

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Южно-Уральский государственный университет  
Кафедра «Автоматизированный электропривод»

62-83(07)  
У836

Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.М. Журавлев

## **ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

Учебное пособие

Челябинск  
Издательский центр ЮУрГУ  
2016

УДК 62-83.01 (075.8)  
У836

*Одобрено  
учебно-методической комиссией энергетического факультета.*

*Рецензенты:*  
В.В. Остроухов, А.С. Сарваров

Усынин, Ю.С.  
У836 Теория электропривода: учебное пособие / Ю.С. Усынин,  
М.А. Григорьев, А.М. Журавлев – Челябинск: Издательский  
центр ЮУрГУ, 2016. – 55 с.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника».

Оно соответствует требованиям ФГОС и содержанию лабораторных и практических занятий, проводимых студентам по курсу «Теория электропривода». В учебном пособии большое внимание уделено методике настройки многоконтурных систем электроприводов с применением персональных компьютеров, приведены программы экспериментального исследования установившихся и переходных режимов, подробно выделены особенности экспериментальных приёмов измерения регулировочных, энергетических и механических характеристик электропривода.

Учебное пособие может быть полезно студентам энергетического факультета, обучающихся по родственным направлениям подготовки.

УДК 62-83.01 (075.8)

© Издательский центр ЮУрГУ, 2016

# 1. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С ПОЗИЦИЙ РЕАЛИЗАЦИИ ПРЕДЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ

## 1.1 Обобщенные требования технологического процесса к электроприводам, реализующим предельные режимы работы по быстродействию и перегрузочной способности

В начале XXI века проф. Ильинский Н.Ф. отметил, что бурный рост силовой полупроводниковой техники приведет к тому, что соотношение в цене между полупроводниковым преобразователем и двигателем изменится от 1:5 к соотношению 1:1. На рис. 1.1 показаны удельные цены на полупроводниковые преобразователи с разными типами конфигурации силовой цепи. Интересен тот факт, что в диапазоне малых мощностей (до 10 кВт) мостовой преобразователь постоянного тока (*Mentor II*) имеет наибольшую стоимость по сравнению с преобразователями частоты (для наглядности на рис. 1.1 проведена поперечная плоскость, пересекающая стоимость других типов преобразователей частоты). В области больших мощностей (при  $P_H > 1$  МВт) лидерство по условиям наименьшей цены остается за тиристорными преобразователями. Средняя стоимость преобразователя частоты лежит в диапазоне (50–100) долларов за 1 А.

Появление новых технологий и совершенствование существующих не только повышает требования к электроприводу, но и требует реализации нового характера движения. Привычные требования к электроприводу: диапазон регулирования скорости и момента, полоса пропускания частот электропривода, энергоэффективность, – резко увеличиваются.

В табл. 1.1 систематизированы требования к регулируемому электроприводу со стороны ряда технологических объектов, в которых наиболее остро проявляются эти требования. В качестве технологических объектов были взяты объекты металлургического производства и тяговые механизмы. Развитие этих объектов является наиболее актуальным для Уральского региона в силу исторических причин и с учетом приоритетных направлений развития Южно-Уральского региона.

Анализ этой таблицы показал, что при сохранившихся требованиях к диапазону регулирования скорости наиболее актуальными становятся показатели расширения диапазона регулирования момента (до 1:10 в тяговых механизмах), максимальной скорости (до 10:1) и предельных перегрузок по моменту (до 4  $M_H$ ).

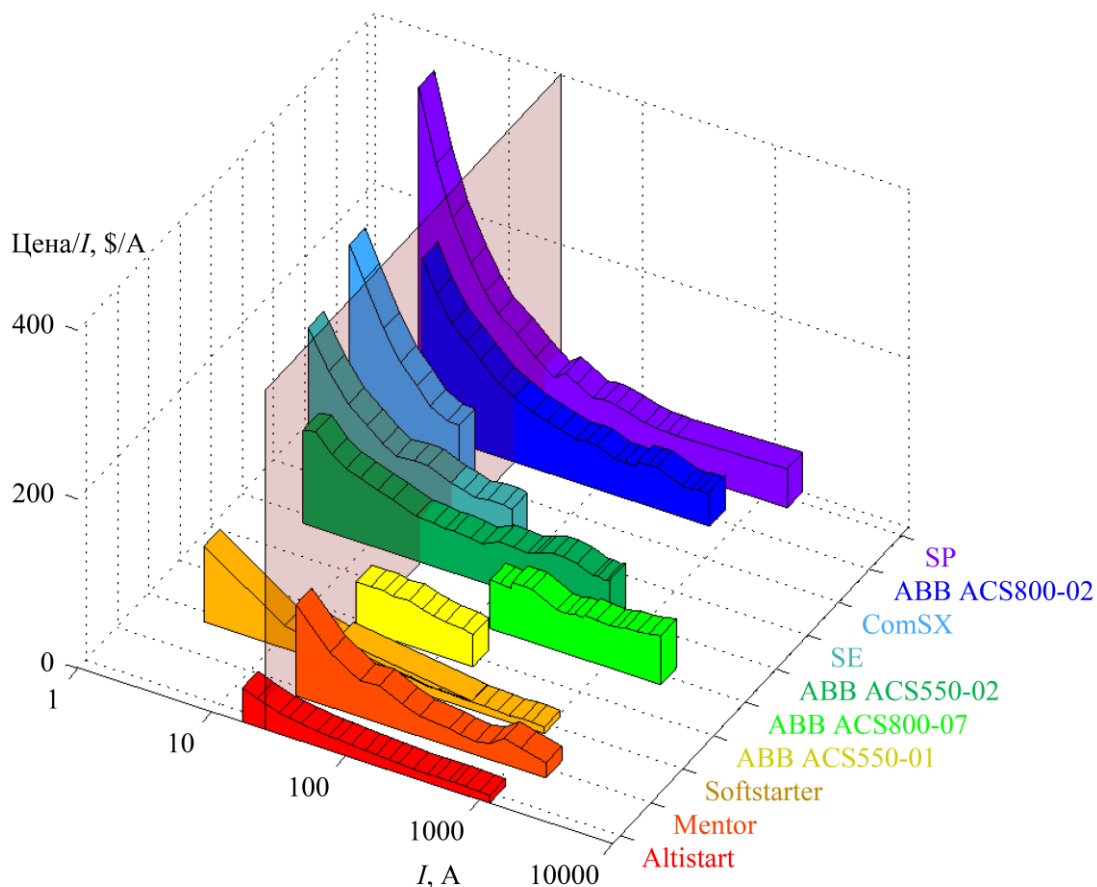


Рис. 1.1. Зависимость удельных цен на полупроводниковые преобразователи от тока и схем силовых цепей Altistart, Mentor, Softstarter, ACS550-01, ACS800-07, ACS550-02, SE, ComSX, ACS800-02, UnidriveSP

Поэтому для дальнейшего анализа были отобраны две группы механизмов. Первая – те механизмы, в которых наиболее важными являются рассматриваемые показатели: электроприводы станов холодной прокатки труб, тяговые механизмы городского электротранспорта и промышленных тракторов, которые характеризуются экстремальными режимами работы по быстрдействию и перегрузочной способности. Вторая группа – объекты технологического производства, к которым предъявляются умеренные требования по регулированию координат электропривода, но которые работают в агрессивных, а следовательно, тяжелых технологических условиях.

### *Электропривод подачи станов холодной прокатки труб*

Станы холодной прокатки труб предназначены для получения бесшовных труб переменного или постоянного сечения, используемых в оборонной промышленности из труднопрокатываемых легированных сталей. В настоящее время в России эксплуатируется более 200 таких станов. В Челябинске установлено два стана ХПТ 450 в цехе №5 ОАО Челябинского трубопрокатного

завода. На основании исследований показано, что в многосвязной системе стана наиболее “слабым” звеном является электропривод подачи стана, который на сегодняшний день определяет быстродействие системы в целом. Поэтому отдельно остановимся на анализе технологических требований к этому объекту.

На рис. 1.2 дана пространственная модель стана, которая была реализована в программе *Solid Works*. Электропривод подачи (на рис. 1.2 – механизм 4) работает в позиционном режиме. Анализ технологических требований к механизму подачи показывает, что электропривод должен реализовывать предельные характеристики по быстродействию и точности: перемещение заготовки и механизма подачи общей массой более 15 т за время позиционирования около 100 мс; при срыве трубы с оправки электропривод должен кратковременно развивать момент, больший (3–4)  $M_H$ . Указанные требования можно считать предельными. Последнее требование реализуется увеличением габарита электрической машины, что ведет к ухудшению добротности электропривода ( $M/J$ ), так как в традиционных асинхронных электроприводах и приводах постоянного тока предельное значение момента не превышает (2–2,5)  $M_H$ . Существующая система, предложенная в 80-х годах проф. Вейнгером А.М., построена по схеме синхронного электропривода с частотно-токовым регулированием. Схема силовых цепей, выполненная на базе тиристорных преобразователей частоты (НПЧ) [45], ограничивает предельные возможности электропривода, так как система импульсно-фазового управления имеет раздельное управление вентильными группами. В общем случае система может быть аппроксимирована как двухмассовая при следующих соотношениях обобщенных параметров  $T_c > T_{рм} > T_{крс}$ .

### *Тяговый электропривод городского электротранспорта*

Следующая группа механизмов: тяговые электроприводы тракторов, городского электротранспорта, – имеет специфические требования, которые определяются автономным расположением электрооборудования. В табл. 1.1 даны обобщенные требования к электроприводу трамвая. Среди этих требований следует выделить: расширенный диапазон регулирования по моменту; возможность реализации трамвая с низким уровнем пола.

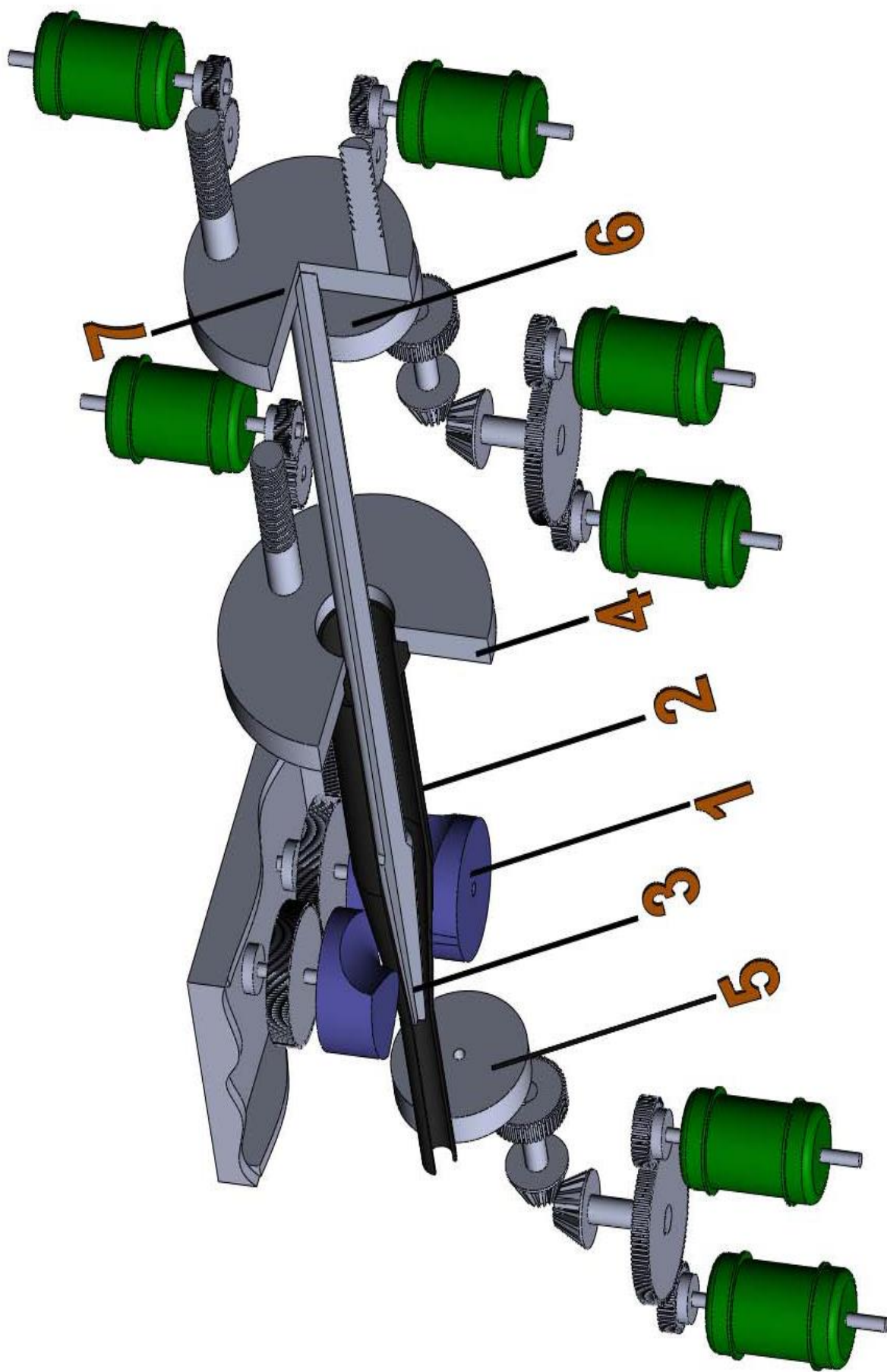


Рис. 1.2. Модель стана холодной прокатки труб ХПТ450, где 1 – валки; 2 – труба; 3 – коническая оправка; 4 – механизм подачи трубы; 5 – механизм поворота трубы; 6 – механизм поворота оправки; 7 – стержень с оправкой

