

Министерство образования Российской Федерации

Южно-Уральский государственный университет

Кафедра электропривода
и автоматизации промышленных установок

62-83(07)

Д729

Г.И. Драчев

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Учебное пособие по типовым расчетам
для студентов
заочного обучения спец.180400

Челябинск
Издательство ЮУрГУ
2002

УДК 62-83-01(076.5)

Драчев Г.И. Теория электропривода: Учебное пособие по типовым расчетам для студентов заочного обучения спец. 180400. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2002.– 85 с.

Приведена объединенная рабочая программа дисциплин «Электрический привод» и «Теория электропривода» с методическими указаниями, перечнем литературы и контрольными задачами по каждому разделу программы. Приводится перечень лабораторных и практических занятий.

Разработаны варианты контрольных заданий, выполняемых в процессе изучения дисциплин, охватывающих основные разделы первой части рабочей программы. Вопросы второй части будут изучаться в процессе выполнения курсового проекта по курсу «Теория электропривода».

Типовые расчеты позволят освоить методику расчета характеристик электродвигателя и переходных процессов электропривода при различных параметрах цепей и источников питания.

Учебное пособие может быть использовано при курсовом проектировании по курсу “Теория электропривода” и при дипломном проектировании студентами специальности 180400 – “Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов”.

Учебное пособие может быть использовано студентами других электротехнических специальностей при изучении курса “Автоматизированный электропривод”.

Ил. 13, табл. 9, список лит.– 18 назв.

Одобрено учебно-методической комиссией энергетического факультета.

Рецензенты: И.Д.Кабанов, С.А.Чупин.

ВВЕДЕНИЕ

Целью обучения специалистов по специальности 180400 – “Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов” является подготовка инженеров широкого профиля, способных самостоятельно и творчески решать задачи проектирования, исследования, наладки и эксплуатации современных автоматизированных электроприводов промышленных установок в любых отраслях человеческой деятельности.

В1. Требования ГОС к дисциплине

Инженер - электроприводчик должен иметь представление:

- об основных научно-технических проблемах и перспективах развития электропривода;
- об общих закономерностях физических процессов в автоматизированном электроприводе;
- об основах физического и математического моделирования процессов и явлений в электроприводе;

Инженер - электроприводчик должен владеть:

- методами расчетов установившихся режимов работы и переходных процессов при пуске и торможении электрических двигателей;
- методами анализа и синтеза линейных и нелинейных электрических цепей;
- построением и анализом численных и аналоговых моделей систем электропривода и их отдельных частей;
- методами расчета функциональной и технологической точности;

Инженер - электроприводчик должен знать и уметь использовать:

- основы теории электропривода при решении задач проектирования;
- математические модели и программные комплексы для численного анализа физических процессов в электроприводе;
- современные методы расчета схем для проектирования силовых цепей электропривода;
- знания по технологии и контролю качества при проектировании электропривода;

Инженер - электроприводчик должен иметь опыт:

- формулирования, постановки задач и расчетов установившихся и переходных процессов в электроприводах;
- расчета мощности электродвигателей для различных режимов работы;
- расчета энергетических показателей работы электропривода;
- использования ЭВМ для расчетов установившихся и переходных процессов в электроприводах.

Рабочая программа предусматривает совместное чтение дисциплин “Электрический привод” и “Теория электропривода”, обеспечивая последовательное и глубокое усвоение материала.

В курсе изучаются вопросы применения электродвигателей в промышленности, способы приспособления рабочих свойств электродвигателя к требованиям рабочих органов технологических объектов, современные системы электропривода и их статические, энергетические и динамические характеристики, а также приобретаются навыки расчета, проектирования, наладки и исследования этих систем.

Курс базируется на знаниях, полученных при изучении теоретической и прикладной механики, теоретических основ электротехники, электрических машин и аппаратов, теории автоматического управления, преобразовательной техники, вычислительной техники.

В2. Учебный план изучения дисциплины для заочной формы обучения

Семестры	8	9
«Электрический привод»		
Лекционные занятия, ч	10	–
Самостоятельная работа, ч	140	–
Контрольная работа	№1	–
Форма контроля знаний	Зачет	–
Всего часов	150	
«Теория электропривода»		
Лекционные занятия, ч	10	20
Практические занятия, ч	4	–
Лабораторные занятия, ч	–	20
Самостоятельная работа, ч	20	96
Курсовое проектирование	–	1–16 недели
Контрольные работы	№2, №3	–
Форма контроля знаний	–	Зачет
	Экзамен	Экзамен
Всего часов		170

1. РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИН “ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД” И “ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА”

Рабочая программа соответствует государственному образовательному стандарту (ГОС) специальности 180400, введенному в действие 1 сентября 2000 г.

Рабочая программа утверждена на заседании кафедры «Электропривод и автоматизация промустановок» 19 октября 2001 г., протокол №2.

1.1. Введение

Определение понятий “привод” и “электропривод”. Назначение и функции электропривода (ЭП). Физические принципы электромеханического преобразования энергии. История электропривода. Вклад российских ученых в теорию и практику ЭП.

Групповой, индивидуальный, взаимосвязанный электропривод. Автоматизированный ЭП. Общая структура ЭП. Место ЭП в современной технологии. ЭП и энергетика. Общие требования к ЭП.

Содержание, структура курса, его связь с другими дисциплинами.

[9 (В.1 – В.4), 10 (Введение), 7 (В.1 – В.5)].

При изучении данного раздела необходимо понять роль и место электропривода в промышленности, его основное назначение как главного элемента, осуществляющего преобразование электрической энергии в механическую, а также выполняющего задачи значительного числа систем автоматического управления в роли силового исполнителя, обеспечивая возможность превращения этих задач в реальную механическую работу в заданных координатах, с заданными параметрами. Знание роли и места электропривода в энергетике, в электротехнологии, общих требований к электроприводу потребуются при изучении дальнейших глав.

1.2. Механика электропривода

1.2.1. Схемы механической части системы электропривод – рабочая машина. Кинематические схемы. Статические нагрузки ЭП. Силы и моменты, действующие в ЭП. Активные и реактивные моменты.

1.2.2. Расчетные схемы механической части ЭП. Приведение моментов сопротивления движению, моментов инерции, сил, масс к валу двигателя при поступательном и вращательном движении.

1.2.3. Учет потерь в передачах при определении приведенных моментов, сил, моментов инерции, масс. Метод разделения потерь.

1.2.4. Основное уравнение движения системы ЭП – рабочий орган (рабочая машина). Анализ состояния электропривода по основному уравнению движения. Статические и динамические моменты.

1.2.5. Механическая часть ЭП как объект управления. Структурная схема, логарифмические частотные характеристики механической части.

1.2.6. Переходные процессы механической части ЭП. Время переходного процесса. Угол поворота вала двигателя.

1.2.7. Оптимальное по быстродействию передаточное число редуктора.

1.2.8. Системы ЭП – РМ с упругой механической связью. Приведение жесткостей механических связей к валу двигателя. Приведение многомассовой упругой системы к двухмассовой. Уравнения движения и структурные схемы механической части ЭП. Явление резонанса в двухмассовой упругой системе, амплитуда и частота упругих колебаний.

Переходный процесс пуска двухмассовой упругой системы. Демпфирование упругих колебаний. Динамический коэффициент. Влияние зазоров механической части на упругие колебания.

1.2.9. Обобщенная структурная схема механической части электропривода.

[9 (1.2–1.7, 4.7), 10 (1.2–1.5, 1.9), 7 (1.1–1.8), 5 (16)].

При изучении данной главы необходимо на основе известной кинематики механизма, его технических данных и сведений о технологическом процессе научиться составлять расчетные схемы и рассчитывать параметры механической части ЭП, описывать движение ЭП дифференциальными уравнениями, рассчитывать механические переходные процессы на основе методов механики и теории управления. Нужно уметь свободно оценивать характер движения ЭП по известному характеру изменения электромагнитного момента двигателя и приложенных к системе внешних сил, а также определять законы изменения электромагнитного момента, обеспечивающие формирование требуемых законов движения рабочего органа. Для контроля усвоения главы рекомендуем решить прилагаемые контрольные задачи к главе “Механика”.

1.3. Электромеханические свойства и характеристики электродвигателей

1.3.1. Электромеханические свойства и характеристики электродвигателей постоянного тока параллельного (независимого) возбуждения (ДНВ)

1.3.1.1. Уравнения и структурная схема ДНВ. Статические характеристики ДНВ. Зоны допустимых нагрузок.

1.3.1.2. Естественные механическая и электромеханическая характеристики ДНВ в абсолютных и относительных (о.е.) единицах и их расчет. Каталожные характеристики ДНВ и их сравнение с расчетными.

Искусственные характеристики ДНВ и их расчет.

1.3.1.3. Энергетика двигательного режима ДНВ. Пути снижения потерь энергии.

1.3.1.4. Тормозные режимы ДНВ (рекуперативное торможение, противовключение, динамическое торможение), схемы включения, механические характеристики и энергетические диаграммы, достоинства и недостатки.

1.3.1.5. Расчет схем включения, обеспечивающих работу ДНВ в заданной точке, и характеристик, проходящих через заданную точку.

1.3.1.6. Реостатный пуск ДНВ (при питании от цеховой сети). Правильная пусковая диаграмма и ее расчет аналитическим и графическим методами.

1.3.1.7. Механические переходные процессы в ЭП с прямолинейной механической характеристикой. Механические переходные процессы реостатного пуска ДНВ, при набросе нагрузки, торможения противовключением, динамического торможения.

1.3.1.8. Энергетика переходных режимов ЭП с ДНВ (пуск на холостом ходу, пуск под нагрузкой, торможение противовключением, динамическое торможение). Пути снижения потерь энергии в переходных процессах.

[9 (3.2 – 3.4, 4.1 – 4.4, 4.8, 9.3), 10 (6.1,6.4), 7 (3.1, 3.12), 2 (2.3, 2.4), 5 (13, 14)].

В этой главе следует изучить статические характеристики ДНВ как в режиме двигателя, так и в тормозных режимах, влияние на вид характеристик изменения напряжения на якоре, потока и введения добавочного сопротивления в цепь якоря.

Необходимо научиться обеспечивать работу ДНВ в заданной точке четырехкоординатного графика механических характеристик. При изучении переходных процессов пуска и торможения следует усвоить методику их расчета и влияние параметров ЭП на быстродействие с учетом предельных значений тока и момента двигателя. Для закрепления материала главы необходимо решить контрольные задачи.

1.3.2. Электромеханические свойства и характеристики электродвигателей постоянного тока последовательного возбуждения (ДПВ)

1.3.2.1. Уравнения и структурная схема ДПВ. Естественные и искусственные характеристики ДПВ и их расчет.

1.3.2.2. Тормозные режимы ЭП с ДПВ (противовключение, динамическое торможение с самовозбуждением и независимым возбуждением), схемы включения, механические характеристики и энергетические диаграммы, достоинства и недостатки.

1.3.2.3. Расчет схем включения, обеспечивающих работу ДПВ в заданной точке, и характеристик, проходящих через заданную точку.

1.3.2.4. Реостатный пуск ДПВ при питании от цеховой сети. Расчет правильной пусковой диаграммы.

1.3.2.5. Механические переходные процессы при нелинейных механических характеристиках. Методы конечных интервалов (усреднения) и линеаризации. Расчет механических переходных процессов реостатного пуска, торможения противовключением, динамического торможения ДПВ.

1.3.2.6. Энергетика переходных режимов ЭП с ДПВ (по сравнению с энергетикой ДНВ).

[9 (3.7, 6.2, 9.3), 10 (2.8, 6.9), 7 (3.15), 2 (2.13, 2.14), 5 (12, 14.1, 16)].

В этой главе следует изучить особенности механических и электромеханических характеристик ДПВ в связи с нелинейной зависимостью между током якоря и потоком, особенности тормозных режимов, влияние на вид характеристик изменения напряжения на якоре, потока и введения добавочного сопротивления в цепь якоря.

Необходимо научиться обеспечивать работу ДПВ в заданной точке, рассчитывать характеристики при изменении параметров схемы включения. При изучении переходных процессов пуска и торможения следует усвоить методику их расчета и влияние параметров ЭП на быстроедействие с учетом предельных значений тока и момента двигателя.

1.3.3. Особенности электромеханических свойств двигателя смешанного возбуждения (ДСВ)

1.3.3.1. Естественные и искусственные механические и электромеханические характеристики. Тормозные режимы. Расчет характеристик.

[9 (3.9), 10 (2.9), 7 (3.21), 2 (2.20)].

Необходимо понять особенности ДСВ по сравнению с ДПВ и ДНВ по режимам работы, по виду характеристик, по способам расчета статических характеристик и переходных процессов.

1.3.4. Особенности электромеханических свойств ДНВ при питании от источника тока

1.3.4.1. Механические характеристики двигателя постоянного тока, питающегося от источника тока (ИТ). Схемы источников тока, достоинства и недостатки. Зоны допустимых нагрузок.

[9 (6.3), 7 (3.9)].

Целью данного раздела является изучение свойств двигателя, когда он подключается не к источнику ЭДС, каковой является сеть, а к источнику тока, когда ток двигателя определяется не нагрузкой на его валу, а зависит только от задания. Необходимо понять особенности характеристик и режимов работы.

1.3.5. Электромеханические свойства и характеристики асинхронного двигателя (АД)

1.3.5.1. Основные соотношения между координатами и параметрами АД. Т-образная и Г-образная схемы замещения АД. Естественные механические и электромеханические характеристики и их расчет.

1.3.5.2. Естественные характеристики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (АДКЗ) с учетом вытеснения тока ротора.

1.3.5.3. Структурные схемы АД (упрощенная, для рабочего участка механической характеристики).

1.3.5.4. Искусственные характеристики и их расчет. Расчет коэффициентов упрощенной структурной схемы.

1.3.5.5. Электромеханические свойства и характеристики АД, питающегося от источника тока.

1.3.5.6. Энергетика двигательного режима АД. Пути снижения потерь мощности.

1.3.5.7. Тормозные режимы АД (рекуперативное торможение, торможение противовключением, динамическое торможение с независимым возбуждением и с самовозбуждением, конденсаторное торможение), схемы включения, механические характеристики, энергетические диаграммы, достоинства и недостатки.

1.3.5.8. Расчет схем включения, обеспечивающих работу АД в заданной точке, и характеристик, проходящих через заданную точку.

1.3.5.9. Механические характеристики АД при несимметричных режимах.

1.3.5.10. Реостатный пуск АД. Расчет правильной пусковой диаграммы с учетом кривизны механической характеристики.

1.3.5.11. Механические переходные процессы реостатного пуска АД при нелинейных механических характеристиках. Расчет механических переходных процессов пуска короткозамкнутого АД при статических моментах, изменяющихся в функции скорости, пути, времени и переменном моменте инерции.

1.3.5.12. Энергетика переходных процессов асинхронного ЭП. Потери энергии в цепи ротора, в цепи статора АД с фазным ротором и короткозамкнутым ротором в переходных режимах на холостом ходу, под нагрузкой, при торможении.

[9 (3.10, 3.11, 3.13, 3.14, 9.3), 10 (4.2–4.7), 7(4.1, 4.3), 2 (3.4), 5 (12 – 14,16)].

В этой главе следует изучить статические характеристики АД как в режиме двигателя, так и в тормозных режимах, влияние на вид характеристик изменения амплитуды и частоты напряжения на статоре и введения добавочных активных и индуктивных сопротивлений в цепи статора и ротора.

Необходимо научиться обеспечивать работу АД в заданной точке четырехкоординатного графика механических характеристик. При изучении переходных процессов пуска и торможения следует усвоить методику их расчета с учетом нелинейности механических характеристик и влияние параметров ЭП на быстродействие с учетом предельных значений момента двигателя. Для закрепления материала главы необходимо решить контрольные задачи.

1.3.6. Электромеханические свойства и характеристики синхронного двигателя (СД)

1.3.6.1. Особенности синхронного двигателя. Механическая, электромеханическая и угловая характеристики СД. Влияние амплитуды и частоты напряжения питающей сети, тока возбуждения на вид механических и угловых характеристик.

1.3.6.2. Упрощенная структурная схема СД.

1.3.6.3. Механические характеристики СД при пуске. Эффект одноосного включения.

1.3.6.4. Тормозные режимы СД (рекуперативное торможение, торможение противовключением, динамическое торможение), схемы включения, механические характеристики, энергетические диаграммы, достоинства и недостатки.

[9 (3.15), 10 (4.11), 7(5.1,5.2)].

При изучении свойств СД обратите внимание на предельные значения момента, его зависимость от тока возбуждения. Кроме того, СД отличается условиями пуска и тормозными режимами.

В этой главе следует изучить статические характеристики СД как в режиме двигателя, так и в тормозных режимах, влияние на вид характеристик изменения амплитуды и частоты напряжения, а также тока возбуждения. Следует рассмотреть условия, обеспечивающие работу СД в режиме компенсатора реактивной энергии.

При изучении переходных процессов пуска, торможения и приложения нагрузки следует выяснить причины колебаний ротора, последовательность включения различных цепей при втягивании в синхронизм, а также меры по предупреждению выпадания двигателя из синхронизма.

1.4. Регулирование координат электропривода

1.4.1. Требования к регулированию координат

Основные показатели способов регулирования координат ЭП: точность, диапазон, плавность, экономичность. Допускаемые нагрузки при регулировании скорости. Динамические показатели качества переходного процесса (быстродействие, перерегулирование, колебательность) при автоматическом регулировании.

[9 (5.2)].

При изучении различных систем электропривода обратите внимание на основные показатели регулирования, с помощью которых появляется возможность сравнения этих систем, выявления достоинств и недостатков, а также путей достижения этими системами заданных показателей регулирования. Рассмотрение переходных процессов пуска, торможения и приложения нагрузки позволит выявить возможности этих систем выполнять и заданные динамические показатели. При изучении данной главы следует повторить необходимые разделы ТАУ и преобразовательной техники.

1.4.2. Регулируемый ЭП постоянного тока

1.4.2.1. Реостатное регулирование скорости, схемы включения, механические характеристики, основные показатели регулирования.

1.4.2.2. Система тиристорный преобразователь –двигатель (ТП – Д). Схемы выпрямления, способы регулирования напряжения. Режимы работы

преобразователя. Механические характеристики в режимах непрерывного и прерывистого тока.

Регулировочные характеристики системы ТП-Д.

Реверсивные системы ТП-Д с согласованным и несогласованным управлением и их механические и регулировочные характеристики.

Основные показатели регулирования координат в системе ТП-Д.

Выбор тиристорного преобразователя по мощности.

Способы формирования статических характеристик с помощью обратных связей по напряжению, скорости, току.

[9 (5.4, 6.4, 6.5, 7.2), 10 (3.4), 7(3.4, 3.5)].

При изучении системы ТП-Д обратите внимание на особенности работы двигателя при его питании от ТП (пульсации напряжения, тока, прерывистый режим работы), на основные показатели регулирования, с помощью которых выявляются возможности этой системы при регулировании скорости, момента, а также пути достижения заданных показателей регулирования, на достоинства и недостатки.. При изучении данной главы следует повторить необходимые разделы ТАУ и преобразовательной техники.

1.4.2.3. Логарифмические частотные характеристики и механические переходные процессы при линейном изменении напряжения на якоре двигателя. Влияние постоянной времени задатчика интенсивности, электромеханической постоянной времени, статического момента на вид нагрузочных диаграмм, на вид динамических механических характеристик и динамические показатели переходного процесса.

Уравнения и структурная схема системы ТП – Д. Логарифмические частотные характеристики системы. Пуск и торможение двигателя в системе с задатчиком интенсивности.

Потери энергии в системе с линейным изменением напряжения.

[9 (4.8, 4.9, 9.3), 10 (6.13, 6.14)].

Рассмотрение переходных процессов торможения и приложения нагрузки позволит выявить возможности этих систем обеспечивать поддержание постоянства момента (тока), влияние ЗИ на динамические показатели. Следует обратить внимание на особенность протекания процессов при активном и реактивном статических моментах. Нужно научиться строить динамические механические характеристики.

1.4.2.4. Электромеханические переходные процессы. ЛАЧХ колебательного звена при различных электромагнитной и электромеханической постоянных времени . Влияние электромагнитной постоянной времени на вид нагрузочных диаграмм, динамические механические характеристики и

показатели переходного процесса пуска, приложения нагрузки и торможения двигателя.

[9 (4.8, 4.9), 10 (6.10,6.11)].

Влияние электромагнитной инерции отражается на особенности протекания процессов, когда нарастание тока и момента задерживается во времени. Особенно на вид переходного процесса влияет характер статического момента (активный или реактивный) В зависимости от соотношения $Tя/Tм$ существенно изменяется характер переходного процесса – от апериодического до колебательного.

1.4.2.5. Система генератор – двигатель (Г-Д). Составные элементы, способ управления, регулировочные и механические характеристики. Основные показатели регулирования координат.

Электромагнитные переходные процессы в цепи возбуждения, способы убыстрения переходных процессов. Структурная схема цепи возбуждения генератора.

Механические переходные процессы в системе Г-Д. ЛАЧХ, нагрузочные диаграммы пуска и торможения двигателя при экспоненциальном изменении напряжения. Влияние электромагнитной постоянной времени генератора, электромеханической постоянной времени двигателя, статического момента на вид нагрузочных диаграмм, на вид динамических механических характеристик и динамические показатели переходного процесса.

[9 (4.9), 10 (3.2, 3.3, 6.12), 7(3.4, 3.13)].

Обратите внимание, что трехкратное преобразование энергии приводит к снижению КПД системы, однако система Г-Д обеспечивает более простой переход в тормозные режимы. Характер переходных процессов определяет электромагнитная постоянная времени цепи возбуждения

1.4.2.6. Регулирование скорости двигателя постоянного тока изменением магнитного потока. Схемы включения, механические характеристики. Основные показатели регулирования.

Уравнения, структурная схема ДНВ для режима ослабления поля двигателя. ЛАЧХ и переходные процессы при ослаблении поля. Графоаналитический метод расчета нагрузочных диаграмм режима ослабления поля.

[9 (7.8), 10 (6.15), 7(3.11,в)].

В режиме ослабления поля ДНВ , часто применяемом в современных системах электропривода за хорошие энергетические показатели, изменение потока существенно сказывается на ЭДС двигателя, в результате возникает довольно резкое изменение тока и момента. Переходные процессы похожи на процессы в системе Г-Д, только происходят они на скоростях выше естественной характеристики двигателя. Темп процессов определяется

электромагнитной постоянной цепи возбуждения. Нужно научиться оценивать величину броска тока и видеть способы его ограничения.

1.4.2.7. Система широтно-импульсный преобразователь – двигатель (ШИП–Д). Анализ схем ШИП. Способы регулирования напряжения. Механические характеристики, основные показатели регулирования.

[10 (3.5), 7(3.10)].

В данной системе следует разобраться со способами регулирования напряжения по сравнению с системой ТП-Д. Обратите внимание на прерывистый режим работы и способы снижения зоны его действия, на особенности тормозных режимов в этой системе.

1.4.3. Регулируемый ЭП переменного тока

1.4.3.1. Способы регулирования скорости и момента асинхронного и синхронного электропривода.

1.4.3.2. Регулирование скорости АД путем изменения числа пар полюсов. Способы соединения обмоток, механические характеристики, основные показатели регулирования.

1.4.3.3. Реостатное регулирование скорости и момента АД. Механические характеристики, основные показатели регулирования координат.

1.4.3.4. Системы импульсного регулирования в цепи ротора и в цепи статора. Способы регулирования, механические характеристики, основные показатели регулирования.

1.4.3.5. Фазовое управление АД. Составные элементы, способ регулирования, механические характеристики, основные показатели регулирования координат.

[9 (6.2, 7.9), 10 (4.8), 7(4.4, 4.5, 4.8)].

Сравните рассмотренные способы регулирования координат по основным показателям регулирования. Это достаточно простые по капитальным затратам системы, но энергетические их показатели находятся на низком уровне.

1.4.3.6. Частотное регулирование скорости. Статические законы частотного регулирования. Преобразователи частоты (ПЧ): электромашинные, с непосредственной связью (НПЧ), со звеном постоянного тока (ПЧИ). Составные элементы, способ регулирования.

Механические характеристики системы ПЧ-АД при питании от АИН и АИТ. Основные показатели частотного регулирования координат. Выбор ПЧ по мощности.

Уравнения, структурная схема системы ПЧ – АД. Механические переходные процессы при линейном изменении частоты и амплитуды напряжения на статоре.

Пуск и торможение АД в системе с пропорционально-интегральным задатчиком интенсивности. Нагрузочные диаграммы, динамические механические характеристики.

[9 (4.8, 4.9 5.5, 6.7, 7.10), 10 (4.8), 3 (4.6)].

Обратите внимание, что данная система в настоящее время находит все большее применение при проектировании новых электроприводов. Следует внимательно оценить ее показатели регулирования (экономичность, энергетика, диапазон регулирования и т.п.) и выяснить причины такой популярности. Сравните с системой ТП-Д. Изучите способы регулирования скорости, момента, возможности тормозных режимов для различных схем преобразователей частоты. Рассмотрите особенности формирования переходных процессов в системе ПЧ-АД

1.4.3.7. Каскадное регулирование скорости АД. Принцип каскадного регулирования. Электромеханический и электрический каскады, каскад с машиной двойного питания.

Асинхронный вентильный каскад (АВК). Регулировочные и механические характеристики АВК. Структурная схема АВК. Энергетическая диаграмма.

Схема и механические характеристики электромеханического каскада. Основные показатели регулирования скорости в каскадных схемах.

[9 (7.12, 7.13), 7 (4.7)].

По сравнению с системой ПЧ-АД в каскадных схемах включения АД с фазным ротором регулирование осуществляется в цепи ротора. Следует выяснить основные особенности этой системы , показатели регулирования, область применения.

1.4.3.8. Многодвигательные электромеханические системы. Работа нескольких двигателей на общий вал. Синхронное вращение двигателей.

1.4.3.9. Принцип действия и характеристики вентильного двигателя.

[9 (4.12), 10 (4.13)].

1.5. Основы выбора двигателей по мощности

1.5.1. Энергетика электропривода. Энергетические характеристики ЭП.

Выбор рода тока и типа электродвигателя. Выбор двигателя по конструктивному исполнению

1.5.2. Общие положения и основные критерии выбора мощности двигателя. Основы теории одноступенчатого нагрева электрических машин. Уравнение теплового баланса и его решение. Постоянная времени нагрева.

Охлаждение электрических машин. Постоянная времени нагрева при охлаждении, коэффициент ухудшения условий охлаждения.

Классификация режимов работы двигателей по условиям нагрева.

1.5.3. Выбор двигателя по мощности для ЭП продолжительного режима работы с постоянной и переменной нагрузками.

1.5.4. Эквивалентирование режимов переменной нагрузки. Методы эквивалентных потерь, эквивалентного тока, эквивалентного момента, среднеквадратичной мощности, области их применения.

