta_0 = 0,45 \div 0,55$ для самовентилируемых двигателей.

Постоянную времени нагревания можно определить, если рассмотреть работу двигателя в кратковременном режиме (рис. 6.11). Температура двигателя достигает $\tau_{\text{кр}}$ за время $t_{\text{кр}}$, причем $\tau_{\text{кр}} = \tau_{\text{уст}}$.

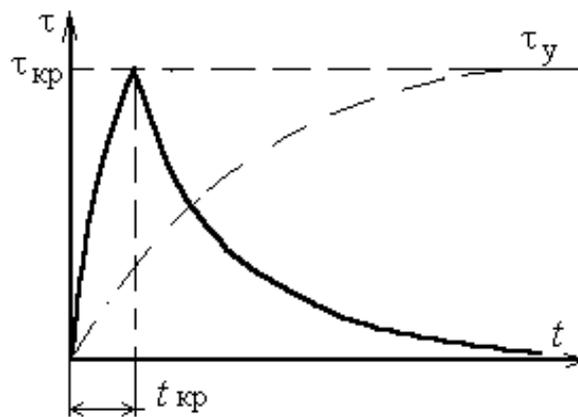


Рис. 6.11. Кривая изменения температуры двигателя при кратковременном режиме работы

Под перегрузочной способностью двигателя понимается коэффициент тепловой перегрузки, показывающий во сколько раз потери при кратковременном режиме превышают потери при длительном номинальном режиме

$$P = \frac{\sum P_{\text{кр}}}{\sum P_{\text{ном}}}.$$

Продолжительность работы в кратковременном режиме $t_{кр}$, определяется как

$$t_{кр} = T_n \ln \frac{P}{p-1},$$

где $t_{кр}$ – продолжительность работы в кратковременном режиме мин;
 T_n – постоянная времени нагрева, мин;
 p – коэффициент тепловой перегрузки.

Коэффициент тепловой перегрузки может быть также определен, как отношение квадрата токов, т. е.

$$P = \frac{\sum P_{кр}}{\sum P_{ном}} = \frac{I_{кр}^2 R}{I_{ном}^2 R} = \left(\frac{I_{кр}}{I_{ном}} \right)^2.$$

Это справедливо, если $P_{кр}$ не на много отличается от $P_{ном}$, так как предполагается, что КПД практически не изменяется.

Промышленность выпускает специальные электрические двигатели для работы в кратковременном режиме на длительность 15, 30, 60 мин.

Постоянная времени нагревания:

1) при длительном режиме $P_n = 35$ кВт и полные потери $\Delta p_{ном} = 5,7$ кВт;

2) выберем стандартное время кратковременной работы $t_{кр} = 60$ мин, тогда $P_{кр} = P_{1max} = 70$ кВт, и полные потери $\Delta p_{кр} = 12 + 2,7 = 14,7$ кВт;

3) определим коэффициент тепловой перегрузки

$$p = \frac{\sum P_{кр}}{\sum P_{ном}} = \frac{14,2}{5,7} = 2,5;$$

4) постоянная времени нагрева двигателя

$$T_n = \frac{t_{кр}}{\ln \frac{p}{p-1}} = \frac{60}{\ln \frac{2,5}{1,5}} = \frac{60}{0,5} = 120 \text{ мин};$$

5) время достижения максимальной температуры перегрева для аperiodического процесса $t_y = (3 \div 4) \cdot T_n = (6 \div 8)$ ч, т. е. для достижения максимальной температуры перегрева двигатель должен непрерывно работать (6 ÷ 8) час., что практически не допускается, поэтому перегрева двигателя не будет.

Постоянная времени охлаждения

$$T_{\text{охл}} = \frac{T_{\text{н}}}{\beta_0}, \text{ при } \beta_0 = 1 \text{ для двигателей с независимой вентиляцией}$$

$$T_{\text{охл}} = T_{\text{н}} = 120 \text{ мин.}$$

Построим кривые нагрева и охлаждения для длительного и кратковременного режимов по выражению (2) и (3) при $\tau_0 = 30$ °С, задаваясь полным временем по оси абсцисс 6 часов и шагом в 1 час.

По оси ординат максимальная температура нагрева $\tau_{\text{кр}} = \tau_{\text{уст}} = 155$ °С (табл. 6.3) для класса изоляции *H* (по указанию).

Таблица 6.3

Классы изоляции

Класс изоляции обмоток	A	E	B	H	C
Допустимая температура перегрева	105	120	130	150	200

Построение естественных механических характеристик по каталожным данным [2].