## Обобщенные технические требования к тяговым механизмам

Показатель	Значение	Единицы измерения
Номинальная мощность тягового привода	$P_{\text{ном}} = (160-240)$	кВт
Диапазон регулирования по моменту	1:10	
Число тяговых двигателей	2-4	шт.
Удельное энергопотребление на тягу	60	Вт·ч/тыс. км
Скорость движения	$v_{\text{движ}} = 40$	км/ч
Высота тележки трамвая	$h = 400$	мм
Высота сверхнизкого пола	$h = 140$	мм
Доля низкого пола в существующих трамваях	60	%

Первоочередная задача реализации 100% низкого пола (при высоте  $h < 250$  мм) может быть решена только при комплексном подходе к проектированию механо- и электрооборудования. На рис. 1.3 в программе *Solid Works* была выполнена модель модернизированной тележки трамвая 71-619А [2]. На схеме показан один из вариантов компоновки тягового электропривода: в этом случае размещение элементов тележки не претерпевает значительных изменений, однако к тяговому электроприводу 1 (см. рис. 1.3) предъявляются требования снижения высоты оси вращения электрической машины. Существующая схема асинхронного частотнорегулируемого электропривода не позволяет решить поставленную задачу, поэтому требуется переход к новым (нетрадиционным)

электромеханическим преобразователям. Второй вариант модернизации тележки (на рис. 1.3 не показан) предполагает отказ от механической передачи и размещения двигателя непосредственно на приводной оси. В этом случае требования низкой высоты оси вращения приводного двигателя сохраняются, но они дополняются необходимостью установки специальных упругих муфт. Из модели тележки видно (рис. 1.3), что проект реализации трамвая со “сверхнизким полом” (при высоте  $h < 100$  мм) может быть осуществлен только при конструировании электрических машин со специальной формой геометрии статора. Одним из примеров рассмотрен в [1]. Научный коллектив кафедры, решая задачу снижения электротехнической стали при изготовлении магнитопровода электрической машины предложили вариант конструкции статора синхронной реактивной машины прямоугольного сечения.

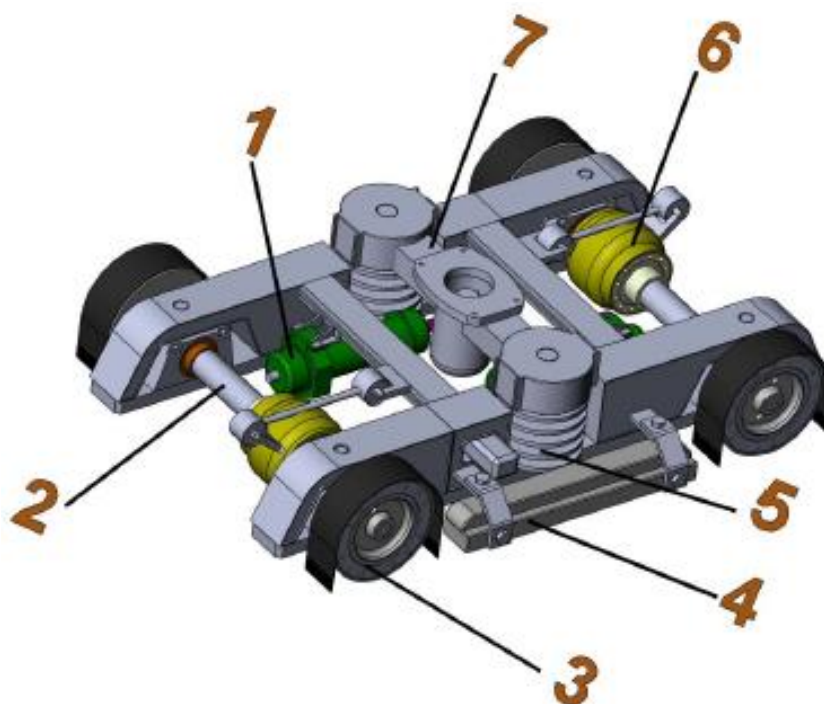


Рис. 1.3. Модернизированная модель тележки 71-619А с установочными предельными габаритами для размещения электрооборудования:

- 1 – тяговый двигатель; 2 – ось колесной пары; 3 – колесо;  
 4 – рельсовый тормоз; 5 – листовой рессор;  
 6 – редуктор; 7 – шкворная балка

## 1.2 Новые подходы к синтезу современных регулируемых электроприводов переменного тока

Возможности полупроводниковой техники и современного электропривода значительно недоиспользовались, если бы гибкие устройства управления на базе микропроцессорных устройств управления отсутствовали или находились бы на начальной ступени развития. В современных системах электропривода



применяются цифровые сигнальные процессоры, выполненные по Гарвардской архитектуре [6]. Несмотря на то, что различия между архитектурами Фон Неймана и Гарвардской постепенно исчезают, но за последней сохраняется ряд обязательных функций: аппаратная организация работы узлов ШИМ и цифровых фильтров.

Совершенствование технологии производства предъявляет новые требования к современному регулируемому электроприводу, которые могут быть обеспечены только при системном подходе к синтезу электротехнического комплекса. Этот подход требует обязательного учета совместной работы полупроводникового преобразователя и двигателя. В современной технической литературе появился новый технический термин *Converter Fed Machine* [7] (электрические машины, запитываемые от электрического преобразователя). На сегодняшний день при проектировании сформировались два основных направления.

Первое направление [5 - 7] предполагает проектирование так называемых энергосберегающих двигателей, в которые закладывается больше активной меди и электротехнической стали. За счет этого достигаются повышенные технические показатели системы, такие как КПД и  $\cos\phi$ . Электрические машины могут проектироваться для работы как от питающей сети, так и от полупроводникового преобразователя. Существенный эффект и окупаемость капитальных затрат на электропривод достигается, если график нагрузки рабочего механизма носит ровный характер, а электропривод подобран по мощности наиболее правильно. Этот подход нашел применение при проектировании систем общепромышленных механизмов с вентиляторным характером нагрузки.

Второй подход [5, 9] предусматривает больший учет особенностей совместной работы преобразователя и двигателя и обусловлено это тем, что в этом случае электропривод работает в тяжелых условиях эксплуатации с «рваным» характером нагрузки, либо к электрооборудованию предъявляются жесткие требования по массогабаритным показателям. Добиться интенсивного использования активных материалов можно только при обязательном учете совместной работы всего комплекса. При этом такие привычные требования, как трехфазность, синусоидальность не являются обязательными. Наиболее полное использование активных материалов может быть реализовано только при учете возможностей всех компонентов электропривода и требований технологического процесса: от графика нагрузки и силовых элементов электропривода и заканчивая микропроцессорными устройствами управления.

Уровень развития современной элементной базы электропривода напрямую влияет на возможности системы и качества реализации движения рабочего органа. Принятие технических решений жестко связано не только с техническими возможностями современной элементной базы, но и предусматривает экономическое обоснование.

## *Технико-экономические показатели электромеханических преобразователей*

Удельные массогабаритные показатели современных электромеханических преобразователей, используемых в регулируемом электроприводе, можно оценить по рис. 1.4. Здесь по вертикальной оси отложены удельные показатели по моменту ( $M/m$ ), которые вычислялись в функции номинального момента  $M_n$  и типа электромеханического преобразователя (асинхронный, синхронный с электромагнитным возбуждением, синхронный с постоянными магнитами (на рис. 1.4 отмечен, как серво)). Как и ожидалось, наилучшие удельные показатели среди асинхронных машин имеют двигатели с числом полюсов  $2p=6$ , наихудшие – двухполюсные машины, имеющие увеличенное сечение “спинки” магнитопровода статора. В диапазоне малых мощностей наилучшие удельные показатели имеют двигатели с постоянными магнитами, так как высокоэнергетические магниты обеспечивают относительно большие значения индукции в зазоре, даже в малых машинах, в которых доля зазора оказывается существенной [2]. Наилучшие показатели имеют прокатные синхронные двигатели с электромагнитным возбуждением (до 8–10 Н·м/кг). Эти двигатели работают в замкнутой системе с частотно-токовым управлением на знаковых технологических объектах Челябинской области: универсальном рельсобалочном стане (ОАО ЧМК); стане 5000 (ОАО ММК). Улучшенные удельные показатели в этих электроприводах достигнуты за счет следующих факторов: работы электрической машины в замкнутой системе, когда нет необходимости иметь относительно большой зазор с целью обеспечения устойчивой работы синхронного двигателя; применения жидкостного охлаждения, что позволило поднять электромагнитные нагрузки примерно на (20–30)%; построения структуры управления по схеме с последовательным возбуждением для улучшения перегрузочной способности системы.

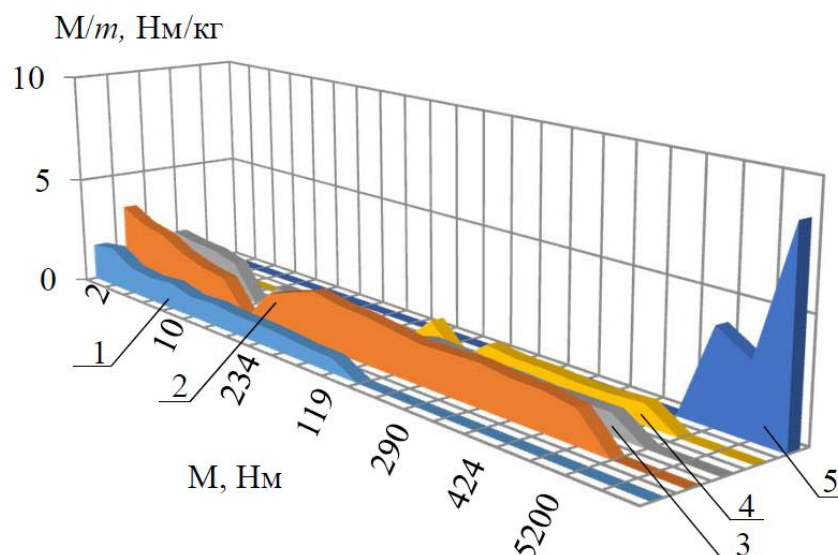


Рис. 1.4. Зависимость удельного значения момента двигателя от номинального значения момента для Серво привода (1), АД 2р=2(2), 2р=4(3), 2р=6(4), СД(5)

#### *Технико-экономические показатели микропроцессорной техники*

Возможности полупроводниковой техники и современного электропривода значительно недоиспользовались, если бы гибкие устройства управления на базе микропроцессорных устройств управления отсутствовали или находились бы на начальной ступени развития. В современных системах электропривода применяются цифровые сигнальные процессоры, выполненные по Гарвардской архитектуре [5]. Несмотря на то, что различия между архитектурами Фон Неймана и Гарвардской постепенно исчезают, но за последней сохраняется ряд обязательных функций: аппаратная организация работы узлов ШИМ и цифровых фильтров. За счет увеличения быстродействия тактовой частоты процессора, увеличения объема памяти программ и данных, увеличения скорости доступа к системной шине данных удалось существенно снизить время расчета одного скана программы. При этом на несущих частотах до 1кГц время задержки в контуре регулирования оценивается величиной 0,1 мс. На микроконтроллеры накладываются не только функции управления, но и задачи диагностики элементов системы управления электроприводом.

Решение задач управления технологическими координатами (регулирование натяжения на станах холодной прокатки, синхронизация движения транспортных средств) может реализовываться на специальных технологических контроллерах, которые синхронизируются по быстродействующим последовательным шинам данных [9, 10]. Эти контроллеры имеют достаточный набор программных инструментов, позволяющих реализовывать соответствующие функции автоматического регулирования и управления.

В тех случаях, когда необходимо решать задачи регулирования координат электропривода по напряжению, току, электромагнитному моменту рекомендуется некоторые блоки и узлы программировать на “низком” уровне. Наиболее эффективно данная задача может быть решена на базе менее мощных, но более простых в программировании микропроцессорных систем, например, “Atmega” [5], и именно этим устройствам нужно в первую очередь отдавать предпочтение. При этом снизить время расчета скана одной программы можно за счет параллельного включения нескольких процессоров. В электроприводах, работающих в функции положения ротора, синхронизация процессоров, включенных параллельно, решается очень просто по сигналам с выхода датчика положения ротора. Реализация же сложных алгоритмов управления электроприводом (пространственной векторной ШИМ-модуляции, быстродействующих векторных систем управления электроприводами) возможна только на базе мощных сигнальных цифровых процессоров (*DSP*) [6]. Примеры реализации таких сложных алгоритмов представлены и в отечественной школе электропривода [5 - 7].