1.5.5. Нагрев и охлаждение двигателя повторно-кратковременного режима работы. Коэффициенты перегрузки по потерям, по току. Специальные серии двигателей для повторно-кратковременного и кратковременного режимов.

Определение допускаемой нагрузки при продолжительности включения (ПВ), отличной от каталожной.

Выбор по мощности двигателя повторно-кратковременного режима.

Допустимая частота включений АД с короткозамкнутым ротором.

1.5.6. Нагрев и охлаждение двигателя кратковременного режима. Выбор двигателя кратковременного режима работы по мощности.

[9 (9), 10 (9)].

При изучении данного раздела нужно восстановить знания в области энергетики отдельных типов двигателей, различных способов регулирования и переходных процессов пуска и торможения. Следует разобраться в физических процессах теплообмена между составными частями двигателя между собой и с окружающей средой и внимательно рассмотреть допущения, заложенные в основу выбора двигателей по мощности. Изучение различных с точки зрения нагрева режимов работы двигателей необходимо в связи с тем, что при выборе двигателей по мощности используется сравнение реальных режимов работы двигателей с каталожными режимами.

1.6. Заключение

1.7. Лабораторные работы

1.7.1. Электроприводы постоянного тока [14]

Работа 2.1. Исследование статических характеристик двигателя независимого (параллельного) возбуждения.

Работа 2.2. Исследование системы « Тиристорный преобразователь – двигатель (ТП – Д) ».

Работа 2.3. Исследование системы « Генератор – двигатель (Г – Д) ».

Работа 2.4. Исследование переходных режимов системы «Тиристорный преобразователь – двигатель».

1.7.2. Асинхронные электроприводы [15]

Работа 2.5. Исследование статических характеристик асинхронного двигателя с фазным ротором.

Работа 2.6. Исследование системы «Преобразователь частоты с непосредственной связью — асинхронный двигатель (НПЧ — АД)».

Работа 2.7. Исследование системы «Преобразователь частоты инверторного типа — асинхронный двигатель (ПЧИ—АД)».

Работа 2.8. Исследование переходных режимов системы «Преобразователь частоты инверторного типа — асинхронный двигатель (ПЧИ — АД)».

Работа 2.9. Исследование асинхронно-вентильного каскада.

1.7.3. Синхронные электроприводы [16]

Работа 2.10. Исследование статических и динамических характеристик нерегулируемого синхронного электропривода.

Работа 2.11. Исследование системы «Преобразователь частоты с непосредственной связью — синхронный двигатель (НПЧ — СД)».

Работа 2.12. Исследование переходных режимов системы «Преобразователь частоты с непосредственной связью — синхронный двигатель (ПЧИ — СД)».

Работа 2.13. Исследование статических характеристик вентильного двигателя.

1.8. Практические занятия

1.8.1. Механика электропривода. Приведение статических моментов и моментов инерции к валу двигателя. Основное уравнение движения электропривода. Переходные процессы механической части электропривода.
[9 (1), 5 (8, 9)].

1.8.2. Двигатель независимого возбуждения (ДНВ). Расчет механических и электромеханических характеристик. Обеспечение работы двигателя в заданной точке $M_{зад}$, $\omega_{зад}$ двигательного и тормозных режимов.
[9 (3.3, 3.4), 5 (12; 13), 2 (2.3)].

1.8.3. Реостатный пуск ДНВ. Расчет правильной пусковой диаграммы. Механические переходные процессы пуска и торможения ДНВ.

[9 (4.8), 2 (2.4), 5 (14.1,16.1)].

1.8.4. Двигатель последовательного возбуждения (ДПВ). Расчет механических и электромеханических характеристик. Обеспечение работы двигателя в заданной точке $M_{зад}$, $\omega_{зад}$ двигательного и тормозных режимов.

[9 (3.7,3.8), 5 (12), 2 (2.13, 2.15)].

1.8.5. Асинхронный двигатель (Д). Расчет механических и электромеханических характеристик. Обеспечение работы двигателя в заданной точке $M_{зад}$, $\omega_{зад}$ двигательного и тормозных режимов при питании от цеховой сети.

[9 (3.11), 2 (3.3,3.7,3.8), 5 (12,13)].

1.8.6. Реостатный пуск АД . Расчет правильной пусковой диаграммы. Механические переходные процессы пуска и торможения АД.

[9 (4.8), 2 (3.4), 5 (14.1, 14.2, 16.1)].

1.8.7. Расчет механических и электромеханических характеристик АД при изменении частоты и амплитуды напряжения.

[9 (3.12), 5 (13.2)].

1.8.8. Расчет механических и электромеханических характеристик АД при питании от источника тока.

[9 (3.13), 5 (13.2)].

Практические занятия проводятся в основном в вычислительном центре кафедры. Для расчета характеристик и переходных процессов используются специальные программы [5].

1.9. Курсовое проектирование

Курсовое проектирование выполняется по учебному пособию[5,6].

2. КОНТРОЛЬНЫЕ РАБОТЫ

Перед выполнением контрольной работы необходимо проработать раздел по рекомендованной литературе, номера и параграфы которой приводятся в конце каждой темы рабочей программы. После усвоения основных понятий и закономерностей следует разобрать имеющиеся в пособии типовые расчеты и приступить к выполнению контрольной работы.

Требования к оформлению контрольных работ:

– контрольная работа выполняется в обычной школьной тетради, на обложке задания – титульный лист с номером варианта;

– на первой странице задания пишется номер и условие задачи (что дано и что требуется рассчитать), при этом каждую рассчитанную величину из требуемых в дальнейшем нужно выделять;

– все вычисления и математические преобразования снабжаются краткими пояснениями;

– при подстановке в формулу числовые значения величин записываются в том же порядке, как и соответствующие им символы в формуле (если расчет выполняется в Mscad, то все присвоения рассчитываемых величин должны быть пояснены);

– размерность величин ставится только у окончательного результата;

– при выполнении серии однотипных расчетов приводится расчет со всеми пояснениями и формулами для одной точки, результаты расчета других точек сводятся в таблицы;

– графики и диаграммы вычерчиваются карандашом на миллиметровой бумаге, выполняются в определенном масштабе.

Вычерчивание графиков, диаграмм и электрических схем от руки не разрешается. Графики приклеивают к свободной странице.

Если при решении задачи или проработке теоретического материала возникают трудности, необходимо обратиться за консультацией к преподавателю.

Защита правильно выполненных контрольных работ проводится на консультациях в течение семестра или во время лабораторно-экзаменационной сессии. Зачет по курсу выставляется на основании зачетных и защищенных контрольных работ и зачета по лабораторным работам.

Вариант контрольной работы назначается преподавателем или определяется по двум последним цифрам номера зачетной книжки как остаток от деления на 25. Например, шифр студента 6137 означает, что его вариант 12.

При выполнении расчетов необходимо использовать рекомендованную литературу, методические указания к курсовому проектированию [5], каталоги электротехнической промышленности.

2.1. Контрольная работа №1

Механика электропривода

Задача 2.1.1. Приведение статических моментов и моментов инерции к валу двигателя

В вариантах заданий приняты условные обозначения технологических параметров рабочих органов:

m – масса перемещаемого груза, т ;
 v – скорость перемещения груза, м/с;
 $D_б (D_{хв})$ – диаметр барабана (ходового винта), м ;
 $M_б(m_{хв})$ – масса барабана (ходового винта), кг;
 $J_б$ – момент инерции барабана, кгм²;
 $D_п$ – диаметр подшипников барабана, м ;
 $\mu_п$ – коэффициент трения в подшипниках барабана;
 i_{12}, i_{34} – передаточные числа шестеренных пар;
 η_{12}, η_{34} – КПД передачи;
 J_1, J_2, J_3, J_4 – моменты инерции шестерен, кгм²;
 $J_{дв}$ – момент инерции ротора двигателя, кгм²;
 $J_{ш}$ – момент инерции тормозного шкива, кгм²;
 α – угол нарезки резьбы, град;
 φ – угол трения в резьбе, град;
 F_x – усилие подачи, кН.

По заданным технологическим параметрам рабочего органа рассчитать для ПРЯМОГО и ОБРАТНОГО направлений движения:

$\omega_{ро}$ – угловую скорость вала рабочего органа, рад/с;
 $P_{ро}$ – мощность на валу рабочего органа, кВт;
 $M_{ро}$ – момент на валу рабочего органа, Нм;
 $J_{ро}$ – момент инерции рабочего органа, кгм²;
 $\omega_{дв}$ – угловую скорость вала двигателя, рад/с;
 $P_{дв}$ – мощность на валу двигателя, кВт;
 M_c – статический момент, приведенный к валу двигателя, Нм;
 $J_{пр}$ – момент инерции рабочего органа, приведенный к валу двигателя, кгм²;
 $J_{пер}$ – момент инерции передачи, приведенный к валу двигателя, кгм²;
 $\delta = (J_{дв} + J_{пер}) / J_{дв}$ – коэффициент, учитывающий момент инерции передачи в моменте инерции ротора двигателя;
 J – суммарный момент инерции механической части электропривода, кгм².

2.1.1.1. Механизм подъема

Кинематическая схема барабанной лебедки механизма подъема мостового крана [8] приведена на рис.2.1.1.1. Двигатель 3 через редуктор 5 приводит во вращение барабан 2 лебедки, на который наматывается при подъеме и сматывается при опускании груза m канат 1. Грузозахватное приспособление

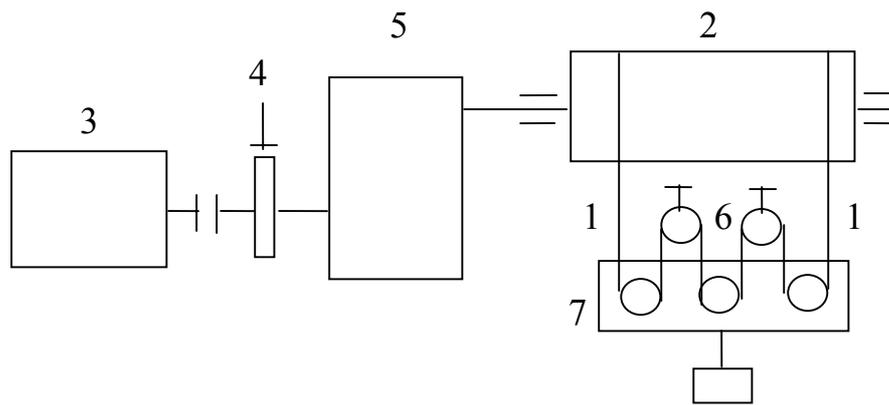


Рис.2.1.1.1. Кинематическая схема механизма подъема

Таблица 2.1.1.1

Технологические данные механизма подъема

$$\eta_{12}=\eta_{34}=0,9; D_{п}=0,2 \cdot D_{б}; \mu_{п}=0,08; J_{ш}=0,1 \text{ кгм}^2; i_{п}=3; J_{дв}=0,5 \text{ кгм}^2$$

Вариант	m	v	D _б	m _б	i ₁₂	i ₃₄	J1	J2	J3	J4
	т	м/с	м	кг	-	-	кгм ²			
1	1,0	1,0	0,4	100	1,7	4,0	0,1	0,5	0,3	2,0
2	1,0	0,95	0,4	100	1,7	4,2	0,1	0,5	0,3	2,0
3	1,1	0,9	0,4	100	1,7	4,5	0,1	0,5	0,3	2,0
4	1,2	0,85	0,4	100	1,7	4,7	0,1	0,5	0,3	2,5
5	1,3	0,8	0,4	120	1,7	5,0	0,2	0,5	0,3	2,5
6	1,3	0,75	0,4	120	2	4,4	0,2	0,6	0,4	3,0
7	1,4	0,7	0,4	120	2	4,8	0,2	0,7	0,5	3,5
8	1,5	0,65	0,4	120	2	5,0	0,2	0,7	0,5	3,5
9	1,6	0,6	0,4	140	2,3	4,8	0,1	0,9	0,7	4,0
10	1,8	0,55	0,4	140	2,3	5,2	0,1	0,9	0,7	4,5
11	2,0	0,5	0,5	140	2,7	6,2	0,1	1,0	0,8	6,0
12	2,2	0,45	0,5	160	3	6,2	0,1	1,3	1,2	7,0
13	2,5	0,4	0,5	160	3	7,0	0,2	1,3	1,2	8,0
14	2,8	0,35	0,5	160	3	7,2	0,2	1,5	1,4	10
15	3,3	0,3	0,5	180	4	7,0	0,2	1,8	2,5	12
36	4,0	0,25	0,5	200	4	10	0,2	1,8	2,5	18
37	5,0	0,2	0,6	200	5	10	0,2	2,2	3,0	22

подвешивается на подвижных блоках 7, которые образуют с неподвижными относительно лебедки блоками 6 полиспафт. Удержание груза в подвешенном состоянии осуществляется тормозом 4. Расчетные соотношения приводятся в литературе [6,7]. Технологические параметры механизма приведены в табл. 2.1.1.1.

2.1.1.2. Механизм подачи станка

В электроприводе подач двигатель осуществляет перемещение инструмента или изделия для обеспечения процесса резания.

Наибольшее распространение получил привод с ходовым винтом [7], типовая кинематическая схема которого приведена на рис. 2.1.1.2.

Вращательное движение от двигателя 1 через редуктор 2 передается ходовому винту 3 и через гайку 4, закрепленную на суппорте, преобразуется в поступательное движение подачи суппорта 5 по направляющим 6. Двигатель подачи обеспечивает передвижение суппорта со скоростью v и преодоление суммарного усилия подачи, необходимое для линейного перемещения суппорта

$$F_{\text{п}} = 1,2 * F_x + (F_z + F_y + 9,81 * m) * \mu_c,$$

которое зависит от составляющих процесса резания: усилия подачи F_x , радиального усилия $F_y \approx 0,8 * F_x$, усилия резания $F_z \approx 2,5 * F_x$, от массы суппорта m и от коэффициента трения суппорта при движении по направляющим μ_c . Коэффициент 1,2 учитывает перекосы при движении суппорта. На обратном ходе суппорта резание не выполняется.

Расчетные соотношения приводятся в литературе [7,8].

Технологические параметры механизма приведены в табл. 2.1.1.2.

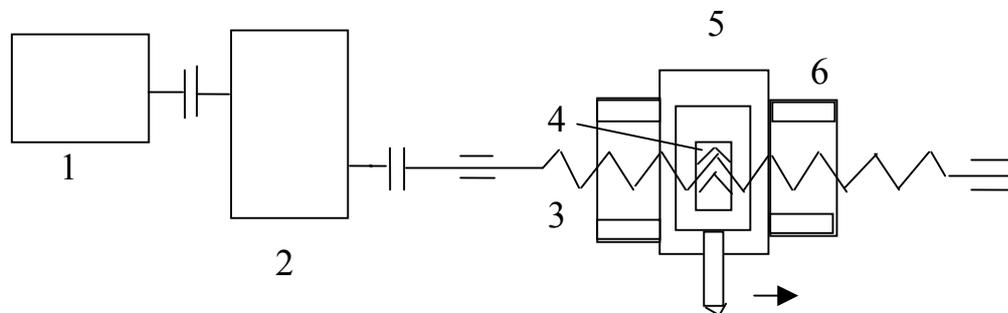


Рис. 2.1.1.2. Кинематическая схема механизма подачи станка

Таблица 2.1.1.2

Технологические данные механизма подачи станка

$$\eta_{12}=0,9; \mu_c=0,08; m_{xв}=100 \text{ кг}; \varphi=4 \text{ град}; J_{дв}=0,2 \text{ кгм}^2$$

Вариант	F_x	m	v	$D_{xв}$	α	i_{12}	J_1	J_2
	кН	т	мм/с	мм	град	-	кгм ²	
16	10	2,0	50	50	5,0	4,4	0,03	0,6
17	9	2,1	48	50	5,0	4,6	0,03	0,6
18	8	2,2	46	50	5,0	4,8	0,03	0,6
19	7	2,3	44	50	5,0	5,0	0,03	0,6
20	6	2,4	42	50	5,0	5,2	0,03	0,6
21	10	2,0	50	48	5,2	4,4	0,04	0,8
22	9	2,1	48	48	5,2	4,6	0,04	0,8
23	8	2,2	46	48	5,2	4,8	0,04	0,8
24	7	2,3	44	48	5,2	5,0	0,04	0,8
25	6	2,4	42	48	5,2	5,2	0,04	0,8
26	10	2,0	50	46	4,8	3,8	0,03	0,7
27	9	2,1	48	46	4,8	4,0	0,03	0,7
28	8	2,2	46	46	4,8	4,2	0,035	0,7
29	7	2,3	44	46	4,8	4,4	0,035	0,7
30	6	2,4	42	46	4,8	4,6	0,035	0,7
31	10	2,0	50	44	5,5	4,2	0,03	0,6
32	9	2,1	48	44	5,5	4,4	0,03	0,6
33	8	2,2	46	44	5,5	4,6	0,03	0,6
34	7	2,3	44	44	5,5	4,8	0,03	0,6
35	6	2,4	42	44	5,5	5,0	0,03	0,6

Задача 2.1.2

Двигатель работает последовательно на каждом i -м участке в течение времени t_i с моментом на валу двигателя M_i при статическом моменте M_{ci} . По заданному в табл. 2.1.2 закону изменения момента двигателя $M_i(t)$ рассчитать и построить зависимости скорости $\omega(t)$, ускорения $\varepsilon(t)$, угла поворота вала двигателя $\alpha(t)$. На участке $i=9$ необходимо рассчитать время t_i до остановки двигателя. Тип двигателя смотри по номеру варианта в табл. 2.1.4.

Таблица 2.1.2.

Расчет координат механической части электропривода

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Delta t_i = t_i / T_d$	0,1	0,2	0,4	0,2	0,1	0,3	0,1	0,2	?
$M_i = M / M_H$	1,6	2,1	1,6	1,1	0,6	0,2	-1,6	-2,1	0
$M_{ci} = M_c / M_H$	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
t_i, c									
$M_{дин}/M_H$									
$\Delta\omega_i/\omega_{OH}$									
$\varepsilon_i, рад / c^2$									
$\omega_{коні}, рад/c$									
$\Delta\alpha_i$									
$\alpha_{коні}, рад$									

Задача 2.1.3

В табл. 2.1.3 приведено значение скорости ω_i в конце каждого i -го участка. За время работы t_i на i -м участке скорость изменяется на величину $\Delta\omega_i$. Рассчитать и построить зависимости скорости $\omega(t)$, момента двигателя $M(t)$ при статическом моменте $M_c/M_H = 0,5$. Тип двигателя смотри по номеру варианта в табл. 2.1.4.

Таблица 2.1.3

Расчет $M(t)$ по заданному закону $\omega(t)$

i	1	2	3	4	5	6	7	8
$\Delta t_i = t_i / T_d$	0,2	0,1	0,3	1,0	0,7	0,4	0,5	1,0
$\omega_i = \omega / \omega_{OH}$	0,1	0,2	0,5	1,0	1,0	0,6	0,3	0
M/M_H								

Тип двигателя к контрольным работам №1 и №2

	Тип	Ун,В		Тип	Ун,В		Тип	Ун,В
1	Д12Т	220	14	Д21Б	220	27	Д812Т	440
2	Д21Т	220	15	Д22Б	220	28	Д810Т	440
3	Д22Т	220	16	Д31Б	220	29	Д808Т	440
4	Д31Т	220	17	Д32Б	220	30	Д41Т	440
5	Д32Т	220	18	Д41Б	220	31	Д31Т	440
6	Д41Т	220	19	Д806Б	220	32	Д21Т	440
7	Д806Т	220	20	Д808Б	220	33	Д12Т	220
8	Д808Т	220	21	Д806Б	440	34	Д21Т	220
9	Д810Т	220	22	Д32Б	440	35	Д22Т	220
10	Д812Т	220	23	Д22Б	440	36	Д31Т	220
11	Д814Т	220	24	Д818Т	440	37	Д32Т	220
12	Д816Т	220	25	Д816Т	440	38	Д41Т	220
13	Д818Т	220	26	Д814Т	440	39	Д808Т	220

Исполнение: Б – быстроходное, Т – тихоходное.

Каталожные данные двигателей смотри [5, 16, 17, 19].

Задача 2.1.4

Рассчитать и построить зависимости момента двигателя $M(t)$, скорости двигателя $\overline{\omega}(t)$, угла поворота $\alpha(t)$, обеспечивающие угол поворота $\alpha = \alpha_{\text{кон}}$ (полученный в задаче 2.1.2) за минимальное время при $M_c=0,5$.

Момент двигателя при этом не должен превышать предельного значения, а скорость двигателя – базового значения.

Сравнить диаграммы $\alpha(t)$. Во сколько раз уменьшилось время отработки угла поворота вала двигателя?

2.2. Контрольная работа №2

Расчет характеристик, параметров схем включения и переходных процессов электропривода с двигателем независимого возбуждения

Задача 2.2.1

Для двигателя (тип двигателя смотри по номеру варианта в табл.2.1.4) рассчитать и построить естественную механическую $\omega(M)$ и естественную электромеханическую $\omega(I)$ характеристики. На одном графике с рассчитанными характеристиками построить каталожные характеристики.

Задача 2.2.2

Рассчитать параметры схем включения ($U, R_{\text{доб}}$), обеспечивающие работу двигателя (тип двигателя – по номеру варианта в табл. 2.1.4) в двигательном и тормозных режимах в четырех заданных точках:

$$M_{\text{зад}} = + / - 0.8, \quad \omega_{\text{зад}} = + / - 0.4.$$

Рассчитать и построить механические характеристики, проходящие через заданные точки. Рассчитать КПД двигателя.

Задача 2.2.3

Рассчитать и построить правильную пусковую диаграмму, обеспечивающую пуск двигателя (тип двигателя – по номеру варианта в табл. 2.1.4) за время пуска $t_{\text{п}}=T_{\text{д}}$ при $M_{\text{с}}=0,5$ и $J=2*J_{\text{дв}}$.

Принять число ступеней $m=2..3$.

Рассчитать:

$M1$ – максимальный момент пусковой диаграммы;

$M2$ – момент переключения пусковой диаграммы;

$I1$ – максимальный ток пусковой диаграммы;

$I2$ – ток переключения пусковой диаграммы;

$R1, R2, R3$ – полные сопротивления якорной цепи;

$R_{1\text{доб}}, R_{2\text{доб}}, R_{3\text{доб}}$ – сопротивления ступеней;

t_1, t_2, t_3, t_e – времена работы на ступенях.

Рассчитать и построить нагрузочные диаграммы пуска двигателя $M(t)$ и $\omega(t)$. Для расчета переходных процессов и построения нагрузочных диаграмм рекомендуется использовать программу RENOP [5].

Задача 2.2.4

Рассчитать сопротивление якорной цепи $R_{дт}$, обеспечивающее динамическое торможение двигателя (тип двигателя по номеру варианта в табл. 2.1.4) от начальной скорости на естественной характеристике до нуля за минимальное время. Принять $M_c=0,5$ и $J=2*J_{дв}$.

Рассчитать:

$M_{тнач}$ – начальное значение тормозного момента;

$I_{тнач}$ – значение тока в начале торможения;

$R_{дтдоб}$ – сопротивление ступени торможения;

t_t – время торможения.

Рассчитать и построить нагрузочные диаграммы динамического торможения двигателя $M(t)$ и $\omega(t)$.

Для расчета переходных процессов и построения нагрузочных диаграмм рекомендуется использовать программу RENOP [5].

2.3. Контрольная работа №3

Расчет характеристик, параметров схем включения и переходных процессов асинхронного электропривода

Задача 2.3.1

Рассчитать и построить естественную механическую $\omega(M)$ характеристику двигателя (тип двигателя смотри по номеру варианта в табл. 2.3.1):

- по формуле Клосса;
- по упрощенной формуле Клосса;
- по T-образной схеме замещения *.

Механические характеристики построить на одном графике. На этом же графике построить каталожную механическую характеристику.

Рассчитать и построить естественные электромеханические характеристики $\omega(I_2)$, $\omega(I_1)$, $\omega(I_\mu)$:

- по известным параметрам Г-образной схемы замещения;
- по формулам В.А.Шубенко;
- по T-образной схеме замещения *.

* Для расчета рекомендуется использовать программу HARAD "Расчет характеристик асинхронного двигателя"[5].

Электромеханические характеристики привести на другом графике, совместив их с каталожной электромеханической характеристикой $\omega(I_1)$.

Таблица 2.3.1

Тип двигателя к контрольной работе №3

	Тип		Тип		Тип
1	МТН111-6	17	МТФ011-6	33	4АК160S6
2	МТН112-6	18	МТФ012-6	34	4АК160M6
3	МТН211-6	19	МТФ111-6	35	4АК180M6
4	МТН311-6	20	МТФ112-6	36	4АК200M6
5	МТН312-6	21	МТФ211-6	37	4АК200L6
6	МТН411-6	22	МТФ311-6	38	4АК225M6
7	МТН412-6	23	МТФ312-6	39	4АК250S6
8	МТН311-6	24	МТФ411-6	40	4АК250M6
9	МТН312-8	25	МТФ412-6	41	4АК160S8
10	МТН411-8	26	МТФ311-8	42	4АК160M8
11	МТН412-8	27	МТФ312-8	43	4АК180M8
12	МТН511-8	28	МТФ411-8	44	4АК200M8
13	МТН512-8	29	МТФ412-8	45	4АК200L8
14	МТН111-6	30	МТФ411-6	46	4АК225M8
15	МТН112-6	31	МТФ311-6	47	4АК250S8
16	МТН211-6	32	МТФ211-6	48	4АК250M8

Каталожные данные двигателей смотри [5, 16, 17, 18, 20].

Задача 2.3.2

Рассчитать параметры схем включения асинхронного двигателя, обеспечивающие работу двигателя (тип двигателя – по номеру варианта в табл. 2.3.1) в четырех заданных точках: $M_{\text{зад}} = \pm 0,8$, $\omega_{\text{зад}} = \pm 0,4$.

В расчетах использовать все возможные варианты:

- введение добавочного сопротивления в цепь ротора $R_{2\text{доб}}$;
- изменением частоты f_1 и амплитуды U_1 напряжения на статоре при питании от источника напряжения;
- изменением частоты f_1 и амплитуды I_1 тока статора при питании от источника тока;

– при питании статора от источника постоянного тока.

Рассчитать и построить механические и электромеханические характеристики, проходящие через заданные точки. Определить режим работы и рассчитать КПД и $\cos\phi$ в заданных точках.

Для расчета рекомендуется использовать программу HARAD "Расчет характеристик асинхронного двигателя"[5].

Задача 2.3.3

Рассчитать и построить правильную пусковую диаграмму, обеспечивающую пуск двигателя (тип двигателя – по номеру варианта в табл. 2.3.1) за время пуска $t_{\text{п}}=T_{\text{д}}$ при $M_{\text{с}}=0,5$ и $J=2*J_{\text{дв}}$.

