



Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Автоматизированный электропривод»

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к контрольным работам
по одноименной дисциплине
для студентов специальности 1-53 01 05
«Автоматизированные электроприводы»
заочной формы обучения**

Электронный аналог печатного издания

Гомель 2007

УДК 62-83(075.8)
ББК 31.291я73
Т33

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
факультета автоматизированных и информационных систем
ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 7 от 13.03.2006 г.)*

Автор-составитель: *С. И. Захаренко*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. «Промышленная электроника»
ГГТУ им. П. О. Сухого *В. А. Карпов*

Т33

Теория электропривода : метод. указания к контрол. работам по одноим. дисциплине для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» заоч. формы обучения / авт.-сост. С. И. Захаренко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2007. – 40 с.– Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://gstu.local/lib>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-420-586-1.

Методические указания содержат программу курса «Теория электропривода», вопросы для проверки усвоения материала, задания к контрольным работам и указания по их выполнению.

Для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» заочной формы обучения.

УДК 62-83(075.8)
ББК 31.291я73

ISBN 978-985-420-586-1

© Захаренко С. И., составление, 2007
© Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого», 2007

Введение

При изучении курса «Теория электропривода» студенты знакомятся с физическими процессами, протекающими в блоках устройств электропривода, с теоретическими положениями, лежащими в основе науки «Электропривод» и позволяющими проводить расчет, проектирование и решать практические задачи эксплуатации систем электроприводов в различных отраслях промышленности.

Изучение курса «Теория электропривода» в системе заочного обучения требует твердого знания таких предшествующих этому курсу дисциплин, как «Высшая математика», «Теоретические основы электротехники», «Электрические машины». Основная форма изучения материала – самостоятельная работа с учебной и научно-технической литературой. Выполнение и проверка контрольных работ позволяет студенту и преподавателю проверить, как студент осваивает предмет и помочь ему в этом.

Работать с учебниками, учебными пособиями и технической литературой студент-заочник должен систематически в соответствии с приведенной программой курса. Особое внимание рекомендуется обратить на вопросы, сформированные после каждого раздела программы. При работе с литературой целесообразно вести конспект, а ответы на вопросы формулировать не только устно, но и кратко записывать.

1. Программа дисциплины «Теория электропривода»

1.1. Введение

Сущность и назначение электропривода. Структура электропривода и характеристика составляющих его элементов. Направления развития электропривода.

Контрольные вопросы

1. Основная задача устройства электропривод.
2. Для каких целей служат обратные связи в электроприводе?
3. В чем заключаются задачи силовой и управляющей частей устройства управления?

1.2. Механика электропривода

Приведение моментов, сил и жесткостей к валу электродвигателя. Учет потерь в передачах. Расчетные схемы двух- и одномассовых механических частей электропривода. Типовые нагрузки механической части электропривода.

Уравнение движения электропривода. Уравнение движения при нелинейных механических связях. Режимы работы электропривода.

Механическая часть как объект управления. Структурные схемы, передаточные функции, частотные характеристики.

Механические переходные процессы в одно- и двухмассовой системах электропривода.

Контрольные вопросы

1. Какие законы лежат в основе приведения моментов инерции и масс, жесткости механических связей?
2. В чем отличие активных и реактивных, консервативных и диссипативных моментов?
3. Чем характеризуются статические и динамические режимы работы электропривода?
4. В каких режимах работает электропривод с нелинейными механическими связями?
5. Как влияют на динамические характеристики механической части соотношение моментов инерции двигателя и исполнительного механизма, жесткость механической связи?
6. Отличие механических переходных процессов с постоянными моментами в одномассовой схеме при активном и при реактивном статических моментах.
7. Законы движения масс при переходном процессе в двухмассовой механической части.

1.3. Основы теории обобщенной электрической машины

Обобщенная электрическая машина и описание динамических процессов в ней. Электромеханическая связь в электромеханическом преобразователе. Системы координат обобщенной электрической машины. Координатные преобразования переменных. Ограничения, накладываемые на процессы преобразования энергии.

Контрольные вопросы

1. Условия адекватности обобщенной электрической машины реальному электродвигателю.
2. За счет чего осуществляется влияние механических переменных на электрические?
3. Какую частоту имеют переменные, преобразованные к координатным системам X , Y и d , q ?
4. Какие ограничения накладываются на процессы преобразования энергии в двигателях постоянного тока?

1.4. Электромеханические свойства двигателей

Обобщенная модель машин постоянного тока и вентильного двигателя.

Естественные и искусственные характеристики двигателя постоянного тока с независимым возбуждением. Каналы управления, частотные характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения. Электрическое торможение.

Статические характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения. Естественные и искусственные характеристики. Динамическое торможение с самовозбуждением.

Особенности характеристик двигателя смешанного возбуждения.

Обобщенная модель асинхронной машины. Естественные и искусственные характеристики при питании от сети. Способы пуска и торможения. Линеаризация характеристик. Передаточная функция.

Обобщенная модель синхронного двигателя. Угловая характеристика и ее линеаризация. Пуск и торможение. Линеаризованная структура и передаточная функция.

Контрольные вопросы

1. Уравнения механической характеристики обобщенной модели машины постоянного тока.
2. Динамическая механическая характеристика двигателя постоянного тока независимого возбуждения.

3. Искусственные характеристики двигателей постоянного тока при:
 - введении добавочного сопротивления в цепь якоря;
 - изменении напряжения;
 - изменении магнитного потока.
4. Реализация и характеристики двигателей постоянного тока в тормозных режимах.
5. Уравнения механической характеристики модели асинхронного двигателя.
6. Естественные электромеханическая и механическая характеристики асинхронного двигателя.
7. Зависимость координат критической точки механической характеристики асинхронного двигателя от его параметров.
8. Искусственные характеристики асинхронного двигателя при изменении:
 - сопротивления цепей статора, ротора;
 - числа пар полюсов;
 - статорного напряжения и частоты.
9. Способы торможения асинхронного двигателя.
10. Угловая и механические характеристики синхронного двигателя.

1.5. Разомкнутая электромеханическая система как объект управления

Уравнения, описывающие динамику разомкнутых систем постоянного и переменного тока, линеаризованные структурные схемы и их параметры. Обобщенная система с линейной механической характеристикой.

Динамические свойства обобщенной разомкнутой электромеханической системы с жесткими механическими связями при разных соотношениях постоянных времени. Динамические свойства разомкнутой системы при учете упругих связей.

Контрольные вопросы

1. Уравнения электромеханической системы с двигателями переменного тока.
2. Структурная схема и передаточные функции обобщенной электромеханической системы при жестких механических связях.
3. Переходные характеристики электромеханической системы при различных значениях соотношения постоянных времени.
4. Демпфирующая способность электропривода.

1.6. Электромеханические переходные процессы

Переходные процессы в электромеханической системе при постоянных моментах. Переходные процессы в электроприводе с линейной механической характеристикой при линейном нарастании управляющего воздействия.

Контрольные вопросы

Дифференциальные уравнения и их аналитические решения для скорости и момента при переходных процессах с постоянными моментами (M_c , J) и управляющем воздействии.

Переходной процесс при скачке задания.

Влияние на переходные процессы характера изменения во времени управляющего воздействия.

1.7. Регулирование координат электропривода

Сущность регулирования координат электропривода. Способы регулирования и их основные показатели.

Системы регулируемых электроприводов: Г-Д, ТП-Д, ПЧ-АД, вентильный двигатель. Характеристики элементов и их параметры. Структурные схемы систем. Обобщенная система «Управляемый преобразователь – двигатель» (УП-Д).

Контрольные вопросы

1. Схемы систем регулируемых электроприводов.
2. Регулировочные характеристики и коэффициенты передач основных элементов систем.

1.8. Регулирование момента (тока)

Реостатное регулирование момента (тока). Система «Источник тока-двигатель» (ИТ-Д). Использование отрицательной обратной связи по току в системе УП-Д. Компенсация возмущения с помощью обратной связи по скорости.

Контрольные вопросы

1. Абсолютная и относительная погрешность при реостатном регулировании.
2. Схемная реализация и характеристики системы ИТ-Д на постоянном токе.
3. Характеристики систем автоматического регулирования момента (тока) при различных значениях коэффициентов передач обратных связей по току и скорости.

1.9. Регулирование скорости

Реостатное регулирование, характеристики электропривода при регулировании напряжением на цепи якоря двигателя постоянного тока.

Регулирование скорости в системе УП-Д (Г-Д, ТП-Д). Регулирование скорости изменением магнитного потока. Двухзонное регулирование.

Статические характеристики и особенности анализа динамики системы электропривода с изменяемой структурой.

Параметрические способы регулирования скорости асинхронного двигателя. Законы частотного регулирования. Принцип ориентирования по полю.

Регулирование скорости в каскадных схемах. Асинхронно-вентильный каскад.

Многодвигательный электропривод. Выравнивание нагрузки и регулирование скорости.

Контрольные вопросы

1. Погрешности, статизм характеристик, диапазон при реостатном регулировании и при изменении напряжения.
2. Характеристики электропривода при автоматическом регулировании скорости в системе УП-Д.
3. Схема и уравнения обратных связей в системе электропривода с изменяемой структурой.
4. Дифференциальные уравнения и корни характеристических уравнений для разных зон статической характеристики системы с изменяемой структурой.
5. Характеристики асинхронного двигателя для различных способов параметрического регулирования.
6. Схема и характеристики системы с плавным реостатным регулированием скорости асинхронного двигателя с фазным ротором.
7. Управление какими переменными электропривода можно осуществлять при частотном регулировании?
8. Почему при частотном регулировании необходимо изменять напряжение?
9. Как реализуется обратная связь по магнитному потоку без его непосредственного измерения?

1.10. Энергетика электропривода

Потери мощности и энергии в статических и переходных режимах. Нагрев и охлаждение двигателей. Нагрузочные диаграммы. Номинальные режимы двигателей.

Выбор и проверка по нагреву методами средних потерь и эквивалентных величин. Проверка двигателей, работающих в продолжительном, кратковременном и повторно-кратковременном режимах.