### *Энергоэффективные электромеханические преобразователи*

При ровном графике нагрузки рабочего механизма рационально применять технические решения на базе энергосберегающих двигателей. Идея проектирования электроприводов в этом случае проста – в асинхронный двигатель закладывают в ротор медь, жестче выдерживают допуски, формулируют новые критерии качества с учетом особенностей работы от полупроводникового преобразователя [5 - 9].

На рис. 1.5 представлены энергетические показатели асинхронных энергоэффективных двигателей разных стандартов. Из рис. 1.5 следует, что в двигателях класса IE4 электрические потери снижены примерно на 30 %. Как обращают внимание авторы [5, 6], даром такое улучшение энергетических показателей не дается. На рис. 1.5 (кривые 2, 3, 4) видно, что энергоэффективные двигатели имеют не самые лучшие массогабаритные показатели. Ротор таких электрических машин оказывается тяжелее, что ограничивает использование этих типов двигателей для механизмов, работающих с резкопеременным графиком нагрузки.

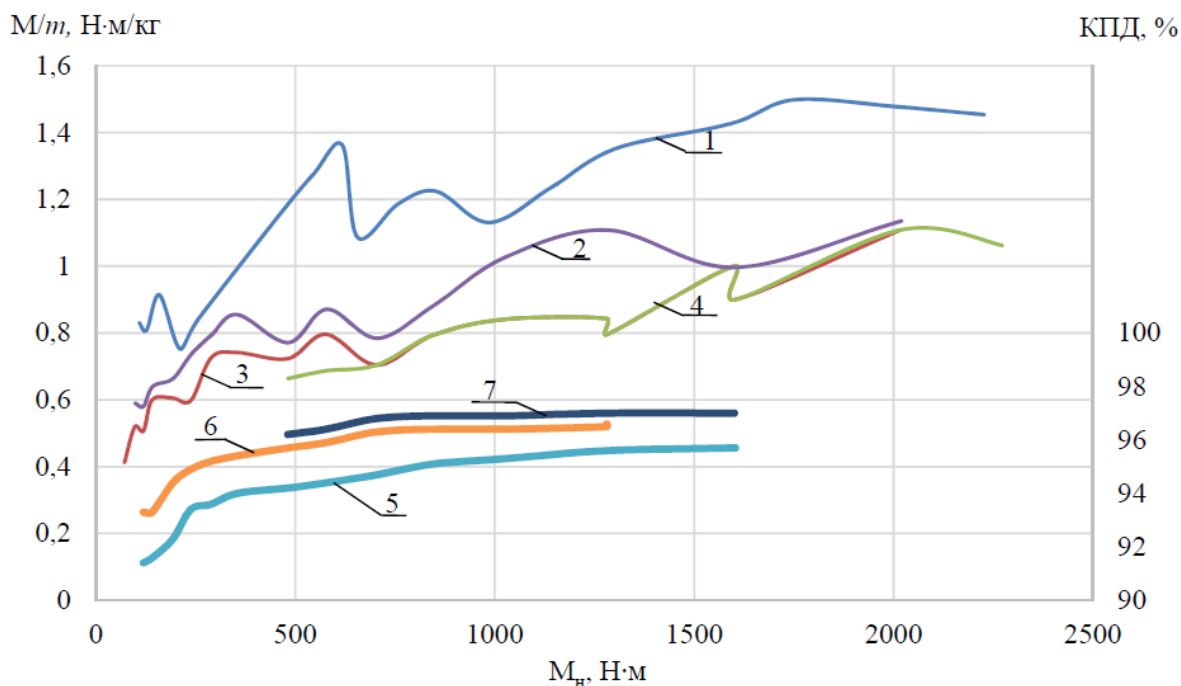


Рис. 1.5. Удельные массогабаритные показатели синхронных реактивных (СРД АВВ) (1), новых энергоэффективных асинхронных электроприводов серии IE2 (2), IE3 (3), IE4 (4), КПД асинхронных электроприводов серии IE2 (5), IE3(6), IE4(7)

### 1.3. Новые типы электроприводов

Особое место в классе реактивных электроприводов занимают вентильно-индукторные электроприводы ВИП (*SRD – Switched Reluctance Drive*). Идея работы электропривода была озвучена еще в 70-е годы XX века, но силовая версия электропривода была впервые реализована в 90-е годы прошлого столетия.

Большое количество публикаций, касающихся разработки и внедрения этих электроприводов [2, 10], говорит о перспективах его использования в промышленности.

Основные преимущества и недостатки электропривода определяются принципом работы системы.

На рис. 1.6 даны сечения электрической машины и осциллограммы токов обмоток, поясняющие идею работы электропривода на примере трехфазной машины.

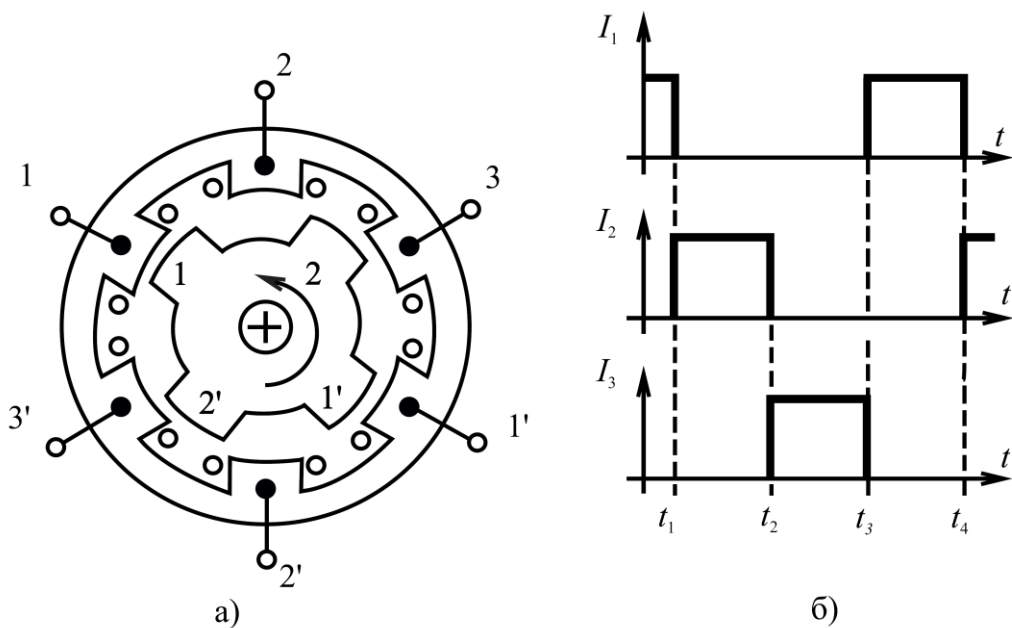


Рис. 1.6. Индукторный двигатель с числом полюсов 6/4 (а) и диаграмма токов фаз статора (б)

Электрический цикл управления электроприводом, который включает в себя поочередное подключение к источнику питания всех трех обмоток статора приводит к вращению вала двигателя. Причем направление вращения будет зависеть не только от порядка чередования питающих фаз, но и от соотношения количества полюсов ротора и статора [3].

Главные преимущества этих электроприводов: простота конструкции электрической машины (по технологии изготовления проще асинхронного двигателя); меньшее количество вентилях силового полупроводникового преобразователя частоты; улучшенные удельные массогабаритные показатели, которые получаются при больших отношениях  $Ld/Lq$ ; бесконтактность; пониженный расход меди [4].

Недостатки электрического привода на базе вентильно-индукторной машины связаны с конструктивными особенностями машины и принципом работы электропривода, а именно, большими пульсациями электромагнитного момента и повышенным шумом, которые обусловлены “двойной зубчатостью” машины.

Другим примером нетрадиционного перспективного электропривода является синхронный реактивный электропривод с независимым управлением по каналу возбуждения [3] (*FRRM – Field Regulated Reluctance Machine*) [6]. В этой бесконтактной машине роль обмотки возбуждения может выполнять и обмотка, размещенная на статоре, если, во-первых, ее витки располагаются в межполюсном промежутке и, во-вторых, эта обмотка имеет полный шаг. Такой двигатель работает как обращенная машина постоянного тока (рис. 1.7), ее фазные обмотки статора могут питаться как от независимых индивидуальных источников, так и от традиционных многофазных управляемых преобразователей,

выполненных, например, по мостовой схеме. Так как ротор может выполняться массивным, то достигается высокая механическая жесткость вала. Двигатель может быть выполнен в том же корпусе и с тем же пакетом железа статора, что и у асинхронных двигателей, а при той же токовой линейной нагрузке статора развивает момент на 20...35 % больше. Благодаря умышленному смещению физической нейтрали на край полюса двигатель может развивать большие (до 4...10 номиналов) перегрузочные моменты.

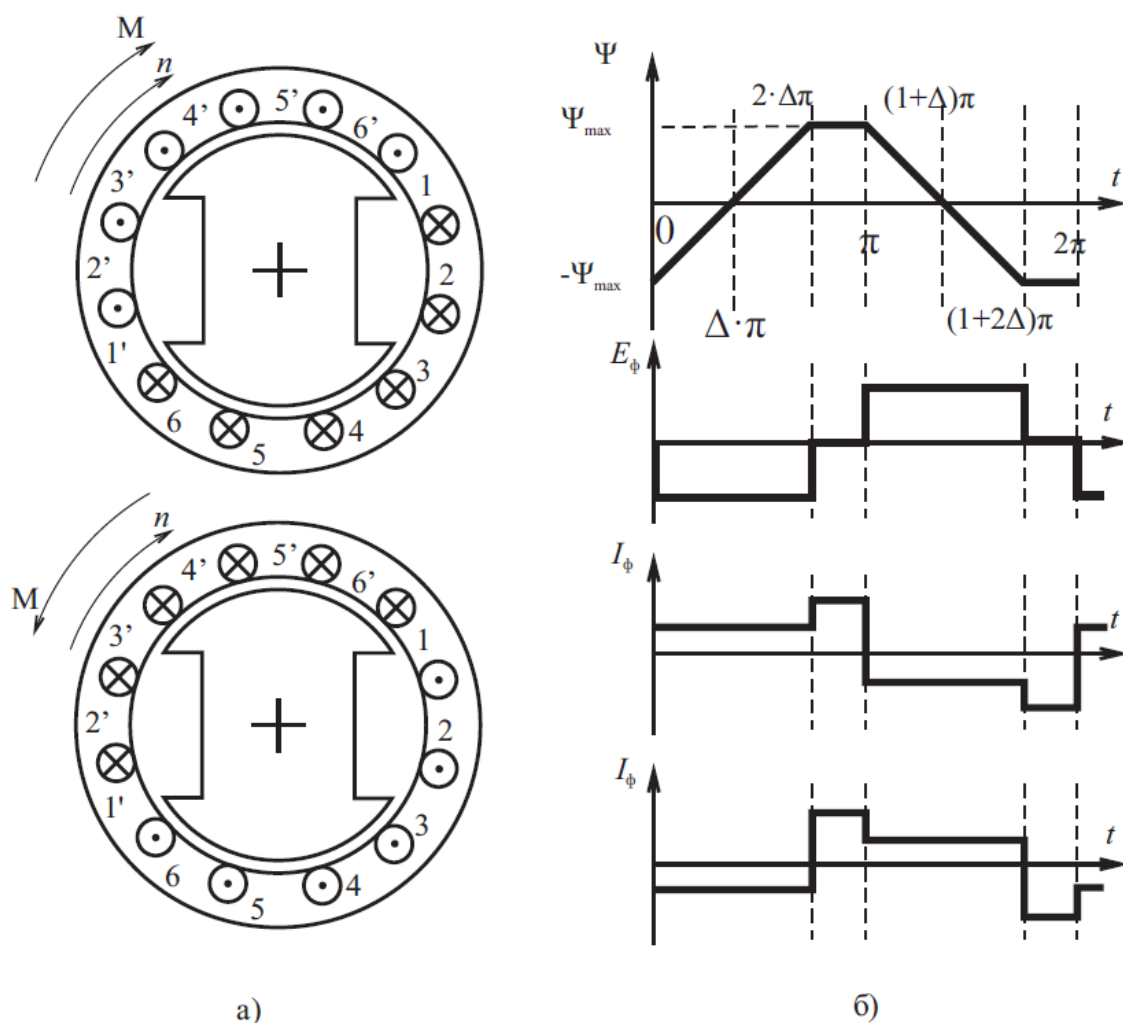


Рис. 1.7. Сечение СРМНВ (а) и идеальные диаграммы (б), поясняющие принцип работы электропривода с СРМНВ

В описываемом реактивном (с явно выраженными полюсами) двигателе при вращении ротора каждая обмотка (пара диаметрально расположенных проводников) работает попеременно или как обмотка возбуждения, или как обмотка якоря (создает вращающий момент). Токи в обмотках возбуждения, расположенных над межполюсными промежутками ротора, и токи в якорных обмотках, расположенных над полюсами ротора, могут регулироваться независимо и переключаться в функции положения ротора. По этим обмоткам нет необходимости пропускать синусоидальный ток. Более эффективной оказывается

прямоугольная форма тока, как в секциях обмотки двигателя постоянного тока. Двигатель работает как многофазный, ток и ЭДС каждой последующей фазы сдвинуты на  $\pi/m$  электрических градусов, где  $m$  – число фаз двигателя. Так, на рис. 1.7  $m = 6$ .