Принять число ступеней $m=2..3$.

Рассчитать:

M_1 – максимальный момент пусковой диаграммы;

M_2 – момент переключения пусковой диаграммы;

I_{21} – максимальный ток ротора пусковой диаграммы;

I_{22} – ток переключения ротора пусковой диаграммы;

R_1, R_2, R_3 – полные сопротивления роторной цепи;

$R_{1\text{доб}}, R_{2\text{доб}}, R_{3\text{доб}}$ – сопротивления ступеней;

t_1, t_2, t_3, t_e – времена работы на ступенях.

Рассчитать и построить искусственные механические характеристики, обеспечивающие правильную пусковую диаграмму.

Для построения нагрузочных диаграмм рекомендуется использовать программу READ "Расчет переходных процессов в системе электропривода «Магнитный контроллер – асинхронный двигатель» [5].

Задача 2.3.4

Рассчитать сопротивление цепи ротора R_2 , обеспечивающее торможение двигателя (тип двигателя – по номеру варианта в табл. 2.3.1) от начальной скорости на естественной характеристике до нуля за время торможения $t_{\text{т}}=T_{\text{д}}$. Принять $M_{\text{с}}=0,5$ и $J=2*J_{\text{дв}}$.

Рассчитать:

$M_{\text{тнач}}$ – начальное значение тормозного момента;

$I_{2\text{тнач}}$ – значение тока ротора в начале торможения;

$M_{\text{ткон}}$ – значение момента при $\omega=0$;

$I_{2\text{ткон}}$ – значение тока при $\omega=0$;

$R_{\text{тдоб}}$ – сопротивление ступени торможения;

$t_{\text{т}}$ – время торможения.

Способ торможения (противовключение, динамическое с независимым возбуждением или с самовозбуждением) выбирается из условий обеспечения заданного времени торможения.

Рассчитать и построить механическую и электромеханические характеристики , обеспечивающие торможение двигателя.

Для построения нагрузочных диаграмм рекомендуется использовать программу READ "Расчет переходных процессов в системе электропривода «Магнитный контроллер – асинхронный двигатель»[5].

3. КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ПО НЕКОТОРЫМ РАЗДЕЛАМ

Расчеты выполняются в относительных единицах, условное обозначение о.е. не указывается.

3.1. Механика электропривода

3.1.01. В каком режиме (разгона, торможения) работает двигатель, если $M = -1$, $M_c = 0,5$? Каким должен быть M , чтобы время переходного процесса уменьшить в 1,5 раза?

3.1.02. Во сколько раз изменится время пуска двигателя при $M_c = 0,5$, если момент двигателя увеличить от $M=1$ до $M=2$?

3.1.03. Для двигателя ($\omega_{\text{он}} = 100$ рад/с, $M_{\text{н}} = 100$ Нм, $J = 1$ кгм²) определить ускорение и построить переходный процесс $\omega(t)$ для заданных значений момента двигателя M , его начальной скорости $\omega_{\text{нач}}$ и статического момента M_c :

3.1.03.01. $M=1$, $\omega_{\text{нач}}=0$, $M_c=0$;

3.1.03.02. $M=1$, $\omega_{\text{нач}}=0$, $M_c=-1$;

3.1.03.03. $M=2$, $\omega_{\text{нач}}=0$, $M_c=1$;

3.1.03.04. $M=-1$, $\omega_{\text{нач}}=1$, $M_c=1$;

3.1.03.05. $M=-2$, $\omega_{\text{нач}}=1$, $M_c=0$;

3.1.03.06. $M=-2$, $\omega_{\text{нач}}=0$, $M_c=0$;

3.1.03.07. $M=-1$, $\omega_{\text{нач}}=0$, $M_c=0$;

3.1.03.08. $M=2$, $\omega_{\text{нач}}=-1$, $M_c=1$;

3.1.03.09. $M=2$, $\omega_{\text{нач}}=-1$, $M_c=0$;

3.1.03.10. $M=-2$, $\omega_{\text{нач}}=1$, $M_c=1$;

3.1.03.11. $M=-2$, $\omega_{\text{нач}}=1$, $M_c=0,5$;

3.1.03.12. $M=2$, $\omega_{\text{нач}}=-1$, $M_c=0,5$;

3.1.03.13. $M=2$, $\omega_{\text{нач}} = -1$, $M_c = -0,5$.

3.1.04. Как изменится время переходного процесса, если момент инерции рабочего органа увеличится вдвое ?

3.1.05. Как и во сколько раз изменится приведенный к валу двигателя момент инерции рабочего органа $J_{\text{лр}}$, если скорость подъема увеличить вдвое при $\omega_{\text{дв}} = \text{const}$?

3.1.06. Как и во сколько раз изменится приведенный к валу двигателя момент сопротивления движению $M_{\text{рс}}$ механизма подъема груза, если скорость двигателя снизить вдвое ?

3.1.07. На сколько изменится приведенный к валу двигателя момент сопротивления движению $M_{\text{рс}}$, если скорость подъема груза увеличить вдвое при $\omega_{\text{дв}} = \text{const}$.

3.1.08. На сколько изменится $M_{\text{вс}}$, приведенный к валу двигателя, если применить редуктор с КПД, повышенным на 10 % ?

3.1.09. Во сколько раз изменится время пуска двигателя при $M_c = 0,5$, если момент двигателя изменить с $M = 1,5$ до $M = 2$?

3.1.10. Во сколько раз изменится время торможения при $M_c = 0,5$, если момент двигателя изменить от $M = -2$ до $M = -1$?

3.1.11. Для двигателя ($\omega_{\text{он}} = 100$ рад/с, $M_n = 100$ Нм, $J = 1$ кгм²) построить переходный процесс $\omega(t)$, если момент двигателя изменяется по закону $M(t)$:

3.1.11.1. $M(t) = 0,5 + t$, реактивный $M_c = 1$, $\omega_{\text{нач}} = 0$;

3.1.11.2. $M(t) = 0,5 + t$, активный $M_c = 1$, $\omega_{\text{нач}} = 0$;

3.1.11.3. $M(t) = 1 - 0,5 * t$, реактивный $M_c = 0,5$, $\omega_{\text{нач}} = 0$;

3.1.11.4. $M(t) = 1 - 0,5 * t$, активный $M_c = 0,5$, $\omega_{\text{нач}} = 0$;

3.1.11.5. $M(t) = t$, реактивный $M_c = 0,5$, $\omega_{\text{нач}} = 0$;

3.1.11.6. $M(t) = t$, активный $M_c = 0,5$, $\omega_{\text{нач}} = 0$;

3.1.11.7. $M(t) = 0,5 + \sin(t)$, реактивный $M_c = 1$, $\omega_{\text{нач}} = 0$;

3.1.11.8. $M(t) = 0,5 + \sin(t)$, активный $M_c = 1$, $\omega_{\text{нач}} = 0$.

3.2. Электромеханические свойства двигателей независимого возбуждения (ДНВ)

3.2.01. Определить напряжение на якоре ДНВ, обеспечивающее при $M = 1$ скорость вращения $\omega_n / 2$. Принять $r = 0,1$, $\Phi = 1$.

3.2.02. Определить $R_{\text{доб}}$ в цепи ДНВ, обеспечивающее при $M = 1$ скорость вращения $\omega_n / 2$. Принять $r = 0,1$, $U = 1$, $\Phi = 1$.

3.2.03. Определить $R_{\text{доб}}$ в цепи якоря ДНВ в режиме динамического торможения, обеспечивающее при $M=1$ скорость $\omega = -1$. Принять $\Phi=1$, $r=0,1$, $U=1$.

3.2.04. Определить скорость ω ДНВ, если при $U=1$, $M=1$, $\Phi=1$ ввести в цепь якоря $R_{\text{доб}}=0,5$. Принять $r=0,1$.

3.2.05. Определить скорость ω ДНВ, если при $\Phi=1$, $R_{\text{доб}}=0,5$ момент двигателя $M=2$. Принять $r=0,1$.

3.2.06. Определить скорость и ток двигателя при $U=1$, $M=1$, $\Phi=0,5$. Принять $r=0,1$.

3.2.07. Определить режим работы, момент, ток и скорость ДНВ, если $U=1$, $M=-0,5$, $\Phi=0,5$, $r=0,1$.

3.2.08. Определить режим работы, момент, ток и скорость ДНВ, если $U=0,5$, $M_c=1$, $\Phi=1$, $r=0,1$, $R_{\text{доб}}=0,5$.

3.2.09. Определить режим работы, момент, ток и скорость ДНВ, если $U=0,5$, $M_c=1$, $\Phi=1$, $R_{\text{доб}}=1$. Принять $r=0,1$.

3.2.10. Во сколько раз изменится жесткость механической характеристики ДНВ в режиме динамического торможения, если поток уменьшить в два раза?

3.2.11. Во сколько раз изменится жесткость механической характеристики ДНВ в режиме динамического торможения, если сопротивление в цепи якоря уменьшить в два раза?

3.2.12. ДНВ работает в точке $M_c=0,5$, $\omega_c=0,5$. Возрос $M_c=1,5$. На сколько нужно увеличить напряжение на двигателе, чтобы восстановить скорость, если $r=0,1$?

3.2.13. ДНВ работает в точке $M_c=0,2$, $\omega_c=0,5$. Определить напряжение на якоре, необходимое для поддержания скорости, если M_c возрос в 2 раза, а $r=0,1$?

3.2.14. ДНВ работает в точке $M_c=1$, $\omega_c=-0,5$. Определить напряжение на двигателе, необходимое для поддержания скорости, если поток двигателя уменьшится до 0,9 при $r=0,1$.

3.2.15. На сколько изменится скорость и ток ДНВ, если напряжение на якоре возросло на 0,1. Принять $M_c=1$, $r=0,1$.

3.2.16. Определить бросок тока якоря, если при работе ДНВ с $M_c=0,5$ и $\omega_c=0,5$ напряжение скачком снизилось на 0,1. Принять $\Phi=1$, $r=0,1$.

3.2.17. Определить ток и скорость ДНВ, если при $M_c=1$, $\omega_c=0,9$, $U=1$ поток уменьшился до $\Phi=0,9$.

3.2.18. Определить ток и скорость ДНВ, если при $M_c=0,5$, $\omega_c=0,95$, $U=1$ поток уменьшился до $\Phi=0,8$.

3.2.19. При переводе ДНВ, работавшего на холостом ходу на естественной характеристике, в режим динамического торможения бросок тока якоря составил 2,5. Определить сопротивление якорной цепи двигателя.

3.2.20. Определить бросок тока якоря при переводе ДНВ, работавшего без нагрузки на естественной характеристике, в режим противовключения с сопротивлением в цепи якоря $R=1,2$.

3.2.21. Определить режим работы, ток и скорость ДНВ, если $U=0,5$, $M=1$, $r=0,1$, $\Phi=1$.

3.2.22. Определить режим работы, момент, ток и скорость ДНВ, если $U=0$, $M_c=0,5$, $r=0,1$.

3.3. Электромеханические свойства асинхронных двигателей (АД)

3.3.01. Определить момент и скорость АД при введении в цепь ротора $R_{2\text{доб}}=0,5$. Принять $S_e=0,05$, $M_c=1$.

3.3.02. Определить величину сопротивления в цепи ротора АД, обеспечивающего пусковой момент $M=2$.

3.3.03. При работе АД в режиме динамического торможения сопротивление цепи ротора увеличилось вдвое. Во сколько раз изменятся скорость спуска и ток ротора?

3.3.04. Определить скорость АД на естественной характеристике при $M_c=2$. Принять $S_n=0,1$.

3.3.05. Определить скорость АД при $M_c=1$ и $R_2=0,6$.

3.3.06. Определить скорость АД при $M_c=1$ и $R_2=1$.

3.3.07. Определить R_2 АД, чтобы при $M_c=1$ получить $\omega=0,7$.

3.3.08. АД работает на холостом ходу. Определить R_2 , обеспечивающее в режиме противовключения момент двигателя $M=2$ в момент переключения.

3.3.09. Во сколько раз изменится жесткость механической характеристики, если при питании АД от источника тока ток статора возрос вдвое?

3.3.10. Определить скорость АД, если при $M_c=1$ и $\omega_c=0,9$ частота тока сети снизилась на 0,1 при $U/f=\text{const}$.

3.3.11. Определить R_2 , обеспечивающее в конце торможения противовключением момент двигателя, равный номинальному.

3.3.12. Во сколько раз изменится жесткость механической характеристики АД, если напряжение на статоре снизилось вдвое?

3.3.13. Определить частоту и напряжение АД, обеспечивающие его работу в точке $M_c=0,5$ и $\omega_c=0,2$, если $S_n=0,1$.

3.3.14. Определить приближенно частоту и напряжение АД, обеспечивающие работу в точке $M_c=0,5$ и $\omega_c=0,7$, если $S_n=0,1$, $U/f=\text{const}$.

3.3.15. При работе АД с $M_c=1$ на естественной характеристике ($M_k/M_n=3$) напряжение на статоре снизилось вдвое. Определить скорость двигателя.

3.3.16. Определить скорость вращения АД при $M_c=1$, $\omega_c=0,5$, если частота напряжения на статоре снизилась на 0,1. Принять $S_n=0,1$, $U/f=\text{const}$.

3.3.17. При работе АД с $M_c=1$, $\alpha = 0,5$, $U_1=0,5$ момент возрос вдвое. Определить значения f_1 и U_1 , чтобы восстановить значение скорости. Принять $S_n=0,1$.

3.3.18. При работе АД с $M_c=1$ и $\omega_c=0,3$ момент M_c увеличился вдвое. Определить частоту и напряжение ТПЧ для поддержания скорости. Принять $S_n=0,1$ и $U/f=\text{const}$.

3.3.19. При работе АД с $M_c=0$ и $\omega_c=0,5$ появился $M_c=1$. Определить частоту и напряжение ТПЧ, необходимые для поддержания скорости, если $S_n=0,1$ и $U/f=\text{const}$.

3.3.20. Определить режим работы, скорость и момент АД, если при $M_c=0$ и $\omega_c=0,5$ частота напряжения снизилась на 0,1. Принять $S_n=0,1$, $U_1=\text{const}$.

3.3.21. При работе АД в режиме динамического торможения ток статора увеличен вдвое. Во сколько раз изменятся скорость спуска и ток ротора?

3.3.22. Определить режим работы АД, скорость и момент, если частота сети $\alpha = 0,5$, $M_c=1$, $S_n=0,1$. Принять $U/f=\text{const}$.

3.3.23. Во сколько раз изменится скорость АД, если увеличить сопротивление роторной цепи в 5 раз. Принять $M_c=1$, $S_n=0,1$.

3.4. Переходные процессы в системах электропривода

3.4.1 Система ТП – Д

. Двигатель независимого возбуждения ($P_n = 8,1$ кВт, $U_n = 100$ В, $I_n = 100$ А, $\omega_n = 90$ рад / с, $J_{дв} = 1$ кгм²) получает питание от тиристорного преобразователя ($R_z = 0,1 \cdot R_n$).

3.4.1.1 Построить нагрузочные диаграммы пуска двигателя до скорости $\omega_{зад} = 0,6 \cdot \omega_{он}$ при постоянной времени задатчика интенсивности $T_{зи} = 1$ с, моменте инерции $J = 1,5 \cdot J_{дв}$, статическом моменте $M_c = 0,5 \cdot M_n$.

Как изменится вид нагрузочных диаграмм, если установить $T_{зи} = 0,9$ с?

3.4.1.2. Двигатель работает в точке $M_{зад}=0,5*M_n, \omega_{зад}=0,5*\omega_{он}$.

Построить нагрузочные диаграммы торможения двигателя при постоянной времени задатчика интенсивности $T_{зи}=1с$ и $J=1,5*J_{дв}$.

Как изменится вид нагрузочных диаграмм, если $J=2*J_{дв}$?

3.4.1.3. Построить нагрузочные диаграммы пуска двигателя до скорости $\omega_{зад}=0,7*\omega_{он}$ при постоянной времени задатчика интенсивности $T_{зи}=1с$, моменте инерции $J=1,5*J_{дв}$, статическом моменте $M_c=0$.

Как изменится вид нагрузочных диаграмм, если установить $M_c=0,5*M_n$?

3.4.1.4. Построить нагрузочные диаграммы пуска двигателя до скорости $\omega_{зад}=0,9*\omega_{он}$ при постоянной времени задатчика интенсивности $T_{зи}=0,5с$, моменте инерции $J=1,5*J_{дв}$, статическом моменте $M_c=M_n$.

Определить минимальное время пуска.

3.4.1.5. Двигатель работает в точке $M_{зад}=M_n, \omega_{зад}=0,8*\omega_{он}$.

Построить нагрузочные диаграммы торможения двигателя при постоянной времени задатчика интенсивности $T_{зи}=1с$ и $J=2*J_{дв}$.

Как изменится вид нагрузочных диаграмм, если тиристорный преобразователь - нереверсивный?

3.4.1.6. Двигатель работает в точке $M_{зад}=0,8*M_n, \omega_{зад}=0,8*\omega_{он}$.

Построить нагрузочные диаграммы торможения двигателя за минимальное время, если $J=2*J_{дв}$.

3.4.1.7. Двигатель работает в точке $M_{зад}=0,5*M_n, \omega_{зад}=0,8*\omega_{он}$.

Построить нагрузочные диаграммы торможения холодного и нагретого до максимальной температуры двигателя при постоянной времени задатчика интенсивности $T_{зи}=1с$ и $J=1,5*J_{дв}$.

3.4.1.8. Построить нагрузочные диаграммы пуска двигателя до скорости $\omega_{зад}=0,5*\omega_{он}$ при постоянной времени задатчика интенсивности $T_{зи}=1с$, моменте инерции $J=1,5*J_{дв}$, статическом моменте $M_c=-0,5*M_n$.

Как изменится вид нагрузочных диаграмм, если тиристорный преобразователь – нереверсивный?

3.4.2. Система Г – Д

Двигатель независимого возбуждения ($P_n=8,1квт, U_n=100 В, I_n=100 А, \omega_n=90 1/с, J_{дв}=1 кгм^2$) получает питание от генератора с такими же номинальными данными, как у двигателя, но скорость его вращения $\omega_r=150 рад/с$.

3.4.2.1. Построить нагрузочные диаграммы пуска двигателя до скорости $\omega_{зад}=0,8*\omega_{он}$ при базовой постоянной времени цепи возбуждения генератора $T_{вб}=1с$ и $J=1,5*J_{дв}$.

Как изменятся нагрузочные диаграммы пуска, если установить коэффициент форсировки $\alpha = 2$?

4.2.2. Двигатель работает в точке $M_{зад}=M_n$, $\omega_{зад}=0,7*\omega_{он}$. Построить нагрузочные диаграммы торможения двигателя при базовой постоянной времени цепи возбуждения генератора $T_{вб}=1с$ и $J=1,5*J_{дв}$, если коэффициент форсировки $\alpha = 2$.

3.4.3. Система ПЧ – АД

Асинхронный двигатель $P_n=9,5$ кВт, $n_n=900$ об/мин, $M_k=250$ Нм, $J_{дв}=1$ кгм² получает питание от преобразователя частоты с задатчиком интенсивности.

3.4.3.1 Рассчитать и построить нагрузочные диаграммы $\omega_o=f(t)$, $\omega=f(t)$, $M=f(t)$ пуска двигателя до скорости $\omega_{зад}=0,8$ за минимальное время, если $M_c=1$, $J=2*J_{дв}$, $f_{1мин}=5$ Гц.

3.4.3.2. Асинхронный двигатель работает в точке $M_{зад}=0,5, \omega_{зад}=0,8$. Напряжение задания уменьшилось на 0,4.

Рассчитать и построить нагрузочные диаграммы $\omega_o=f(t)$, $\omega=f(t)$, $M=f(t)$ процесса снижения скорости, если $J=1,5*J_{дв}$, $T_{зи}=1с$, $R_s=0$.

3.4.3.3. Асинхронный двигатель работает в точке $M_{зад}=0,5$, $\omega_{зад}=0,2$. Напряжение задания увеличилось на 0,4.

Рассчитать и построить нагрузочные диаграммы $\omega_o=f(t)$, $\omega=f(t)$, $M=f(t)$ процесса изменения скорости и динамическую механическую характеристику, если $J=1,5*J_{дв}$, $T_{зи}=1с$, $R_s=0$.

3.4.3.4. Асинхронный двигатель работает в точке $M_{зад}=1$, $\omega_{зад}=0,5$.

Рассчитать и построить нагрузочные диаграммы $\omega_o=f(t)$, $\omega=f(t)$, $M=f(t)$ торможения двигателя с учетом $f_{1мин}=5$ Гц, если $J=1,5*J_{дв}$, $T_{зи}=1с$, а статический момент - реактивный.

3.4.3.5. Рассчитать и построить нагрузочные диаграммы $\omega_o=f(t)$, $\omega=f(t)$, $M=f(t)$ пуска двигателя до скорости $\omega_{зад}=0,7$, если $M_c=1$ (активный), $J=1,5*J_{дв}$, $f_{1мин}=5$ Гц, $T_{зи}=1$ с.

3.4.3.6. Рассчитать и построить нагрузочные диаграммы $\omega_o=f(t)$, $\omega=f(t)$, $M=f(t)$ пуска двигателя до скорости $\omega_{зад}=0,9$ за минимальное время, если $M_c=0,5$, $J=1,5*J_{дв}$, $R_s=0$.

3.4.3.7. Рассчитать и построить нагрузочные диаграммы $\omega_o=f(t)$, $\omega=f(t)$, $M=f(t)$ пуска двигателя до скорости $\omega_{зад}=0,9$, если $T_{зи}=1с$, $M_c=0,5$, $J=1,5*J_{дв}$, $R_s=0$. Как изменится вид нагрузочных диаграмм, если $J=2*J_{дв}$?

3.4.3.8. Рассчитать и построить нагрузочные диаграммы $\omega_0=f(t)$, $\omega=f(t)$, $M=f(t)$ пуска двигателя с пропорционально-интегральным задатчиком интенсивности до скорости $\omega_{зад}=0,8$ за минимальное время, если $M_c=0,5$, $J=1,5*J_{дв}$, $R_3=0$.

3.4.3.9. Асинхронный двигатель работает в точке $M_{зад}=0,5$, $\omega_{зад}=0,5$. Напряжение задания уменьшилось на 0,3.

Рассчитать и построить нагрузочные диаграммы $\omega_0=f(t)$, $\omega=f(t)$, $M=f(t)$ процесса изменения скорости и динамическую механическую характеристику, если $J=1,5*J_{дв}$, $T_{зи}=1с$, $R_3=0$.

3.4.3.10. Асинхронный двигатель работает в точке $M_{зад}=0,5$, $\omega_{зад}=0,8$.

Рассчитать и построить нагрузочные диаграммы $\omega_0=f(t)$, $\omega=f(t)$, $M=f(t)$ торможения двигателя, если $J=1,5*J_{дв}$, $T_{зи}=1с$, если преобразователь частоты не обеспечивает торможение.

4. ТИПОВЫЕ РАСЧЕТЫ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

4.1. Механика электропривода

4.1.1. Приведение статических моментов и моментов инерции к валу двигателя

Механическая часть рабочих органов (РО) содержит элементы, вращающиеся с разными скоростями. Передаваемые моменты в связи с этим также различны. Поэтому необходимо заменить реальную кинематическую схему РО на расчетную схему, в которой все элементы вращаются со скоростью вала приведения. Чаще всего приведение осуществляют к валу двигателя.

В задачах требуется по известной кинематической схеме РО составить расчетную схему, в которой моменты сопротивления движению (статические моменты) и моменты инерции приводятся к валу двигателя. Для этого необходимо изучить кинематическую схему РО, разобраться с принципом работы механической части, выявить основную его технологическую работу и места выделения потерь мощности.

Критерием приведения статических моментов к валу двигателя является энергетический баланс механической части электропривода, обеспечивающий равенство мощностей реальной и расчетной схем электропривода.

Критерием приведения моментов инерции к валу двигателя является равенство запаса кинетической энергии механической части реальной и расчетной схем электропривода.

Критерием приведения жесткости упругой системы к валу двигателя является равенство запаса потенциальной энергии упругого звена механической части в реальной и расчетной схемах электропривода.

Статические моменты, моменты инерции на валу РО рассчитываются по формулам [5].

Задача 4.1.1

Рассчитать для ПРЯМОГО и ОБРАТНОГО направлений движения значения скоростей, статических моментов и моментов инерции, мощностей на валу РО и на валу двигателя по заданным технологическим параметрам механизма подачи (таблица 2.1.1.2, вариант 35).

Технологические данные механизма подачи станка:

$$F_x=6 \text{ кН}; m=2,4 \text{ т}; v=42 \text{ мм/с}; D_{\text{хв}}=44 \text{ мм}; m_{\text{хв}}=100 \text{ кг}; \alpha=5,5^\circ; \varphi=4^\circ; \\ i_{12}=5, J_{\text{дв}}=0,2 \text{ кгм}^2; J_1=0,03 \text{ кгм}^2; J_2=0,6 \text{ кгм}^2; \eta_{12}=0,9; \mu_c=0,08.$$

Решение

После изучения принципа работы механизма и его кинематической схемы определяем участки выделения потерь:

- в редукторе (потери учитываются КПД η_{12});
- в передаче « винт – гайка » (потери рассчитываются углом трения φ в нарезке винта);
- в подшипниках ходового винта (потери рассчитываются через коэффициент трения в подшипниках, однако в рассмотренной литературе эти потери не учитываются).