Естественную механическую $\omega = f(M)$ и электромеханическую $\omega = f(I)$ характеристики строим по двум точкам: точке, соответствующей номинальному режиму и точке идеального холостого хода:

1) номинальная частота вращения якоря

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{ном}}}{30} = \frac{3,14 \cdot 579}{30} = 60,6 \text{ рад/с;}$$

2) номинальный момент вращения (по п. 2)

$$M_{\text{ном}} = 577,29 \text{ Н} \cdot \text{м;}$$

3) полное сопротивление цепи якоря

$R_{\text{я}\Sigma} = 1,25r_{\text{я}75^\circ\text{C}}$ с учетом выходного сопротивления источника питания и соединительных проводов составляет

$$R_{\text{я}\Sigma} = 1,25 \cdot 0,06 = 0,075 \text{ Ом;}$$

4) номинальная ЭДС вращения якоря

$$E_{\text{н}} = U_{\text{н}} - \Delta U_{\text{я}} = U_{\text{н}} - I_{\text{н}} \cdot R_{\text{я}\Sigma} = 220 - 185 \cdot 0,075 = 206,125 \text{ В;}$$

5) частота вращения идеального холостого хода при номинальном напряжении

$$\omega_0 = \frac{U_H \cdot \omega_{\text{НОМ}}}{E_H} = \frac{220 \cdot 60,6}{206,125} = 64,7 \text{ рад/сек};$$

6) коэффициент ЭДС двигателя

$$c_H = \frac{E_H}{\omega_{\text{НОМ}}} = \frac{206,125}{60,6} = 3,4 \text{ Вc};$$

7) номинальный электрический момент

$$M_{\text{эл}} = c_H I_H = 3,4 \cdot 185 = 629 \text{ Нм};$$

8) момент холостого хода

$$M_{\text{ХХ}} = M_{\text{ЭН}} - M_H = 629 - 577,29 = 51,71 \text{ Нм};$$

9) скорость реального холостого хода

$$\omega_{\text{ХХ}} = \frac{U_H}{c_{\text{НОМ}}} - M_{\text{ХХ}} \frac{R_{\text{я}\Sigma}}{c_H^2} = \frac{220}{3,4} - 51,71 \frac{0,075}{3,4^2} = 223,4 - 0,33 \approx 223 \text{ рад/с};$$

10) уравнения механических характеристик двигателя:

– электромеханическая характеристика $\omega = \frac{U_{\text{НОМ}}}{c_H} - \frac{R_{\text{я}\Sigma}}{c_H} I_{\text{НОМ}}$,

– механическая характеристика $\omega = \frac{U_{\text{НОМ}}}{c_{\text{НОМ}}} - \frac{R_{\text{я}\Sigma}}{c_{\text{НОМ}}^2} M_{\text{НОМ}}$.

Для точки номинального режима

$$\omega_{\text{НОМ}} \rightarrow M_{\text{НОМ}}; \omega_{\text{НОМ}} \rightarrow I_{\text{НОМ}};$$

для точки идеального холостого хода

$$M = 0 \rightarrow \omega_0 \text{ и } I_{\text{НОМ}} = 0 \rightarrow \omega_0.$$

Естественные электромеханическую и механическую характеристики строим на миллиметровке формата А4.

11) рассчитаем жесткость механической характеристики и перепад скорости

$$\beta_{\omega} = \frac{M_0 - M_{\text{НОМ}}}{\omega_0 - \omega_{\text{НОМ}}}, \quad \Delta\omega = \frac{\omega_0 - \omega_{\text{НОМ}}}{\omega_0}.$$

Расчет сопротивлений пусковых и тормозных резисторов

1. Согласно схеме пуска с двумя ступенями пускового реостата (рис. 6.12, а) построим пусковую диаграмму и определим сопротивления пусковых резисторов.