При вращении вала реально работающего шестифазного двигателя через каждые  $30^\circ$ , соответствующие ширине его фазной зоны, происходит переключение знака тока в одной из фазных обмоток, переходящей из зоны возбуждения в зону якоря (рис. 1.7, б).

#### **1.4. Этапы синтеза регулируемых электроприводов, реализующих предельные режимы работы**

Рассмотренные частные случаи электроприводов, реализованные с использованием новых подходов, показали, что за счет перераспределения активных материалов удастся достигнуть улучшенных показателей при простоте конструкции электромеханического преобразователя. В связи с этим актуальной является задача систематизации этапов проектирования электроприводов, в которых реализуются предельные режимы работы для технологических механизмов, отличающихся тяжелыми и сверхтяжелыми условиями эксплуатации.

Была сформулирована концепция синтеза (проектирования) электротехнических комплексов, в которых обеспечиваются предельные по возможностям характеристики (рис. 1.8).

Первый этап синтеза является обязательным, так как существующие математические модели, как правило, описывают системы с сосредоточенными параметрами и не учитывают особенности конфигурации электромеханических преобразователей. Более того, ценность этого этапа в том, что с использованием обобщенной математической модели удастся обосновать упрощенные расчетные схемы.

На втором этапе выполняется оценка предельных показателей, системы. На этом этапе осуществляется выбор системы электропривода, которая способна решать конкретные технологические задачи в части обеспечения электроприводом конкретной траектории движения.

Рациональный выбор соотношения активных материалов в электроприводе может быть решен на этапе параметрической оптимизации электропривода. На этом этапе получают ответ, могут ли применяться традиционные подходы к выбору габаритных размеров электромеханических преобразователей или требуются уточнения, если в качестве критерия эффективности выступает показатель минимума массы системы (или максимума перегрузочного момента).





Рис. 1.8. Концепция синтеза электротехнических комплексов, реализующих предельные режимы работы

Выбор структур и параметров корректирующих связей требует предварительной оценки принятой упрощенной модели электропривода (4 и 5 этапы).

Оптимальные траектории движения рабочего органа могут быть сформулированы после детального изучения технологического процесса. Результат, полученный на 6 этапе дает ответ, насколько успешным является решение. При необходимости выполняется возврат к предыдущему этапу. Как правило, приходится уточнять показатели эффективности и снова решать задачу параметрической оптимизации (3 этап).

## 2. СПОСОБЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПУСКА И ПОДДЕРЖАНИЯ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

### 2.1. Формирование прямоугольной токовой диаграммы с помощью отрицательной обратной связи по току якоря

#### 2.1.1. Исходные данные

В регулируемом электроприводе постоянного тока независимого возбуждения с отрицательной обратной связью по току якоря (рис. 2.1), управляемый преобразователь постоянного тока аппроксимируется апериодическим звеном первого порядка с постоянной времени  $T_{\Pi}$ , с коэффициентом передачи  $K_{\Pi}$ . В двигателе постоянной времени  $T_{\text{яц}}$  учитывается электромагнитная инерция якорной цепи. Обратная связь по току описывается безынерционным звеном с коэффициентом усиления  $K_{\text{от}}$  [1].

Рассматриваемый в задачах электропривод имеет следующие параметры:  $K_{\text{дв}} = 1$  рад/(с·В);  $K_{\Pi} = 10$  В/В;  $K_{\text{от}} = 1$  В/А;  $R_{\text{яц}} = 0,1$  Ом;  $U_{\text{вхн}} = 10$  В;  $J_{\text{д}} = 1$  кг·м<sup>2</sup>;  $T_{\Pi} = 1$  с;  $T_{\text{яц}} = 0,1$  с.

#### 2.1.2. Задачи

1. Построить статическую электромеханическую характеристику  $n = f(I_{\text{я}})$ . Определить основные энергетические режимы работы электропривода при изменении момента сопротивления от 0 до 15 Н·м.
2. Определить показатели процесса пуска при скачке входного сигнала  $U_{\text{вх}} = 10$  В и  $M_{\text{с}} = 0$ .
3. Построить переходный процесс изменения следующих координат:  $I_{\text{я}}(t)$ ,  $n(t)$ ,  $E_{\Pi}(t)$ , – при пуске электропривода.
4. Дать анализ влияния варьируемых параметров на показатели переходного процесса  $I_{\text{м}}$ ,  $t_{\text{м}}$  при пуске в соответствие с вариантом (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Варьируемые параметры (к задаче 4)

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Варьируемый параметр	$T_{\text{яц}}$	$K_{\text{от}}$	$T_{\text{д}}$	$T_{\Pi}$	$R_{\text{яц}}$	$T_{\text{м}}$	$K_{\Pi}$	$K_{\text{дв}}$	$L_{\text{яц}}$	$J_{\text{д}}$

#### 2.1.3. Методические указания

С целью упрощения математических выкладок и для максимального обобщения полученных результатов удобно все переменные представить в системе относительных единиц. Задачу можно решать и в системе абсолютных единиц.

Для перехода к относительным единицам примем базовые значения переменных в соответствии с табл. 2.2.

Параметры звеньев на схеме (см. рис. 2.1):

– кратность тока короткого замыкания:

$$K_{\text{яц}} = \frac{U_{\text{ян}}}{R_{\text{яц}} \cdot I_{\text{н}}} = \frac{100}{0,1 \cdot 100} = 10;$$

– базовая постоянная времени интегрального звена Д (механическая постоянная электропривода)

$$T_{\text{д}} = J \frac{n_{\text{б}}}{M_{\text{б}}} = 1 \frac{100}{100} = 1 \text{ с -}$$

время, за которое скорость двигателя изменится от 0 до базовой скорости, при условии, что вал двигателя развивает постоянный момент, равный  $M_{\text{н}}$ ;

– электромеханическая постоянная времени:

$$T_{\text{м}} = \frac{T_{\text{д}}}{K_{\text{яц}}} = \frac{1}{10} = 0,1 -$$

время, за которое скорость двигателя изменится от 0 до базовой скорости, при условии, что к валу двигателя приложен момент, равный  $M_{\text{кз}} = M_{\text{н}} \cdot K_{\text{яц}}$ ;

– относительное значение коэффициента обратной связи по току:

$$\bar{K}_{\text{от}} = \frac{\Delta \bar{U}_{\text{от}}}{\Delta \bar{I}_{\text{я}}} = \frac{I_{\text{н}} \cdot \Delta U_{\text{от}}}{U_{\text{отб}} \cdot \Delta I_{\text{я}}} = \frac{I_{\text{н}}}{U_{\text{отб}}} = \frac{100 \cdot 1}{10} = 10.$$

Таблица 2.2

Базовые значения переменных

Переменная	$U_{\text{от}}, U_{\text{вх}}$	$E_{\text{п}}$	$I_{\text{я}}$	$n$	$M$
Способ определения	$U_{\text{вхн}}$	$U_{\text{вхн}} \cdot K_{\text{п}}$	$I_{\text{н}}$	$K_{\text{дв}} \cdot E_{\text{пб}}$	$I_{\text{н}} / K_{\text{дв}}$
Численное значение	10	100	100	100	100
Размерность	В	В	А	рад/с	Н·м

Передаточные функции звеньев, записанные в системе относительных единиц представлены на структурной схеме (см. рис. 2.1).

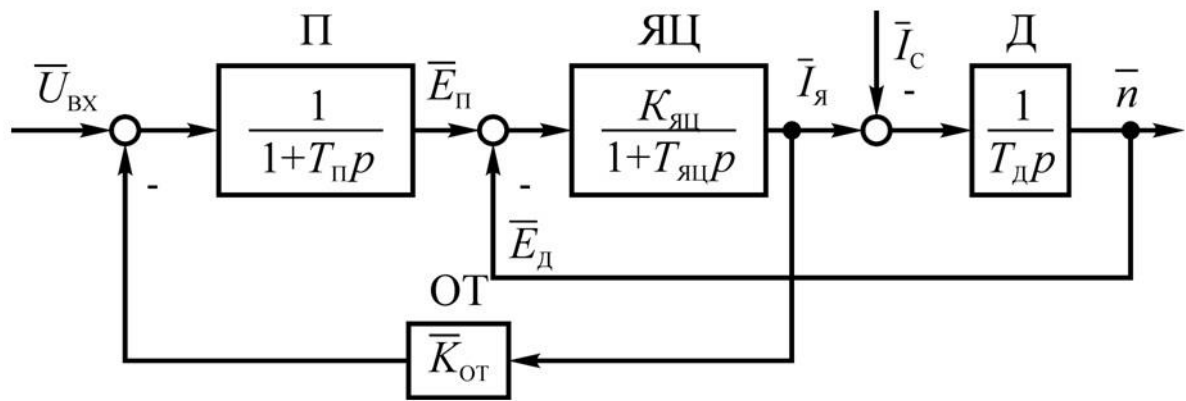


Рис. 2.1. Структурная схема электропривода с отрицательной обратной связью по току

1. Статическая электромеханическая характеристика может быть построена по структурной схеме, если оператор Лапласа приравнять к нулю (рис 2.2).

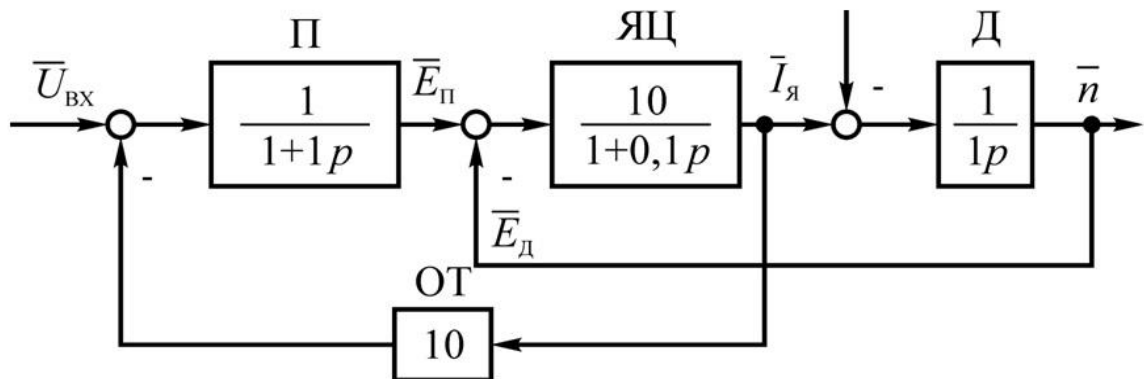


Рис. 2.2. Структурная схема (см. рис. 2.1) с численными значениями параметров звеньев

В режиме идеального холостого хода  $I_{Я} = 0$ , тогда  $U_{ОТ} = 0$ , следовательно,  $\bar{n}_0 = 1$ .

Вторая, удобная для расчёта точка, – в режиме работы электропривода на упор. Примем  $n_0 = 0$ , тогда:

$$\bar{I}_{Я\text{упора}} = \bar{U}_{ВХ} \frac{\bar{K}_{П} \cdot \bar{K}_{ЯЦ}}{1 + \bar{K}_{П} \cdot \bar{K}_{ЯЦ} \cdot \bar{K}_{ОТ}} = 1 \frac{1 \cdot 10}{1 + 1 \cdot 10 \cdot 10} \approx 0,1.$$

Статическая электромеханическая характеристика представлена на рис. 2.3. Полученное значение тока упора является приближённым. При ответе на вторую часть вопроса 1 рекомендуется построить на этом же графике зависимость  $E_{\Pi} = f(I_{\text{я}})$  и уточнить значение тока упора.

2. Приближённые показатели пуска электропривода можно определить,

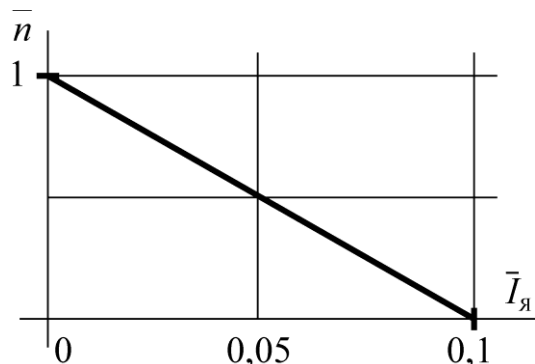


Рис. 2.3. Статическая электромеханическая характеристика электропривода

учитывая общеизвестные зависимости между кривой переходного процесса в системе регулирования и формой её частотной характеристики. На рис. 2.4 построена аппроксимированная частотная характеристика КРТ. Здесь построение выполнялось в следующей последовательности. Сначала была построена характеристика прямого канала, в который входят звенья преобразователя (П) и двигателя (ЯЦ и Д). Звено, учитывающее

механическую инерцию (Д) взято со знаком “–”, так как оно находится в канале обратной связи двигателя. Канал обратной связи системы представлен датчиком тока ( $K_{\text{от}}$ ). Учитывая безынерционность канала обратной связи, частотная характеристика канала обратной связи проходит во всём диапазоне частот горизонтально на уровне  $1/K_{\text{от}}$ . Результирующая характеристика проходит по “низам”.