4.1.1.1. Угловая скорость ходового винта (рабочего органа)

$$\omega_{\text{ро}} = v/\rho ,$$

где ρ – радиус приведения передачи « винт – гайка » с шагом h , диаметром $d_{\text{ср}}$ и углом нарезки резьбы α .

$$\rho = v/\omega_{\text{ро}} = h/ (2*\pi) = (\pi*d_{\text{ср}}*\text{tg } \alpha) / (2*\pi) = (d_{\text{ср}}/2)*\text{tg } \alpha.$$

$$\rho = (d_{\text{ср}}/2)*\text{tg } \alpha = (44/2)*\text{tg } 5,5^\circ = 2,12 \text{ мм}.$$

$$\omega_{\text{ро}} = v/\rho = 42 / 2,12 = 19,8 \text{ рад / с}.$$

4.1.1.2. Момент на валу ходового винта (рабочего органа) с учетом потерь в передаче « винт – гайка » углом трения φ :

$$M_{\text{ро}} = F_{\text{п}}*(d_{\text{ср}}/2)*\text{tg}(\alpha + \varphi),$$

где $F_{\text{п}}$ – суммарное усилие подачи.

$$F_{\text{п}} = 1,2*F_x + (F_z + F_y + 9,81*m)*\mu_c =$$

$$= 1,2*F_x + (2,5*F_x + 0,8*F_x + 9,81*m)*\mu_c =$$

$$= 1,2*6 + (2,5*6 + 0,8*6 + 9,81*2,4)*0,08 = 10,67 \text{ кН}.$$

$$M_{\text{ро}} = F_{\text{п}}*(d_{\text{ср}}/2)*\text{tg}(\alpha + \varphi) =$$

$$= 10,67 * (0,044/2) * \operatorname{tg}(5,5^\circ + 4^\circ) = 39,27 \text{ Нм.}$$

4.1.1.3. Мощность на валу рабочего органа полезная :

– без учета потерь в передаче « винт – гайка »

$$P_{po} = F_x * v = 6 * 10^3 * 42 * 10^{-3} = 252 \text{ Вт};$$

– с учетом потерь

$$P_{po} = M_{po} * \omega_{po} = 39,27 * 19,8 = 777,5 \text{ Вт.}$$

4.1.1.4. Статический момент, приведенный к валу двигателя,

$$M_{pc} = M_{po} / (i_{12} * \eta_{12}) = 39,27 / (5 * 0,9) = 8,73 \text{ Н*м.}$$

4.1.1.5. Угловая скорость вала двигателя

$$\omega_{дв} = \omega_{po} * i_{12} = 19,8 * 5 = 99 \text{ рад / с.}$$

4.1.1.6. Мощность на валу двигателя

$$P_{дв} = M_{pc} * \omega_{дв} = 8,73 * 99,1 = 864,3 \text{ Вт.}$$

Находим элементы кинематической схемы, запасующие кинетическую энергию: суппорт массой m , ходовой винт массой $m_{хв}$, шестерни редуктора J1 и J2, ротор электродвигателя – J_{дв}.

4.1.1.7. Момент инерции рабочего органа определяется массой m суппорта, перемещающейся со скоростью v , и моментом инерции ходового винта J_{хв}.

Момент инерции поступательно движущегося суппорта

$$J_c = m * v^2 / \omega_{po}^2 = m * \rho^2 = 2400 * 0,00212^2 = 0,0106 \text{ кгм}^2.$$

Момент инерции ходового винта

$$J_{хв} = m_{хв} * (d_{ср}/2)^2 = 100 * (0,044/2)^2 = 0,0484 \text{ кгм}^2.$$

Момент инерции рабочего органа

$$J_{po} = J_c + J_{хв} = 0,0106 + 0,0484 = 0,059 \text{ кгм}^2.$$

4.1.1.8. Момент инерции рабочего органа, приведенный к валу двигателя,

$$J_{пр} = J_{po} / i_{12}^2 = 0,059 / 5^2 = 0,00236 \text{ кгм}^2.$$

4.1.1.9. Момент инерции передачи, приведенный к валу двигателя,

$$J_{пер} = J1 + J2 / i_{12}^2 = 0,03 + 0,6 / 5^2 = 0,054 \text{ кгм}^2.$$

4.1.1.10. Коэффициент, учитывающий момент инерции передачи в моменте инерции ротора двигателя,

$$\delta = (J_{дв} + J_{пер}) / J_{дв} = (0,2 + 0,054) / 0,2 = 1,27.$$

4.1.1.11. Суммарный момент инерции механической части электропривода

$$J = \delta * J_{дв} + J_{пр} = 1,27 * 0,2 + 0,00236 = 0,256 \text{ кгм}^2.$$

4.1.2. Основное уравнение движения электропривода

При переменных статических моментах и моментах инерции, зависящих от скорости, времени, угла поворота вала двигателя (линейного перемещения PO), уравнение движения электропривода записывается в общем виде:

$$M(x) - M_c(x) = J(x) \cdot d\omega / dt + (\omega/2) \cdot dJ(x) / dt.$$

При постоянном моменте инерции $J = \text{const}$ уравнение упрощается

$$M(x) - M_c(x) = J \cdot d\omega / dt,$$

и его называют основным уравнением движения.

Правую часть уравнения $M(x) - M_c(x) = M_{\text{дин}}$ называют динамическим моментом. Знак $M_{\text{дин}}$ определяет знак производной $d\omega / dt$ и состояние электропривода:

– $M_{\text{дин}} = d\omega / dt > 0$ – двигатель разгоняется;

– $M_{\text{дин}} = d\omega / dt < 0$ – двигатель снижает скорость;

– $M_{\text{дин}} = d\omega / dt = 0$ – установившийся режим работы двигателя, его скорость неизменна.

Темп разгона зависит от момента инерции J электропривода, определяющего способность механической части электропривода запасать кинетическую энергию.

Для анализа режимов работы и решения задач удобнее записать основное уравнение движения в относительных единицах (о.е.). Приняв за базовые значения момента $M_b = M_n$ – номинальный электромагнитный момент двигателя, скорости $\omega_b = \omega_{\text{он}}$ – скорость идеального холостого хода при номинальном напряжении на якоре и номинальном токе возбуждения, основное уравнение движения в о.е. записывается в виде

$$\bar{M} - \bar{M}_c = T_d \cdot d\bar{\omega} / dt,$$

где $T_d = J \cdot \omega_{\text{он}} / M_n$ – механическая постоянная времени электропривода, учитывающая и приведенный момент инерции РО. Наличие в уравнении T_d свидетельствует о записи уравнения в о.е.

Задача 4.1.2.1

Рассчитать для механизма с двигателем ($P_n = 8,1$ кВт, $\omega_n = 90$ рад/с, $U_n = 100$ В, $I_n = 100$ А) и суммарным моментом инерции $J = 1$ кгм² динамический момент $M_{\text{дин}}$, ускорение электропривода ε , конечное значение скорости $\omega_{\text{кон}}$, угол поворота вала двигателя α за промежуток времени $\Delta t = t_i / T_d = 0,5$, если $\bar{M} = 1,5$, $\bar{M}_c = 0,5$, $\bar{\omega}_{\text{нач}} = 0,2$.

Решение

Основное уравнение движения в о.е.

$$\bar{M} - \bar{M}_c = T_d \cdot d\bar{\omega} / dt$$

Механическая постоянная времени двигателя

$$T_d = J \cdot \omega_{\text{он}} / M_n.$$

Значения ω_{OH} и M_H рассчитаем по каталожным данным двигателя (см. задачу 4.2.1).

Скорость идеального холостого хода

$$\omega_{OH} = U_H / k\Phi_H = 100 / 1 = 100 \text{ рад / с.}$$

Номинальный электромагнитный момент

$$M_H = k\Phi_H * I_H = 1 * 100 = 100 \text{ Нм.}$$

Механическая постоянная времени

$$T_d = J * \omega_{OH} / M_H = 1 * 100 / 100 = 1 \text{ с.}$$

4.1.2.1. Динамический момент

$$\overline{M}_{дин} = \overline{M} - \overline{M}_c = 1,5 - 0,5 = 1.$$

4.1.2.2. Ускорение электропривода (при $t_0 = T_d$)

$$\varepsilon = d\overline{\omega} / (dt / T_d) = (\overline{M} - \overline{M}_c) = \overline{M}_{дин} = 1.$$

Приращение скорости за промежуток времени $\Delta t = t_i / T_d = 0,5$:

$$\Delta\overline{\omega} = (\overline{M} - \overline{M}_c) * t_i / T_d = (1,5 - 0,5) * 0,5 = 0,5.$$

4.1.2.3. Конечное значение скорости на участке

$$\overline{\omega}_{кон} = \overline{\omega}_{нач} + \Delta\overline{\omega} = 0,2 + 0,5 = 0,7.$$

4.1.2.4. Приращение угла поворота

$$\begin{aligned} \overline{\Delta\alpha} &= \overline{\omega}_{нач} * \Delta t + (\overline{\omega}_{кон} + \overline{\omega}_{нач}) * \Delta t / 2 = \\ &= 0,2 * 0,5 + (0,7 + 0,2) * 0,5 / 2 = 0,325. \end{aligned}$$

Определим полученные значения в абсолютных единицах:

$$M_{дин} = \overline{M}_{дин} * M_H = 1 * 100 = 100 \text{ Нм;}$$

$$\varepsilon = \overline{\varepsilon} * \omega_{OH} / t_0 = 1 * 100 / 1 = 100 \text{ рад / с}^2;$$

$$\Delta\omega = \overline{\Delta\omega} * \omega_{OH} = 0,5 * 100 = 50 \text{ рад / с;}$$

$$\omega_{кон} = \overline{\omega}_{кон} * \omega_{OH} = 0,7 * 100 = 70 \text{ рад / с;}$$

$$\Delta\alpha = \overline{\Delta\alpha} * \omega_{OH} * t_0 = 0,325 * 100 * 1 = 32,5 \text{ рад.}$$

4.1.3. Переходные процессы механической части электропривода

Для расчета и построения нагрузочных диаграмм $M(t)$ и $\omega(t)$ используется решение основного уравнения движения

$$\overline{M} - \overline{M}_c = T_d d\overline{\omega} / dt ,$$

из которого для конечных приращений при $M = \text{const}$ и $M_c = \text{const}$ для заданного t_i получим приращение скорости

$$\Delta\overline{\omega} = (\overline{M} - \overline{M}_c) * t_i / T_d$$

и значение скорости в конце участка

$$\overline{\omega} = \overline{\omega}_{нач} + \Delta\overline{\omega}.$$

Задача 4.1.3.1

Для двигателя ($\omega_{\text{он}}=100$ рад/с, $M_{\text{н}}=100$ Нм, $J=1$ кгм²) рассчитать ускорение и построить переходный процесс $\bar{\omega}(t)$, если $\bar{M} = 2$, $\bar{\omega}_{\text{нач}} = 0$, $\bar{M}_c = 0$.

Решение

Механическая постоянная времени

$$T_d = J * \omega_{\text{он}} / M_{\text{н}} = 1 * 100 / 100 = 1 \text{ с.}$$

Приращение скорости $\Delta\bar{\omega} = (\bar{M} - \bar{M}_c) * t_i / T_d = (2 - 0) * t_i / T_d$,
и при $t_i = T_d$ получаем $\Delta\bar{\omega} = 2$.

Скорость за это время достигнет значения

$$\bar{\omega} = \bar{\omega}_{\text{нач}} + \Delta\bar{\omega} = 0 + 2 = 2.$$

Значения $\bar{\omega} = 1$ скорость достигнет за $\Delta t = 0,5$, в этот момент времени разгон прекращают, снижая момент двигателя до величины статического момента $\bar{M} = \bar{M}_c$ (см. рис. 4.1.3.1).

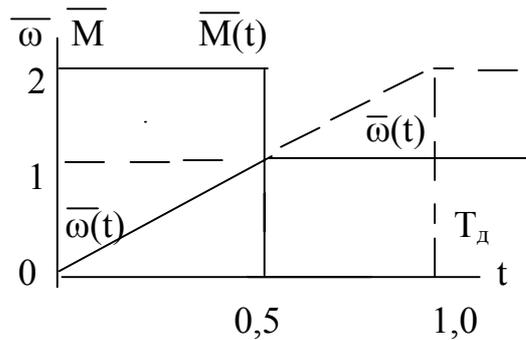


Рис. 4.1.3.1. Механический переходный процесс при $M=\text{const}$

Задача 4.1.3.2

Для двигателя ($\omega_{\text{он}}=100$ рад/с, $M_{\text{н}}=100$ Нм, $J=1$ кгм²) рассчитать ускорение и построить переходный процесс реверса $\bar{\omega}(t)$, если $\bar{M} = -2$, $\bar{\omega}_{\text{нач}} = 1$, $M_c = 1$.

Решение

Приращение скорости

$$\Delta\bar{\omega} = (\bar{M} - \bar{M}_c) * t_i / T_d = (-2 - 1) * t_i / T_d.$$

За базовое время $t_0 = T_d$ приращение скорости $\Delta\bar{\omega} = -3$, конечная скорость

$$\bar{\omega}_{\text{кон}} = \bar{\omega}_{\text{нач}} + \Delta\bar{\omega} = 1 - 3 = -2.$$

Двигатель остановится ($\bar{\omega}_{\text{кон}} = 0$) при $\Delta\bar{\omega} = -1$ за время $t_i = T_d / 3$. Реверс закончится при $\bar{\omega}_{\text{кон}} = -1$, при этом $\Delta\bar{\omega} = -2$, $t_i = 2 * T_d / 3$. В этот момент

времени следует снизить момент двигателя до $M = M_c$. Рассмотренный переходный процесс справедлив для активного статического момента (см. рис. 4.1.3.2,а).

При реактивном статическом моменте, который изменяет свой знак при изменении направления движения, переходный процесс распадается на два этапа. До остановки двигателя переходный процесс протекает также, как и при

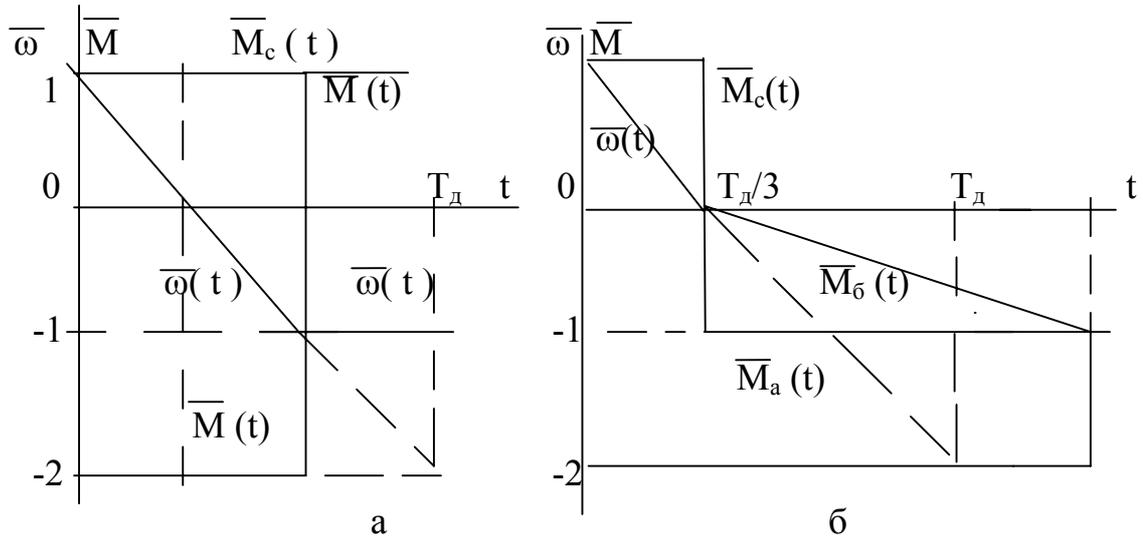


Рис.4.1.3.2 К задаче 4.1.3.2: а – при активном M_c ;
б – при реактивном M_c .

активном M_c . Двигатель остановится, $\overline{\omega}_{\text{кон}} = 0$, тогда $\Delta\overline{\omega} = -1$, время торможения $t_i = T_d / 3$.

При изменении направления движения меняются начальные условия:

$$\overline{M}_c = -1; \overline{\omega}_{\text{нач}} = 0; \overline{M} = -2, \text{ начальное время } \Delta t_{\text{нач}} = T_d / 3.$$

Тогда приращение скорости составит

$$\Delta\overline{\omega} = (\overline{M} - \overline{M}_c) * t_i / T_d = (-2 - (-1)) * t_i / T_d = - t_i / T_d.$$

При $t_i = T_d$ приращение скорости $\Delta\overline{\omega} = -1$, $\overline{\omega}_{\text{кон}} = -1$, разгон в обратную сторону произойдет за $\Delta t = T_d$, реверс закончится за $\Delta t = 4 * T_d / 3$. В этот момент времени следует снизить момент двигателя до $M = M_c$ (см. рис. 4.1.3.2,б). Таким образом, при реактивном M_c время реверса увеличилось вдвое.

Задача 4.1.3.3

Для двигателя ($\omega_{\text{он}} = 100$ рад/с, $M_n = 100$ Нм, $J = 1$ кгм²) построить переходный процесс $\omega(t)$, если момент двигателя изменяется по закону $M(t) = 0,5 + \sin(t)$, активный $M_c = 1$, $\omega_{\text{нач}} = 0$.

Решение

Рассмотрим поведение двигателя на начальном участке.

Когда момент двигателя меньше статического активного момента $M < M_c$, то под действием активного M_c двигатель начинает разгоняться в сторону, противоположную знаку момента двигателя, $\omega < 0$.

При $M = M_c$ снижение скорости прекратится, а при $M > M_c$ скорость начнет нарастать до нуля, и только после перехода через нуль начнется разгон двигателя в заданном направлении.

Если момент двигателя является функцией времени, то для получения выражения нагрузочной диаграммы скорости приходится интегрировать основное уравнение движения. Т.к. интегрирование выполняется в о.е., то время также приходится вводить в о.е., при этом за базовое значение времени удобно принять $t_0 = T_d$. Тогда в функциях $\sin(t)$ и $\cos(t)$ полагаем, что

$$\begin{aligned}\omega(t) &= \int (M - M_c) * dt = \\ &= \int (0,5 + \sin t - M_c) * dt = (0,5 - M_c) * t + 1 - \cos t\end{aligned}$$

$\omega=1$ рад/с, и t принимает значение радиана.

На рис. 4.1.3.3 приведен механический переходный процесс для синусоидального изменения момента $M(t)$. Значение t , при котором $M = M_c$ и $M_{\text{дин}} = 0$, а скорость достигает максимального отрицательного значения, найдем из формулы:

$$M = M_c = 0,5 + \sin(t) = 1.$$

Тогда $t = \arcsin(1 - 0,5) = 0,524$,

$$\begin{aligned}\overline{\omega}_{\text{мин}} &= (0,5 - M_c) * t + 1 - \cos(t) = \\ &= (0,5 - 1) * 0,524 + 1 - \cos(0,524) = -0,128.\end{aligned}$$

Для определения времени перехода скорости через нуль воспользуемся методом подбора, так как уравнение $\omega(t)$ – трансцендентное.

t, c	0	0,524	1	1,11	1,5	2	3
$M(t)$	0,5	1	1,34	1,4	1,5	1,4	0,64
$\cos(t)$	1	0,866	0,54	0,444	0,07	-0,416	-0,99
$\omega(t)$	0	-0,128	-0,04	0,000	0,16	0,416	0,49

Таким образом, скорость переходит через нуль при

$$t = 1,11 * t_0 = 1,11 * T_d = 1,11 * 1 = 1,11 \text{ с.}$$

В дальнейшем изменение скорости будет происходить под действием момента двигателя, являющегося основным управляющим воздействием электропривода.

При реактивном статическом моменте до $M = M_c$ двигатель будет стоять, так как не способен разогнать двигатель в обратную сторону. Процесс пуска начнется с того момента времени, когда момент двигателя превысит реактивный статический момент $M > M_c$. Закон изменения скорости для реактивного статического момента нужно вывести самостоятельно.

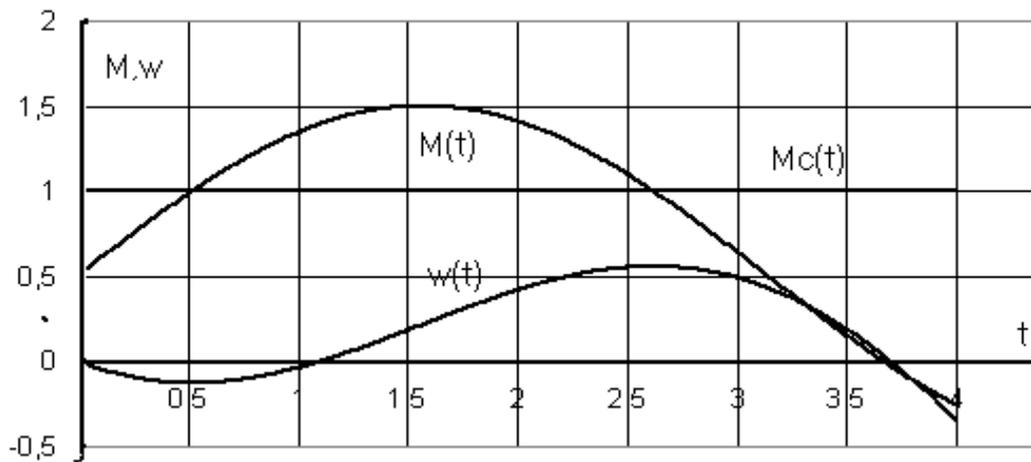


Рис. 4.1.3.3. Механический переходный процесс при синусоидальном изменении момента $M(t)$

4.2. Расчет параметров схем включения и характеристик двигателя независимого возбуждения (ДНВ)

Напряжение U , приложенное к якорной цепи двигателя постоянного тока, уравнивается эдс двигателя E и падением напряжения в сопротивлениях якорной цепи от протекающего тока якоря I .

$$U = E + I \cdot R + L \cdot \frac{dI}{dt},$$

где $E = k\Phi\omega$, В;

R — сопротивление якорной цепи, Ом;

L — индуктивность якорной цепи, Гн;

Φ — магнитный поток двигателя, Вб;

$K = \frac{p_p N}{2\lambda a}$ — конструктивный коэффициент, учитывающий число пар полюсов p_p , число активных проводников N и число параллельных ветвей a якорной обмотки.

Для установившегося режима работы уравнение принимает вид

$$U = k\Phi\omega + IR,$$

при этом для ДНВ поток Φ постоянен, а в двигателях последовательного и смешанного возбуждения поток Φ зависит от тока якоря.

Выражение механической характеристики двигателя постоянного тока $\omega = f(M)$ имеет вид

$$\omega = U / k\Phi - MR / (k\Phi)^2,$$

где $M = k\Phi I$ – электромагнитный момент двигателя, Нм.

Естественной называют механическую характеристику двигателя при номинальном напряжении питающей сети U_n и отсутствии добавочных сопротивлений в цепях двигателя (для ДНВ - при номинальном потоке Φ_n).

Принимая за базовые величины U_n, Φ_n, I_n , а также $M_n = k\Phi_n * I_n$,

$R_n = U_n / I_n, \omega_{он} = U_n / k\Phi_n$, выражение механической характеристики в общем виде записывают в о.е.

$$\bar{\omega} = \bar{U} / \bar{\Phi} - \bar{M} * \bar{R} / \bar{\Phi}^2 (*)$$

Естественная механическая характеристика ДНВ ($U = U_n, \Phi = \Phi_n, R = r_{я}$ – невыключаемое сопротивление) в о.е. имеет вид

$$\bar{\omega} = 1 - \bar{M} * \bar{r}_{я}$$

При $M = M_n$ естественная механическая характеристика ДНВ записывается в виде, удобном для построения

$$\bar{\omega}_n = 1 - \bar{r}_{я}$$

Если $\bar{M} = 0$, то $\bar{\omega} = \bar{\omega}_{он} = 1$.

Если $\bar{M} = 1$, то $\bar{\omega} = \bar{\omega}_n$, а $\bar{\omega}_{он} - \bar{\omega}_n = \bar{r}_{я}$.

Таким образом, естественная механическая характеристика ДНВ строится по двум точкам.

По двум точкам строятся и искусственные характеристики, только используется формула (*), и изменяются в зависимости от изменяемого параметра схемы включения:

$$\bar{\omega}_o = \bar{U} / \bar{\Phi}; \Delta\bar{\omega} = \bar{M} * \bar{R} / \bar{\Phi}^2.$$

Задача 4.2.1

Для двигателя ($P_n=8.1$ квт, $U_n=100$ В, $I_n=100$ А, $\omega_n=90$ рад / с, $J_{дв}=1$ кгм²) рассчитать и построить естественную механическую $\omega(M)$ и естественную электромеханическую $\omega(I)$ характеристики.

Решение

Для построения механической $\omega(M)$ и электромеханической $\omega(I)$ характеристик необходимо рассчитать координаты двух точек: идеального

холостого хода ($\omega_{он}, 0$) и номинальной скорости (ω_n, M_n), причем под M_n следует понимать электромагнитный номинальный момент $M_n = k\Phi_n * I_n$, который отличается от момента на валу $M_{вн}$ на величину момента потерь холостого хода

$$\Delta M_x = M_n - M_{вн}.$$

Скорость идеального холостого хода при номинальном потоке

$$\omega_{он} = U_n / k\Phi_n,$$

где $k\Phi_n$ – номинальный коэффициент эдс E двигателя.

$$k\Phi_n = E_n / \omega_n = (U_n - I_n * r_{я}) / \omega_n.$$

Если сопротивление цепи якоря $r_{я} = r_{оя} + r_{дп} + r_{ко}$ не приведено в каталоге, его можно рассчитать приближенно из условия примерного равенства постоянных и переменных потерь в номинальном режиме работы двигателя.

$$\begin{aligned} r_{я} &= \Delta P_n / (2 * I_n^2) = (U_n * I_n - P_n) / (2 * I_n^2) = \\ &= (100 * 100 - 8100) / (2 * 100^2) = 0,095 \approx 0,1 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Тогда $k\Phi_n = (U_n - I_n * r_{я}) / \omega_n = (100 - 100 * 0,1) / 90 = 1 \text{ Вс}$.

Скорость идеального холостого хода

$$\omega_{он} = U_n / k\Phi_n = 100 / 1 = 100 \text{ рад / с}.$$

Номинальный электромагнитный момент

$$M_n = k\Phi_n * I_n = 1 * 100 = 100 \text{ Нм}.$$

Выбираем базовые величины:

$$U_б = E_б = U_n = 100 \text{ В};$$

$$I_б = I_{нн} = 100 \text{ А};$$

$$k\Phi_б = k\Phi_n = 1 \text{ Вс};$$

$$\omega_б = \omega_{он} = E_б / k\Phi_б = 100 / 1 = 100 \text{ рад / с}$$

$$M_б = k\Phi_б * I_б = k\Phi_n * I_n = M_n = 100 \text{ Нм};$$

$$R_б = U_б / I_б = R_n = U_n / I_n = 100 / 100 = 1 \text{ Ом}.$$

4.2.7,а. Для обеспечения минимального времени переходного процесса двигатель должен работать с предельным моментом $M_{доп}$, ограниченными условиями коммутации тока якоря. Для предложенного двигателя $M_{доп} = 250$

$$\overline{M}_1 = \overline{M}_{доп} = 2,5;$$

$$\lambda = \frac{\overline{M}_1}{\overline{M}_2} = \sqrt[3]{\frac{1}{\overline{M}_1 * \overline{r}_{я}}} = \sqrt[3]{\frac{1}{2,5 * 0,1}} = 1,587;$$

$$\overline{M}_2 = \overline{M}_1 / \lambda = 2,5 / 1,587 = 1,575.$$

Нм (величина $M_{доп}$ для каждого типа двигателя приводится в каталогах как $M_{макс}$, при отсутствии каталога принимают $M_{доп} = 2...2,5 * M_n$).

Максимальный момент пусковой диаграммы $M1 = M_{доп}$.