Контрольные вопросы

1. Как определяются постоянные и переменные потери мощности через токи для различных типов двигателей?
2. Уравнение теплового баланса.
3. Допустимая рабочая температура для классов изоляции *B* и *H*?
4. Учет ухудшения условий охлаждения при изменении скорости и останове двигателей.
5. Чем отличаются нагрузочные диаграммы двигателя и исполнительного механизма?
6. Какими параметрами характеризуются режимы *S2* и *S3*?
7. Какие ограничения накладываются на применение методов проверки двигателей по нагреву?
8. Особенности выбора двигателя с номинальным режимом *S1* для работы в кратковременном или повторно-кратковременном режимах?

2. Контрольные работы

2.1. Общие методические рекомендации

К выполнению контрольных работ следует приступать после изучения соответствующего теоретического материала. Контрольная работа состоит из вопросов и задач.

Вариант, подлежащий решению, определяется по двум последним цифрам номера студента. Данные из таблиц 1.1, 2.1 и 1.3 выбираются по последней цифре, а из таблиц 1.2 и 1.4 – по предпоследней.

Ответы на вопросы должны быть по возможности краткими, но исчерпывающими, и показывать понимание студентом существа вопроса. Ответы формального характера, представляющие собой переписанный из книг или у коллег текст, и показывающие несамостоятельную работу студента, могут быть не зачтены.

Ответы и решения задач должны иллюстрироваться принципиальными схемами и графиками, которые должны быть выполнены тщательно, снабжены необходимыми обозначениями и поясняющими надписями. При использовании формул нужно указывать источник, из которого взята формула, а также пояснять буквенные обозначения с указанием размерностей величин.

При выполнении контрольных работ должны быть соблюдены следующие обязательные условия:

- В начале работы должен быть переписан первый вопрос и затем приведен ответ на него. В такой же последовательности излагаются остальные вопросы.
- После формулировки текста задачи нужно указать номер варианта, увязав его с личным шифром, и привести исходные данные.
- Тестовый и расчетный материал должен иметь необходимые формулы и пояснения.
- Графические построения должны быть сделаны с помощью чертежных инструментов на миллиметровой бумаге и с указанием масштабов.

При многотипных и многозначных вычислениях все расчетные данные должны быть помещены в сводные таблицы с обязательным указанием размерности.

При расчете графиков по уравнениям требуется выполнить полный числовой расчет минимум для двух–трех точек, а остальные привести в таблице исходных, промежуточных и итоговых данных.

Арифметическая правильность вычисления является обязательным условием для зачета работы. После решения каждой задачи следует подытожить и по возможности проанализировать полученные результаты.

2.2. Контрольная работа № 1

Для выполнения контрольной работы необходимо изучить материал, изложенный в разделах 1.1–1.4; 2.1–2.2; 3.2–3.4; 3.10; 3.11 [1] или в 1.2–1.4; 2.1; 2.2; 3.1; 3.3 [2], в 1.2–1.4; 2.1; 2.2; 3.2–3.4; 3.10 [3], в 1.5–1.8; 2.3–2.6; 4.2–4.8 [4].

Теоретические вопросы

1. Приведите соотношения, используемые для приведения статического момента и момента инерции к скорости электродвигателя (ЭД). На каком основании они получены?
2. Запишите виды энергетических режимов электропривода и их признаки.
3. Приведите принимаемые допущения при использовании модели в виде обобщенной электрической машины.

Задача 1-1

Для ЭП рабочей машины используется ЭД постоянного тока независимого возбуждения исполнения 2П... ГУХЛ4. В соответствии с данными, приведенными в таблицах 1.1 и 1.2, определить и построить:

1. Естественные электромеханическую и механическую характеристики.
2. Искусственные электромеханические и механические характеристики при введении добавочного сопротивления в цепь якоря ($R_{доб}$) и при изменении напряжения на якоре.
3. Величину добавочного сопротивления и напряжения на якоре.
4. Рассчитать статизмы искусственных характеристик и относительные потери мощности при работе ЭД на естественных и искусственных характеристиках.
5. Проанализировать способы регулирования.

Таблица 1.1

| Данные | Вариант | | | | | | | | | |
|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 0 |
| Тип ЭД | 2ПН180МГ | 2ПН180ЛГ | 2ПН200МГ | 2ПН200ЛГ | 2ПН225МГ | 2ПН225ЛГ | 2ПН200МГ | 2ПФ225МГ | 2ПН225ЛГ | 2ПФ250МГ |
| P_H , кВт | 15 | 18,5 | 22 | 30 | 37 | 45 | 13 | 22 | 30 | 37 |
| U_H , В | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 |
| n_H , об/мин | 1500 | 1500 | 1500 | 1500 | 1500 | 1500 | 1120 | 1000 | 1060 | 1060 |

12

Таблица 1.2

| Данные | Вариант | | | | | | | | | |
|--------|---------|-----|------|-----|------|-----|-----|----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 0 |
| D | 2 | 3 | 5 | 7 | 10 | 12 | 15 | 20 | 25 | 30 |
| K | 0,6 | 0,7 | 0,75 | 0,8 | 0,85 | 0,8 | 0,9 | 1 | 1,1 | 1,2 |

Методические указания к задаче 1-1

1. Остальные необходимые данные ЭД выбираются по справочнику [5].

2. Сопротивление якорной цепи должно быть приведено к расчетной допустимой температуре для соответствующего класса изоляции:

$$R_{\text{яд}} = (R_{\text{оя}} + R_{\text{дп}}) \cdot (1 + \alpha \Delta t^\circ),$$

где $R_{\text{оя}}$, $R_{\text{дп}}$ – сопротивления якорной обмотки и дополнительных полюсов при температуре, указанной в справочнике;

α – температурный коэффициент сопротивления для меди;

Δt – разность температур между расчетной допустимой и указанной в справочнике, в градусах Цельсия (расчетная температура 120 °С – класс *B*, 140 °С – класс *F*).

3. Расчет произведения конструктивной постоянной на магнитный поток производится по выражению электромеханической характеристики $c = k \cdot \Phi$ для точки номинального режима, учитывая, что номинальный ток

$$I_{\text{ян}} = \frac{P_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}} \cdot U_{\text{н}}},$$

где $P_{\text{н}}$, $U_{\text{н}}$ – номинальные значения мощности на валу и напряжения якорной цепи;

$\eta_{\text{н}}$ – номинальное значение КПД.

4. Максимальная скорость $\omega_{\text{сmax}} = \omega_{\text{max}}$ соответствует работе двигателя на естественной характеристике при нагрузке $M_c(I_c)$. Искусственные характеристики строятся графически в координатной системе естественных и должны проходить через рабочую точку $M_c(I_c)$, $\omega_{\text{сmax}} = \omega_{\text{max}}$.

5. Статизм характеристик определяется как:

$$S_x = \frac{\omega_0 - \omega_{\text{н}}}{\omega_0},$$

где ω_0 , $\omega_{\text{н}}$ – скорости идеального холостого хода и соответствующая номинальной нагрузке двигателя $M_{\text{н}}(I_{\text{н}})$.

6. Потребляемая мощность и потери определяются при работе ЭД под нагрузкой:

$$P_1 = U \cdot I_c \quad \text{и} \quad \Delta p = I_c^2 \cdot R_{\text{я}},$$

где $R_{я}$ – полное сопротивление якорной цепи. Относительные потери определяются соотношением

$$\Delta p^* = \frac{\Delta p}{P_1}.$$

Задача 1-2

В рабочей машине могут применяться асинхронные ЭД с короткозамкнутым ротором (АД КЗ) исполнения 4А...УЗ или с фазным ротором (АД ФР) исполнения 4АНК...УЗ. Напряжение сети 380 В.

Используя данные таблиц 1.2 и 1.3, определить и построить:

1. Естественные электромеханические $\omega(I_2)$ и механические $\omega(M)$ характеристики для выбранных ЭД.
2. Искусственные характеристики:
 - для АД КЗ при изменении частоты тока статора f_1 ;
 - для АД ФР при введении добавочного сопротивления в цепь ротора $R_{доб}$;
3. Значения частоты и напряжения для АД КЗ и $R_{доб}$ для АД ФР.
4. По полученным значениям напряжения и частоты в п. 3 рассчитать искусственную механическую характеристику для АД КЗ сравнить с построенной графически.
5. Скольжение, соответствующее номинальной нагрузке ЭД на естественных и искусственных характеристиках. Потери мощности в роторной цепи при работе на искусственных характеристиках.

Таблица 1.3

| Исполнение ЭД | Вариант | | | | | | | | | |
|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 0 |
| АД КЗ | 4А160S4 | 4А160M4 | 4А180S4 | 4А180M4 | 4А200M4 | 4А200L4 | 4А160M6 | 4А200M6 | 4А200L6 | 4А225M6 |
| АД ФР | 4АНК160S4 | 4АНК160M4 | 4АНК180S4 | 4АНК180M4 | 4АНК200M4 | 4АНК200L4 | 4АНК180S6 | 4АНК200M6 | 4АНК200L6 | 4АНК225M6 |

| Кратность момента инерции | Вариант | | | | | | | | | |
|-------------------------------|---------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 0 |
| $J_{\text{мех}}/J_{\text{д}}$ | 0,4 | 0,5 | 0,3 | 0,2 | 0,15 | 0,4 | 0,6 | 0,3 | 0,5 | 0,2 |

Методические указания к задаче 1-2

1. Параметры ЭД выбираются по справочнику [6]. Следует учесть, что значения сопротивлений обмоток приведены в относительных единицах, поэтому требуется пересчет в абсолютные величины по формулам, приведенным в справочнике.

2. Расчет механической характеристики производится по полной формуле Клосса (с учетом сопротивления обмотки статора). Она хорошо аппроксимирует устойчивый участок характеристики ($|S| \leq S_k$). Уточнение вида для АД КЗ $S \geq S_k$ производят графически по значениям пускового и минимального моментов. Пример показан на рис. 1.1.