3. Переходный процесс пуска рассчитывается численными методами с использованием ЭВМ в любом программном приложении, например, *Matlab (Simulink)*.

4. При ответе на этот вопрос, необходимо построить графики зависимостей  $I_{\text{м}}$ ,  $t_{\text{м}}$  от величины варьируемого параметра. Обратите внимание, варьируемый параметр необходимо увеличивать и уменьшать от исходного значения в широких пределах. При этом попытайтесь найти левую и правую границу устойчивого состояния системы.

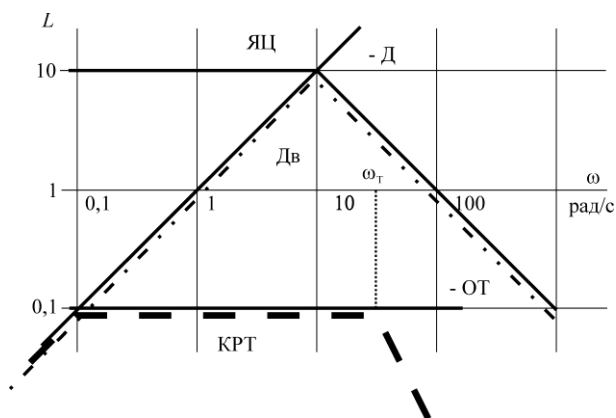


Рис. 2.4. Логарифмическая частотная характеристика контура регулирования тока

## 2.2. Поддержание скорости с помощью отрицательной обратной связи по скорости вращения двигателя

### 2.2.1. Исходные данные

В электроприводе с отрицательной обратной связью по скорости скачкообразно прикладывается момент статической нагрузки (рис. 2.5). Внутренний контур – контур саморегулирования ЭДС двигателя,

образованный звеньями ЯЦ, Д и местной обратной связью по ЭДС двигателя. Внешний контур – контур регулирования скорости, полученный охватом преобразователя П (аппроксимирован апериодическим звеном первого порядка с постоянной времени  $T_P$ ) и двигателя безынерционным звеном ОС – внешней обратной связью по скорости с коэффициентом передачи  $K_{OC}$  [2].

Рассматриваемый в задачах электропривод характеризуется следующими параметрами:

$K_{ДВ} = 1$  рад/(В·с);  $K_P = 10$  В/В;  $R_{ЯЦ} = 0,1$  Ом;  $U_{ВХН} = 10$  В;  $K_{OC} = 0,31$  (В·с)/рад;  $J_D = 1$  кг·м<sup>2</sup>;  $T_P = 1$  с;  $T_{ЯЦ} = 0,1$  с.

### 2.2.2. Задачи

1. Пользуясь аппроксимированными частотными характеристиками, определить показатели переходного процесса при скачкообразном приложении момента сопротивления  $\Delta M_C = M_H$ .

2. Дать анализ влияния на показатели переходного процесса  $\Delta n_D$ ,  $t_M$  при приложении нагрузки в соответствии с вариантом (см. табл. 1.3).

3. Построить переходный процесс пуска следующих координат:  $I_{Я}(t)$ ,  $\Delta n(t)$ ,  $E_P(t)$ , – при приложении  $\Delta M_C$ .

4. Сопоставить показатели процессов в п.п. 2 и 3 и объяснить причины несовпадения.

Таблица 2.3

Варьируемые параметры (к задаче 2)

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Варьируемый параметр	$T_{ЯЦ}$	$K_{OC}$	$T_D$	$T_P$	$R_{ЯЦ}$	$T_M$	$K_P$	$K_{ДВ}$	$L_{ЯЦ}$	$J_D$

### 2.2.3. Методические указания к решению

Базовые величины переменных представлены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Базовые значения переменных

Переменная	$U_{OC}, U_{BX}$	$E_{\Pi}$	$I_{Я}$	$n$	$M$
Способ определения	$U_{BXH}$	$U_{BXH} \cdot K_{\Pi}$	$I_H$	$K_{ДВ} \cdot E_{\Pi 6}$	$I_H / K_{ДВ}$
Численное значение	10	100	100	100	100
Размерность	В	В	А	рад/с	Н·м

Коэффициент обратной связи по скорости в относительных единицах

$$K_{OC} = \frac{\Delta \bar{U}_{OC}}{\Delta \bar{n}} = \frac{n_6 \cdot \Delta U_{OC}}{U_{BX6} \cdot \Delta n} = \frac{100 \cdot 0,31}{10} = 3,1.$$

1. Оценку показателей переходного процесса, вызванного приложением нагрузки, необходимо выполнять по аппроксимированной частотной характеристике. Структурная схема электропривода в относительных единицах по каналу  $U_{BX} - n$  дана на рис. 2.5. Для удобства построения статической характеристики постройте структурную схему электропривода по каналу  $M_C (I_C) - \Delta n_C$ .

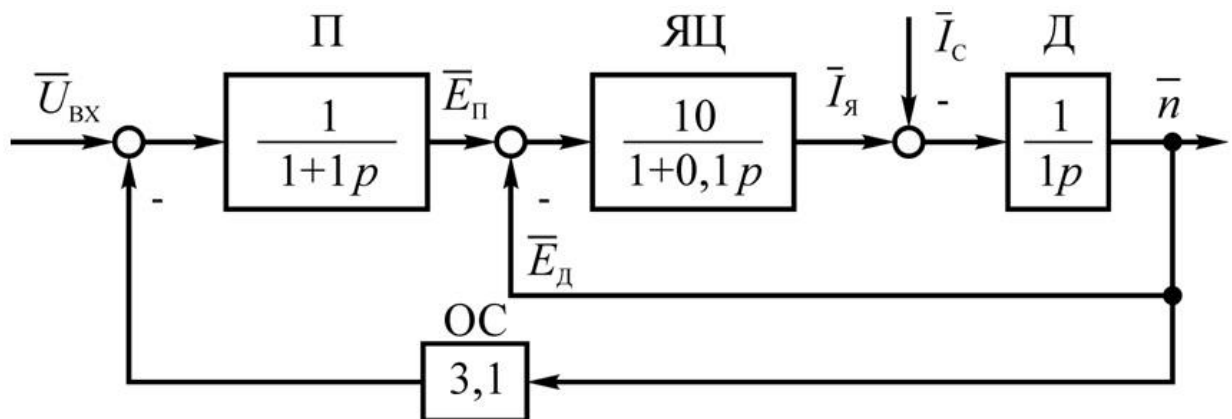


Рис. 2.5. Структурная схема электропривода с отрицательной обратной связью по скорости

Пользуясь структурной схемой (рис. 2.6), необходимо построить амплитудную частотную характеристику электропривода по каналу и сопоставить её с рис. 2.7. Попробуйте выделить влияние главных звеньев на каждом участке.

Ориентируясь на вид частотной характеристики (см. рис. 2.7), можно определить приближённые показатели переходного процесса:

$$\Delta \bar{n}_C \approx \frac{1}{K_{ЯЦ}} \cdot \frac{1}{K_{OC}} = \frac{1}{10} \cdot \frac{1}{3,1} \cdot 1 = 0,31;$$

$$\Delta \bar{n}_D \approx \Delta n_D^{\text{ест}} = \frac{1}{K_{\text{ЯЦ}}} \cdot \Delta \bar{I}_C = \frac{1}{10} \cdot 1 = 0,1;$$

$$t_M \approx \frac{3 \dots 4}{\omega_{\text{э}}} = \frac{3 \dots 4}{10} = 0,3 \dots 0,4 \text{ с};$$

$$t_{\text{ПП}} \approx \frac{3 \dots 4}{\omega_c} = \frac{3 \dots 4}{\sqrt{10}} = 1 \dots 1,3 \text{ с}.$$

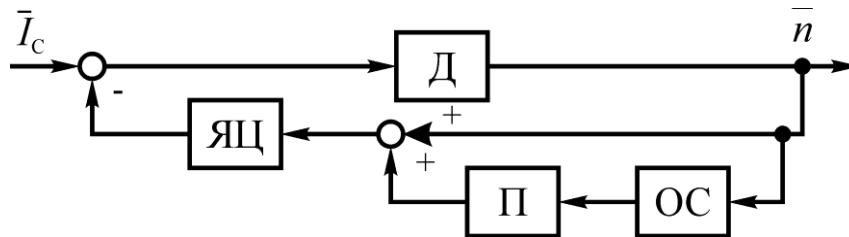


Рис. 2.6. Структурная схема электропривода с отрицательной обратной связью по скорости по каналу  $I_C - \Delta n$

2. Для построения переходных процессов, вызванных приложением статической нагрузки воспользуйтесь любым программным приложением, позволяющим решать систему дифференциальных уравнений численными методами, например, *Matlab (Simulink)*.

3. При ответе на этот вопрос, необходимо построить графики зависимостей  $\Delta n_D$ ,  $t_M$  от величины варьируемого параметра. Обратите внимание, варьируемый параметр необходимо увеличивать и уменьшать от исходного значения в широких пределах. При этом попытайтесь найти левую и правую границу устойчивого состояния системы.

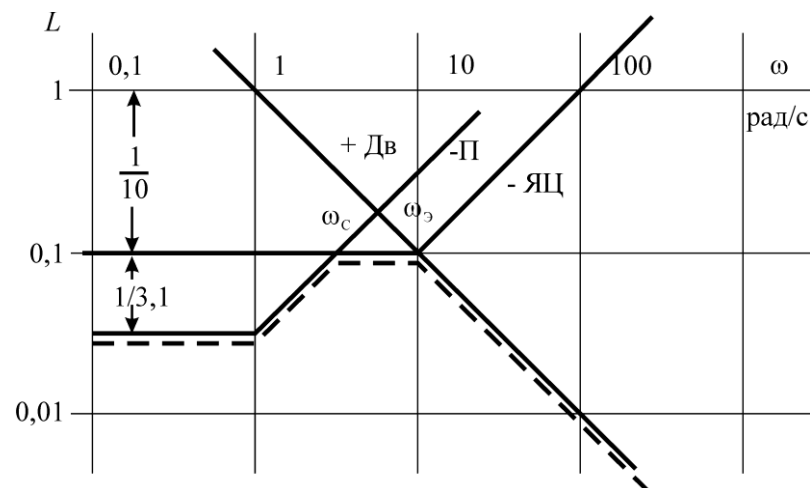


Рис. 2.7. Частотная характеристика электропривода с обратной связью по скорости по каналу  $I_C - \Delta n$



### 3. РЕГУЛИРУЕМЫЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

#### 3.1. Система управления электроприводом постоянного тока с обратными связями по скорости и току якоря

##### 3.1.1. Исходные данные

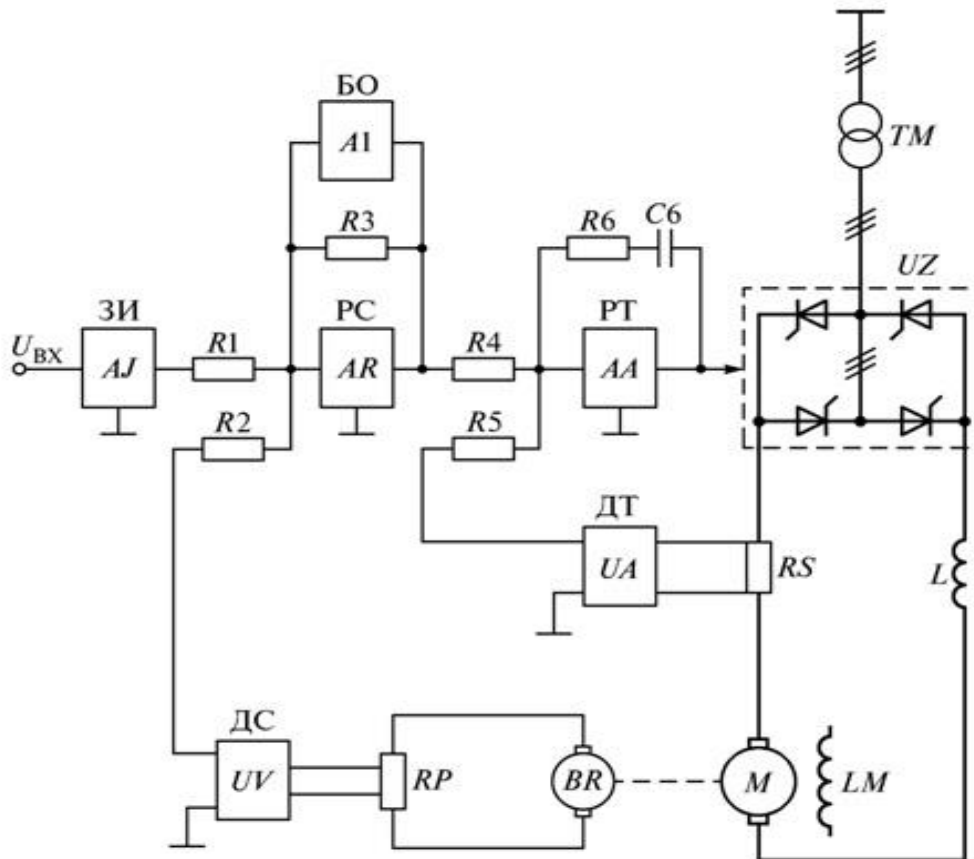


Рис. 3.1. Функциональная схема электропривода постоянного тока с подчиненным регулированием

В электроприводе (рис. 3.1) даны следующие параметры звеньев:

$K_{дв} = 1/(k \cdot \Phi) = 1 \text{ рад}/(\text{В} \cdot \text{с})$  – передаточный коэффициент двигателя по каналу “напряжение на якоре – скорость”;

$R_{яц} = 0,1 \text{ Ом}$  – сопротивление якорной цепи двигателя;

$J_{я} = 5 \text{ кгм}^2$  – момент инерции якоря двигателя;

$I_{н} = 100 \text{ А}$  – номинальный ток якоря двигателя;

$K_{тп} = 10 \text{ В}/\text{В}$  – коэффициент усиления тиристорного преобразователя;

$K_{дс} = 0,1 \text{ В} \cdot \text{с}/\text{рад}$  – коэффициент усиления датчика скорости;

$K_{дт} = 0,1 \text{ В}/\text{А}$  – коэффициент усиления датчика тока;

$R_1 = R_2 = 10 \text{ кОм}$ ;  $R_3 = 50 \text{ кОм}$ ;  $R_4 = R_5 = 100 \text{ кОм}$ ;

$R_6 = 20 \text{ кОм}$ ;  $C_6 = 0,5 \text{ мкФ}$ ;

$T_{яц} = 0$ ;  $T_{п} = 0$ .