Определим момент переключения $M2$ пусковой диаграммы:

Проверим правильность расчета

$$\bar{R}_4 = \bar{R}_3 / \lambda = 0,159 / 1,587 = 0,1; \quad \bar{R}_4 = \bar{r}_я.$$

Рассчитаем полные сопротивления якорной цепи:

$$\bar{R}_1 = 1 / \bar{M}_1 = 1 / 2,5 = 0,4; \quad R_1 = \bar{R}_1 * R_H = 0,4 * 1 = 0,4 \text{ Ом};$$

$$\bar{R}_2 = \bar{R}_1 / \lambda = 0,4 / 1,587 = 0,252; \quad R_2 = \bar{R}_2 * R_H = 0,252 * 1 = 0,252 \text{ Ом};$$

$$\bar{R}_3 = \bar{R}_2 / \lambda = 0,252 / 1,587 = 0,159; \quad R_3 = \bar{R}_3 * R_H = 0,159 * 1 = 0,159 \text{ Ом}.$$

Величины ступеней сопротивлений:

$$R_{1\text{доб}} = R_1 - R_2 = 0,4 - 0,252 = 0,148 \text{ Ом};$$

$$R_{2\text{доб}} = R_2 - R_3 = 0,252 - 0,159 = 0,093 \text{ Ом};$$

$$R_{3\text{доб}} = R_3 - r_я = 0,159 - 0,1 = 0,059 \text{ Ом}.$$

Максимальный ток пусковой диаграммы

$$\bar{I}_1 = \bar{M}_1 = 2,5; \quad I_1 = \bar{I}_1 * I_H = 2,5 * 100 = 250 \text{ А}.$$

Ток переключения правильной пусковой диаграммы

$$\bar{I}_2 = \bar{M}_2 = 1,575; \quad I_2 = \bar{I}_2 * I_H = 1,575 * 100 = 157,5 \text{ А}.$$

Правильная пусковая диаграмма построена на рис.4.2.7.

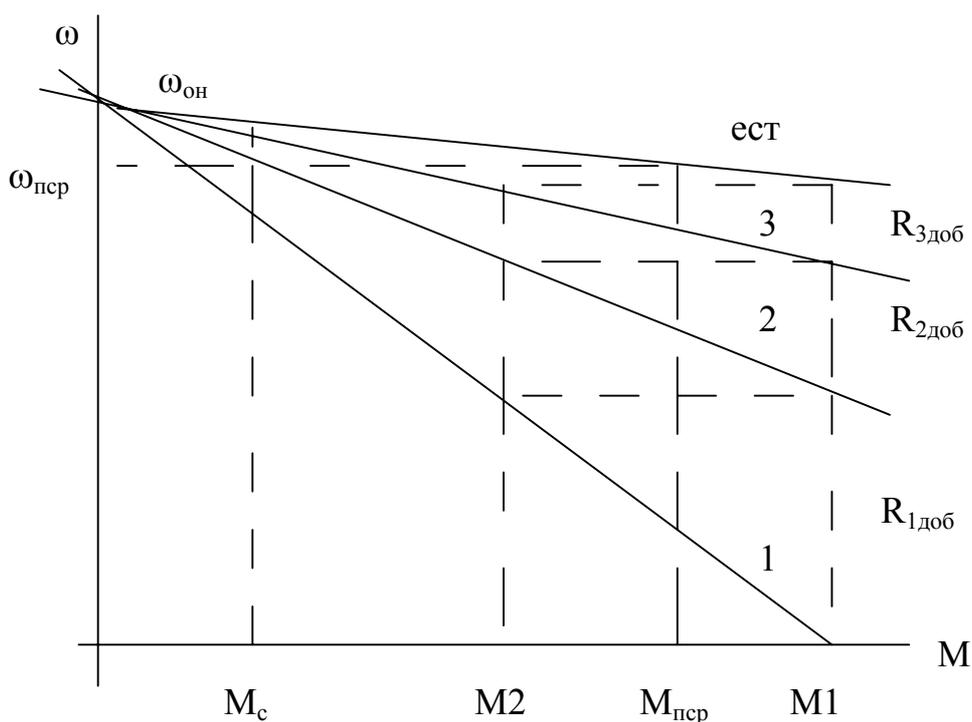


Рис. 4.2.7. Правильная пусковая диаграмма ДНВ

Значения добавочных сопротивлений $R_{1\text{доб}}$, $R_{2\text{доб}}$, $R_{3\text{доб}}$ пропорциональны отрезкам по оси скорости между характеристиками при номинальном моменте.

Время пуска (приближенно, если бы разгон осуществлялся под действием среднего пускового момента до скорости на естественной характеристике, соответствующей этому моменту):

$$\overline{M}_{\text{пер}} = \frac{\overline{M}_1 + \overline{M}_2}{2} = \frac{2,5 + 1,575}{2} = 2,04 ;$$

$$\overline{\omega}_{\text{пер}} = 1 - \overline{M}_{\text{пер}} * \overline{\Gamma}_я = 1 - 2,04 * 0,1 = 0,8 ;$$

$$t_{\text{п}} = \frac{T_{\text{д}} * \overline{\omega}_{\text{пер}}}{\overline{M}_{\text{пер}} - \overline{M}_{\text{с}}} = \frac{2 * 0,8}{2,04 - 0,5} = 1,04 \text{ с}; \quad T_{\text{д}} = \frac{J * \omega_{\text{он}}}{M_{\text{н}}} = \frac{2 * 100}{100} = 2 \text{ с}.$$

4.2.7.б. Для обеспечения заданного ускорения $(d\omega/dt)_{\text{доп}} = 75 \text{ рад / с}^2$. двигатель должен развивать заданный динамический момент

$$M_{\text{дин}} = J * (d\omega/dt)_{\text{доп}} = 2 * 75 = 150 \text{ Нм},$$

тогда максимальный момент двигателя при пуске

$$M1 = M_{\text{с}} + M_{\text{дин}} = 50 + 150 = 200 \text{ Нм}.$$

Далее расчет выполняется аналогично задаче 4.2.7.а.

4.2.7.в. Для обеспечения заданного времени переходного процесса $t_{\text{п}} = T_{\text{д}}$ двигатель должен создать заданный динамический момент. Будем предполагать, что пуск обеспечивается средним пусковым моментом $\overline{M}_{\text{пер}}$. Тогда

$$t_{\text{п}} = \frac{T_{\text{д}} * \Delta \overline{\omega}}{\overline{M}_{\text{пер}} - \overline{M}_{\text{с}}} \Rightarrow \overline{M}_{\text{пер}} = T_{\text{д}} \frac{\Delta \overline{\omega}}{t_{\text{п}}} + \overline{M}_{\text{с}} = 2 * \frac{1}{2} + 0,5 = 1,5.$$

Для дальнейшего расчета необходимо знать максимальный момент двигателя $M1$ и момент переключения $M2$

$$\overline{M}_{\text{пер}} = \frac{\overline{M}_1 + \overline{M}_2}{2}; \quad \overline{M}_1 = \overline{M}_{\text{пер}} + \Delta \overline{M}; \quad \overline{M}_2 = \overline{M}_{\text{пер}} - \Delta \overline{M}.$$

Можно решить уравнение

$$\frac{2 * \overline{M}_{\text{пер}}}{\overline{\Gamma}_я} * \lambda^{m+1} - \lambda - 1 = 0,$$

но оно при $m=2$ уже кубическое, и решать его не просто.

Можно рассчитать методом подбора. Правильность расчета зависит от точности выбора ΔM . Величина ΔM подбирается таким образом, чтобы получилась правильная пусковая диаграмма.

$$\text{Задаем } \Delta \overline{M} = 0,4; \quad \text{тогда } \overline{M}_1 = \overline{M}_{\text{пер}} + \Delta \overline{M} = 1,5 + 0,4 = 1,9,$$

$$\overline{M}_2 = \overline{M}_{\text{пер}} - \Delta \overline{M} = 1,5 - 0,4 = 1,1 \text{ и определяем } \lambda = \frac{\overline{M}_1}{\overline{M}_2} = \frac{1,9}{1,1} = 1,73.$$

Проверим правильную пусковую диаграмму. При выходе на естественную характеристику в цепи якоря должно остаться невыключаемое сопротивление.

Из уравнения

$$\lambda = m \sqrt{\frac{1}{M_1 * \bar{r}_я}} \quad \text{получим} \quad \bar{r}_я = \frac{1}{M_1 * \lambda^m} = \frac{1}{1,9 * 1,73^3} = 0,1016 ,$$

что с точностью 1,6% соответствует условиям задачи.

Далее расчет продолжается по методике задачи 4.2.7.а.

Задача 4.2.8

Рассчитать сопротивление якорной цепи $R_{дт}$, обеспечивающее динамическое торможение двигателя ($P_n=8.1\text{кВт}$, $U_n=100\text{ В}$, $I_n=100\text{ А}$, $\omega_n=90\text{ рад / с}$, $J_{дв}=1\text{ кгм}^2$) при $M_c=0,5$ и $J = 2\text{ кгм}^2$ от начальной скорости на естественной характеристике до нуля:

а - за минимальное время;

б - за время $t_T = T_d$.

Рассчитать:

$M_{тнач}$ – начальное значение тормозного момента;

$I_{тнач}$ – значение тока в начале торможения;

$R_{дтдоб}$ – сопротивление ступени торможения;

t_T – время торможения.

Решение

4.2.8.а. Для обеспечения минимального времени переходного процесса необходимо применить схему включения, использующую максимально допустимый момент двигателя. Для ДНВ ограничение накладывают условия коммутации. В начале торможения момент двигателя принимаем равным максимальному $M_{тнач} = M_{доп}$.

При динамическом торможении двигатель отключается от сети, $U=0$, $\Phi = \Phi_n$, уравнение * (см. п.4.2) записывается в виде

$$\bar{\omega} = -\bar{M} * \bar{R}_{дт} .$$

Значение начальной скорости определим из уравнения предыдущего режима

$$\bar{\omega} = \bar{\omega}_{нач} = 1 - \bar{M}_c * \bar{r}_я = 1 - 0,5 * 0,1 = 0,95 .$$

$$\bar{M} = \bar{M}_{тнач} = -2,5 .$$

Сопротивление цепи якоря в схеме динамического торможения

$$\bar{R}_{дт} = -\frac{\bar{\omega}_{нач}}{\bar{M}_{тнач}} = -\frac{0,95}{-2,5} = 0,38, \quad \bar{R}_{дтдоб} = \bar{R}_{дт} - \bar{r}_я = 0,38 - 0,1 = 0,28,$$

$$R_{дтдоб} = \bar{R}_{дтдоб} * R_n = 0,28 * 1 = 0,28 \text{ Ом}.$$

Время торможения рассчитываем из условия торможения под действием среднего тормозного момента двигателя

4.2.8,б. Для обеспечения заданного времени торможения определим необходимый средний тормозной момент двигателя. Значение T_d и $\Delta\omega$ рассчитаны в задаче 4.2.8,а.

Начальный тормозной момент определим по среднему тормозному

$$\begin{aligned} \overline{M}_{\text{тсп}} &= \frac{\overline{M}_{\text{тнач}}}{2} = -\frac{2,5}{2} = -1,25; & T_d &= J \frac{\omega_{\text{он}}}{100} = 2 * \frac{100}{100} = 2 \text{ с}; \\ t_T &= \frac{T_d * \Delta\omega}{\overline{M}_{\text{тсп}} - \overline{M}_c} \Rightarrow \overline{M}_{\text{тсп}} = T_d \frac{\Delta\omega}{t_T} + \overline{M}_c = 2 * \frac{-0,95}{2} + 0,5 = -0,45. \\ t_T &= \frac{\overline{M}_{\text{тсп}} - \overline{M}_c}{\overline{M}_{\text{тсп}} - \overline{M}_c} = \frac{-1,25 - 0,5}{-1,25 - 0,5} = 1,086 \text{ с}. \end{aligned}$$

моменту.

Для динамического торможения

$$\overline{M}_{\text{тсп}} = \frac{\overline{M}_{\text{тнач}}}{2} \Rightarrow \overline{M}_{\text{тнач}} = 2 * \overline{M}_{\text{тсп}} = 2 * (-0,45) = -0,9.$$

Добавочное сопротивление в цепи якоря в режиме динамического торможения

$$\overline{R}_{\text{дтдоб}} = \frac{\overline{\omega}_{\text{нач}}}{-\overline{M}_{\text{тнач}}} - \overline{r}_я = \frac{0,95}{0,9} - 0,1 = 0,956 \text{ Ом}.$$

Начальный ток якоря

$$\overline{I}_{\text{тнач}} = \overline{M}_{\text{тнач}} = -0,9; \quad I_{\text{тнач}} = \overline{I}_{\text{тнач}} * I_n = -0,9 * 100 = -90 \text{ А}.$$

4.3. Расчет параметров схем включения и характеристик двигателя последовательного возбуждения (ДПВ)

Задача 4.3.1

Рассчитать добавочные сопротивления $R_{\text{доб}}$, обеспечивающие работу двигателя последовательного возбуждения типа Д32 ($P_n = 9,5 \text{ кВт}$, $I_n = 53 \text{ А}$, $U_n = 220 \text{ В}$, $n_n = 760 \text{ об/мин}$, $M_{\text{макс}} = 677 \text{ Нм}$, $r_{\text{оя}} = 0,2 \text{ Ом}$, $r_{\text{дп}} = 0,08 \text{ Ом}$, $r_{\text{ов}} = 0,0972 \text{ Ом}$) в точках $\overline{M}_{\text{зад}} = 0,8$; $\overline{\omega}_{\text{зад}} = + / - 0,4$.

Рассчитать механические и электромеханические характеристики, проходящие через заданные точки.

Решение

4.3.1.1 Воспользуемся каталожными характеристиками $M(I)$ и $n(I)$ двигателя и сведем их в таблицу 4.3.1.

Переведем числовые значения в систему СИ:

$$M(\text{Нм}) = 9,81 * M(\text{кГм}), \quad \omega(\text{рад/с}) = n(\text{об/мин}) / 9,55.$$

Рассчитаем электромагнитные моменты $M_{эм} = k\Phi \cdot I$, т.к. механическая характеристика – это зависимость скорости от электромагнитного момента.

Выполним расчет для одной точки. Задаемся током $I = I_H = 53A$, по каталожной электромеханической характеристике $\omega(I)$ определяем

$$\omega_{ест} = \omega_H = 79,6 \text{ рад/с,}$$

Таблица 4.3.1.

Каталожные и расчетные данные двигателя Д32

I	A	20	32	40	48	53	60	80	100	150
n	мин ⁻¹	1300	1000	880	810	760	720	630	550	400
M	кГм	2,5	6	8	10	12	14	22	30	47
ω	рад/с	136,1	104,7	92,1	84,8	79,6	75,4	66	57,6	41,9
M_B	Нм	24,5	58,9	78,5	98,1	119	137	216	294	461
kФ	Вс	1,56	1,986	2,22	2,38	2,5	2,62	2,88	3,16	3,9
$M_{эм}$	Нм	31,2	63,5	88,8	114	132	157	230	316	585
ΔM	Нм	6,7	4,6	10,3	15,9	13	20	14	22	124
M_T	Нм	37,9	68,1	99,1	130	145	177	244	338	-

определяем kФ по формуле:

$$k\Phi = (U_H - I \cdot r_{я}) / \omega_{ест} = (220 - 53 \cdot 0,377) / 79,6 = 2,5 \text{ Вc,}$$

где $r_{я} = r_{оя} + r_{дп} + r_{ов} = 0,2 + 0,08 + 0,0972 = 0,377 \text{ Ом.}$

Электромагнитный момент при заданном токе

$$M_{эм} = k\Phi \cdot I = 2,5 \cdot 53 = 132,5 \text{ Нм.}$$

Момент постоянных потерь

$$\Delta M = M_{эм} - M_B = 132,5 - 120 = 12,5 \text{ Нм,}$$

где M_B взята по каталожной характеристике $M_B(I)$ при $I_{зад} = 53A$.

Тормозной момент на валу при заданном токе якоря

$$M_T = M_{эм} + \Delta M = 132,5 + 12,5 = 145 \text{ Нм.}$$

4.3.1.3. По такой схеме рассчитывают другие точки и строится зависимость $M_T(I)$. Зависимость $M_B(I)$ – каталожная кривая. По этим зависимостям можно выполнять расчеты параметров схем включения этого двигателя как двигательного, так и тормозных режимов работы.

По заданной величине момента графически по $M_B(I)$ или $M_T(I)$ определяют ток якоря $I_{зад}$, при этом значении тока поток на всех характеристиках постоянен, а отношение скоростей равно отношению эдс.

$$\omega_{иск} / \omega_{ест} = E_{иск} / E_{ест} = (U - I_{зад} \cdot R) / (U_H - I_{зад} \cdot r_{я}). \quad **$$

Решая уравнение ** относительно U или R , получаем необходимый параметр.

4.3.1.4. Для обеспечения работы в заданной точке $\overline{M}_{зад} = 0,8$ и $\overline{\omega}_{зад} = 0,4$ введением добавочного сопротивления в цепь якоря $R_{доб}$ определим значения параметров в абсолютных единицах.

Момент в заданной точке обычно является моментом на валу.

$$M_{зад} = \overline{M}_{зад} * M_{вн} = 0,8 * P_{н} / \omega_{н} = 0,8 * 9500 / 79,6 = 0,8 * 119,35 = 95,5 \text{ Нм.}$$

За базовое значение скорости принимают номинальную скорость двигателя $\omega_{н}$, так как скорость идеального холостого хода ДПВ зависит от потока и является переменной величиной $\omega_{он} (I)$, тогда

$$\omega_{зад} = \overline{\omega}_{зад} * \omega_{н} = 0,4 * 79,6 = 31,8 \text{ рад/с.}$$

При $M_{зад} = M_{в} = 95,5 \text{ Нм}$ по $M_{в} (I)$ находим $I_{зад} = 47 \text{ А}$, при этом токе

$\omega_{ест} = 85,7 \text{ рад/с}$, а из формулы ** определяем:

– $\overline{\omega}_{зад} = 0,4$ двигательного режима работы

$$R_{доб} + r_{я} = (U - (U_{н} - I_{зад} * r_{я}) * \omega_{иск} / \omega_{ест}) / I_{зад} = \\ = (220 - (220 - 47 * 0,377) * 31,8 / 85,7) / 47 = 3,08 \text{ Ом,}$$

$$R_{доб} = 3,08 - 0,377 = 2,71 \text{ Ом.}$$

– $\overline{\omega}_{зад} = -0,4$ для торможения противовключением $I_{зад}$ нужно находить по характеристике $M_{т} (I)$, для этого режима

$$I_{зад} = 39 \text{ А, } \omega_{ест} = 93,7 \text{ рад/с,}$$

$$R_{доб} + r_{я} = (U - (U_{н} - I_{зад} * r_{я}) * \omega_{иск} / \omega_{ест}) / I_{зад} = \\ = (220 - (220 - 39 * 0,377) * (-31,8) / 93,7) / 39 = 7,43 \text{ Ом,}$$

$$R_{доб} = 7,43 - 0,377 = 7,05 \text{ Ом.}$$

– $\overline{\omega}_{зад} = -0,4$ для динамического торможения с самовозбуждением $I_{зад}$ нужно находить по характеристике $M_{т} (I)$, для этого режима $I_{зад} = 39 \text{ А}$, при этом токе $\omega_{ест} = 93,7 \text{ рад/с}$, в формуле ** принимаем $U = 0$,

$$R_{доб} + r_{я} = (- (U_{н} - I_{зад} * r_{я}) * \omega_{иск} / \omega_{ест}) / I_{зад} = \\ = (- (220 - 39 * 0,377) * (-31,8) / 93,7) / 39 = 1,79 \text{ Ом,}$$

$$\text{тогда } R_{доб} = 1,79 - 0,377 = 1,41 \text{ Ом.}$$

– $\overline{\omega}_{зад} = -0,4$ для динамического торможения с независимым возбуждением $I_{зад}$ нужно находить по характеристике $M_{т} (I)$, для этого режима $I_{зад} = 39 \text{ А}$,

в формуле ** принимаем $U = 0$, а также установим ток возбуждения, примерно равный номинальному, $I_{ов} = I_{н} = 53 \text{ А}$, при этом токе $\omega_{ест} = 79,6 \text{ рад/с}$.

$$R_{доб} + r_{я} = (- (U_{н} - I_{ов} * r_{я}) * \omega_{иск} / \omega_{ест}) / I_{зад} = \\ = (- (220 - 53 * 0,377) * (-31,8) / 79,6) / 39 = 2,05 \text{ Ом,}$$

$$\text{тогда } R_{\text{доб}} = 2,05 - 0,377 = 1,67 \text{ Ом,}$$

а добавочное сопротивление в цепи обмотки возбуждения при питании от цеховой сети $R_{\text{доб.возб}} = U_{\text{н}}/I_{\text{ов}} - r_{\text{ов}} = 220/53 - 0,0972 = 4,05 \text{ Ом.}$

4.3.1.8. Расчет характеристик, проходящих через заданные точки, выполняется также графическим методом с использованием формулы **. В этих расчетах известны U и R , задаются $I_{\text{зад}}$, находят $\omega_{\text{ест}}$ и $M_{\text{эм}}$, и рассчитывают $\omega_{\text{иск}}$ по формуле **. Расчет характеристик предлагается выполнить самостоятельно.

4.4. Расчет параметров схем включения и характеристик асинхронных двигателей

Задача 4.4.1

Рассчитать по каталожным данным активные и индуктивные сопротивления фазных обмоток асинхронного двигателя и сравнить с данными справочника [1].

Данные двигателя 4АК200М8У3 [1, с.59]:

$$U_{1\text{фн}}=220 \text{ В, } n_0 = 750 \text{ об/мин, } P_{\text{н}} = 15 \text{ кВт, } \eta_{\text{н}}=86 \%, \cos \varphi_{\text{н}}=0,7 ,$$

$$I_{2\text{н}} = 28 \text{ А, } U_{2\text{н}} = 360 \text{ В, } \mu_{\text{к}} = 3, s_{\text{н}}=0,035, s_{\text{к}}=0,21, J_{\text{дв}}=0,6 \text{ кгм}^2.$$

$$\begin{aligned} \text{Номинальный ток статора } I_{1\text{н}} &= P_{2\text{н}}/(3*U_{1\text{фн}}*\eta_{\text{н}}*\cos \varphi_{\text{н}})= \\ &= 15000/(3*220*0,86*0,7)=37,8 \text{ А.} \end{aligned}$$

$$\text{Базовое сопротивление } z_6=U_{1\text{фн}}/I_{1\text{н}} = 220/37,8 = 5,82 \text{ Ом.}$$

$$\text{Сопротивления статора: } r_1=\overline{r}_1 * z_6 = 0,038*5,82=0,22 \text{ Ом;}$$

$$x_1=\overline{x}_1 * z_6 = 0,089*5,82=0,518 \text{ Ом;}$$

$$x_{\mu}=\overline{x}_{\mu} * z_6 = 2,2*5,82=12,8 \text{ Ом.}$$

Приведенные к цепи статора сопротивления ротора:

$$r_2'=\overline{r}_2' * z_6 = 0,046*5,82=0,268 \text{ Ом;}$$

$$x_2'=\overline{x}_2' * z_6 = 0,12*5,82=0,7 \text{ Ом.}$$

Решение

При расчетах схем включения необходимо знать величины активных и индуктивных сопротивлений фазных обмоток двигателя. В каталогах данные о сопротивлениях часто отсутствуют, приходится использовать приближенный расчет сопротивлений по каталожным данным [5].

Обмоточные данные рассматриваемого двигателя приведены в справочнике [1]. В сопоставлении данных справочника с итогами приближенного расчета по каталожным данным можно судить о величине погрешности таких расчетов.

Базовое сопротивление цепи ротора $R_{2\text{н}}$ (при $I_2=I_{2\text{н}}$ и $s = 1$)

$$R_{2H} = \frac{E_{20}}{\sqrt{3} * I_{2H}} = \frac{360}{\sqrt{3} * 28} = 7,42 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление фазы ротора

$$r_2 = R_{2H} * s_H = 7,42 * 0,035 = 0,26 \text{ Ом.}$$

Коэффициент трансформации ЭДС двигателя

$$k_e = 0,95 * U_{1H} / U_{2H} = 0,95 * 380 / 360 = 1.$$

Приведенное к цепи статора сопротивление ротора

$$r_2^1 = r_2 * k_r = r_2 * k_e^2 = 0,26 * 1^2 = 0,26 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление статора можно определить из формулы критического момента [9]

$$r_1 = \frac{3 * U_{1\phi}^2}{2 * \omega_{OH} * M_K} - \frac{r_2^1}{s_K} = \frac{3 * 220^2}{2 * 78,5 * 3 * 198} - \frac{0,26}{0,21} = 0,319 \text{ Ом.}$$

Можно принять $a = r_1 / r_2^1 = 1$, тогда $r_1 = r_2^1 = 0,26 \text{ Ом.}$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания определим из выражения критического скольжения s_K :

$$x_K = x_1 + x_2^1 = \sqrt{\left(\frac{r_2^1}{s_K}\right)^2 - r_1^2} = \sqrt{(0,26/0,21)^2 - 0,26^2} = 1,21 \text{ Ом,}$$

$$x_1 = x_2^1 = x_K / 2 = 1,21 / 2 = 0,605 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление контура намагничивания в номинальной точке (ток намагничивания $I_{\mu H} = 22,58 \text{ А}$ рассчитан в задаче 4.4.3)

$$x_{\mu H} = \sqrt{\left(\frac{U_{1\phi H}}{I_{\mu H}}\right)^2 - r_1^2} - x_1 = \sqrt{\left(\frac{220}{22,58}\right)^2 - 0,26^2} - 0,605 = 9,14 \text{ Ом.}$$

Сравните полученные приближенные значения сопротивлений (приведены в скобках) с данными справочника[1]:

$$x_{\mu} = 12,8 (9,14) \text{ Ом, } r_1 = 0,22 (0,26) \text{ Ом, } x_1 = 0,518 (0,605) \text{ Ом,}$$

$r_2^1 = 0,268 (0,26) \text{ Ом, } x_2^1 = 0,7 (0,605) \text{ Ом}$ и оцените точность расчета сопротивлений по приближенным формулам.

Отсюда вывод:

– для расчетов следует использовать сопротивления по данным справочников и каталогов;

– результатами расчетов сопротивлений по каталожным данным нужно пользоваться очень осторожно и лишь для приближенных расчетов.

Задача 4.4.2

Рассчитать естественную механическую характеристику $\omega(M)$ асинхронного двигателя 4АК200М8У3 по каталожным данным (см. задачу 4.4.1).

Решение

Самой точной механической характеристикой двигателя является каталожная. Ею можно пользоваться при выполнении расчетов графоаналитическими методами.