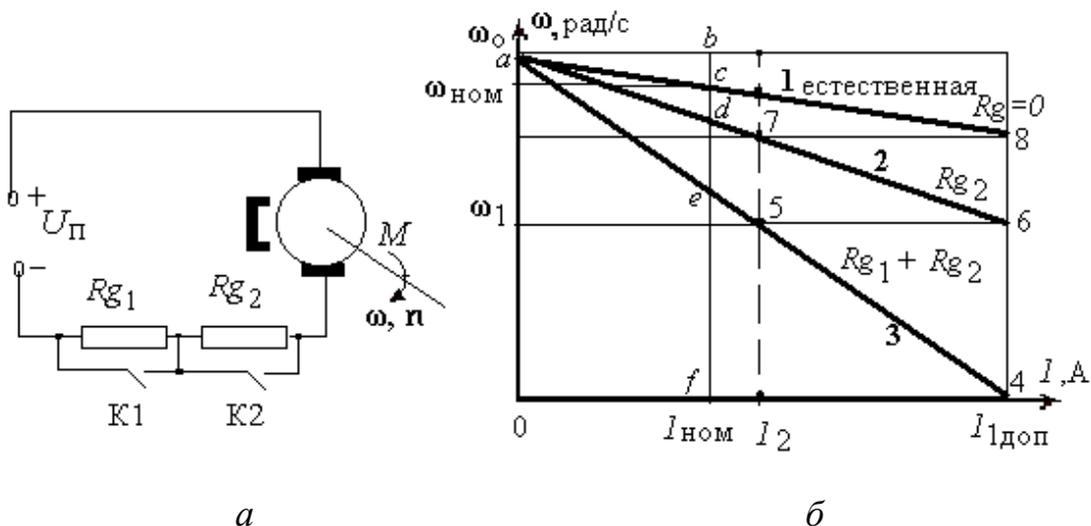


Рис. 6.12. Расчет и построение пусковых характеристик ДПТ НВ

Допустимый ток при пуске $I_{\text{п}} = (3 \div 5) I_{\text{ном}}$, примем $I_{\text{п}} = 3 \cdot I_{\text{н}} = 3 \cdot 185 = 555 \text{ А} = I_{\text{доп}}$.

2. На графике естественной электромеханической характеристики $\omega = f(I)$ (рис. 6.12, б) проведем вертикальную линию, соответствующую абсциссе $I_1 = I_{\text{доп}} = 555 \text{ А}$.

3. Через точки *a* ($\omega_0, I = 0$) и *4* ($\omega = 0, I = I_{\text{н}}$) проводим искусственную (реостатную) характеристику *3*, соответствующую включению в цепь якоря обеих секций пускового резистора $R_{\text{г}1}$ и $R_{\text{г}2}$ (рис. 6.12, а).

4. Определяем ток переключения I_2 из расчета, что при пуске под нагрузкой он должен на 10–20% превосходить номинальный ток якоря, т. е. $I_2 = (1,1 - 1,2) I_1$. Проводим вертикальную линию, соответствующую I_2 .

5. Через точку *5*, соответствующую пересечению этой линии с характеристикой *2*, проводим горизонтальную линию до пересечения в точку *б* с вертикалью I_1 .

6. Через т. *a* и т. *б* проводим следующую реостатную прямую *3* и получаем т. *7* при пересечении с вертикалью I_2 . Проводим горизонтальную прямую до вертикали I_1 и получаем т. *8* пересечения с естественной характеристикой *1*.

Для точного совпадения точек *5*, *6*, *7*, *8* на вертикали с абсциссами I_1 и I_2 проводят подбор величины тока I_2 .

В рассматриваемом случае для графического построения выбраны две секции пускового резистора Rg_1 и Rg_2 . Сумма сопротивлений секций равна общему сопротивлению пускового реостата.

Определяем масштаб сопротивления

$$R_{\text{НОМ}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{I_{\text{НОМ}}} = \frac{220}{185} = 1,19 \text{ Ом},$$

соответствующее отрезку ef в мм, тогда масштабный коэффициент $m_R = R_{\text{НОМ}}(ef)$.

Сопротивлению первой ступени R_1 (сопротивление якоря с двумя секциями пускового реостата) соответствует отрезок ve , мм, т. е. $R_1 = m_R ve$, Ом, второй ступени (сопротивление якоря с одной секцией секцией пускового реостата) – $R_2 = m_R bd$, Ом.

Сопротивление первой секции пускового реостата, которому соответствует отрезок de , мм равно

$$Rg_1 = m_R de, \text{ Ом.}$$

Сопротивление второй секции пускового реостата, которому соответствует отрезок cd , мм равно

$$Rg_2 = m_R cd, \text{ Ом.}$$

Сопротивление якоря

$$R_{\text{я}} = m_R bc, \text{ Ом.}$$

Полное сопротивление якорной цепи

$$Rg = R_{\text{я}} + Rg_1 + Rg_2.$$

7. Расчет регулировочных резисторов ДПТ НВ в переходных режимах и торможении аналогичен приведенному выше [2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев Е. Ф. Расчет и проектирование электрических машин постоянного тока малой мощности: учеб.-метод. пособие по курсовому проектированию. Пермь, 2000. 72 с.
2. Дмитриев В. Н. Проектирование и исследование асинхронных двигателей малой мощности: учеб. пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2013. URL: <http://lib.ulstu.ru/venec/disk/2013/Dmitriev.pdf>
3. Алиев И. И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию. М.: Радиософт, 2010. 384 с.
4. Москаленко В. В. Автоматизированный электропривод. М.: Высш. шк., 2009. 368 с.
5. Онищенко Г. Б. Электрический привод: учебник. Академия, 2006. 312 с.