### 3.1.2. Задачи

1. Построить механическую характеристику электропривода.
2. Определить статическое падение скорости при приложении номинального момента нагрузки  $M_H$ . Какое следует подать напряжение на вход системы управления, чтобы в режиме холостого хода иметь 100 рад/с? Как установить ток упора 200 А?
3. Как изменится статическая характеристика  $n = f(I_{\text{я}})$ , если:
  - величину сопротивления резистора  $R_4$  увеличить в 2 раза;
  - величину сопротивления резистора  $R_5$  уменьшить в 2 раза;
  - ток возбуждения двигателя уменьшить в 2 раза?
4. В схеме управления закоротили  $C_6$  при неизменных параметрах других звеньев. Как изменится статическая характеристика электропривода на участке ограничения тока якоря? Каким будет (больше, меньше, таким же) новое значение тока упора? Если новая и старая характеристики пересекутся, то в каком энергетическом режиме работает электропривод в этой точке, а также при скорости выше и ниже этой точки.
5. Электропривод разгоняют в схеме с интегральным задатчиком интенсивности от нуля до скорости идеального холостого хода с динамическим моментом, равным половине номинального; затем в течение отрезка времени, равного 5 с, поддерживают скорость постоянной; после чего тормозят электропривод с тем же темпом. Принять быстродействие контуров регулирования тока якоря и скорости бесконечно высоким по сравнению со временем разгона и торможения электропривода. Момент статической нагрузки  $M_C = 0$ . Требуется:
  - определить время пуска электропривода;
  - изобразить примерный вид осциллограмм тока якоря  $I_{\text{я}}$ , скорости  $n$ , ЭДС преобразователя  $E_{\text{П}}$ , напряжений на выходах регуляторов тока и скорости;
  - определить потери в якорной цепи за время цикла.
6. В схеме с интегральным задатчиком интенсивности и моментом статической нагрузки, равным нулю, производят реверс электропривода от скорости  $+n_{0\text{н}}$  до  $-n_{0\text{н}}$ . Укажите, в каких энергетических режимах на разных участках реверса работает электродвигатель. По каким признакам Вы производите идентификацию соответствующих режимов?

### 3.1.3. Ответы и пояснения

1. Для построения механической характеристики воспользуемся структурной схемой электропривода, которая в буквенных обозначениях приведена на рис. 2.2.

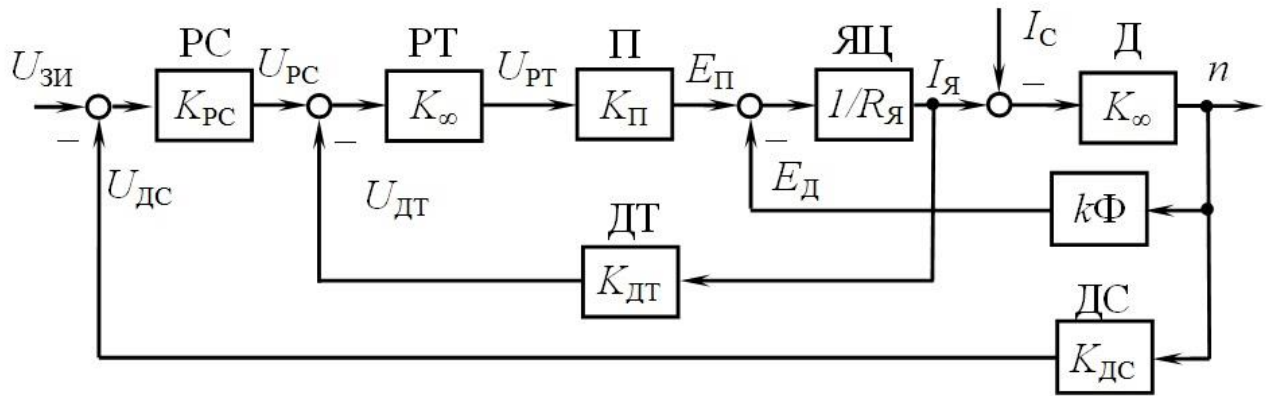


Рис. 3.2. Структурная схема электропривода

На рис 3.2  $n$  – угловая скорость двигателя;  $I_{я}$ ,  $I_{с}$  – ток якоря и ток статической нагрузки;  $E_{п}$ ,  $E_{д}$  – ЭДС преобразователя и двигателя;  $U_{РТ}$ ,  $U_{РС}$  – напряжения регуляторов тока и скорости;  $U_{ДТ}$ ,  $U_{ДС}$  – напряжения датчиков тока и скорости.

Структурная схема того же электропривода с указанием численных значений параметров звеньев и размерностей переменных приведена на рис. 3.3.

Звеньям РТ и Д, содержащим интегральные каналы, в статике присвоены бесконечно большие коэффициенты усиления  $K_{\infty}$ .

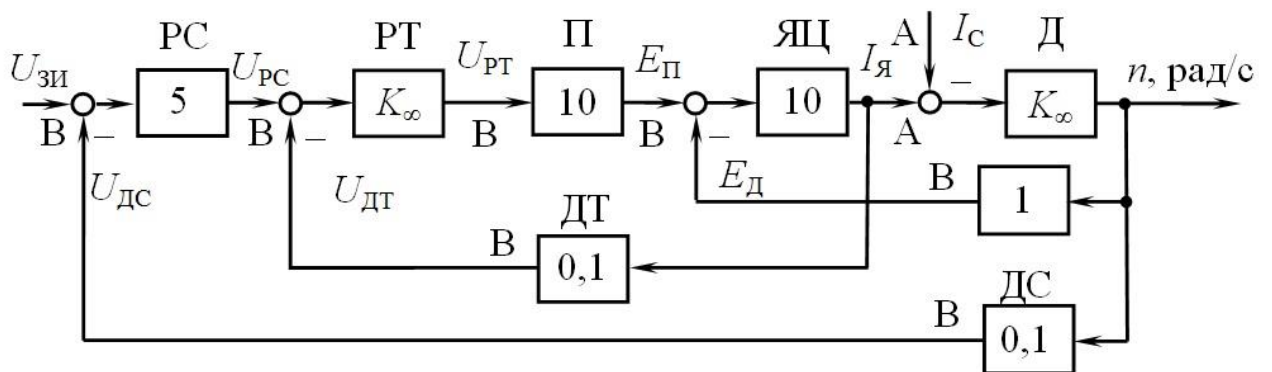


Рис.3.3. Структурная схема (рис. 3.2) с численными значениями параметров звеньев

Структурная схема электропривода, преобразованная к виду, удобному для построения статических характеристик, изображена на рис. 3.4.

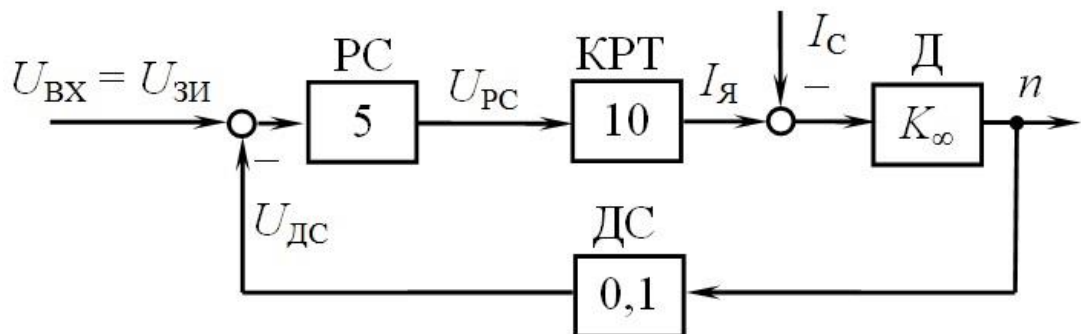


Рис.3.4. Преобразованная структурная схема электропривода

Здесь звеном КРТ обозначен замкнутый контур регулирования тока якоря, образованный звеньями РТ, П, ЯЦ и ДТ, его коэффициент усиления

$$K_{\text{КРТ}} = \frac{K_{\text{РТ}} \cdot K_{\text{П}} \cdot K_{\text{ЯЦ}}}{1 + K_{\text{РТ}} \cdot K_{\text{П}} \cdot K_{\text{ЯЦ}} \cdot K_{\text{ДТ}}} = \frac{1}{K_{\text{ДТ}}} = 10 \frac{\text{А}}{\text{В}}$$

-

Электромеханическая характеристика электропривода изображена на рис. 3.5.

2. Статическое падение скорости электропривода при токе 100 А  $\Delta n_{\text{С}} = 20$  рад/с.

Напряжение  $U_{\text{ВХ}}$ , соответствующее скорости идеального холостого хода 100 рад/с, равно 10 В.

Чтобы получить ток упора 200 А, на вход замкнутого КРТ нужно подать напряжение РС, равное 20 В.

3. Исходная характеристика электропривода представлена кривой 1 на рис. 3.6.

При увеличении сопротивления  $R_4$  в 2 раза статическая характеристика изменится следующим образом. Ток упора уменьшится в 2 раза, а крутизна наклона характеристики на участке поддержания скорости также возрастёт в 2 раза (кривая 2 см. рис. 3.6).

При уменьшении  $R_5$  в 2 раза ток упора уменьшится в 2 раза, а крутизна на участке поддержания скорости возрастёт в 2 раза (кривая 2, см. рис. 3.6). Хотя оба воздействия приводят в статике к одному и тому же результату, однако в первом случае изменяются динамические характеристики контура регулирования скорости из-за уменьшения коэффициента усиления звена РС, а во втором случае изменяются статические и динамические характеристики замкнутого контура регулирования тока из-за изменения коэффициента усиления канала отрицательной обратной связи по току.

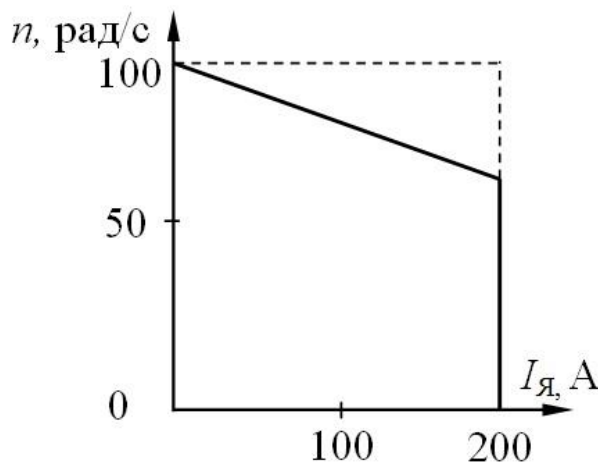


Рис. 3.5. К задаче 2

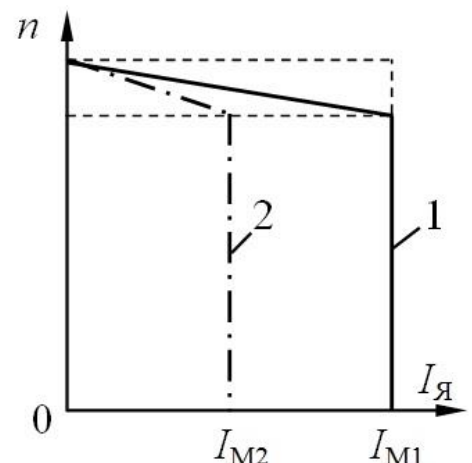


Рис. 3.6. К задаче 3

При уменьшении тока возбуждения в 2 раза характеристика  $n = f(I_{\text{я}})$  не изменяется, однако на механической характеристике момент электропривода в режиме упора уменьшается в 2 раза.

4. Для получения ответа воспользуемся структурной схемой замкнутого КРТ (рис. 3.7 а).