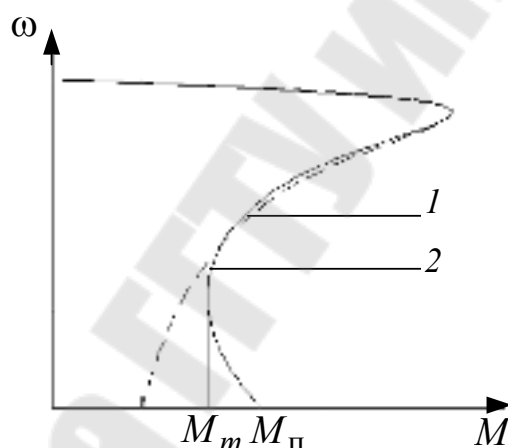


Рис. 1.1. Коррекция вида механической характеристики:

1 – рассчитанная характеристика; 2 – откорректированная характеристика

Для АД ФР параметры роторной цепи при $S \geq S_k$ практически не изменяются и поэтому коррекция не требуется.

3. Искусственные механические характеристики, как и в задаче 1-1, строят через рабочую точку с координатами $M_c, \omega_{\text{сmin}}$. Определение параметров для расчетных характеристик производится следующим образом: при частотном регулировании для АД КЗ в соответствии с определением М. П. Костенко принимается закон:

$$\frac{U_1}{f_1} = \text{const},$$

т. е. напряжение на статоре изменяется пропорционально частоте. Считая в первом приближении, что наклон характеристик не изменяется, получают:

$$\omega_{0\min} = \frac{\omega_{c\max}}{D} + \Delta\omega_c,$$

где $\omega_{0\min}$ – синхронная скорость при пониженной частоте;

$\Delta\omega_c$ – отклонение скорости ротора от синхронной при работе ЭД под нагрузкой на естественной характеристике.

Для АД ФР при реостатном регулировании построение искусственных характеристик производится с учетом, что скольжение пропорционально цепи ротора:

$$\frac{S_e}{R'_2} = \frac{S_{и}}{R'_2 + R'_{доб}},$$

где S_e , $S_{и}$ – скольжение для естественной и искусственной характеристик;

R'_2 , $R'_{доб}$ – значение сопротивления обмотки ротора и добавочного резистора.

Искусственные электромеханические характеристики строятся после определения частоты напряжения и добавочного сопротивления в одной координатной системе с графически определенными характеристиками.

2.3. Контрольная работа № 2

Для выполнения контрольной работы необходимо изучить материал, изложенный в разделах 4.1–4.5; 5.1–5.6; 6.1–6.4; 7.1–7.2; 7.5–7.10; 9.1–9.9 [1] или в 4.3; 5.1; 6.1; 6.2; 7.1–7.3; 8.1–8.3; 8.6; 9.1; 14.1–14.8 [2], в разделах 4.1–4.3; 5.1–5.3; 7.1–7.8; 8.1–8.5; 8.9–8.10 [3].

Теоретические вопросы

1. Приведите показатели регулирования координат ЭП.
2. Опишите способы регулирования момента и тока. Дайте их сравнительную оценку по точности и по энергопотреблению.
3. Приведите зависимости $\omega(t)$ и $M(t)$ для переходных процессов при $\omega_0 = \text{const}$ и $M_C = \text{const}$ в обобщенной электромеханической

системе с $m < 4$. Запишите аналитические решения для процесса прямого пуска при условии: $\omega(0) = 0$, реактивный момент $M_C \neq 0$.

4. Приведите законы частотного регулирования АД и соответствующие им механические характеристики. 5. Приведите составляющие потерь энергии в переходных процессах разомкнутых ЭП.

6. Как проводится проверка ЭД с $S3$ при параметрах реального режима (ПВ, $t_{ц}$), отличающихся от нормированных значений и при многоучастковой диаграмме с разными скоростями.

Задача 2-1

Для ЭП рабочей машины применяется система ТП-Д. С помощью данных, полученных при выполнении контрольной работы № 1 и представленных в таблице 1.4, необходимо:

1. Представить силовую схему системы ЭП с трехфазным мостовым преобразователем трансформаторного исполнения.

2. Выбрать трансформатор и рассчитать параметры якорной цепи.

3. Построить электромеханические и механические характеристики системы ТП-Д:

– при $E_{П} = U_{Н}$,

где $E_{П}$ – внутренняя ЭДС преобразователя;

$U_{Н}$ – номинальное напряжение ЭД;

– при $E_{Пmin}$ с прохождением характеристики через рабочую точку с координатами M_c, ω_{cmin} .

4. Определить статизм нижней характеристики и рассчитать коэффициент передачи отрицательной обратной связи по скорости K_{oc} для получения статизма характеристики замкнутой системы $S_{ХЗ} = 0,1$ (т. е. произвести синтез по статическим показателям).

5. Провести анализ переходных процессов (по возмущению) в разомкнутой и замкнутой системах ЭП. При этом обязательно:

– привести исходные системы уравнений для замкнутой и разомкнутой систем ЭП, дифференциальные уравнения для скорости и момента, их аналитические решения;

– построить зависимости $\omega(t)$ и $M(t)$, а также динамическую механическую характеристику (фазовую траекторию).

6. Проанализировать влияние отрицательной обратной связи по скорости на динамические свойства системы.

Таблица 2.1

| Данные | Вариант | | | | | | | | | |
|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 0 |
| Тип ЭД | 2ПН180МГ | 2ПН180ЛГ | 2ПН200МГ | 2ПН200ЛГ | 2ПН225МГ | 2ПН225ЛГ | 2ПН200МГ | 2ПФ225МГ | 2ПН225ЛГ | 2ПФ250МГ |
| P_n , кВт | 15 | 18,5 | 22 | 30 | 37 | 45 | 13 | 22 | 30 | 37 |
| U_n , В | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 |
| n_n , об/мин | 1500 | 1500 | 1500 | 1500 | 1500 | 1500 | 1120 | 1000 | 1060 | 1060 |

Методические указания к задаче 2-1

1. Трансформатор и его параметры выбираются по справочнику [7] на основе требуемых параметров преобразователя. Стандартом установлена шкала номинальных значений выпрямленного тока тиристорных преобразователей: ... 12,5 А; 25 А; 50 А; 200 А; 320 А... .

Внутренние параметры преобразователя при мостовой схеме:

$$R_{\Pi} = 2R_T + R_K \text{ и } L_{\Pi} = 2L_T,$$

где $R_K = \frac{m \cdot X_T}{2\pi}$ – коммутационное сопротивление, Ом;

$f_c = 50$ Гц – частота сети;

m – число фаз сети;

L_T – индуктивность фазы трансформатора, Гн;

R_T – активное сопротивление фазы трансформатора, Ом.

Параметры вторичной обмотки трансформатора, Ом:

$$Z_T = \frac{U_K \cdot U_{2H}}{100 \% \cdot I_{2H}}, \quad R_T = \frac{P_{K3}}{3 \cdot I_{2H}^2}, \quad X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2},$$

где U_{2H}, I_{2H} – номинальные значения фазных напряжения и тока вентильной обмотки;

$U_K(\%), P_{K3}(\text{Вт})$ – напряжение и потери мощности короткого замыкания.

Полные параметры якорной цепи при питании от преобразователя:

$$R_{я} = R_{яд} + R_{\Pi} \text{ и } L_{я} = L_{яд} + L_{\Pi},$$

где $R_{яд}, L_{яд}$ – параметры самого ЭД.

При отсутствии данных индуктивность якорной цепи ЭД рассчитывается по эмпирической формуле, Гн:

$$L_{яд} = \beta_k \cdot \frac{U_H}{p_d \cdot \omega_H \cdot I_H},$$

где p_d – число пар полюсов;

$\beta_k = 0,2$ для ЭД с компенсационной обмоткой;

$\beta_k = 0,4-0,6$ – без компенсационной обмотки (для ЭД серии 2П $\beta_k = 0,4$).

3. При синтезе САР в качестве исходных используют данные характеристик разомкнутой и требуемые показатели замкнутой систем. Так при синтезе по статическим показателям системы регулирования скорости используют погрешность регулирования или статизм

характеристик. Обозначая коэффициент передачи прямого канала воздействия, (рад/с)/В

$$K_0 = K_p \cdot K'_\Pi = \frac{\Delta\omega_0}{\Delta U_\delta},$$

а коэффициент отрицательной обратной связи по скорости, В/(рад/с)

$$K_{oc} = K_{\Gamma\Gamma} = \frac{\Delta U_{oc}}{\Delta\omega},$$

и используя статизмы характеристик разомкнутой S_{xp} и замкнутой S_{x3} систем, получаем:

$$K_C = K_0 \cdot K_{oc} = \frac{S_{xp} - S_{x3}}{S_{x3}},$$

где $K_p = \frac{\Delta U_y}{\Delta U_\delta}$ – коэффициент передачи регулятора скорости;

$K'_\Pi = \frac{\Delta\omega_0}{\Delta U_y} = \frac{\Delta E_\Pi}{\Delta U_y} \cdot \frac{\Delta\omega_0}{\Delta E_\Pi} = \frac{K_\Pi}{C}$ – коэффициент передачи преобразователя в (рад/с)/В;

$K_\Pi = \frac{\Delta E_\Pi}{\Delta U_y}$ – коэффициент передачи преобразователя по напря-

жению (при линеаризации регулировочной характеристики и напряжения сети 380 В для мостовой схемы $K_\Pi = 71$);

$K_{\Gamma\Gamma} = \frac{S_{\Gamma\Gamma}}{0,105}$ – коэффициент передачи тахогенератора при кру-

тизне его характеристики $S_{\Gamma\Gamma}$ в В/(рад/с);

U_δ, U_{oc}, U_y – напряжения ошибки системы, обратной связи по скорости и управляющее преобразователя.

4. Исходные системы уравнений составляются на основе упрощенных схем, представленных на рис. 2.1. Так как обычно $U_{oc.max} = K_{\Gamma\Gamma} \cdot \omega_{max} > 10$ В (допустимое входное напряжение операционных усилителей), то согласование напряжения задания U_{zc} и U_{oc} обеспечивается выбором резисторов для усилителя регулятора скорости (РС) и на упрощенной схеме представляется в виде узла с коэффициентом:

$$K_1 = \frac{U_{oc.max}}{U_{z.max}} \cdot \left(1 + \frac{1}{K_C}\right) = \frac{U_{oc.max}}{10} \cdot \left(1 + \frac{1}{K_C}\right).$$

Электромагнитная постоянная времени самого преобразователя принимается равной нулю ($T_{\Pi} = 0$). Статический момент изменяется скачком от $M_{c.min} = 0,5 \cdot K \cdot M_H$ до $M_c = M_H$.