Для аналитических расчетов используют уравнение механической характеристики, полученное из Г-образной схемы замещения асинхронного двигателя, которое называют уточненной формулой Клосса [9]:

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

где $s_k = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}}$ – критическое скольжение;

$a = \frac{r_1}{r_2'}$ – отношение активных сопротивлений статора и ротора;

$M_k = \mu_k * M_H$ – максимальный (критический) момент.

При расчетах механической характеристики по каталожным данным, в которых приводится лишь момент M_k , значения сопротивлений статора и ротора часто неизвестны. Для расчета критического скольжения s_k используют точку номинального режима, подставляют в формулу Клосса номинальный момент M_H , номинальное скольжение s_H , каталожное значение критического момента M_k , и решают уравнение относительно s_k :

$$s_k = s_H * \frac{\mu_k \pm \sqrt{\mu_k^2 - 1 + 2 * a * s_H * (\mu_k - 1)}}{1 - 2 * a * s_H * (\mu_k - 1)}.$$

Для рассматриваемого двигателя $\mu_k = 3$, $s_H = 0,035$,

$$s_k = 0,035 * \frac{3 \pm \sqrt{3^2 - 1 + 2 * 1 * 0,035 * (3 - 1)}}{1 - 2 * 1 * 0,035 * (3 - 1)} = 0,238.$$

По сравнению с данными справочника [1] получили на 13% завышенное значение s_k .

Из двух корней полученного квадратного уравнения выбираем больший из физических соображений.

Выражение естественной механической характеристики при $a = 1$

$$\frac{M}{M_H} = \frac{2 * \mu_K * (1 + s_K)}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s} + 2 * s_K} = \frac{2 * 3 * (1 + 0,21)}{\frac{s}{0,21} + \frac{0,21}{s} + 2 * 0,21}$$

Для проверки подставим $s = s_H = 0,035$, получили $M/M_H = 1,1$. Результат удовлетворительный. Естественная механическая характеристика, построенная в программе «harad» с сопротивлениями цепей двигателя из справочника [1], приведена на рис. 4.4.3.

Задача 4.4.3

Рассчитать естественные электромеханические характеристики $\omega(I_2)$, $\omega(I_1)$, $\omega(I_\mu)$ асинхронного двигателя 4АК200М8 по каталожным данным (см. задачу 4.4.1).

Решение

В каталогах приводится зависимость тока статора от скольжения $I_1(s)$, которой можно воспользоваться при графоаналитических способах расчета, что не всегда применимо.

Электромеханические характеристики можно рассчитывать, имея значения сопротивлений обмоток двигателя. Из возможных методов расчета электромеханических характеристик:

- по известным параметрам Г-образной схемы замещения;
- по формулам В.А.Шубенко;
- по Т-образной схеме замещения

только формулы профессора В.А.Шубенко позволяют выполнить расчет характеристик по каталожным данным. Однако следует иметь в виду, что в этих формулах принято допущение $r_1 \sim 0$, и там, где влияние r_1 существенно, например, при частотном регулировании, они дают большую погрешность.

Электромеханические характеристики представлены профессором В.А.Шубенко в следующем виде:

- ток холостого хода (ток намагничивания)

$$I_\mu = I_{1H} * \left(\sin \varphi_H - \frac{s_H}{s_K} * \cos \varphi_H \right);$$

- ток ротора

$$I_2 = I_{2H} * \sqrt{\frac{M * s}{M_H * s_H}};$$

– ток статора

Ток холостого хода (ток намагничивания) рассматриваемого двигателя рассчитываем при полученном выше $s_k = 0,21$, номинальном скольжении $s_H = 0,035$, каталожном значении $\cos \varphi_H = 0,7$ (тогда $\sin \varphi_H = 0,714$) и

$$I_1 = \sqrt{I_{\mu}^2 + (I_{1H}^2 - I_{\mu}^2) * \frac{M * s}{M_H * s_H}}$$

номинальном токе статора $I_{1H} = 37,8$ А:

$$I_{\mu} = I_{1H} * (\sin \varphi_H - \frac{s_H}{s_k} * \cos \varphi_H) = 37,8 * (0,714 - \frac{0,035}{0,21} * 0,7) = 22,58 \text{ А.}$$

Ток намагничивания составляет $I_{\mu} = 0,6 * I_{1H}$.

При расчете токов статора и ротора в формулы В.А.Шубенко подставляют значения моментов M и M_H и скольжений s и s_H , соответствующих одной механической характеристике, т.е. при расчете естественной характеристики номинальному моменту M_H соответствует s_H , при расчете искусственной характеристики M_H соответствует номинальное скольжение на искусственной характеристике $s_{ни}$.

Расчетные формулы естественных электромеханических характеристик для токов ротора и статора рассматриваемого двигателя имеют вид:

$$I_2 = I_{2H} * \sqrt{\frac{M * s}{M_H * s_H}} = 28 * \sqrt{\frac{M * s}{198 * 0,035}};$$

$$I_1 = \sqrt{I_{\mu}^2 + (I_{1H}^2 - I_{\mu}^2) * \frac{M * s}{M_H * s_H}} =$$

$$= \sqrt{22,58^2 + (37,8^2 - 22,58^2) * \frac{M * s}{198 * 0,035}},$$

где

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{P_H * 10^3 * 9,55}{n_o * (1 - s_H)} = \frac{15 * 10^3 * 9,55}{750 * (1 - 0,035)} = 198 \text{ Нм .}$$

По полученным выражениям рассчитываются естественные характеристики при $x_{\mu} = \text{const}$. На рис. 4.4.3 приведены механическая и электромеханические характеристики двигателя, рассчитанные программой « harad ». Расчет в этой программе ведется с учетом изменения x_{μ} по кривой намагничивания двигателя.

Точки, показанные на рисунке, отражают координаты номинального режима: $\omega_n=0,96$, $M=1,01$, $I_1=1,01$ (точка 1), $I_2' = 0,64$, $I_\mu=0,64$ (точка 2 – в масштабе тока статора).

Ток намагничивания при синхронной скорости $I_\mu=0,75$. Значение критического момента $\mu_k=2,95$ при каталожном значении $\mu_k=3$. Сравнение с предыдущим расчетом показывает достаточную точность приближенных расчетов.

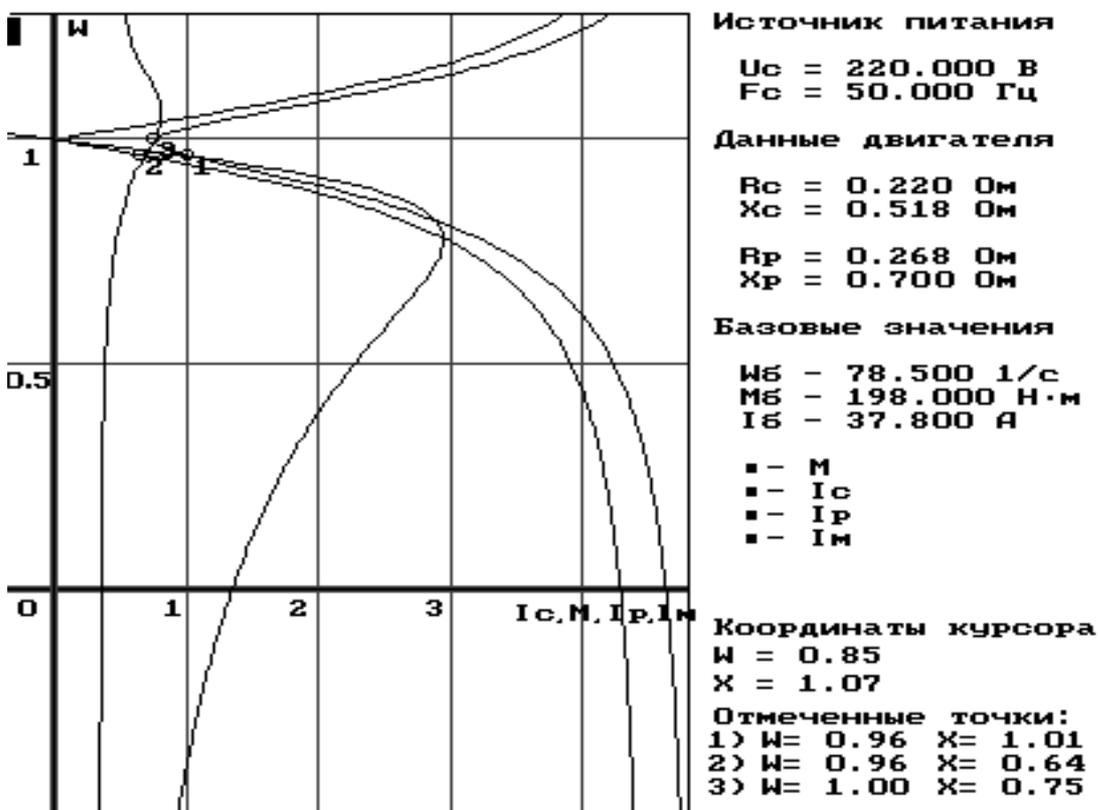


Рисунок 4.4.3. Естественные характеристики двигателя

Задача 4.4.4

Рассчитать величину добавочного сопротивления в цепи ротора $R_{2\text{доб}}$ асинхронного двигателя 4АК200М8У3 (см. задачу 4.4.1), обеспечивающего работу двигателя в заданной точке:

$$M_{\text{зад}} = 0,8, \quad \omega_{\text{зад}} = 0,4.$$

Рассчитать и построить механические и электромеханические характеристики, проходящие через заданную точки. Определить режим работы и рассчитать КПД и $\cos\phi$ в заданной точке.

Решение

Для решения поставленной задачи используем зависимость между сопротивлением цепи ротора R_2 и скольжением s , справедливую при постоянстве момента двигателя:

$$\frac{r_2}{s_{\text{ест}}} = \frac{R_2}{s_{\text{иск}}}$$

Схема расчета:

– по заданной величине $M_{\text{зад}}$ находим на естественной характеристике $\Delta\omega_{\text{ест}} = \omega_0 - \omega_{\text{ест}}$ и определяем $s_{\text{ест}} = \Delta\omega_{\text{ест}}/\omega_0$;

– по заданной скорости $\omega_{\text{зад}}$ рассчитываем

$$s_{\text{иск}} = (\omega_0 - \omega_{\text{зад}})/\omega_0,$$

в о.е. $s_{\text{иск}} = (\overline{\omega_0} - \overline{\omega_{\text{зад}}})$;

– активное сопротивление обмотки ротора r_2 отыскиваем в каталоге или справочнике, а при их отсутствии – рассчитываем по каталожным данным;

– значение добавочного сопротивления $R_{2\text{доб}}$ рассчитываем по формуле:

$$R_{2\text{доб}} = R_2 - r_2 = \frac{s_{\text{иск}}}{s_{\text{ест}}} * r_2 - r_2.$$

4.4.4.1. Расчет для точки $\overline{M}_{\text{зад}} = 0,8$, $\overline{\omega}_{\text{зад}} = 0,4$.

Режим работы – двигательный.

$$\overline{\Delta\omega}_{\text{ест}} = s_{\text{ест}} = s_n * \overline{M}_{\text{зад}} = 0,035 * 0,8 = 0,028;$$

$$s_{\text{иск}} = \overline{\omega_0} - \overline{\omega}_{\text{зад}} = 1 - 0,4 = 0,6;$$

$$r_2 = 0,268 \text{ Ом};$$

$$R_{2\text{доб}} = R_2 - r_2 = \frac{s_{\text{иск}}}{s_{\text{ест}}} * r_2 - r_2 = \frac{0,6}{0,028} * 0,268 - 0,268 = 5,475 \text{ Ом}.$$

Выражение механической характеристики, проходящей через заданную точку:

$$\frac{M}{M_n} = \frac{2 * \mu_k * (1 + s_{\text{ки}})}{\frac{s}{s_{\text{ки}}} + \frac{s_{\text{ки}}}{s} + 2 * s_{\text{ки}}} = \frac{2 * 3 * (1 + 4,64)}{\frac{s}{4,64} + \frac{4,64}{s} + 2 * 4,64},$$

где

$$s_{\text{ки}} = \frac{R_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}} = \frac{R_2' * k_e^2}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}} = \frac{5,743 * 1^2}{\sqrt{0,22^2 + (0,518 + 0,7)^2}} = 4,64.$$

Выражение электромеханических характеристик, проходящих через заданную точку:

где

$$s_{\text{ни}} = \frac{s_{\text{н}}}{r_2} * R_2 = \frac{0,035}{0,268} * 5,743 = 0,75.$$

Значения токов в заданной точке при $s_{\text{иск}} = 0,6$:

$$I_{1\text{зад}} = \sqrt{I_{1\mu}^2 + (I_{1\text{н}}^2 - I_{1\mu}^2) * \frac{M_{\text{зад}} * s_{\text{зад}}}{M_{\text{н}} * s_{\text{ни}}}} = \sqrt{22,58^2 + (37,8^2 - 22,58^2) * \frac{0,8 * 198 * 0,6}{198 * 0,75}} = 33,26 \text{ А};$$

$$I_2 = I_{2\text{н}} * \sqrt{\frac{M_{\text{зад}} * s_{\text{ни}}}{M_{\text{н}} * s_{\text{иск}}}} = 28 * \sqrt{\frac{198 * 0,75}{0,8 * 198 * 0,6}} = 22,4 \text{ А}.$$

Механическая и электромеханические характеристики двигателя при введении в цепь ротора $R_{2\text{доб}}$, проходящие через заданную точку, построены на рисунке 4.4.4. Значения токов в отмеченных точках равны рассчитанным выше значениям.

Коэффициент полезного действия η двигателя в заданной точке

$$\eta_{\text{зад}} = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{затр}}} = \frac{M_{\text{зад}} * \omega_{\text{зад}}}{M_{\text{зад}} * \omega_{\text{зад}} + 3 * I_{1\text{за}}^2 * r_1 + 3 * I_{2\text{за}}^2 * r_2} =$$

$$= \frac{0,8 * 198 * 0,4 * 78,5}{0,8 * 198 * 0,4 * 78,5 + 3 * 33,26^2 * 0,22 + 3 * 22,4^2 * 5,743} = \frac{4973,76}{14348,7} =$$

$$= 0,347.$$

В приведенном расчете не учтены механические потери мощности в двигателе, которые традиционно относят к потерям в механической части электропривода. Кроме того, не учтены потери мощности в контуре намагничивания, т.к. активным сопротивлением контура в расчетах обычно пренебрегают. Таким образом, затраченная мощность $P_{\text{затр}}$ представляет собой активную мощность, потребляемую из сети.

Коэффициент мощности $\cos \phi$ в заданной точке

$$\cos \phi_{\text{зад}} = \frac{P_{\text{затр}}}{3 * U_{1\text{фн}} * I_{1\text{зад}}} = \frac{14348,7}{3 * 220 * 33,26} = 0,654.$$

Задача 4.4.5

Рассчитать величину добавочного сопротивления в цепи ротора $R_{2\text{доб}}$ асинхронного двигателя 4АК200М8 (см. задачу 4.4.1) обеспечивающего работу двигателя в заданной точке:

$$\overline{M}_{\text{зад}} = -0,8, \quad \overline{\omega}_{\text{зад}} = 0,4.$$

Рассчитать и построить механические и электромеханические характеристики, проходящие через заданную точку. Определить режим работы и рассчитать КПД и $\cos\phi$ в заданной точке.

Решение

Режим работы для симметричной схемы включения – противовключение, для обеспечения работы во втором квадранте необходимо изменить направление вращения магнитного поля (переключить две фазы статора), при этом $\overline{\omega}_{\text{он}} = -1$.

$$\Delta\omega_{\text{ест}} = s_{\text{ест}} = s_{\text{н}} * \overline{M}_{\text{зад}} = 0,035 * 0,8 = 0,028.$$

$$s_{\text{иск}} = \overline{\omega}_{\text{он}} - \overline{\omega}_{\text{зад}} = (-1 - 0,4) / (-1) = 1,4.$$

$$\begin{aligned} R_{2\text{ддо}} &= R_2 - r_2 = \frac{s_{\text{иск}}}{s_{\text{ест}}} * r_2 - r_2 = \\ &= \frac{1,4}{0,028} * 0,268 - 0,268 = 13,4 - 0,268 = 13,13 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Выражение механической характеристики, проходящей через заданную точку:

$$\frac{M}{M_{\text{н}}} = \frac{2 * \mu_{\text{к}} * (1 + s_{\text{ки}})}{\frac{s}{s_{\text{ки}}} + \frac{s_{\text{ки}}}{s} + 2 * s_{\text{ки}}} = \frac{2 * 3 * (1 + 10,5)}{\frac{s}{10,5} + \frac{10,5}{s} + 2 * 10,5},$$

где

$$s_{\text{ки}} = \frac{s_{\text{к}}}{r_2} * R_2 = \frac{0,21}{0,268} * 13,4 = 10,5.$$

Выражения электромеханических характеристик, проходящих через заданную точку:

$$I_1 = \sqrt{I_\mu^2 + (I_{1H}^2 - I_\mu^2) * \frac{M * s}{M_H * s_{HI}}} =$$

$$= \sqrt{22,58^2 + (37,8^2 - 22,58^2) * \frac{M * s}{198 * 1,75}};$$

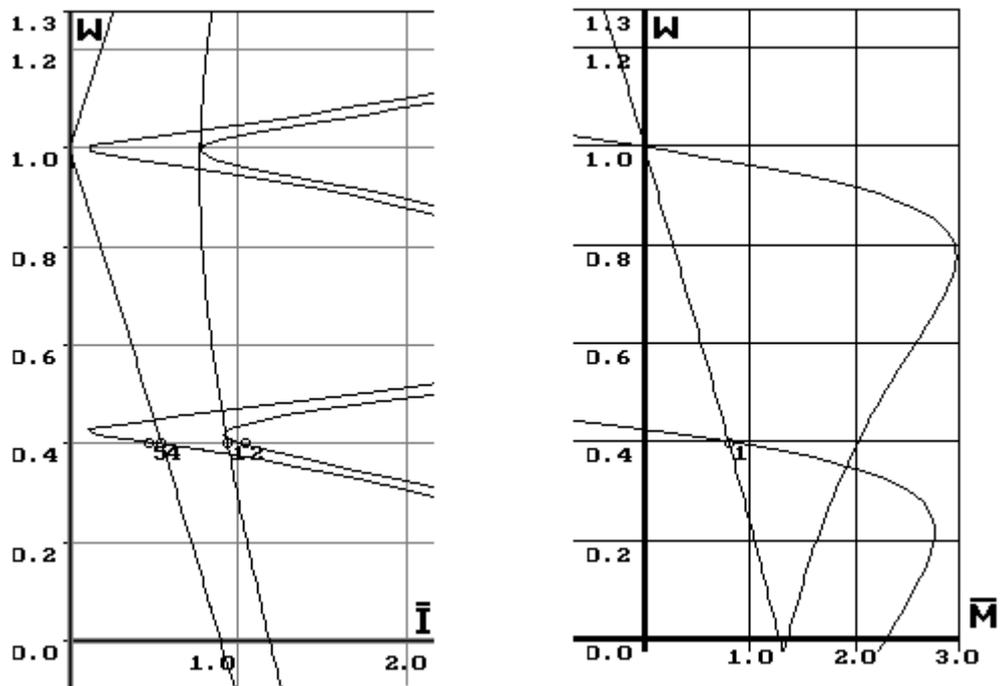


Рис. 4.4.4. Характеристики двигателя, проходящие через заданную точку двигательного режима, при введении $R_{2доб}$ и изменении частоты

$$I_2 = I_{2H} * \sqrt{\frac{M * s}{M_H * s_{HI}}} = 28 * \sqrt{\frac{M * s}{198 * 1,75}},$$

где

$$s_{HI} = \frac{s_H}{r_2} * R_2 = \frac{0,035}{0,268} * 13,4 = 1,75.$$

Значения токов в заданной точке при $s_{иск} = 1,4$:

$$I_{1зад} = \sqrt{I_\mu^2 + (I_{1H}^2 - I_\mu^2) * \frac{M_{зад} * s_{зад}}{M_H * s_{HI}}} =$$

$$= \sqrt{22,58^2 + (37,8^2 - 22,58^2) * \frac{0,8 * 198 * 1,4}{198 * 1,75}} = 33,26 \text{ А};$$

$$I_{2за} = I_{2H} * \sqrt{\frac{M_{зад} * s_{зад}}{M_H * s_{HI}}} = 28 * \sqrt{\frac{0,8 * 198 * 1,4}{198 * 1,75}} = 22,4 \text{ А}.$$

Механические и электромеханические характеристики режима противовключения, обеспечивающего работу в заданной точке, приведены на рис. 4.4.6.

В заданной точке двигатель работает в режиме противовключения, избыточная энергия с вала расходуется на нагрев сопротивлений в цепи ротора. Кроме того, мощность потребляется и из сети. Таким образом, электрическая энергия в сеть не возвращается, и полезная работа в этом режиме с точки зрения питающей сети равна нулю. Коэффициент полезного действия η двигателя в режиме противовключения равен нулю.

Коэффициент мощности $\cos\varphi$ в заданной точке

$$\begin{aligned} \cos\varphi_{\text{зад}} &= \frac{P_c}{3 * U_{1\phi} * I_{1\text{за}}} = \frac{3I_1^2 r_1 + 3I_2^2 r_2 + 3I_2^2 R_{2\text{ддо}} - M_{\text{зад}} \omega_{\text{зад}}}{3 * U_{1\phi} * I_{1\text{за}}} = \\ &= \frac{3 * 33,26^2 * 0,22 + 3 * 22,4^2 * 0,268 + 3 * 22,4^2 * 13,13 - 0,8 * 198 * 1,4 * 78,5}{3 * 220 * 33,26} = 0,159. \end{aligned}$$

Задача 4.4.6

Рассчитать величину постоянного тока в цепи статора $I_{\text{п}}$ и величину добавочного сопротивления в цепи ротора $R_{2\text{доб}}$ асинхронного двигателя 4АК200М8У3 (см. задачу 4.4.1), обеспечивающего работу двигателя в заданной точке в режиме динамического торможения:

$$\overline{M}_{\text{зад}} = -0,8, \quad \overline{\omega}_{\text{зад}} = 0,4.$$

Рассчитать и построить механические и электромеханические характеристики, проходящие через заданную точку.

Решение

Режим работы двигателя – динамическое торможение с независимым возбуждением, питание цепи статора – от источника тока. Обмотки статора соединены в звезду, постоянный ток подключен к двум фазам.

Для обеспечения устойчивой работы в заданной точке установим запас по перегрузочной способности $M_k = 2 * M_{\text{зад}}$. Тогда величина эквивалентного переменного тока (при $x_{\mu} = x_{\mu}' = \text{const}$) определяется по формуле а величина постоянного тока при схеме соединения – звезда

$$I_{1\text{зад}} = \sqrt{\frac{2M_{\text{кт}} \omega_{\text{он}} (x_{\mu} + x_{\mu}')}{3x_{\mu}^2}} = \sqrt{\frac{2 * 2 * 0,8 * 198 * 78,5 * (12,8 + 0,7)}{3 * 12,8^2}} = 36,96 \text{ А},$$

$$I_{\pi} = I_{1\text{зад}} / 0,816 = 36,96 / 0,816 = 45,3 \text{ А.}$$

Выражение механической характеристики двигателя при питании от источника тока имеет вид:

$$M = \frac{2M_{\text{КТ}}}{\frac{\alpha s}{\alpha s_{\text{КТ}}} + \frac{\alpha s_{\text{КТ}}}{\alpha s}}, \text{ где } \alpha s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_{\text{ОН}}},$$

$$\alpha s_{\text{КТ}} = \pm \frac{r_2'}{x_{\mu} + x_2'} = \pm \frac{0,268}{12,8 + 0,7} = \pm 0,02.$$

В режиме динамического торможения

$$\omega_0 = 0, \quad M_{\text{КТ}} = 2 * M_{\text{зад}} = 2 * 0,8 * 198 = 316,8 \text{ Нм.}$$

Задаваясь абсолютным скольжением αs , а следовательно, и скоростью двигателя $\omega = \alpha s * \omega_{\text{ОН}}$, рассчитывается момент двигателя и строится естественная механическая характеристика динамического торможения (при отсутствии добавочных сопротивлений в цепи ротора).

Для расчета добавочного сопротивления в цепи ротора определим абсолютное скольжение на естественной характеристике динамического торможения при $\mu = M_{\text{КТ}} / M_{\text{зад}}$:

$$\alpha s_{\text{ест}} = \alpha s_{\text{КТ}} / (\mu \pm \sqrt{\mu^2 - 1}) =$$

$$= 0,02 / (2 \pm \sqrt{2^2 - 1}) = 0,00536.$$

Добавочное сопротивление в цепи ротора (из пропорциональности скольжений и сопротивлений), обеспечивающее работу в заданной точке,

$$R'_{2\text{доб}} = \frac{\alpha s_{\text{иск}}}{\alpha s_{\text{ест}}} * r_2' - r_2' = \frac{0,4}{0,00536} * 0,268 - 0,268 = 19,736 \text{ Ом.}$$

Для расчета электромеханических характеристик используют закон распределения токов в параллельных цепях. Задаются абсолютным скольжением и при постоянстве тока статора рассчитываются ток ротора и ток намагничивания.

Для примера рассчитаем токи в заданной точке.

Ток ротора в заданной точке

$$I_2' = I_1 * \frac{x_{\mu}}{\sqrt{\left(\frac{R_2'}{\alpha s_{\text{иск}}}\right)^2 + (x_{\mu} + x_2')^2}} = 36,96 * \frac{12,8}{\sqrt{\left(\frac{0,268 + 19,736}{0,4}\right)^2 + (12,8 + 0,7)^2}} = 9,13 \text{ А.}$$

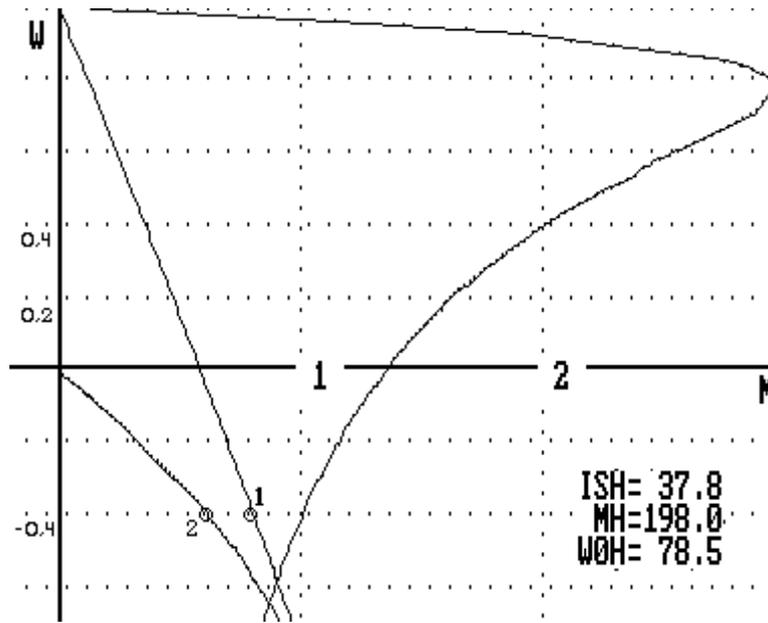


Рис.4.4.6. Механические характеристики тормозных режимов, проходящие через заданную точку

Ток намагничивания в заданной точке

$$I_{\mu} = I_1 * \frac{\sqrt{\left(\frac{R'_2}{\alpha s_{иск}}\right)^2 + x_2'^2}}{\sqrt{\left(\frac{R'_2}{\alpha s_{иск}}\right)^2 + (x_{\mu} + x_2')^2}} =$$

$$= 36,96 * \frac{\sqrt{\left(\frac{0,268 + 19,732}{0,4}\right)^2 + 0,7^2}}{\sqrt{\left(\frac{0,268 + 19,732}{0,4}\right)^2 + (12,8 + 0,7)^2}} = 35,68 \text{ A}$$

Расчеты выполнялись при постоянстве индуктивного сопротивления контура намагничивания, тогда как при питании от источника тока ток намагничивания существенно изменяется при изменении тока ротора (по аналогии с двигателем постоянного тока – реакция якоря). Неучет изменения X_{μ} приводит к значительным погрешностям, а учет – ведет к усложнению расчета. Применение ЭВМ позволяет уточнить предварительный расчет с учетом кривой намагничивания (программа « harad » – [5]).