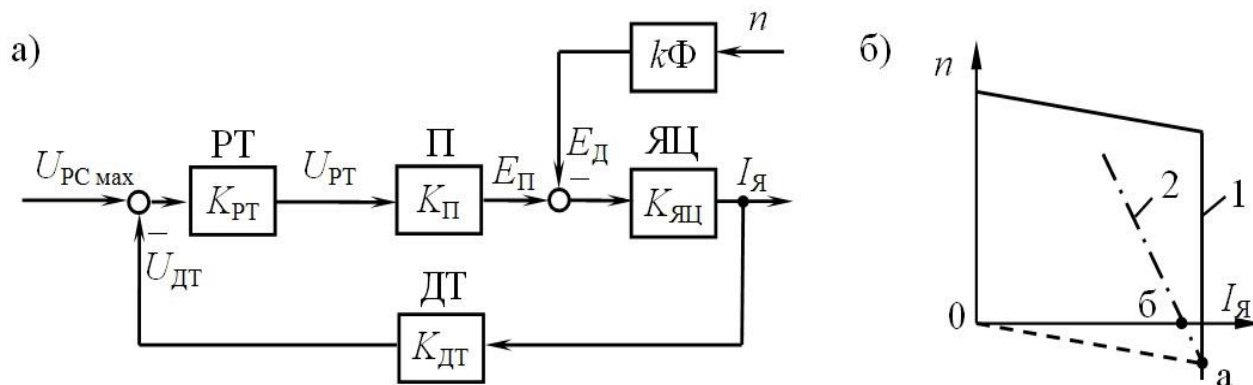


Рис.3.7. К задаче 4: а) структурная схема; б) статические характеристики электропривода

Здесь коэффициент усиления П-регулятора тока после закорачивания конденсатора  $C_6$

$$K_{\text{РТ}} = \frac{R_6}{R_5} = \frac{20}{100} = 0,2 \frac{\text{В}}{\text{В}}.$$

Новое значение тока упора уменьшится до значения, определяемого на основании выражения

$$I_{\text{М}} = \frac{K_{\text{РТ}} \cdot K_{\text{П}} \cdot K_{\text{ЯЦ}}}{1 + K_{\text{РТ}} \cdot K_{\text{П}} \cdot K_{\text{ЯЦ}} \cdot K_{\text{ДТ}}} \cdot U_{\text{PCmax}} = \frac{0,2 \cdot 10 \cdot 10}{1 + 0,2 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 0,1} \cdot 20 = 133 \text{ А}.$$

При изменении угловой скорости величину наклона характеристики в режиме ограничения тока якоря оценим выражением

$$\frac{\Delta I_{\text{я}}}{\Delta n} = \frac{K_{\text{ЯЦ}} \cdot k_{\Phi}}{1 + K_{\text{РТ}} \cdot K_{\text{П}} \cdot K_{\text{ЯЦ}} \cdot K_{\text{ДТ}}} = \frac{10 \cdot 1}{1 + 0,2 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 0,1} = 3,3 \frac{\text{А} \cdot \text{с}}{\text{рад}}.$$

На рис. 3.7 б показаны электромеханические характеристики. Здесь характеристика 2 соответствует работе привода на упор при закороченной ёмкости  $C_6$ .

5. Время разгона электропривода до заданной скорости холостого хода

$$t_p = \frac{M_H}{M_{дин}} \cdot T_D = \frac{100}{50} \cdot 5 = 10 \text{ с.}$$

Здесь  $M_H = k \cdot \Phi \cdot I_H = 100 \text{ Нм}$  – номинальный момент двигателя;  $M_{дин} = 0,5M_H = 50 \text{ Нм}$  – динамический момент двигателя при разгоне и торможении.

$$T_D = \frac{J \cdot n_0}{M_H} = \frac{5 \cdot 100}{100} = 5 \text{ с.},$$

где  $T_D$  – механическая постоянная электропривода.

Осциллограммы регулируемых переменных электропривода приведены на рис. 3.8.

При заданных допущениях о бесконечно высоком быстродействии КРТ и КРС в относительных единицах кривые  $U_{зи}(t)$  и  $n(t)$  совпадают и имеют трапецеидальную форму.

Ток якоря изменяется во времени по прямоугольному закону, на участках разгона и торможения величина тока якоря равна 50 А.

ЭДС преобразователя  $E_{п}$  отличается от ЭДС двигателя  $E_{д}$  на величину

$$\Delta U = I_{я} \cdot R_{яц} = 50 \cdot 0,1 = 5 \text{ В.}$$

Напряжения регуляторов повторяют графики соответствующих переменных: напряжение РС соответствует кривой тока якоря, а напряжение РТ – ЭДС  $E_{п}$ .

Потери в якорной цепи за время цикла

$$Q = Q_{ПУСКА} + Q_{ТОРМ} = I_{я1}^2 \cdot R_{яц} \cdot t_p + I_{я2}^2 \cdot R_{яц} \cdot t_T = 2(50^2 \cdot 0,1 \cdot 10) = 5 \text{ кДж.}$$

Здесь  $I_{я1} = I_{я2} = 50 \text{ А}$  – ток якоря при пуске и торможении;  $t_p$ ,  $t_T$  – время пуска и торможения привода.

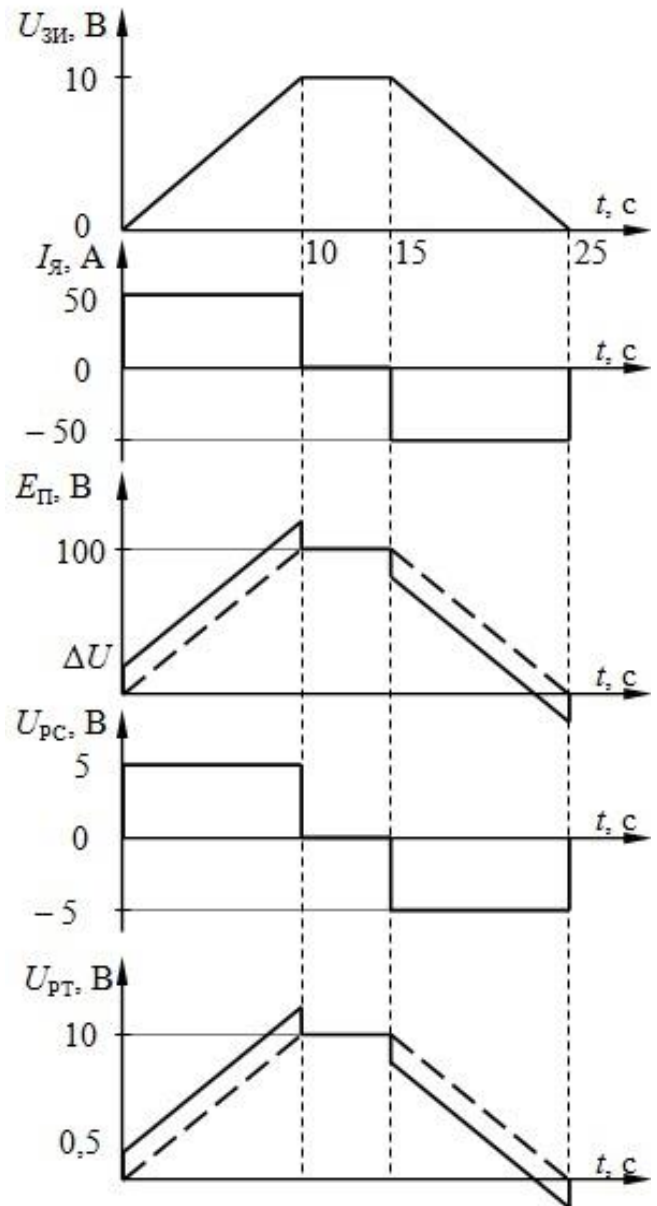


Рис. 2.8. К задаче 5

6. Примерный вид осциллограмм ЭДС преобразователя  $E_{\Pi}$  и ЭДС двигателя  $E_{\text{Д}}$  приведён на рис. 3.9.

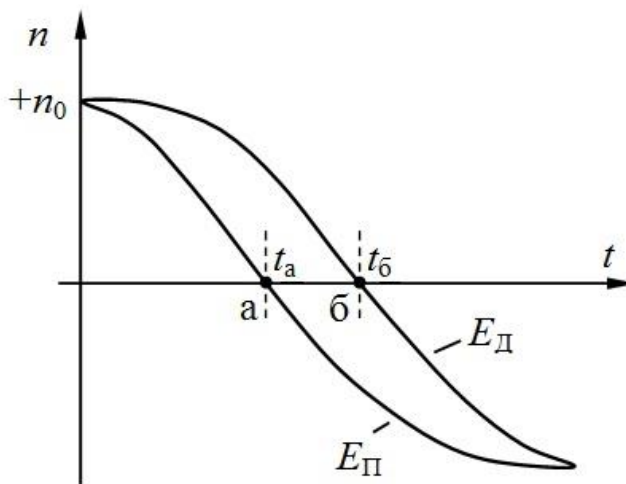


Рис. 3.9. К задаче 6

При  $t < t_a$  двигатель работает в режиме рекуперативного торможения.

При  $t_a < t < t_б$  – в режиме противовключения.

При  $t > t_б$  – в двигательном режиме (назад).

В точке а – в режиме динамического торможения.

В точке б – в режиме моментного тормоза.

Как изменятся осциллограммы (см. рис. 2.9), если быстродействие КРТ и КРС принять бесконечно высоким?

## 3.2. Электропривод постоянного тока по схеме источник тока – двигатель

### 3.2.1. Исходные данные

В электроприводе (рис. 3.10) даны следующие параметры звеньев:

$K_{\text{ДВ}} = \Delta n / \Delta U_{\text{я}} = 1 / (k \cdot \Phi) = 1$  рад/(В·с) – коэффициент усиления двигателя;

$R_{\text{яц}} = 0,1$  Ом – сопротивление якорной цепи двигателя;

$J_{\text{я}} = 5$  кг·м<sup>2</sup> – момент инерции двигателя;

$K_{\text{ДС}} = 0,1$  В·с/рад – коэффициент усиления датчика скорости;

$K_{\text{КРТВ}} = 10$  Н·м/В – коэффициент усиления замкнутого контура регулирования тока возбуждения по каналу “напряжение на выходе регулятора РС – электромагнитный момент двигателя”;

$I_{\text{Н}} = 100$  А – номинальный ток двигателя;

$n_{\text{Н}} = 100$  рад/с;

$R_1 = R_2 = 100$  кОм;  $R_3 = 500$  кОм;  $C_3 = 0,5$  мкФ;  $T_{\text{яц}} = 0$ ;  $T_{\text{П}} = 0$ .

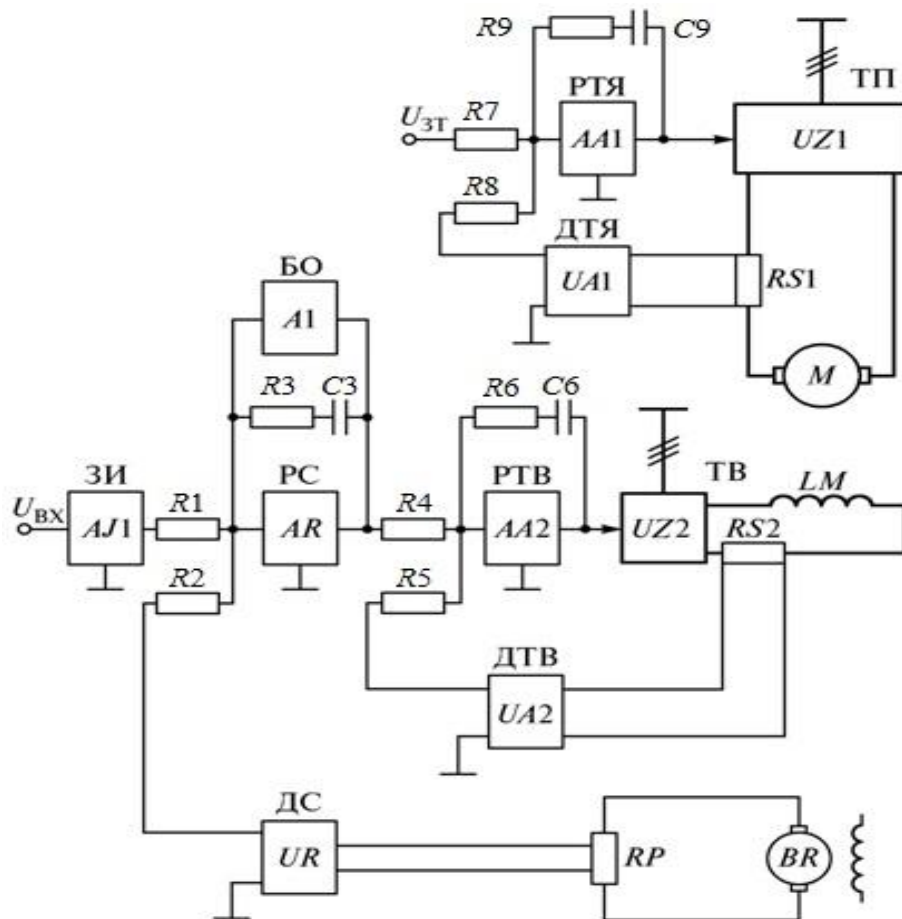


Рис. 3.10. Функциональная схема электропривода постоянного тока с питанием цепи якоря от источника тока

### 3.2.2. Задачи

1. Составить структурную схему электропривода и указать ее параметры.