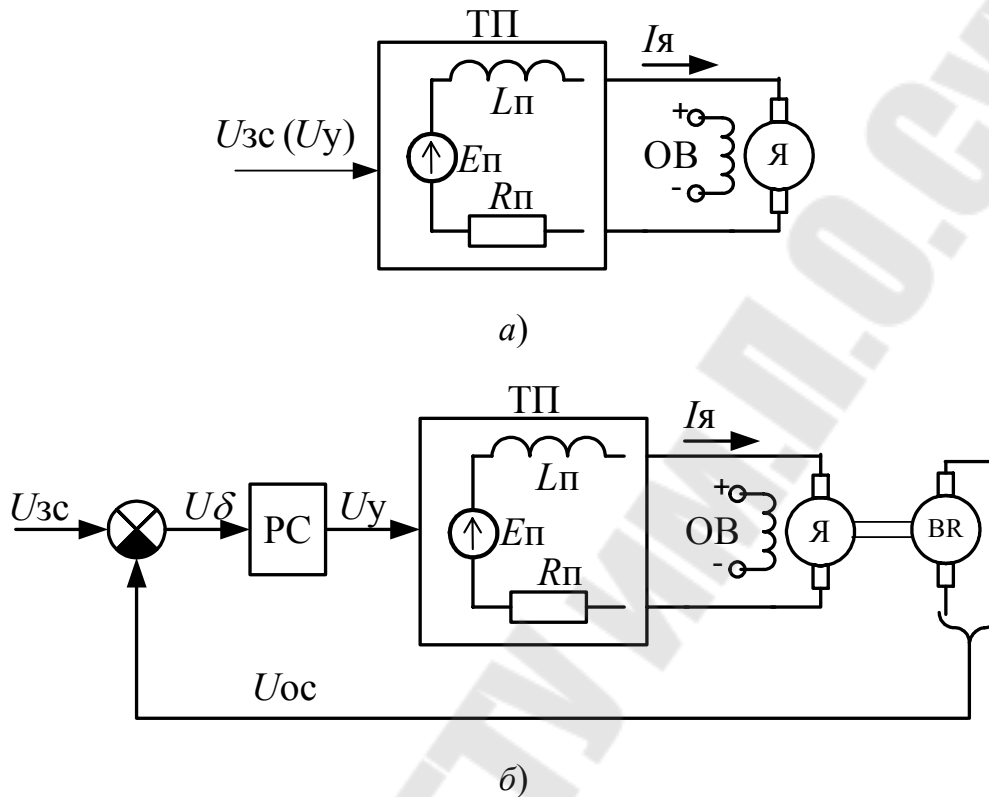


Рис. 2.1. Упрощенные схемы разомкнутой (а) и замкнутой (б) систем

3. Примеры расчета

3.1. Электропривод постоянного тока

Рассчитать и построить естественные и искусственные электро-механические и механические характеристики для двигателя 2ПФ250МГУХЛ4, а также необходимые параметры и показатели при реостатном регулировании и изменением напряжения при $M_c = 0,7 M_H$ и диапазоне регулирования $D = \frac{\Psi_{max}}{\Psi_{min}} = 8$.

Выбрать трансформатор для системы ТП-Д, рассчитать параметры, построить характеристики системы. Рассчитать параметры замкнутой системы с приведенным моментом инерции механизма $J_{мех} = 0,3J_d$ для обеспечения статизма $S_{x3} = 0,05$.

Таблица 3.1

Данные двигателя

| P_n , кВт | U_n , В | n_n , об/мин | η_n , отн. ед. | $R_{я0} + R_{дп}$ при 15 °С, Ом | J_d , кг·м ² | p_d | Класс изоляции | $S_{тг}$ В/(об/мин) |
|-------------|-----------|----------------|---------------------|---------------------------------|---------------------------|-------|----------------|---------------------|
| 55 | 220 | 1500 | 0,87 | 0,0278 | 1,22 | 2 | В | 0,033 |

Сопротивление якорной цепи ЭД после приведения к рабочей температуре:

$$R_{яд} = 0,039 \text{ Ом.}$$

Номинальные значения скорости и тока:

$$\omega_n = \frac{2\pi}{60} n_n = 157 \text{ рад/с}, \quad I_n = \frac{P_n}{\eta_n \cdot U_n} = \frac{55000}{0,87 \cdot 220} = 287 \text{ А.}$$

Произведение конструктивной постоянной двигателя на магнитный поток:

$$c = k\Phi_n = \frac{U_n - I_n R_{яд}}{\omega_n} = \frac{220 - 287 \cdot 0,039}{157} = 1,33 \text{ Вб.}$$

Скорость идеального холостого хода:

$$\omega_0 = \frac{U_n}{c} = \frac{220}{1,33} = 165 \text{ рад/с.}$$

Номинальное значение электромагнитного момента:

$$M_n = cI_n = 1,33 \cdot 287 = 382 \text{ Н·м.}$$

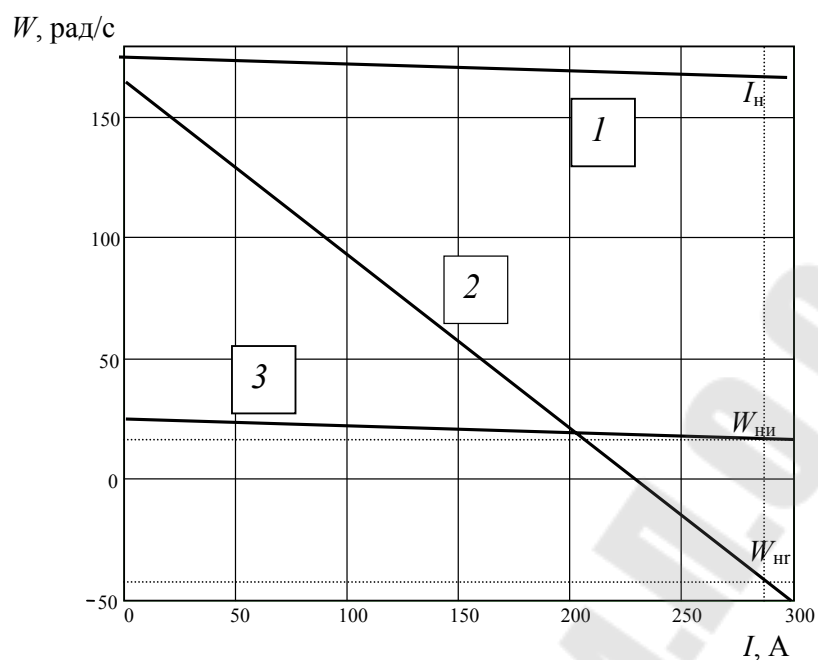
Значение момента и тока нагрузки:

$$M_c = 0,7M_n = 0,7 \cdot 376 = 267 \text{ Н·м,}$$

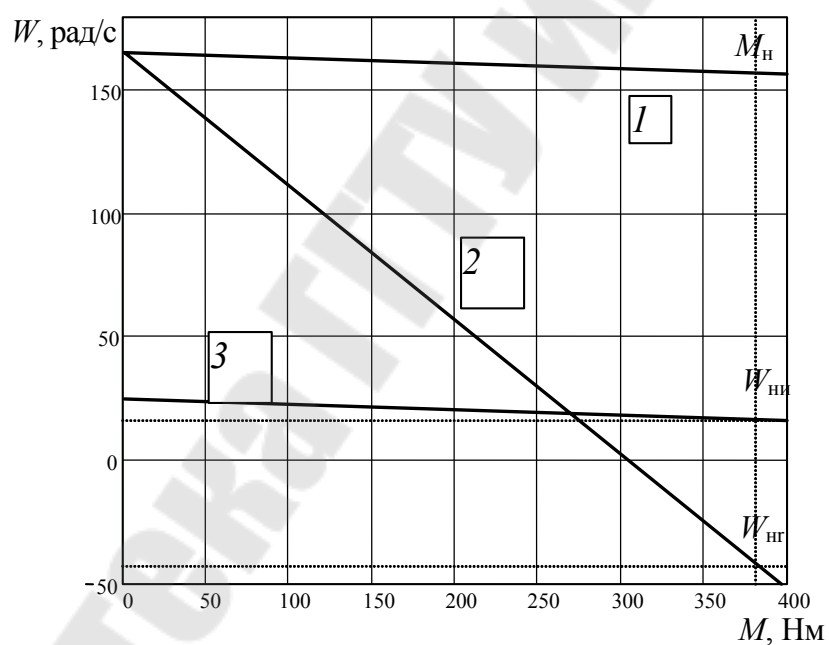
$$I_c = 0,7I_n = 0,7 \cdot 287 = 201 \text{ А.}$$

Естественные электромеханические и механические характеристики представлены на рис. 3.1. По характеристикам определяем скорость ЭД под нагрузкой:

$$\omega_{c,\max} = 160 \text{ рад/с.}$$



а)



б)

Рис. 3.1. Электромеханические (а) и механические (б) характеристики ДПТ НВ:
 1 – естественная; 2 – искусственная при реостатном регулировании;
 3 – искусственная при изменении напряжения на якорной цепи

Минимальная скорость при регулировании:

$$\omega_{c.min} = \frac{\omega_{c.max}}{D} = \frac{160}{8} = 20 \text{ рад/с.}$$

При реостатном регулировании скорость идеального холостого хода не изменяется и искусственные характеристики имеют вид 2 на рис. 3.1. Скорость на искусственной характеристике, соответствующая номинальной нагрузке:

$$\omega_{\text{нач}} = -42,5 \text{ рад/с.}$$

Статизм искусственной характеристики:

$$S_{\text{хи}} = \frac{\omega_0 - \omega_{\text{ни}}}{\omega_0} = \frac{165 - (-42,5)}{165} = 1,26.$$

Полное сопротивление якорной цепи:

$$R_{\text{я}} = \frac{U_{\text{н}} - c \cdot \omega_{\text{с.мин}}}{I_{\text{с}}} = \frac{220 - 1,33 \cdot 20}{201} = 0,962 \text{ Ом.}$$

Добавочное сопротивление в цепи якоря:

$$R_{\text{доб}} = R_{\text{я}} - R_{\text{яд}} = 0,962 - 0,039 = 0,923 \text{ Ом.}$$