Учет изменения x_{μ} при расчетных параметрах динамического торможения ($R_2=20$ Ом и $I_1=36.95$ А) позволил определить при скорости $\omega_{зад} =$

0,4 момент двигателя $M = 0,24 * M_{зад}$. Перерасчет добавочного сопротивления – уменьшение $R_{2доб}$ в $1/0,24$ раза из предположения пропорциональности скольжения и сопротивления – приводит к увеличению момента. На рис. 4.4.6 при заданной скорости $\omega_{зад} = 0,4$ (точка 2) характеристика, рассчитанная с учетом кривой намагничивания и $R_2 = 5,745$ Ом, обеспечивает момент $M = 0,75 * M_{зад}$.

Вывод: даже для приближенного расчета режима динамического торможения, как и любого режима при питании АД от источника тока, нужно учитывать изменение индуктивного сопротивления x_{μ} контура намагничивания при изменении тока ротора.

Задача 4.4.7

Рассчитать частоту и напряжение на статоре асинхронного двигателя 4АК200М8У3 (см. задачу 4.4.1), обеспечивающего работу двигателя в заданной точке: $\overline{M}_{зад} = 0,8$, $\overline{\omega}_{зад} = 0,4$.

Рассчитать механические и электромеханические характеристики, проходящие через заданную точку.

Определить режим работы и рассчитать КПД и $\cos\phi$ в заданной точке.

Решение

Режим работы двигателя – двигательный. Двигатель получает питание от преобразователя частоты, обеспечивающего независимое регулирование частоты и амплитуды напряжения на статоре.

Для предварительного расчета частоты выполним параллельный перенос естественной механической характеристики в заданную точку.

$$\overline{\omega}_0 = \overline{\omega}_{зад} + \Delta\overline{\omega}_{ест} = \overline{\omega}_{зад} + s_H * \overline{M}_{зад} = 0,4 + 0,035 * 0,8 = 0,428;$$

Относительное значение частоты равно $\alpha = \overline{\omega}_0 = 0,428$. Используя типовое отношение $U_{1н}/f_{1н} = 4,4$, выбираем

$$U_{1зад} = 4,4 * \alpha * f_{1н} = 4,4 * 0,428 * 50 = 94,16 \text{ В.}$$

$$f_{1зад} = \alpha * f_{1н} = 0,428 * 50 = 21,4 \text{ Гц.}$$

Для расчета токов двигателя необходимо знать сопротивления цепей ротора и статора. Оценка токов в Г-образной схеме замещения дает недопустимую погрешность, так как не учитывается изменение потока машины.

Перейдем к Т-образной схеме замещения.

Для обеспечения устойчивой работы в заданной точке установим запас по перегрузочной способности $M_k = 2 * M_{зад}$. При $\alpha = 0,428$, $M_{зад} = 0,8 * M_H$ и $\omega_{зад} = 0,4$, выраженной через скольжение

$$s_{зад} = (\omega_0 - \omega_{зад}) / \omega_0 = (0,428 - 0,4) / 0,428 = 0,0654,$$

определим $M_{зад} = 2 * 0,8 * M_H$ и $s = 2 * s_{зад}$.

Ток ротора

$$I'_2 = \sqrt{\frac{M_{зад} \alpha \omega_{ОН}}{3 \frac{r'_2}{s}}} = \sqrt{\frac{2 * 0,8 * 198 * 0,428 * 78,5}{3 * \frac{0,268}{0,131}}} = 41,64 \text{ А.}$$

ЭДС ротора

$$\alpha E = I'_2 \sqrt{\left(\frac{r'_2}{s}\right)^2 + (\alpha x'_2)^2} = 41,64 \sqrt{\left(\frac{0,268}{0,131}\right)^2 + (0,428 * 0,7)^2} = 86,096 \text{ В.}$$

По ЭДС ротора и универсальной кривой намагничивания $E = f(I_\mu)$, приведенной в табл. 4.4.7, определяем ток намагничивания в заданной точке.

Относительное значение ЭДС E , приведенное с частоте 50 Гц, при базовой $E_0 = 0,9 * U_{1H}$

$$E = \alpha E / (\alpha * 0,9 * U_{1H}) = 86,096 / (0,428 * 0,9 * 220) = 1,016.$$

Таблица 4.4.7

Универсальная кривая намагничивания

I_μ	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,6	1,8	2,0	2,2	4,0
E	0	0,38	0,75	0,9	0,95	1,0	1,1	1,15	1,2	1,22	1,24	1,3

Линеаризируем кривую намагничивания, считая точки, приведенные в табл. 4.4.7, точками перегиба.

Относительное значение тока намагничивания

$$\bar{I}_\mu = \bar{I}_{\mu нач} + \frac{\Delta \bar{I}_\mu}{\Delta \bar{E}} (\bar{E} - \bar{E}_{нач}) = 1,0 + \frac{1,05 - 1}{1,2 - 1} (1,016 - 1) = 1,004.$$

При абсолютном значении тока намагничивания

$$I_\mu = 1,004 * I_{\mu H} = 1,004 * 22,58 = 22,67 \text{ А}$$

индуктивное сопротивление контура намагничивания

$$\alpha x_\mu = \frac{\alpha E}{I_\mu} = \frac{86,096}{22,67} = 3,8 \text{ Ом}$$

Для дальнейших расчетов используем векторную диаграмму асинхронного двигателя (см. рис. 4.4.7.1).

Ток статора определим по теореме косинусов

$$I_1 = \sqrt{I_2^2 + I_\mu^2 - 2I_2 I_\mu \cos(90^\circ + \varphi_2)} =$$

$$= \sqrt{22,67^2 + 41,64^2 - 2 * 22,67 * 41,64 * \cos(90^\circ + 8,33^\circ)} = 50,2 \text{ А},$$

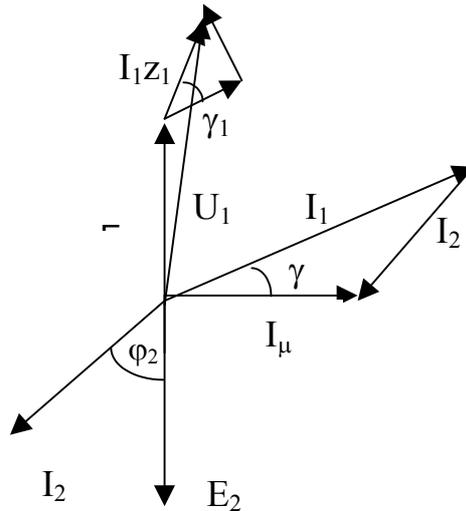


Рис. 4.4.7. Векторная диаграмма АД в двигательном режиме

где φ_2 – угол сдвига между ЭДС и током ротора.

$$\varphi_2 = \arctg \frac{\alpha x_2^l}{\frac{r_2^l}{s}} = \arctg \frac{0,428 * 0,7}{\frac{0,268}{0,131}} = 8,33^\circ.$$

Падение напряжения на сопротивлениях статора

$$I_1 z_1 = I_1 \sqrt{r_1^2 + (\alpha x_1)^2} = 50,2 * \sqrt{0,22^2 + (0,428 * 0,518)^2} = 15,77 \text{ В}.$$

Напряжение на статоре

$$U_1 = \sqrt{(\alpha E)^2 + (I_1 z_1)^2 - 2 * \alpha E * I_1 z_1 * \cos(90^\circ + \gamma + \gamma_1)} =$$

$$= \sqrt{86,096^2 + 15,77^2 + 2 * 86,096 * 15,77 * \sin(54,69^\circ + 45,22^\circ)} = 101,67 \text{ В},$$

где γ - угол между током статора и током намагничивания,

$$\gamma = \arcsin\left(\frac{I_2^l}{I_1} \cos \varphi_2\right) = \arcsin\left(\frac{41,64}{50,49} \cos 8,33^\circ\right) = 54,69^\circ;$$

γ_1 - угол между током статора и падением напряжения на статоре,

$$\gamma_1 = \arctg \frac{\alpha x_1}{r_1} = \arctg \frac{0,428 * 0,518}{0,22} = 45,22^\circ.$$

Отношение

$$\frac{U_1}{f_1} = \frac{U_1}{\alpha f_{1н}} = \frac{101,67}{0,428 * 50} = 4,75 > 4,4 = \frac{U_{1н}}{f_{1н}}$$

показывает, что для обеспечения работы двигателя в заданной точке необходимо подавать на статор напряжение большее, чем по результатам предварительного расчета. Следовательно, придется перестраивать функциональный преобразователь U/f.

Для расчета характеристик асинхронного двигателя разработана программа «harad» [5]. Расчет характеристик двигателя 4AK200M8 в программе «harad» при $U_1=101,67$ В и $f_1=21,4$ Гц и удвоенном заданном моменте $M_{зад} = 2 * 0,8 * 198 = 316,8$ Нм дал следующие результаты (в скобках указаны значения вышеприведенного расчета): $\omega_{зад} = 0,372 * 78,5 = 29,2$ рад / с , $M = 311,17$ Нм,

$I_1 = 52,46$ (50,2) А, $I_2 = 41,26$ (41,64) А, $I_\mu = 26,98$ (22,67) А, $E = 85$ (86,1) В. Характеристики приведены на рис. 4.4.4.

Основная причина, вызвавшая погрешность при расчете токов, связана с определением тока намагничивания. При обращении к кривой намагничивания ЭДС при номинальном токе намагничивания принята приближенно, а даже незначительная неточность в оценке ЭДС дает значительную погрешность в расчете тока намагничивания I_μ , что отражается на величине тока статора I_1 .

При работе на этой характеристике ($U_1=101,67$ В и $f_1=21,4$ Гц) и заданном моменте $M_{зад} = 0,8 * M_n = 0,8 * 198 = 158,4$ Нм программа « harad » выдала следующие результаты: $\omega = 31,6$ рад/с ($\omega_{зад} = 0,4 * 78,5 = 31,4$ рад/с), $M = 159,5$ Нм, $I_1 = 38,56$ А, $I_2 = 19,9$ А, $I_\mu = 31,7$ А, $E = 90$ В. Рассчитанные значения U_1 и f_1 обеспечивают работу двигателя в заданной точке с достаточной точностью.

Если двигатель не попал в заданную точку, определяют разницу между заданной и рассчитанной скоростями (в нашем случае $\Delta\omega = 0,2$ рад/с, $\overline{\Delta\omega} = 0,00255$), на эту величину изменяют частоту ($\alpha = 0,428 + 0,00255 = 0,4305$, что соответствует $f_1 = 21.53$ Гц) и повторяют расчет в программе «harad».

Задача 4.4.8

Рассчитать частоту и ток статора асинхронного двигателя 4AK200M8Y3

(см. задачу 4.4.1) при питании от источника тока, обеспечивающего работу двигателя в заданной точке:

$$\overline{M}_{\text{зад}} = 0,8, \quad \overline{\omega}_{\text{зад}} = 0,4.$$

Рассчитать механические и электромеханические характеристики, проходящие через заданную точку.

Решение

При питании от источника тока (ИТ) величина критического момента не зависит от активного сопротивления статора, поэтому для расчета характеристик применяют упрощенную формулу Клосса, которая в данном случае является уточненной.

$$M = \frac{2 * M_{\text{КТ}}}{\frac{\alpha s_{\text{КТ}}}{\alpha s} + \frac{\alpha s}{\alpha s_{\text{КТ}}}}.$$

Принимаем значение $M_{\text{КТ}} = 2 * M_{\text{зад}}$, обеспечивая необходимую перегрузочную способность двигателя. Рассчитываем абсолютное скольжение $\alpha s_{\text{КТ}}$ по известным сопротивлениям ротора r_2' и x_2' и индуктивном сопротивлении контура намагничивания $x_{\mu} = x_{\mu\text{н}}$:

$$\alpha s_{\text{КТ}} = r_2' / (x_{\mu} + x_2') = 0,268 / (12,8 + 0,7) = 0,02.$$

Подставляя принятые значения в формулу Клосса, определим значение абсолютного скольжения $\alpha s_{\text{зад}}$ при заданном моменте двигателя $\mu = M_{\text{КТ}} / M_{\text{зад}}$.

$$\alpha s_{\text{зад}} = \alpha s_{\text{КТ}} / (\mu \pm \sqrt{\mu^2 - 1}) = 0,02 / (2 \pm \sqrt{2^2 - 1}) = 0,00536.$$

Из формулы абсолютного скольжения получим значения заданной синхронной скорости $\omega_{\text{озад}}$, частоты $f_{1\text{зад}}$, и относительного скольжения $s_{\text{зад}}$:

$$\alpha s_{\text{зад}} = \frac{\omega_{\text{озад}} - \overline{\omega}_{\text{зад}}}{\omega_{\text{ОН}}};$$

$$\begin{aligned} \omega_{\text{озад}} &= \alpha s_{\text{зад}} * \omega_{\text{ОН}} + \overline{\omega}_{\text{зад}} = (\alpha s_{\text{зад}} + \overline{\omega}_{\text{зад}}) * \omega_{\text{ОН}} = \\ &= (0,00536 + 0,4) * 78,5 = 31,82 \text{ рад/с}; \end{aligned}$$

$$\alpha = \alpha s_{\text{зад}} + \overline{\omega}_{\text{зад}} = 0,00536 + 0,4 = 0,40536;$$

$$f_{1\text{зад}} = \alpha * f_{1\text{Н}} = 0,40536 * 50 = 20,268 \text{ Гц};$$

$$s_{\text{зад}} = \frac{\omega_{\text{озад}} - \overline{\omega}_{\text{зад}}}{\omega_{\text{озад}}} = \frac{\alpha s_{\text{зад}}}{\alpha} = \frac{0,00536}{0,40536} = 0,013.$$

Ток статора I_1 находим из формулы критического момента $M_{кт}$ при $x_\mu = x_{\mu н}$, так как значение x_μ в заданной точке пока не определено.

$$M_{кт} = \frac{3 * I_1^2 * x_\mu^2}{2 * \omega_{он} * (x_\mu + x_2^|)} \Rightarrow I_1 = \sqrt{\frac{2 * M_{кт} * \omega_{он} * (x_\mu + x_2^|)}{3 * x_\mu^2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{2 * 2 * 0,8 * 198 * 78,5 * (12,8 + 0,7)}{3 * 12,8^2}} = 36,95 \text{ А.}$$

Ток ротора $I_2^|$ в заданной точке рассчитаем по $M_{зад}$ и определенному выше значению αs_e :

$$M_{зад} = \frac{3 * I_2^{|2} * r_2^| / \alpha s_e}{\omega_{он}};$$

$$I_2^| = \sqrt{\frac{M_{зад} * \omega_{он}}{3 * r_2^| / \alpha s_e}} = \sqrt{\frac{0,8 * 198 * 78,5}{3 * 0,268 / 0,00536}} = 9,1 \text{ А.}$$

Ток намагничивания определим по формуле распределения токов в параллельных цепях [9]:

$$I_\mu = I_1 * \sqrt{\frac{(r_2^| / \alpha s_e)^2 + x_2^{|2}}{(r_2^| / \alpha s_e)^2 + (x_\mu + x_2^|)^2}} =$$

$$= 36,95 * \sqrt{\frac{(0,268 / 0,00536)^2 + 0,7^2}{(0,268 / 0,00536)^2 + (12,8 + 0,7)^2}} = 34,44 \text{ А.}$$

При таком токе намагничивания ($\sim 1,5 * I_{он}$) магнитная цепь находится в насыщении.

ЭДС ротора при рассчитанном токе ротора $I_2^|$

$$E = I_2^| * \sqrt{(r_2^| / \alpha s_e)^2 + x_2^{|2}} = 9,1 * \sqrt{(0,268 / 0,00536)^2 + 0,7^2} = 455 \text{ В.}$$

Получены, на первый взгляд, нереальные результаты – ЭДС вдвое больше фазного напряжения. Но в такой схеме замещения и напряжение в $1/\alpha$ раз выше. Реальная ЭДС равна

$$\alpha E = 0,40536 * 455 = 184,4 \text{ В.}$$

Индуктивное сопротивление контура намагничивания

$x_\mu = \alpha E / I_2^| = 184,4 / 34,44 = 5,35 \text{ Ом}$, что отличается от принятого в расчете $x_{\mu н} = 12,8 \text{ Ом}$. А x_μ повлияло на $M_{кт}$ и I_1 . Следовательно, при расчете характеристик при питании от источника тока необходимо учитывать изменение тока намагничивания, т.е. необходим учет кривой намагничивания

реального двигателя, которая в каталогах традиционно не приводится. Можно воспользоваться универсальной кривой, но при этом вновь страдает точность расчетов. В программе « harad » использована именно универсальная кривая намагничивания для двигателей типа MTF(H).

Проверка выше приведенного расчета при $x_{\mu}=12,8$ Ом дала практически совпадающие с расчетом результаты.

Расчет с учетом кривой намагничивания дал результаты неутешительные – при $\omega_{\text{зад}}=0,4$ момент $M = 0,24 * M_{\text{зад}}$, значения токов также существенно отличаются от расчетных величин. При заданном значении момента $M_{\text{зад}} = 0,8$ скорость составила $\omega=0,38$.

Чтобы скорость поднять до заданной, увеличиваем частоту на $\Delta\omega=0,02$, тогда новые значения синхронной скорости и частоты составят $\alpha=0,40536+0,02=0,425$ и $f_{1\text{зад}}=21,3$ Гц.

Повторяем расчет при новом значении частоты и получаем, что при $\omega=0,4$ момент составил $M=0,984 * M_{\text{зад}}$, ток ротора – $I_2' = 19,9$ А, ток намагничивания $I_{\mu} = 29,8$ А. Таким образом, только учет кривой намагничивания дает достоверные результаты.

Задача 4.4.9

Рассчитать и построить правильную пусковую диаграмму, обеспечивающую пуск асинхронного двигателя (каталожные данные см. в задаче 4.4.1) при $M_c=0,5$ и $J=2 * J_{\text{дв}}$ за минимальное время. Принять число ступеней $m=3$.

Решение

Для обеспечения минимального времени переходного процесса двигатель должен работать с предельным моментом $M_{\text{доп}}$, принимаемым $M_{\text{доп}} = 0,8 * \mu_k$ в связи с допускаемым снижением напряжения сети $\Delta U_c = 10\%$. Величина M_k для каждого типа двигателя приводится в каталогах как $M_{\text{макс}}$.

Для двигателя 4AK200M8: $M_{\text{доп}}=0,8 * \mu_k * M_H=0,8 * 3 * 198=475$ Нм;

$$\overline{M}_{\text{доп}} = 0,8 * \mu_k = 0,8 * 3 = 2,4.$$

Расчет выполняется в зависимости от необходимой точности с учетом или без учета кривизны механической характеристики двигателя.

4.4.9,а. При расчете без учета кривизны характеристики принимают за естественную характеристику ее прямолинейный участок. В этом случае характеристика проходит через точки ($\omega = \omega_{\text{он}}$, $M = 0$) и ($\omega = \omega_{\text{н}}$, $M = M_H$).

Расчет можно выполнить по методике расчета правильной пусковой диаграммы для двигателя с прямолинейной механической характеристикой (см. задачу 4.2.7).

Максимальный момент пусковой диаграммы $M1 = M_{\text{доп}}$.

Определим момент переключения $M2$ пусковой диаграммы:

$$\bar{M}1 = \bar{M}_{\text{доп}} = 2,4;$$

$$\lambda = \frac{\bar{M}1}{\bar{M}2} = \sqrt[3]{\frac{1}{\bar{M}1 * s_{\text{H}}}} = \sqrt[3]{\frac{1}{2,4 * 0,035}} = 2,28;$$

$$\bar{M}2 = \bar{M}1 / \lambda = 2,4 / 2,28 = 1,05.$$

Рассчитаем полные сопротивления в цепи ротора:

$$\bar{R}1 = 1 / \bar{M}1 = 1 / 2,4 = 0,417; \quad R1 = \bar{R}1 * R_{2\text{H}} = 0,417 * 7,42 = 3,094 \text{ Ом};$$

$$\bar{R}2 = \bar{R}1 / \lambda = 0,417 / 2,28 = 0,183; \quad R2 = \bar{R}2 * R_{2\text{H}} = 0,183 * 7,42 = 1,358 \text{ Ом};$$

$$\bar{R}3 = \bar{R}2 / \lambda = 0,183 / 2,28 = 0,08; \quad R3 = \bar{R}3 * R_{2\text{H}} = 0,08 * 7,42 = 0,534 \text{ Ом}.$$

Проверим правильность расчета

$$\bar{R}4 = \bar{R}3 / \lambda = 0,08 / 2,28 = 0,035; \quad \bar{R}4 = \bar{r}_2' = s_{\text{H}}; \quad r_2' = \bar{r}_2' * 7,42 = 0,26 \text{ Ом}.$$

Величины ступеней сопротивлений:

$$R_{1\text{доб}} = R1 - R2 = 3,094 - 1,358 = 1,736 \text{ Ом};$$

$$R_{2\text{доб}} = R2 - R3 = 1,358 - 0,534 = 0,824 \text{ Ом};$$

$$R_{3\text{доб}} = R3 - r_2' = 0,534 - 0,26 = 0,274 \text{ Ом}.$$

Максимальные токи пусковой диаграммы (при скорости $\omega = 0$):

$$I_{1\text{макс}} = \sqrt{I_{\mu}^2 + (I_{1\text{H}}^2 - I_{\mu}^2) * \frac{M_{\text{макс}} * s_{\text{зад}}}{M_{\text{H}} * s_{\text{ни}}}} =$$

$$= \sqrt{22,58^2 + (37,8^2 - 22,58^2) * \frac{2,4 * 198 * 1}{198 * 0,405}} = 77,17 \text{ А}$$

$$I_{2\text{макс}} = I_{2\text{H}} * \sqrt{\frac{M_{\text{макс}} * s_{\text{зад}}}{M_{\text{H}} * s_{\text{ни}}}} = 28 * \sqrt{\frac{2,4 * 198 * 1}{198 * 0,405}} = 68,16 \text{ А};$$

Токи переключения правильной пусковой диаграммы:

$$I_{1\text{пне}} = \sqrt{I_{\mu}^2 + (I_{1\text{H}}^2 - I_{\mu}^2) * \frac{M2 * s_{\text{пер}}}{M_{\text{H}} * s_{\text{ни}}}} =$$

$$= \sqrt{22,58^2 + (37,8^2 - 22,58^2) * \frac{1,05 * 198 * 0,4375}{198 * 0,405}} = 40 \text{ А},$$

На рис. 4.4.9 приведены характеристики двигателя по результатам расчета. Точками 1...7 отмечены расчетные значения скоростей и моментов. Видно, что максимальные моменты не попали на характеристики, тогда как моменты переключения совпали с расчетными. Значит, при расчете правильной

$$s_{\text{ни}} = \frac{s_{\text{H}}}{r_2'} * R_2 = \frac{0,035}{0,268} * 3,094 = 0,405.$$

пусковой диаграммы необходим учет нелинейности механических характеристик.

4.4.9,б. При расчете правильной пусковой диаграммы с учетом кривизны механической характеристики АД можно воспользоваться методом лучевой диаграммы [9].

Схема расчета:

- строится естественная механическая характеристика;
- аналогично задаче 4.4.9,а определяется максимальный пусковой момент $M1$;
- на естественной механической характеристике отмечают точкой "b" скорость двигателя при моменте $M1$;
- задаются моментом переключения $M2$ и на естественной характеристике отмечают точкой "a" скорость двигателя при моменте $M2$;
- через точки "a" и "b" проводят прямую до пересечения с горизонталью, проходящей через точку синхронной скорости $\omega_{он}$;
- точка пересечения "O" является полюсом лучевой диаграммы;
- соединяют точку "O" с точкой $M1$ при скорости $\omega = 0$;
- при пересечении полученной прямой с моментом $M2$ выполняют переход при постоянстве скорости к моменту $M1$;
- полученную точку вновь соединяют с "O" и т.д.

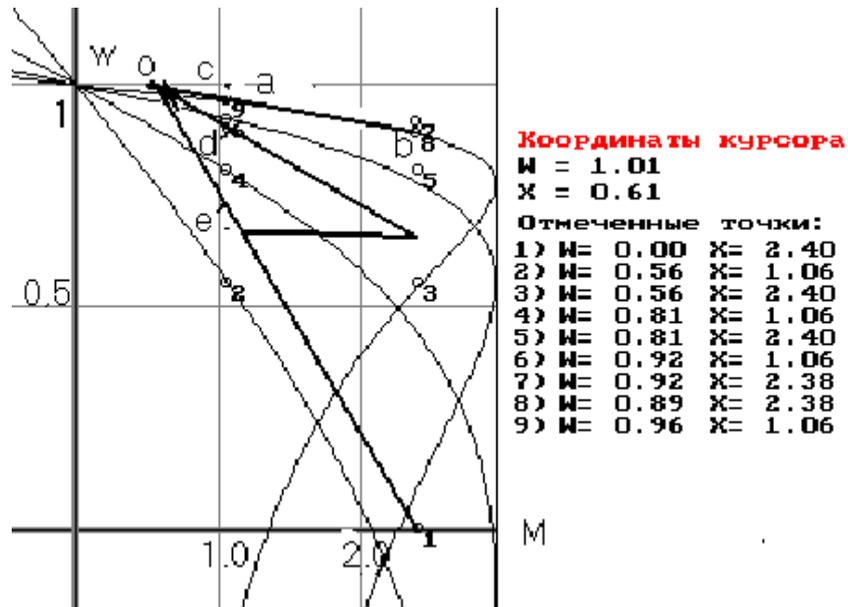


Рис. 4.4.8. Правильная пусковая диаграмма АД

При правильно выбранном значении M_2 выход на естественную характеристику получают при моменте M_1 и правильная пусковая диаграмма построена.