При изменении напряжения на якорной цепи наклон характеристик не изменяется и отклонение скорости от скорости холостого хода остается неизменным

$$\Delta\omega_{\text{с}} = \omega_0 - \omega_{\text{с.макс}} = 165 - 160 = 5 \text{ рад/с,}$$

и теперь для искусственной характеристики

$$\omega_{0\text{и}} = \omega_{\text{с.мин}} + \Delta\omega_{\text{с}} = 20 + 5 = 25 \text{ рад/с.}$$

В результате искусственная характеристика имеет вид 3 на рис. 3.1. Скорость, соответствующая номинальной нагрузке:

$$\omega_{\text{ни}} = 17 \text{ рад/с}$$

и статизм искусственной характеристики:

$$S_{\text{хи}} = \frac{\omega_{0\text{и}} - \omega_{\text{ни}}}{\omega_{0\text{и}}} = \frac{25 - 17}{25} = 0,32.$$

Напряжение на якорной цепи (без учета падения напряжения на щеточном контакте):

$$U = \omega_{0и} \cdot c = 25 \cdot 1,33 = 33,3 \text{ В.}$$

Потребляемая мощность:

– при реостатном регулировании $P_{1р} = U_H \cdot I_c = 220 \cdot 201 = 44200 \text{ Вт};$

– при регулировании напряжением $P_{1и} = U \cdot I_c = 33,3 \cdot 201 = 6690 \text{ Вт.}$

Потери мощности:

– при реостатном регулировании

$$\Delta p_p = R_{я} \cdot I_c^2 = 0,962 \cdot 201^2 = 38900 \text{ Вт,}$$

– при регулировании напряжением

$$\Delta p_u = R_{яд} \cdot I_c^2 = 0,039 \cdot 201^2 = 1580 \text{ Вт.}$$

Для ЭД с $U_H = 220 \text{ В}$ при трехфазной сети 380 В используется, как правило, преобразователь с трансформаторной схемой выпрямления.

Выходные данные преобразователя (табл. 3.2):

$$U_{дн} = 230 \text{ В} = U_H, \quad I_{дн} = 320 \geq I_H.$$

По [7] выбирается трансформатор ТСП-10/07-УХЛ4 встраиваемого исполнения (табл. 3.2):

Таблица 3.2

| $S_n, \text{ кВА}$ | $U_{1н}, \text{ В}$ | Вентильная обмотка | | $P_{кз}, \text{ Вт}$ | $U_{кз}, \%$ |
|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|--------------|
| | | $U_{2н}, \text{ В}$ | $I_{2н}, \text{ А}$ | | |
| 93 | 380 | 205 | 262 | 2300 | 5,8 |

Параметры вторичной (вентильной) обмотки трансформатора:

$$Z_T = \frac{U_{2н} \cdot U_{кз}}{\sqrt{3} \cdot I_{2н} \cdot 100 \%} = \frac{205 \cdot 5,8}{\sqrt{3} \cdot 262 \cdot 100 \%} = 0,0262 \text{ Ом,}$$

$$R_T = \frac{P_{кз}}{3 \cdot I_{2н}^2} = \frac{2300}{3 \cdot 262^2} = 0,011 \text{ Ом;}$$

$$X_T = \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{0,0262^2 - 0,011^2} = 0,0237 \text{ Ом,}$$

$$L_T = \frac{X_T}{2 \cdot \pi \cdot f_c} = \frac{0,0237}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,075 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Коммутационное сопротивление преобразователя при мостовой схеме выпрямления ($m = 6$):

$$R_k = \frac{m \cdot X_T}{2\pi} = \frac{6 \cdot 0,0237}{2 \cdot 3,14} = 0,0226 \text{ Ом.}$$

Параметры якорной цепи с учетом преобразователя:

$$R_{я} = R_{яд} + R_k + 2R_T = 0,039 + 0,0262 + 2 \cdot 0,011 = 0,0836 \text{ Ом,}$$

$$L_{я} = L_{яд} + 2L_T = 0,99 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 0,075 \cdot 10^{-3} = 1,14 \cdot 10^{-3} \text{ Гн,}$$

где индуктивность якорной цепи ЭД:

$$L_{яд} = \frac{\beta_k \cdot U_H}{p_d \cdot \omega_H \cdot I_H} = \frac{0,4 \cdot 220}{2 \cdot 157 \cdot 283} = 0,99 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Постоянные времени ЭД в системе УП-Д:

– электромагнитная $T_{я} = \frac{L_{я}}{R_{я}} = \frac{1,14 \cdot 10^{-3}}{0,0836} = 13,6 \cdot 10^{-3} \text{ с;}$

– электромеханическая

$$T_M = (J_d + J_{мех}) \frac{R_{я}}{c^2} = 1,3 \cdot 1,22 \frac{0,0836}{1,33^2} = 75 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Если не учитывать режим прерывистого тока, то при $E_{дп} = U_H$ скорость идеального холостого хода:

$$\omega_0 = 165 \text{ рад/с.}$$

Скорость при работе под нагрузкой:

$$\omega_{c.\max} = \omega_0 - \frac{R_{я}}{c} I_c = 165 - \frac{0,08366}{1,33} 201 = 152 \text{ рад/с.}$$

Падение скорости при изменении нагрузки от 0 до M_c :

$$\Delta\omega_c = \omega_0 - \omega_c = 13 \text{ рад/с.}$$

Минимальная скорость при регулировании:

$$\omega_{c.\min} = \frac{\omega_{c.\max}}{D} = 19 \text{ рад/с.}$$

Скорость идеального холостого хода для нижней характеристики:

$$\omega_{0\min} = \omega_{c.\min} + \Delta\omega_c = 32 \text{ рад/с.}$$

ЭДС преобразователя:

$$E_{\text{нmin}} = c \cdot \omega_{0\min} = 42,6 \text{ В.}$$

Характеристика для разомкнутой системы представлена на рис. 3.2. Скорость, соответствующая номинальной нагрузке ЭД:

$$\omega_{\text{нmin}} = 14 \text{ рад/с.}$$

Статизм характеристики разомкнутой системы:

$$S_{\text{xp}} = \frac{\omega_{0\min} - \omega_{\text{нmin}}}{\omega_{0\min}} = \frac{32 - 14}{32} = 0,563.$$

Коэффициент усиления системы для обеспечения характеристики с $S_{\text{хз}} = 0,05$:

$$K_c = \frac{S_{\text{xp}} - S_{\text{хз}}}{S_{\text{хз}}} = \frac{0,563 - 0,05}{0,05} = 10,3.$$

Коэффициент передачи обратной связи по скорости (тахогенератора):

$$K_{\text{oc}} = K_{\text{ТГ}} = \frac{S}{0,105} = \frac{0,033}{0,105} = 0,314 \text{ В/(рад/с).}$$

Коэффициент усиления главной цепи воздействия:

$$K_0 = \frac{K_c}{K_{\text{oc}}} = \frac{10,3}{0,314} = 32,8.$$

Напряжение обратной связи по скорости при

$$\omega_{\text{max}} = \omega_0 = 165 \text{ рад/с.}$$

$$U_{\text{oc.max}} = K_{\text{ТГ}} \cdot \omega_{\text{max}} = 54,8 \text{ В.}$$

Коэффициент усиления узла согласования напряжений:

$$K_1 = \frac{U_{\text{oc.max}}}{U_{3.\text{max}}} \left(1 + \frac{1}{K_c} \right) = \frac{51,8}{10} \left(1 + \frac{1}{10,3} \right) = 5,68.$$

Электромеханическая характеристика замкнутой системы:

$$\omega = \frac{K_1 K_0}{1 + K_c} U_3 - \frac{R_{\text{я}}}{c(1 + K_c)} I_{\text{я}}.$$

Напряжение задания для получения $\omega_{c.\text{min}} = 19$ рад/с :

$$U_{3.\text{min}} = \frac{1 + K_c}{K_1 K_0} \omega_{c.\text{min}} + \frac{R_{\text{я}}}{c K_1 K_0} I_c = \frac{11,3}{32,8 \cdot 5,68} 19 + \frac{0,0836}{1,33 \cdot 32,8 \cdot 5,68} 201 = 1,22 \text{ В}.$$

Скорость идеального холостого хода для замкнутой системы:

$$\omega'_{0.\text{min}} = \frac{K_1 K_0}{1 + K_c} U_{3.\text{min}} = \frac{32,8 \cdot 5,68}{11,3} 1,22 = 20 \text{ рад/с}.$$

Характеристика представлена на рис. 3.2.

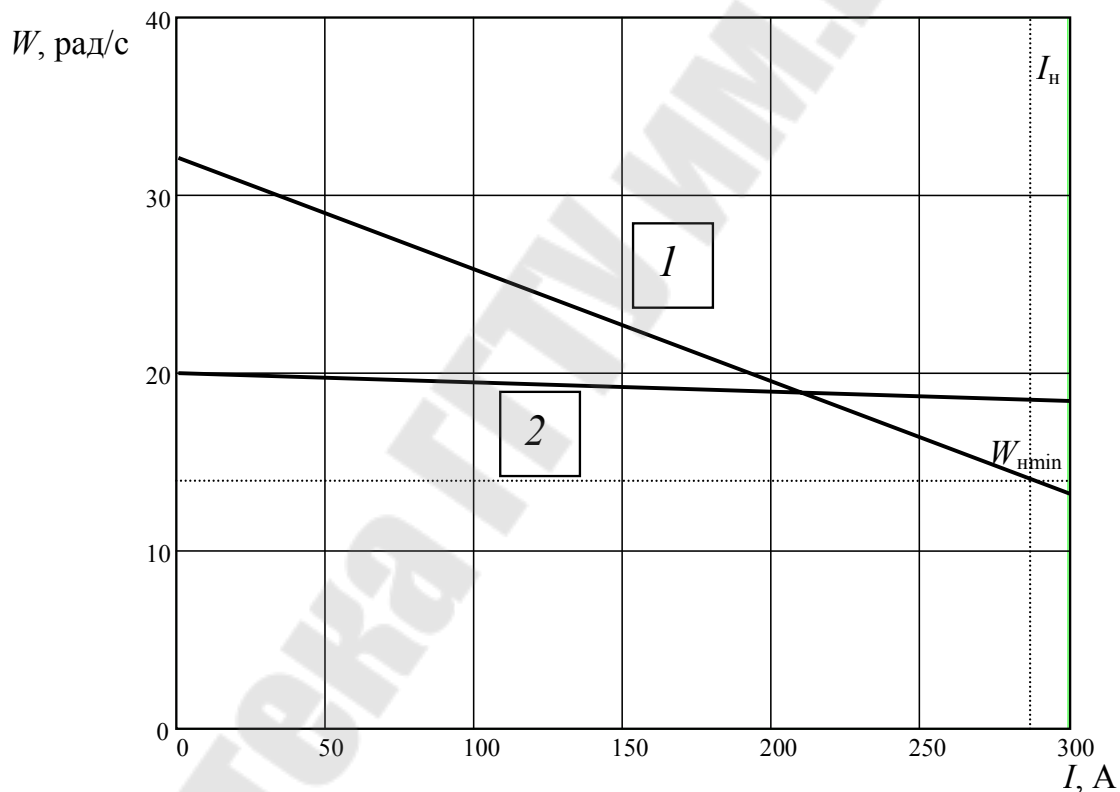


Рис. 3.2. Электромеханические характеристики системы:
1 – разомкнутой; 2 – замкнутой

3.2. Анализ динамических процессов

Рассчитать процесс пуска на пониженную скорость, рассмотренной в предыдущем примере системы, с реактивным статическим моментом и построить:

- временные зависимости скорости и тока;
- динамическую характеристику пуска.

Система уравнений, описывающая схему на рис. 2.1, б):

$$\begin{cases} k_0 \cdot (k_1 \cdot U_3 - k_{oc} \cdot \omega) = \omega_0, \\ \omega_0 = \omega + \frac{R_{я}}{c} \cdot (T_{я} \frac{di_{я}}{dt} + i_{я}), \\ i_{я} = I_c + \frac{J}{c} \cdot \frac{d\omega}{dt}. \end{cases}$$

До тех пор, пока значение электромагнитного момента $M < M_c$ или $i_{я} < I_c$ якорь остается неподвижным, и протекающий электромагнитный процесс описывается уравнением:

$$\frac{c \cdot k_0 \cdot k_1 \cdot U_3}{R_{я}} = T_{я} \frac{di_{я}}{dt} + i_{я},$$

решение которого:

$$i_{я}(t) = I_{кз} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T_{я}}}) = \frac{c \cdot k_0 \cdot k_1 \cdot U_3}{R_{я}} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T_{я}}}).$$

При $U_3 = U_{3min}$:

$$I_{кз} = \frac{1,33 \cdot 32,8 \cdot 5,68}{0,0836} \cdot 1,22 = 5750 \text{ А.}$$

Электромагнитный процесс (1-й этап пуска) заканчивается за время:

$$t_1 = T_{я} \cdot \ln \frac{I_{кз}}{I_{кз} - I_c} = 13,6 \cdot 10^{-3} \cdot \ln \frac{5750}{5750 - 201} = 0,484 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Данные расчета сводим в таблицу 3.2:

Таблица.3.2

| | | | | | | |
|--------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $t, \text{ с}$ | 0,0000807 | 0,000161 | 0,000242 | 0,000323 | 0,000404 | 0,000484 |
| $i_{я}, \text{ А}$ | 34,02 | 67,8 | 101,5 | 135 | 168 | 201 |

Когда $i_{я} > I_c$, якорь начинает разворачиваться и возникает электромеханический процесс, описываемый исходной системой уравне-

ний. После решения ее относительно скорости и тока получаем дифференциальные уравнения:

$$\begin{cases} \frac{T_m \cdot T_{\text{я}}}{1+k_c} \cdot \frac{d^2\omega}{dt^2} + \frac{T_m}{1+k_c} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_{c.\min}, \\ \frac{T_m \cdot T_{\text{я}}}{1+k_c} \cdot \frac{d^2i_{\text{я}}}{dt^2} + \frac{T_m}{1+k_c} \cdot \frac{di_{\text{я}}}{dt} + i_{\text{я}} = I_c, \end{cases}$$

где

$$\omega_{c.\min} = \frac{k_0 \cdot k_1}{1+k_c} \cdot U_{3\min} - \frac{R_{\text{я}} \cdot I_c}{c \cdot (1+k_c)} = \frac{32,8 \cdot 5,68}{1+10,3} \cdot 1,22 - \frac{0,0836}{1,33 \cdot (1+10,3)} \cdot 201 = 19 \text{ рад/с.}$$

Характеристическое уравнение системы

$$\frac{75 \cdot 10^{-3} \cdot 13,6 \cdot 10^{-3}}{11,3} p^2 + \frac{75 \cdot 10^{-3}}{11,3} p + 1 = 0$$

имеет корни

$$p_{1,2} = -\alpha \pm j\Omega = -36,8 \pm j98,6.$$

Так как корни комплексные, то решение дифференциальных уравнений ищется в виде:

$$\begin{cases} \omega(t) = \omega_c + (A \cos \Omega t + B \sin \Omega t) \cdot e^{-\alpha t}, \\ i_{\text{я}}(t) = I_c + (D \cos \Omega t + C \sin \Omega t) \cdot e^{-\alpha t}. \end{cases}$$

После определения коэффициентов A , B , C , D по начальным условиям:

$$\omega(0) = 0, \quad i_{\text{я}}(0) = I_c, \quad \frac{d\omega}{dt}(0) = \frac{c}{J} (i_{\text{я}}(0) - I_c) = 0,$$

$$\frac{di_{\text{я}}}{dt}(0) = \frac{c \cdot k_0 \cdot k_1 \cdot U_{3\min}}{R_{\text{я}} \cdot T_{\text{я}}} - \frac{1}{T_{\text{я}}} \cdot i_{\text{я}}(0) = \frac{1,33 \cdot 32,8 \cdot 5,68 \cdot 1,22}{0,0836 \cdot 13,6 \cdot 10^{-3}} \cdot 201 = 251000 \text{ А/с,}$$

и производных решений

$$\omega'(t) = -\alpha(A \cos \Omega t + B \sin \Omega t) \cdot e^{-\alpha t} + \Omega(-A \sin \Omega t + B \cos \Omega t) \cdot e^{-\alpha t}$$

$$i_{\text{я}}'(t) = -\alpha(D \cos \Omega t + C \sin \Omega t) \cdot e^{-\alpha t} + \Omega(-D \sin \Omega t + C \cos \Omega t) \cdot e^{-\alpha t}$$

получаем:

$$\omega(t) = 19 - [19 \cos(98,6t) + 7,09 \sin(98,6t)] \cdot e^{-36,8t},$$

$$i_{я}(t) = 201 + e^{-36,8t} 2547 \sin(98,6t).$$

Результаты расчета сводим в таблицу 3.3:

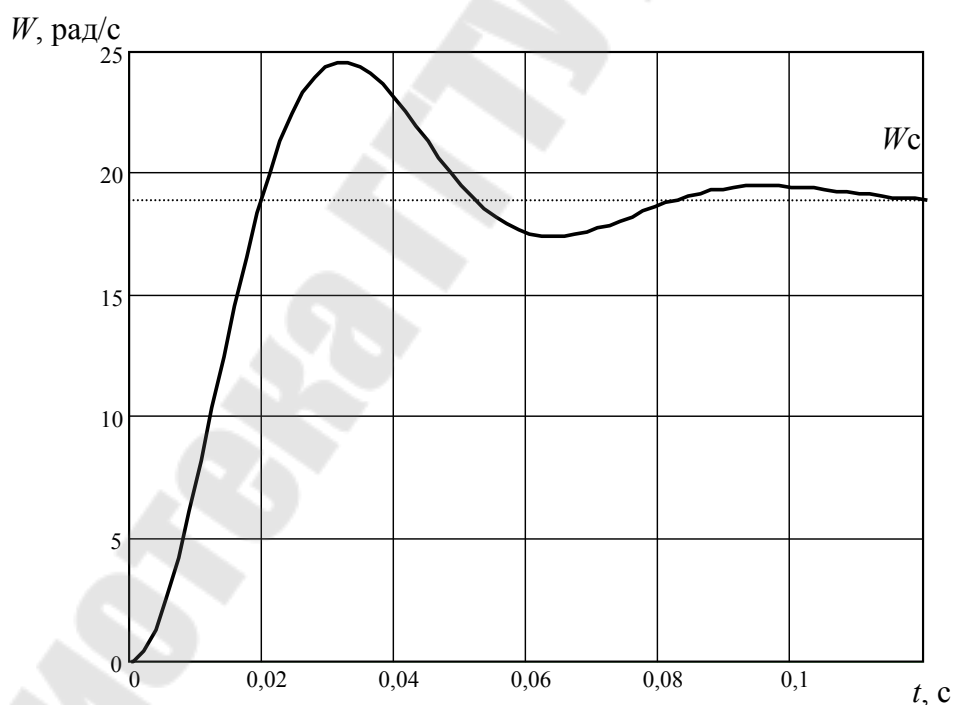
Таблица 3.3

| t, c | 0 | 0,00572 | 0,017 | 0,034 | 0,04 | 0,046 | 0,051 | 0,057 | 0,063 |
|------------------------|-----|---------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| $\omega, \text{рад/с}$ | 0 | 2,92 | 16,5 | 24,7 | 23,2 | 21 | 19 | 17,7 | 17,2 |
| $i_{я}, A$ | 201 | 1390 | 1570 | 28,1 | -220 | -262 | -157 | 14,8 | 181 |