Если правильная пусковая диаграмма не получена, то изменяют M_2 и повторяют построение до ее получения.

При постоянстве момента скольжение пропорционально сопротивлению в цепи ротора, поэтому измеряют отрезки при $M = M_2$ (см. рис. 4.4.9) и по соотношениям отрезков определяют полные сопротивления цепи ротора:

$$R_1 = r_2 * (c_e / c_a); \quad R_2 = r_2 * (c_d / c_a),$$

где r_2 – невыключаемое активное сопротивление фазы ротора.

Значения сопротивлений используют при расчете искусственных характеристик двигателя. Как видно из рис. 4.4.9, получился пуск в две ступени при одинаковых значениях M_1 и M_2 . Характеристики для этого расчета на рисунке не приводятся.

Время пуска (приблизительно, если бы разгон осуществлялся под действием среднего пускового момента до скорости на естественной характеристике, соответствующей этому моменту):

$$t_{п} = \frac{T_{д} * \bar{\omega}_{пср}}{M_{пср} - \bar{M}_c} = \frac{0,475 * 0,94}{1,725 - 0,5} = 0,365 \text{ с};$$

$$T_{д} = \frac{2 * J_{дв} * \omega_{он}}{M_{н}} = \frac{2 * 0,6 * 78,5}{198} = 0,475 \text{ с}.$$

Задача 4.4.10

Рассчитать сопротивление якорной цепи $R_{пв}$, обеспечивающее торможение противовключением асинхронного двигателя (каталожные данные см. в задаче 4.4.1) за минимальное время при $M_c = 0,5$ и $J = 2 * J_{дв}$ от начальной скорости на естественной характеристике до нуля.

Рассчитать:

$M_{тнач}$ – начальное значение тормозного момента;

$I_{тнач}$ – значение тока в начале торможения;

$R_{пвдоб}$ – сопротивление ступени торможения;

$t_{т}$ – время торможения.

Решение

4.2.8.а. Для обеспечения минимального времени переходного процесса необходимо применить схему включения, использующую

максимально допустимый момент двигателя. В начале торможения момент двигателя принимаем равным максимальному $M_{\text{тнач}} = M_{\text{доп}}$.

Значение начальной скорости определим из уравнения предыдущего режима

Скольжение на естественной характеристике при $M_{\text{тнач}}$

$$s_e \frac{\bar{M}_{\text{тнач}}}{\bar{M}_{\text{н}}} = s_{\text{н}} = \frac{M_{\text{н}}}{M_{\text{с}}} = \frac{2,4}{0,035} = 0,084$$

$$\bar{M} = M_{\text{тнач}} = -2,4.$$

$$s_{\text{тнач}} = \frac{\omega_0 - \omega_{\text{тнач}}}{\omega_0} = \frac{-1 - 0,9825}{-1} = 1,9825.$$

Скольжение в начальной точке торможения

Сопротивление цепи ротора в схеме противовключения

Токи статора и ротора определены по формулам Шубенко В.А. для

$$s_{\text{ни}} = 0,826: I_{1\text{тнач}} = 2,015 \cdot I_{\text{н}} = 76,18 \text{ А}; \quad I_{2\text{тнач}} = 2,4 \cdot I_{2\text{н}} = 67,2 \text{ А}.$$

$$R_{\text{пв}} = \frac{r_2}{s_e} \cdot s_{\text{тнач}} = \frac{0,268}{0,084} \cdot 1,9825 = 6,325 \text{ Ом},$$

$$\bar{M}_{\text{тсп}} = \frac{R_{\text{пв}} \cdot \bar{M}_{\text{тнач}}}{2} = \frac{6,325 \cdot (-2,4)}{2} = -7,59 \text{ Нм}; \quad T_{\text{д}} = 0,475 \text{ с};$$

$$t_{\text{т}} = \frac{T_{\text{д}} \cdot \Delta\omega}{\bar{M}_{\text{тсп}} - M_{\text{с}}} = \frac{0,475 \cdot (-0,9825)}{-1,8 - 0,5} = 0,203 \text{ с}.$$

Время торможения приближенно рассчитываем из условия торможения под действием среднего тормозного момента двигателя.

4.5. Переходные процессы в электроприводе

Задача 4.5.1

Рассчитать и построить нагрузочные диаграммы $M(t)$ и $\omega(t)$ пуска двигателя постоянного тока ($P_{\text{н}}=8,1 \text{ кВт}$, $U_{\text{н}}=100 \text{ В}$, $I_{\text{н}}=100 \text{ А}$, $\omega_{\text{н}}=90 \text{ рад / с}$, $J_{\text{дв}}=1 \text{ кгм}^2$) при $M_{\text{с}}=0,5$ и $J=2 \cdot J_{\text{дв}}$.

Правильная пусковая диаграмма рассчитана в задаче 4.2.7.а:

Максимальный пусковой момент $M1=250 \text{ Нм}$;

Момент переключения $M2=157,5 \text{ Нм}$;

Момент статический $M_{\text{с}}=50 \text{ Нм}$.

Полные сопротивления якорной цепи по ступеням:

$R1=0,4 \text{ Ом}$, $R2=0,252 \text{ Ом}$, $R3=0,159 \text{ Ом}$, $r_{\text{я}}=0,1 \text{ Ом}$.

Правильная пусковая диаграмма построена на рис.4.2.7.

Решение

Нагрузочные диаграммы электропривода $\omega = (t)$ и $M = f(t)$ с прямолинейной механической характеристикой описываются уравнениями [9]:

$$\omega(t) = \omega_c + (\omega_{\text{нач}} - \omega_c) * e^{-\frac{t}{T_M}};$$

$$M(t) = M_c + (M_{\text{нач}} - M_c) * e^{-\frac{t}{T_M}}.$$

Для расчета переходного процесса пуска на характеристике 1 (см. рис. 4.2.7) с полным сопротивлением $R1$ определим начальные условия:

$$M_{\text{нач}} = M1 = 250 \text{ Нм}; \omega_{\text{нач}} = 0;$$

$$\omega_{c1} = U_n / k\Phi_n - M_c * R1 / (k\Phi_n)^2 = 100/1 - 50 * 0,4 / 1^2 = 80 \text{ рад / с};$$

$$T_{M1} = J * \omega_{\text{он}} / M1 = 2 * 100 / 250 = 0,8 \text{ с}.$$

Выражения нагрузочных диаграмм для характеристики 1:

$$\omega(t) = \omega_{c1} + (\omega_{\text{нач}} - \omega_{c1}) * e^{-\frac{t}{T_{M1}}} = 80 + (0 - 80) * e^{-\frac{t}{0,8}};$$

$$M(t) = M_c + (M_{\text{нач}} - M_c) * e^{-\frac{t}{T_{M1}}} = 50 + (250 - 50) * e^{-\frac{t}{0,8}}.$$

Процесс разгона по этим выражениям будет продолжаться до установившегося режима в точке $\omega_{c1} = 80 \text{ рад / с}$, $M_c = 50 \text{ Нм}$. Для продолжения пуска по правильной пусковой диаграмме при достижении моментом двигателя M значения момента переключения $M2$ необходимо вывести из цепи якоря добавочное сопротивление $R_{\text{доб}}$ и процесс пуска будет продолжен на характеристике 2.

Время работы на первой ступени (при $M = M2$):

$$t_1 = T_{M1} * \ln\left(\frac{M1 - M_c}{M2 - M_c}\right) = 0,8 * \ln\left(\frac{250 - 50}{157,5 - 50}\right) = 0,497 \text{ с}.$$

Скорость перехода на характеристику 2 (начальная скорость на характеристике 2 при $M = M1$ равна конечной скорости на характеристике 1 при $M = M2$).

$$\omega_{\text{нач2}} = \omega_{\text{кон1}} = U_n / k\Phi_n - M2 * R1 / (k\Phi_n)^2 = 100/1 - 157,5 * 0,4 / 1^2 = 37 \text{ рад / с}.$$

Электромеханическая постоянная времени на характеристике 2

$$T_{M2} = J * (\omega_{\text{он}} - \omega_{\text{нач2}}) / M1 = 2 * (100 - 37) / 250 = 0,5 \text{ с}.$$

Результаты расчета начальных условий, электромеханических постоянных времени T_m , времени работы на ступенях приводятся в табл. 4.5.1.

Время работы на последней ступени (на естественной характеристике) рассчитывается приближенно $t_e = \sim 3 * T_{me}$, время пуска равно сумме времени работы на ступенях $t_n = 1,61 \text{ с}$.

По полученным уравнениям ведется расчет нагрузочных диаграмм для каждой ступени. Для построения нагрузочных диаграмм можно использовать программу RENOP [5] "Расчет переходных процессов в системе МК–ДНВ".

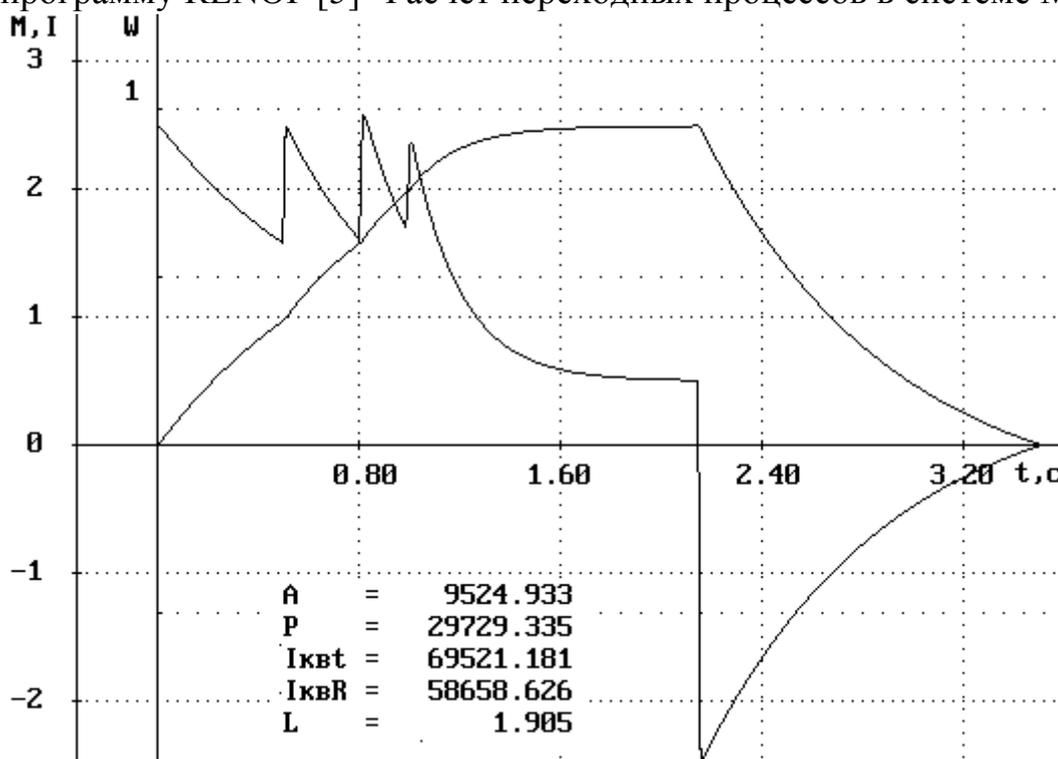


Рис. 4.5.1. Нагрузочные диаграммы реостатного пуска и динамического торможения ДНВ

Таблица 4.5.1

Расчет переходного процесса реостатного пуска ДНВ

Ступень	$M_{нач}, Нм$	$\omega_{нач}, рад/с$	$\omega_c, рад/с$	$T_m, с$	$t, с$
1	250	0	80	0,8	0,497
2	250	37	83,4	0,5	0,31
3	250	60	92	0,32	0,2
4(естеств)	250	75	95	0,2	~0,6

На рис 4.5.1 приведены нагрузочные диаграммы для выполненного выше расчета в программе RENOP. Времена работы на ступенях совпадают. Максимальные значения момента несколько отличаются от рассчитанных выше, особенно при переходе на естественную характеристику, в связи с тем, что при расчетах в программе учитывалась электромагнитная инерция якорной обмотки.

Приведенные результаты расчета энергий (механической A , электрической из сети P , среднеквадратичного тока $I_{кв}$ двигателя и среднеквадратичного тока в добавочных сопротивлениях $I_{квR}$ и др.) позволяют рассчитать энергетические показатели переходного процесса и в дальнейшем позволяют

получить данные для проверки двигателя по нагреву и электропривода – по производительности.

Коэффициент полезного действия электропривода за цикл (в конце цикла запас потенциальной энергии привода должен быть равен запасу ее в начале цикла)

$$\eta_{ц} = A / P = 9525 / 29729,3 = 0,32.$$

Среднеквадратичный ток двигателя

$$I_{срkv} = \sqrt{\frac{\int I^2 dt}{t}} = \sqrt{\frac{I_{кв} t}{t}} = \sqrt{\frac{69521,181}{3,43}} = 142,37 \text{ А.}$$

Среднеквадратичный ток пускотормозных резисторов

$$I_{срkv} = \sqrt{\frac{\int I_R^2 dt}{t}} = \sqrt{\frac{I_{квR}}{t_{п} + t_{т}}} = \sqrt{\frac{58658,626}{1,0 + 1,32}} = 159 \text{ А.}$$

Угол поворота вала двигателя (при $T_{\alpha}=1 \text{ с}$)

$$\alpha = L * \omega_{он} = 1,905 * 100 = 190,5 \text{ рад.}$$

Задача 4.5.2

Рассчитать и построить нагрузочные диаграммы $M(t)$ и $\omega(t)$ динамического торможения двигателя постоянного тока ($P_{н}=8,1 \text{ кВт}$, $U_{н}=100 \text{ В}$, $I_{н}=100 \text{ А}$, $\omega_{н}=90 \text{ рад / с}$, $J_{дв}=1 \text{ кгм}^2$) при $M_c=0,5$ и $J=2*J_{дв}$.

Механическая характеристика динамического торможения рассчитана в задаче 4.2.8:

Начальный тормозной момент $M = - 250 \text{ Нм}$;

Момент статический $M_c = 50 \text{ Нм}$;

Начальная скорость $\omega_{нач} = 95 \text{ рад / с}$;

Полное сопротивление якорной цепи $R_{дт} = 0,38 \text{ Ом}$.

Решение

Нагрузочные диаграммы электропривода $\omega = (t)$ и $M = f(t)$ с прямолинейной механической характеристикой описываются уравнениями [9]:

$$\omega(t) = \omega_c + (\omega_{нач} - \omega_c) * e^{-\frac{t}{T_M}};$$

$$M(t) = M_c + (M_{нач} - M_c) * e^{-\frac{t}{T_M}}.$$

Для расчета переходного процесса определим начальные условия:

$$M_{\text{нач}} = M_{\text{тнач}} = -250 \text{ Нм}; \omega_{\text{нач}} = 95 \text{ рад / с};$$

$$\omega_c = -M_c * R_{\text{дт}} / (k\Phi_n)^2 = -50 * 0,38 / 1^2 = -19 \text{ рад / с};$$

$$T_{\text{мдт}} = J * \omega_{\text{нач}} / M_{\text{тнач}} = 2 * (-95) / (-250) = 0,76 \text{ с}.$$

Выражения нагрузочных диаграмм для режима динамического торможения:

$$\omega(t) = \omega_c + (\omega_{\text{нач}} - \omega_c) * e^{-\frac{t}{T_{\text{мдт}}}} = -19 + (95 - (-19)) * e^{-\frac{t}{0,76}};$$

$$M(t) = M_c + (M_{\text{нач}} - M_c) * e^{-\frac{t}{T_{\text{мдт}}}} = 50 + (-250 - 50) * e^{-\frac{t}{0,76}}.$$

Процесс торможения по этим выражениям будет продолжаться до установившегося режима в точке $\omega_c = -19 \text{ рад / с}$, $M_c = 50 \text{ Нм}$ по экспоненте с $T_{\text{мдт}} = 0,76 \text{ с}$.

Время торможения (до остановки при $\omega = 0$ и $M = 0$)

$$t_T = T_{\text{мдт}} * \ln\left(\frac{M_{\text{тнач}} - M_c}{-M_c}\right) = 0,76 * \ln\left(\frac{-250 - 50}{-50}\right) = 1,22 \text{ с}.$$

Для построения нагрузочных диаграмм рекомендуется использовать программу RENOP [5] "Расчет переходных процессов в системе электропривода МК-ДНВ (магнитный контроллер - двигатель независимого возбуждения)".

На рис 4.5.1 приведены нагрузочные диаграммы динамического торможения для выполненного выше расчета в программе RENOP. Время торможения составило 1,32 с. Максимальные значения момента несколько отличаются от рассчитанных выше в связи с тем, что при расчетах в программе учитывалась электромагнитная инерция якорной обмотки.

Расчет энергетических показателей выполнен в задаче 4.5.1.

Задача 4.5.3

Рассчитать и построить нагрузочные диаграммы $M(t)$ и $\omega(t)$ пуска и торможения противовключением асинхронного двигателя 4AK200M8 (каталожные данные – в задаче 4.4.1) при $M_c=0,5$ и $J=2*J_{\text{дв}}$ за минимальное время.

Правильная пусковая диаграмма рассчитана в задаче 4.4.9.а и построена на рис.4.4.9.:

$$\text{Максимальный пусковой момент } M1=2,4*M_n=475,2 \text{ Нм};$$

$$\text{Момент переключения } M2=1,05*M_n=207,9 \text{ Нм};$$

Момент статический $M_c=0,5*M_H= 99 \text{ Нм}$;

Полные сопротивления роторной цепи для пуска по ступеням:

$R1=3,094 \text{ Ом}$, $R2=1,358 \text{ Ом}$, $R3=0,534 \text{ Ом}$, $r_2=0,268 \text{ Ом}$

Для расчета тормозного режима воспользуемся итогами решения задачи 4.4.10:

Начальный тормозной момент $M = - 2,4*M_H = - 475,2 \text{ Нм}$;

Начальная скорость $\omega_{\text{нач}} = 0,9825*\omega_{\text{он}} = 77,13 \text{ рад / с}$;

Момент статический $M_c = 0,5*M_H = 99 \text{ Нм}$;

Полное сопротивление фазы роторной цепи $R_{\text{пв}} = 6,325 \text{ Ом}$.

Решение

Механические характеристики АД нелинейны. Для расчета нагрузочных диаграмм используются методы линеаризации и конечных интервалов[5,9]. При таких характеристиках широко используются численные методы расчета на ЭВМ. Для приближенных расчетов иногда применяют расчеты нагрузочных диаграмм с прямолинейными механическими характеристиками рабочего участка. Пример такого расчета иллюстрирует задача 4.5.1, в которой выполнен расчет нагрузочных диаграмм для ДНВ.

Для расчетов нагрузочных диаграмм с учетом кривизны характеристик при выполнении контрольных заданий и в курсовом проектировании можно воспользоваться программой READ[5].

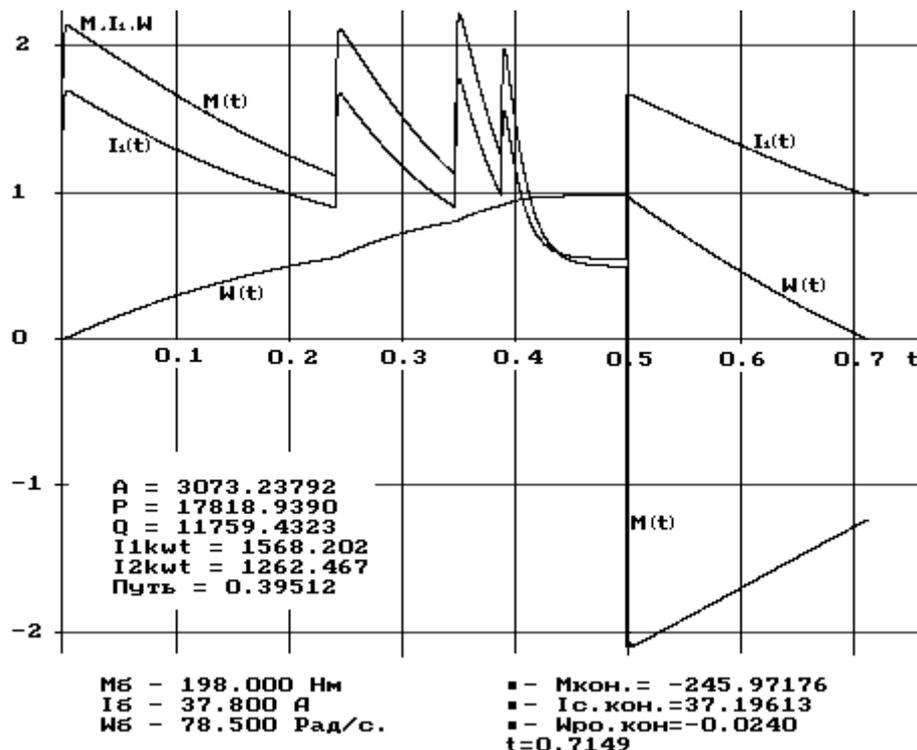


Рис. 4.5.3. Нагрузочные диаграммы реостатного пуска и торможения противовключением АД

На рис. 4.5.3 приведены нагрузочные диаграммы и интегральные показатели переходных процессов пуска и торможения противовключением двигателя 4АК200М8, выполненные по результатам расчета в задачах 4.4.9 (для линейных характеристик) и 4.4.10. Сравнение максимальных значений моментов и токов, времени протекания процессов позволяют судить о правомерности применения для расчетов линейных характеристик.

Для расчета энергетических показателей за время переходного процесса пуска и торможения воспользуемся интегральными показателями из программы « READ » (см. рис. 4.5.3).

Коэффициент полезного действия электропривода за цикл

$$\eta_{ц} = A / P = 3073,24 / 17818,94 = 0,172.$$

Коэффициент мощности за цикл

$$\cos \varphi_{ц} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \frac{17818,94}{\sqrt{17818,94^2 + 11759,47^2}} = 0,835.$$

Среднеквадратичный ток двигателя

$$I_{срКВ} = \sqrt{\frac{I_{1КВ} t}{t}} = \sqrt{\frac{1568,2}{0,715}} = 46,83 \text{ А.}$$

Среднеквадратичный ток пускотормозных резисторов

$$I_{2срКВ} = \sqrt{\frac{I_{2КВ} t}{t_{п} + t_{т}}} = \sqrt{\frac{1262,47}{0,39 + 0,22}} = 45,5 \text{ А.}$$

Угол поворота вала двигателя (при $T_{\alpha}=1\text{ с}$)

$$\alpha = L * \omega_{оН} = 0,395 * 78,5 = 31 \text{ рад.}$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Асинхронные электродвигатели серии 4А: Справочник / А.Э.Кравчик, М.Н.Шлаф, В.И.Афонин и др. – М.: Энергоатомиздат, 1982.
2. Вешеневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. – М.: Энергия, 1977. – 432 с.
3. Двигатели асинхронные трехфазные крановые и металлургические серий МТФ, МТН, МТКФ, МТКН. НК 01.30.01-82. Электротехника СССР. М.: Информэлектро, 1985.
4. Двигатели постоянного тока крановые и металлургические серии Д. НК 01.19.01-82. Электротехника СССР. М.: Информэлектро, 1985.
5. Драчев Г.И. Теория электропривода: Учебное пособие к курсовому проектированию. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 1998. – 160 с.
6. Драчев Г.И. Теория электропривода: Учебное пособие к курсовому проектированию для студентов заочного обучения. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2002. – 137 с.
7. Ильинский Н.Ф., Козаченко В.Ф. Общий курс электропривода: Учебник для вузов.–М.: Энергоатомиздат, 1992.–544 с.
8. Капунцов Ю.Д., Елисеев В.А., Ильяшенко Л.А. Электрооборудование и электропривод промышленных установок: Учебник для вузов.– М.: Высш. школа, 1979. – 359с.
9. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.
- 10.Ковчин С.А., Сабинин Ю.А. Теория электропривода: Учебник для вузов. – СПб.: Энергоатомиздат. 1994.– 496 с.
- 11.Крановое электрооборудование: Справочник / Под ред. А.А. Рабиновича.– М.: Энергия, 1979.
- 12.Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 416 с.
- 13.Справочник по электрическим машинам / Под ред. И.П. Копылова и В.В. Клокова – М.: Энергоатомиздат, 1988.– Т1. – 456 с.
- 14.Осипов О.И., Усынин Ю.С., Драчев Г.И. Теория электропривода: Учебное пособие к лабораторным работам. Ч.1. Электроприводы постоянного тока.– Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 1998.
- 15.Осипов О.И., Усынин Ю.С., Драчев Г.И. Теория электропривода: Учебное пособие к лабораторным работам. Ч.2. Асинхронные электроприводы.– Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 1998.
- 16.Осипов О.И., Усынин Ю.С., Драчев Г.И. Теория электропривода: Учебное пособие к лабораторным работам. Ч.3. Синхронные электроприводы. Электроприводы с машиной двойного питания.–Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 1998.
- 17.Электротехнический справочник.– М.: Энергоиздат, 1982. Т.3. – Кн. 2. Яуре А.Г. , Певзнер Е.М. Крановый электропривод: Справочник. – М.:Энергоатомиздат, 1988. – 344 с.

Оглавление

Введение.....	3
В1. Требования ГОС к дисциплине.....	3
В2. Учебный план изучения дисциплины для заочной формы обучения.....	4
1. Рабочая программа дисциплин “ Электрический привод ” и “Теория электропривода”	5
2. Контрольные работы.....	18
2.1. Контрольная работа №1. Механика электропривода.....	19
2.2. Контрольная работа №2. Расчет характеристик, параметров схем включения и переходных процессов электропривода с двигателем независимого возбуждения	26
2.3. Контрольная работа №3. Расчет характеристик, параметров схем включения и переходных процессов асинхронного электропривода.....	27
3. Контрольные задачи по некоторым разделам.....	30
3.1. Механика электропривода.....	30
3.2. Электромеханические свойства двигателей независимого возбуждения (ДНВ).....	31
3.3. Электромеханические свойства асинхронных двигателей (АД).....	33
3.4. Переходные процессы в системах электропривода.....	34
4. Типовые расчеты в электроприводе	37
4.1. Механика электропривода.....	37
4.2. Расчет параметров схем включения и характеристик двигателя независимого возбуждения (ДНВ).....	45
4.3. Расчет параметров схем включения и характеристик двигателя последовательного возбуждения (ДПВ).....	51
4.4. Расчет параметров схем включения и характеристик асинхронных двигателей.....	54
4.5. Переходные процессы в электроприводе.....	77
Литература.....	84