Окончание табл. 3.3

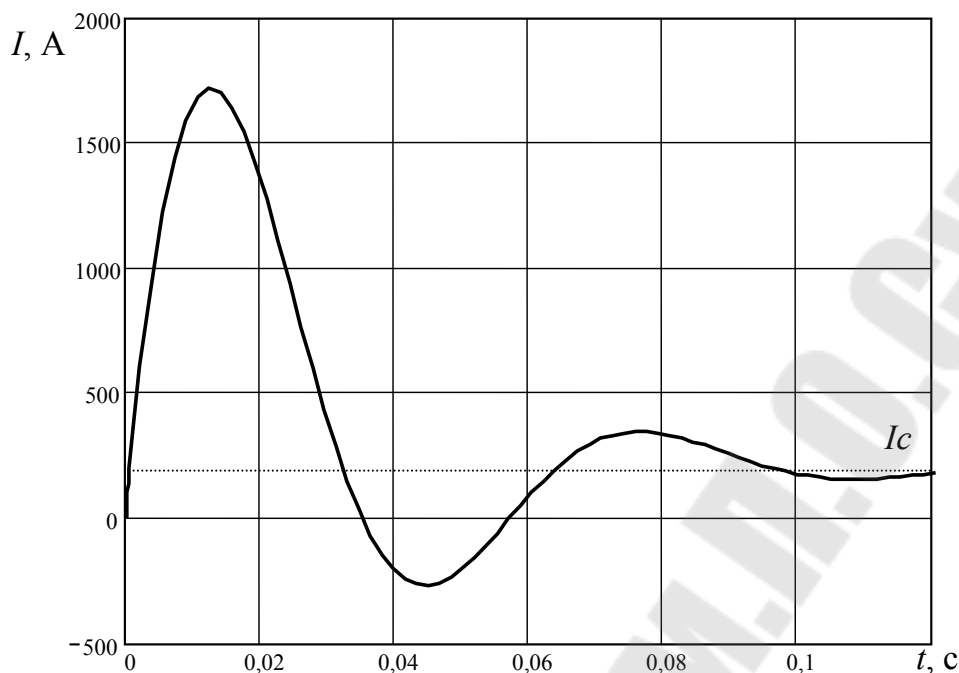
| t, c | 0,069 | 0,074 | 0,08 | 0,086 | 0,092 | 0,097 | 0,109 | 0,114 |
|------------------------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\omega, \text{рад/с}$ | 17,4 | 18 | 18,7 | 19,2 | 19,5 | 19,6 | 19,7 | 19 |
| $i_{я}, A$ | 295 | 344 | 334 | 290 | 235 | 189 | 156 | 163 |

Временные зависимости скорости и тока представлены на рис. 3.3а и 3.3б.



a)

Рис. 3.3а. Временные зависимости скорости при прямом пуске замкнутой системы с отрицательной обратной связью по скорости



б)

Рис. 3.3б. Временные зависимости тока при прямом пуске замкнутой системы с отрицательной обратной связью по скорости

Динамическая электромеханическая характеристика (фазовая траектория процесса) строится для конкретных:

- системы электропривода;
- типоразмера ЭД;
- вида процесса;
- характера и значения нагрузки.

В качестве координат точек, располагающихся на плоскости соответствующей характеристики (в нашем примере $I_{я}$, ω), выбираются мгновенные значения переменных, полученные при расчете динамического процесса. Например, точки, относящиеся к этапу 2 пуска:

$(i - 1)$ -я точка

$$t_{i-1} = 0,04 \text{ с,}$$

$$i_{яi-1} = 187 \text{ А, } \omega_{i-1} = 23,2 \text{ рад/с;}$$

i -я точка

$$t_i = 0,046 \text{ с,}$$

$$i_{яi} = 185 \text{ А, } \omega_i = 21 \text{ рад/с;}$$

($i+1$)-я точка

$$t_{i+1} = 0,051 \text{ с,}$$

$$i_{яi+1} = 189 \text{ А, } \omega_{i+1} = 19 \text{ рад/с.}$$

Фазовая траектория процесса пуска совместно со статической характеристикой представлена на рис. 3.4.

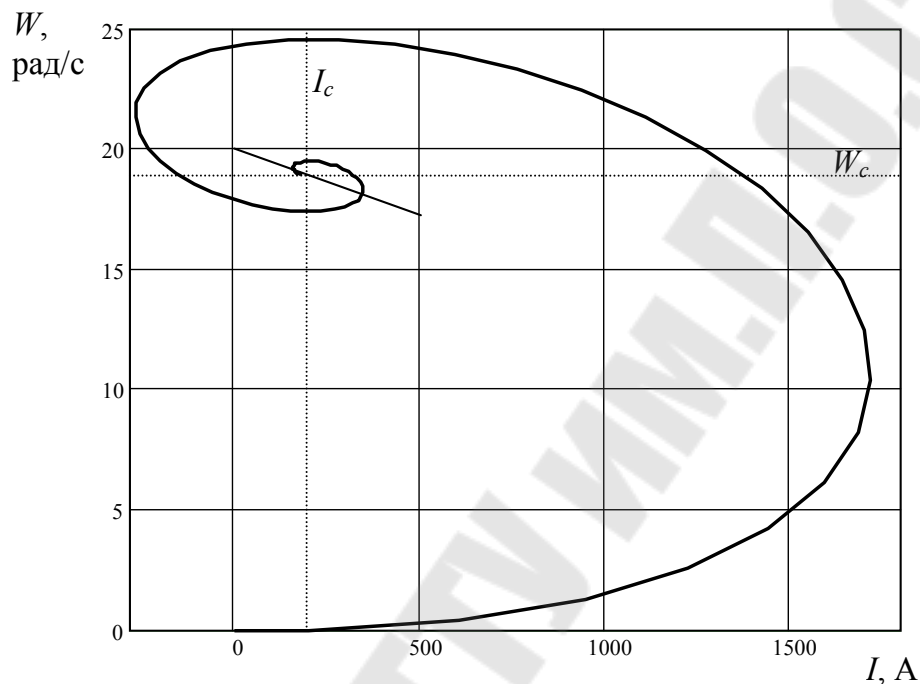


Рис. 3.4. Динамическая электромеханическая характеристика (фазовая траектория) прямого пуска замкнутой системы

3.3. Асинхронный электропривод

Рассчитать и построить естественные и искусственные характеристики ЭД 4А225М4У3, необходимые параметры и показатели регулирования при нагрузке $M_c = \text{const}$ (табл. 3.4).

Таблица 3.4

Данные двигателя

| P_n , кВт | n_n , об/мин | η_n , % | $\cos\phi$, отн. ед. | S_n , % | S_k , % | m_n , отн. ед. | m_m , отн. ед. | m_k , отн. ед. | i_n , отн. ед. |
|----------------------------------|----------------|--------------|-----------------------|-----------|-----------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 55 | 1500 | 92,5 | 0,9 | 1,4 | 10 | 1,3 | 0,96 | 2,5 | 7 |
| Параметры схемы замещения, о. е. | | | | | | | | | |
| X_μ | R_1' | X_1' | R_2'' | X_2'' | | | | | |
| 4,2 | 0,027 | 0,086 | 0,015 | 0,11 | | | | | |

Номинальный ток статора:

$$I_{1H} = \frac{P_H}{\sqrt{3} \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi_H} = \frac{55000}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,9 \cdot 0,925} = 100 \text{ А.}$$

Базовое сопротивление:

$$R_{\varnothing} = \frac{U_{1H}}{I_{1H}} = \frac{220}{100} = 2,2 \text{ Ом.}$$

Абсолютная величина сопротивлений:

$$R_1 = R_{\varnothing} \cdot R_1' = 0,22 \cdot 0,027 = 0,0594 \text{ Ом.}$$

$$R_2' = 0,033 \text{ Ом, } X_2' = 0,308 \text{ Ом, } X_{\mu} = 9,24 \text{ Ом.}$$

Синхронная скорость:

$$\omega_0 = 0,1047 \cdot n_0 = 0,1047 \cdot 1500 = 157 \text{ рад/с.}$$

Соотношение сопротивлений обмоток статора и ротора:

$$q = \frac{R_1'}{R_2} = \frac{0,0594}{0,033} = 1,8.$$

По параметрам схемы замещения рассчитываем:

– критический момент:

$$\begin{aligned} M_k &= \frac{3 \cdot U_{1\phi}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot [R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}]^2} = \\ &= \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 157 \cdot [0,0594 + \sqrt{0,0594^2 + 0,497^2}]^2} = 826 \text{ Нм;} \end{aligned}$$

– критическое скольжение:

$$S_k = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}} = \frac{0,033}{\sqrt{0,0594^2 + 0,497^2}} = 0,66;$$

– номинальное значение приведенного тока ротора в соответствии с выражением электромеханической характеристики:

$$I'_{2H} = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{S_H}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}} = \frac{220}{\sqrt{\left(0,0594 + \frac{0,033}{0,014}\right)^2 + 0,497^2}} = 89 \text{ А};$$

– механическая характеристика рассчитывается по уточненной формуле Клосса

$$M = \frac{2 \cdot M_q \cdot (1 + S_k)}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S} + 2qS_k} = \frac{2 \cdot 826 \cdot (1 + 1,8 \cdot 0,066)}{\frac{0,066}{0,014} + \frac{0,014}{0,066} + 2 \cdot 1,8 \cdot 0,066}$$

и дает при скольжении $S_H = 0,014$ и $\omega_H = \omega_0 \cdot (1 - S_H) = 155$ номинальное значение электромагнитного момента:

$$M_H = 357 \text{ Нм.}$$

Момент, соответствующий статическому:

$$M_c = 0,7 \cdot M_H = 0,7 \cdot 357 = 250 \text{ Нм.}$$

Результаты расчета сводим в таблицу 3.5:

Таблица 3.5

| S , отн. ед. | 0,01 | 0,014 | 0,02 | 0,06 | 0,1 | 0,25 | 0,5 | 0,75 | 1 |
|------------------|-------|-------|------|------|-----|------|------|------|-----|
| ω , рад/с | 155,4 | 155 | 154 | 147 | 141 | 118 | 78,5 | 39,3 | 0 |
| I'_2 , А | 64,8 | 89 | 124 | 280 | 348 | 413 | 429 | 433 | 435 |
| M , Нм | 264 | 357 | 480 | 822 | 765 | 430 | 232 | 158 | 119 |

Электромеханическая и механическая характеристики представлены на рис. 3.5.

По механической характеристике определяем:

$$\omega_{c.\max} = 155,5 \text{ рад/с,}$$

тогда:

$$\omega_{c.\min} = 19,4 \text{ рад/с.}$$

Принимая в первом приближении, что наклон рабочего участка характеристики при частотном регулировании не изменяется, определяем синхронную скорость и частоту тока статора:

$$\omega_{0\min} = \omega_{c.\min} + \Delta\omega_c = 19,4 + (157 - 155,5) = 20,9 \text{ рад/с,}$$

$$f_{1\min} = \frac{\omega_0 \cdot p_\partial}{2\pi} = 6,66 \text{ Гц.}$$

При законе частотного регулирования $U_1/f_1 = \text{const}$ напряжение на обмотке статора:

$$U_{1\min} = U_{1н} \cdot \frac{f_{1\min}}{f_{1н}} = 220 \cdot \frac{6,66}{50} = 29,3 \text{ В.}$$

Индуктивные сопротивления:

$$X_{1f} = X_1 \cdot \frac{f_{1\min}}{f_{1н}} = 0,189 \cdot \frac{6,66}{50} = 0,025 \text{ Ом;}$$

$$X_{2f} = X_2' \cdot \frac{f_{1\min}}{f_{1н}} = 0,308 \cdot \frac{6,66}{50} = 0,041 \text{ Ом.}$$

Значения критического момента и скольжения при минимальной частоте:

$$M_{kf} = \frac{3 \cdot U_{1\min}^2}{2 \cdot \omega_{0\min} [R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 29,3^2}{2 \cdot 20,9 \cdot [0,0594 + \sqrt{0,0594^2 + 0,066^2}]} = 416 \text{ Нм,}$$

$$S_{kf} = \frac{R_1'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_k)^2}} = \frac{0,033}{\sqrt{0,0594^2 + 0,066^2}} = 0,37.$$

По приведенным ранее выражениям рассчитываются искусственные характеристики (электромеханическая и механическая):

$$I'_{2н} = \frac{29,3}{\sqrt{(0,0594 + \frac{0,033}{S})^2 + 0,066^2}}, \quad M_{н} = \frac{2 \cdot 416 \cdot (1 + 1,8 \cdot 0,37)}{\frac{S}{0,37} + \frac{0,37}{S} + 2 \cdot 1,8 \cdot 0,37}.$$

Результаты расчета сводим в таблицу 3.6:

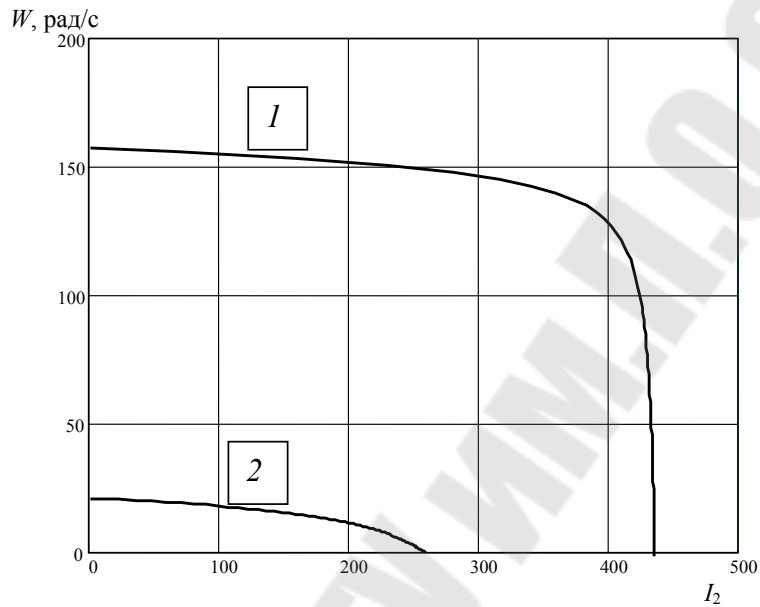
Таблица 3.6

| S , отн. ед. | 0,02 | 0,04 | 0,07 | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,3 | 0,35 |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| ω , рад/с | 20,5 | 20,1 | 19,4 | 18,8 | 17,8 | 16,7 | 14,6 | 13,6 |
| $I'_{2н}$, А | 17 | 33 | 54,8 | 74,2 | 102 | 125 | 161 | 175 |
| $M_{н}$, Нм | 67 | 130 | 204 | 261 | 330 | 372 | 411 | 416 |

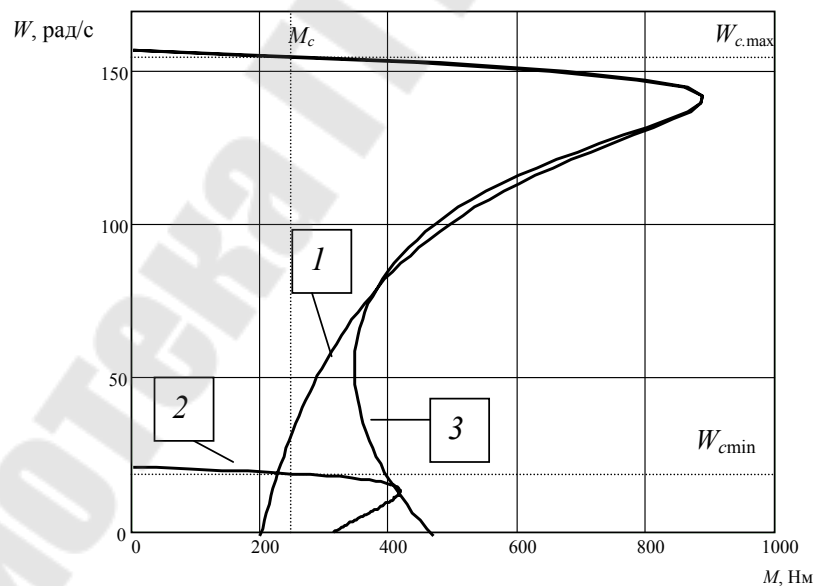
Окончание табл. 3.6

| | | | | |
|------------------|------|------|-----|-----|
| S , отн. ед. | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 |
| ω , рад/с | 12,5 | 8,36 | 4,2 | 0 |
| I'_{2H} , А | 187 | 222 | 243 | 258 |
| M_H , Нм | 415 | 388 | 350 | 314 |

Искусственные характеристики представлены на рис. 3.5.



а)



б)

Рис. 3.5. Электромеханические (а) и механические (б) характеристики асинхронного двигателя КЗ:

1 – естественная; 2 – искусственная при частотном регулировании; 3 – естественная откорректированная по пусковому и минимальному моментам

По характеристикам определяем:

– на естественной характеристике $I'_{2c} = 62 \text{ A}$;

– на искусственной характеристике

$$I'_{2cf} = 71,5 \text{ A}, \omega_{c.\min} = 19 \text{ рад/с}, \omega_{\text{hmin}} = 17 \text{ рад/с}.$$

Номинальное скольжение на искусственной характеристике:

$$s_{\text{H}} = \frac{\omega_{0\min} - \omega_{\text{hmin}}}{\omega_{0\min}} = \frac{20,9 - 17}{20,9} = 0,19.$$

Потери мощности в роторной цепи при работе:

– на естественной характеристике:

$$\Delta p_{2\text{H}} = 3 \cdot I'_{2c}{}^2 \cdot R'_2 = 3 \cdot 62^2 \cdot 0,033 = 381 \text{ Вт};$$

– на искусственной характеристике:

$$\Delta p_{2\text{H}} = 3 \cdot I'_{2cf}{}^2 \cdot R'_2 = 3 \cdot 71,5^2 \cdot 0,033 = 506 \text{ Вт}.$$

Литература

1. Ключев, В. И. Теория электропривода : учебник для вузов / В. И. Ключев. – Москва : Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.
2. Чиликин, М. Г. Теория автоматизированного электропривода / М. Г. Чиликин, В. И. Ключев, А. С. Сандлер. – Москва : Энергия, 1979. – 616 с.
3. Фираго, Б. И. Теория электропривода : учеб. пособие для вузов / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск : Техноперспектива, 2004. – 527 с.
4. Ковчин, С. А. Теория электропривода / С. А. Ковчин, Ю. А. Сабинин. – Санкт-Петербург : Энергоатомиздат, 2000. – 496 с.
5. Справочник по электрическим машинам. В 2 т. Т. 1 / под ред. И. П. Копылова и Б. К. Клокова. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.
6. Асинхронные двигатели серии 4А : справочник / А. Э. Кравчик [и др.]. – Москва : Энергоатомиздат, 1982. – 504 с.
7. Комплектные тиристорные электроприводы : справочник / И. Х. Евзрезов [и др.] ; под ред. В. М. Перельмутера. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 319 с.

Содержание

| | |
|--|----|
| Введение | 3 |
| 1. Программа дисциплины «Теория электропривода» | 4 |
| 1.1. Введение..... | 4 |
| 1.2. Механика электропривода..... | 4 |
| 1.3. Основы теории обобщенной электрической машины..... | 5 |
| 1.4. Электромеханические свойства двигателей..... | 5 |
| 1.5. Разомкнутая электромеханическая система как объект управления..... | 6 |
| 1.6. Электромеханические переходные процессы..... | 7 |
| 1.7. Регулирование координат электропривода..... | 7 |
| 1.8. Регулирование момента (тока)..... | 7 |
| 1.9. Регулирование скорости | 8 |
| 1.10. Энергетика электропривода | 9 |
| 2. Контрольные работы | 10 |
| 2.1. Общие методические рекомендации | 10 |
| 2.2. Контрольная работа № 1 | 11 |
| Теоретические вопросы | 11 |
| 2.3. Контрольная работа № 2..... | 16 |
| Теоретические вопросы | 16 |
| 3. Примеры расчета..... | 21 |
| 3.1. Электропривод постоянного тока..... | 21 |
| 3.2. Анализ динамических процессов..... | 28 |
| 3.3. Асинхронный электропривод..... | 33 |
| Литература..... | 39 |

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

**Методические указания
к контрольным работам
по одноименной дисциплине
для студентов специальности 1-53 01 05
«Автоматизированные электроприводы»
заочной формы обучения**

Автор-составитель: **Захаренко Сергей Иванович**

Редактор *Н. И. Жукова*

Компьютерная верстка *Н. В. Широглазова*

Подписано в печать 28.08.07.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.

Цифровая печать. Усл. печ. л. 2,32. Уч.-изд. л.2,32.

Изд. № 58.

E-mail: ic@gstu.gomel.by

<http://www.gstu.gomel.by>

Издатель и полиграфическое исполнение:

Издательский центр

учреждения образования «Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого».

ЛИ № 02330/0131916 от 30.04.2004 г.

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.