2. Нарисовать механическую характеристику электропривода, когда задан полный сигнал задания “вперед”, а момент статической нагрузки изменяется от  $+M_{max}$  до  $-M_{max}$ . Нарисовать внешнюю характеристику  $E_{\Pi} = f(M)$  в тех же квадрантах.

3. При изменении момента от  $+M_{max}$  до  $-M_{max}$  и неизменном сигнале задания указать на статических характеристиках все возможные энергетические режимы работы двигателя и зоны, им соответствующие.

4. Электропривод присоединен к механизму циклического действия. Нагрузочная диаграмма (в долях от номинального момента двигателя) изображена на рис. 3.11. Нарисовать примерный вид ожидаемых осциллограмм: электромагнитного момента двигателя  $M(t)$ , скорости вращения двигателя  $n(t)$ .



### 3.2.3. Ответы и пояснения

1. Структурная схема электропривода в буквенных обозначениях приведена на рис. 3.12.

На схеме обозначены:  $n$  – угловая скорость двигателя;  $M$ ,  $M_c$  – момент двигателя и момент статической нагрузки;  $U_{PC}$  – напряжение регулятора скорости;  $U_{DC}$  – напряжение датчика скорости.

Звеном КРТВ обозначен контур регулирования тока возбуждения, образованный звеньями РТВ, ТВ, ОВД, ДТ, его коэффициент усиления

$$K_{\text{КРТВ}} = \frac{\Delta M_H}{\Delta U_{PC}} = 10 \frac{\text{Нм}}{\text{В}}.$$

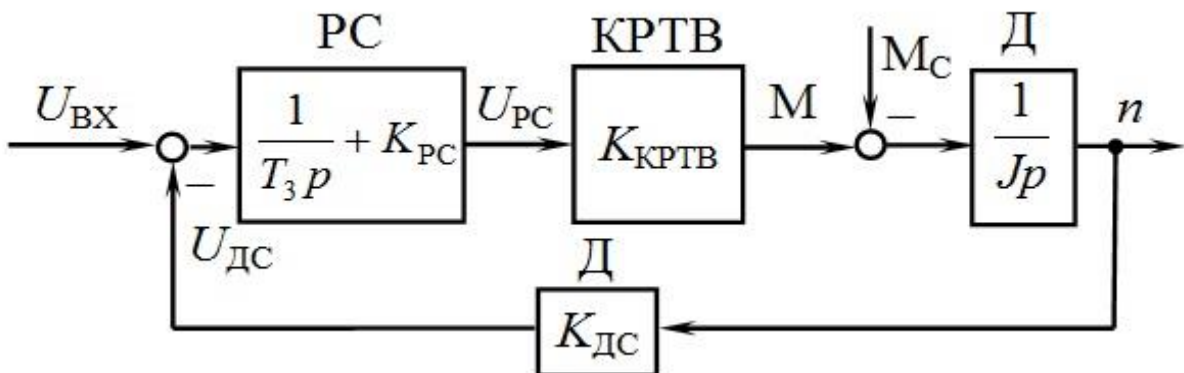


Рис.3.12. Структурная схема электропривода

2. Построим механическую характеристику электропривода. Механическая характеристика  $n = f(M)$  изображена на рис. 3.13, кривая 1. Статическое падение скорости электропривода в данной системе равно нулю (т.к. регулятор скорости пропорционально-интегрального типа).

Для построения внешней характеристики  $E_{II} = f(M)$  воспользуемся следующим уравнением  $E_{II} = E_D + I_{Я} \cdot R_{Я}$ .

Внешняя характеристика представлена на рис. 3.13 (кривая 4). Она получена суммированием кривых 2 (учитывает составляющую  $I_{Я} \cdot R_{Я}$ ) и 3 (учитывает составляющую  $E_D = n \cdot \Phi$ ) [3, 4].

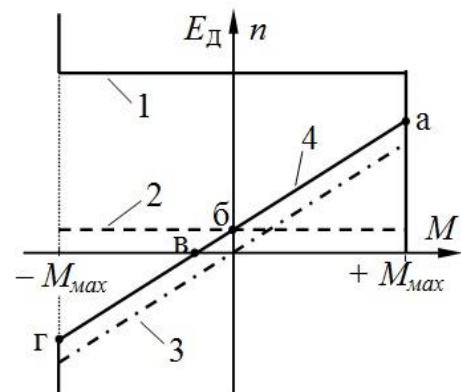


Рис. 3.13. К задаче 2 и 3

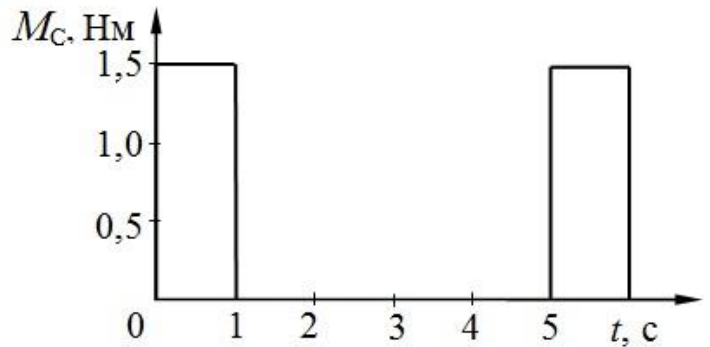


Рис. 3.11. Нагрузочная диаграмма электропривода

3. Укажем все возможные энергетические режимы работы двигателя и зоны, им соответствующие, а также особые точки (см. рис. 3.13):

участок а–б – двигательный режим;

участок б–в – режим противовключения;

участок в–г – режим рекуперативного торможения;

точка в – точка динамического торможения;

точка б – режим, аналогичный идеальному холостому ходу двигателя ( $M=0$ ;  $\Phi=0$ ; но  $I_{я} \neq 0$ ).

4. Для построения осциллограмм  $M(t)$ ,  $n(t)$  найдем передаточные функции  $\Delta M / \Delta M_C$  и  $\Delta n / \Delta M_C$ , пользуясь структурными схемами (рис. 3.14). Здесь пропорционально-интегральный регулятор РС заменен пропорциональным звеном с коэффициентом усиления  $K_{РС}$ .

Передаточная функция электропривода по каналу “момент статической нагрузки  $M_C$  – момент  $M$  электромагнитный двигателя” определится после следующих алгебраических преобразований

$$\frac{\Delta M}{\Delta M_C} = \frac{\frac{1}{Jp} \cdot K_{ДС} \cdot K_{РС} \cdot K_{КРТВ}}{1 + \frac{1}{Jp} \cdot K_{ДС} \cdot K_{РС} \cdot K_{КРТВ}} = \frac{\frac{1}{5p} \cdot 0,1 \cdot 5 \cdot 10}{1 + \frac{1}{5p} \cdot 0,1 \cdot 5 \cdot 10} = \frac{1}{1 + 1p}$$

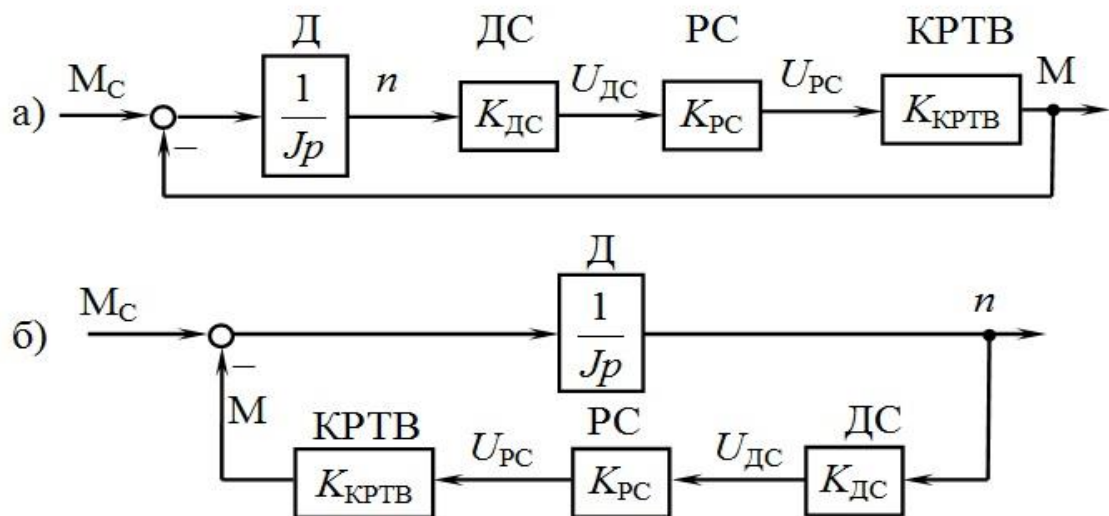


Рис. 3.14. Структурные схемы электропривода с выходом по моменту (а) и по скорости (б)

Передаточная функция электропривода по каналу “момент статической нагрузки  $M_C$  – скорость двигателя  $n$ ” определится после следующих алгебраических преобразований

$$\frac{\Delta n}{\Delta M_C} = \frac{\frac{1}{Jp}}{1 + \frac{1}{Jp} \cdot K_{PC} \cdot K_{DC} \cdot K_{КРТВ}} = \frac{1}{5p + 0,1 \cdot 10 \cdot 5} = \frac{0,2}{1 + p}$$

Полученные передаточные функции принадлежат апериодическому звену первого порядка с постоянной времени 1 с. Переходные процессы  $M(t)$  и  $n(t)$  в таком звене, вызванные скачкообразным приложением и сбросом момента статической нагрузки, описываются экспонентой с той же постоянной времени. Следовательно, через время 1 с выходная величина достигнет величины 0,63 своего установившегося значения, а через 3...4 с практически будет равна установившемуся значению. Соответствующие осциллограммы процессов изображены на рис. 3.15.

Максимальное значение момента  $M$  наблюдается через 1 с после приложения нагрузки и равно  $M_{max} \approx 0,63 \cdot 1,5 \cdot \Delta M_H = 95$  Н·м, динамическое падение скорости при этом  $\Delta n_{дин} \approx 0,63 \cdot 0,2 \cdot \Delta M_C = 18$  рад/с. Здесь  $M_H = 100$  Н·м;  $\Delta M_C = 1,5 \cdot M_H = 150$  Н·м.

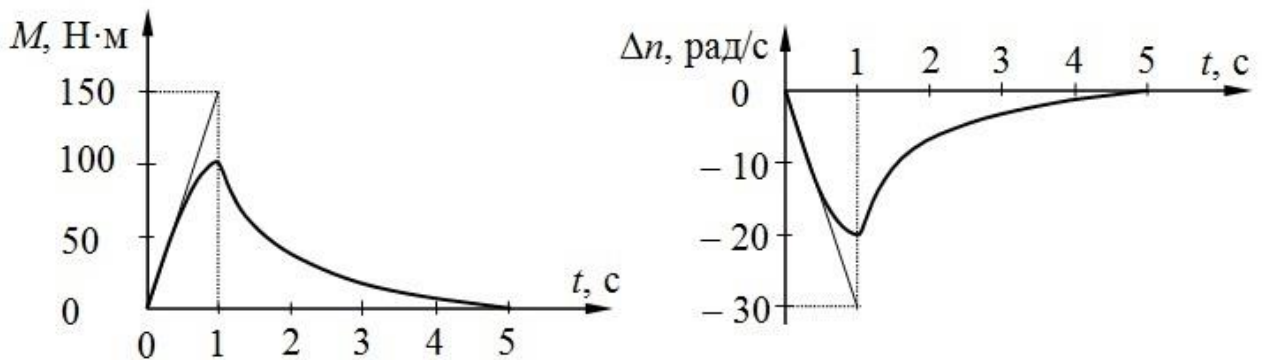


Рис. 3.15. Переходные процессы при приложении ударной нагрузки

### 3.3. Электропривод постоянного тока с двухзонным регулированием скорости

#### 3.3.1. Исходные данные

При параметрах электропривода, указанных в п. 3.1, выполнена схема двухзонного регулирования скорости (рис. 3.16) с диапазоном ослабления поля 1:2.

#### 3.3.2. Задачи

1. Считая, что ослабление потока ведется в функции ЭДС двигателя и при этом в зоне ослабления потока поддерживается  $E_{дв} = E_H$ , построить характеристики:  $n = f(M)$ ;  $I_{я} = f(M)$ ;  $U_{PC} = f(M)$ ;  $E_d = f(M)$  при изменении момента

статической нагрузки от нуля до максимально допустимого для двух значений сигнала задания скорости:  $U_{ВХ} = 0,5U_{ВХН}$ ;  $U_{ВХ} = 1,5U_{ВХН}$ .

Регуляторы РТЯ, РС, РТВ, РН принять пропорционально-интегральными.

2) При сигнале задания, соответствующем скорости  $2n_H$ , приложен момент статической нагрузки  $M_C = 0,3M_H$ , после чего скорость электропривода плавно

снижается до нуля. Нарисовать, как выглядят в зависимости от угловой скорости графики следующих величин:

- а) момента;
- б) тока якоря;
- в) потока;
- г) ЭДС двигателя.

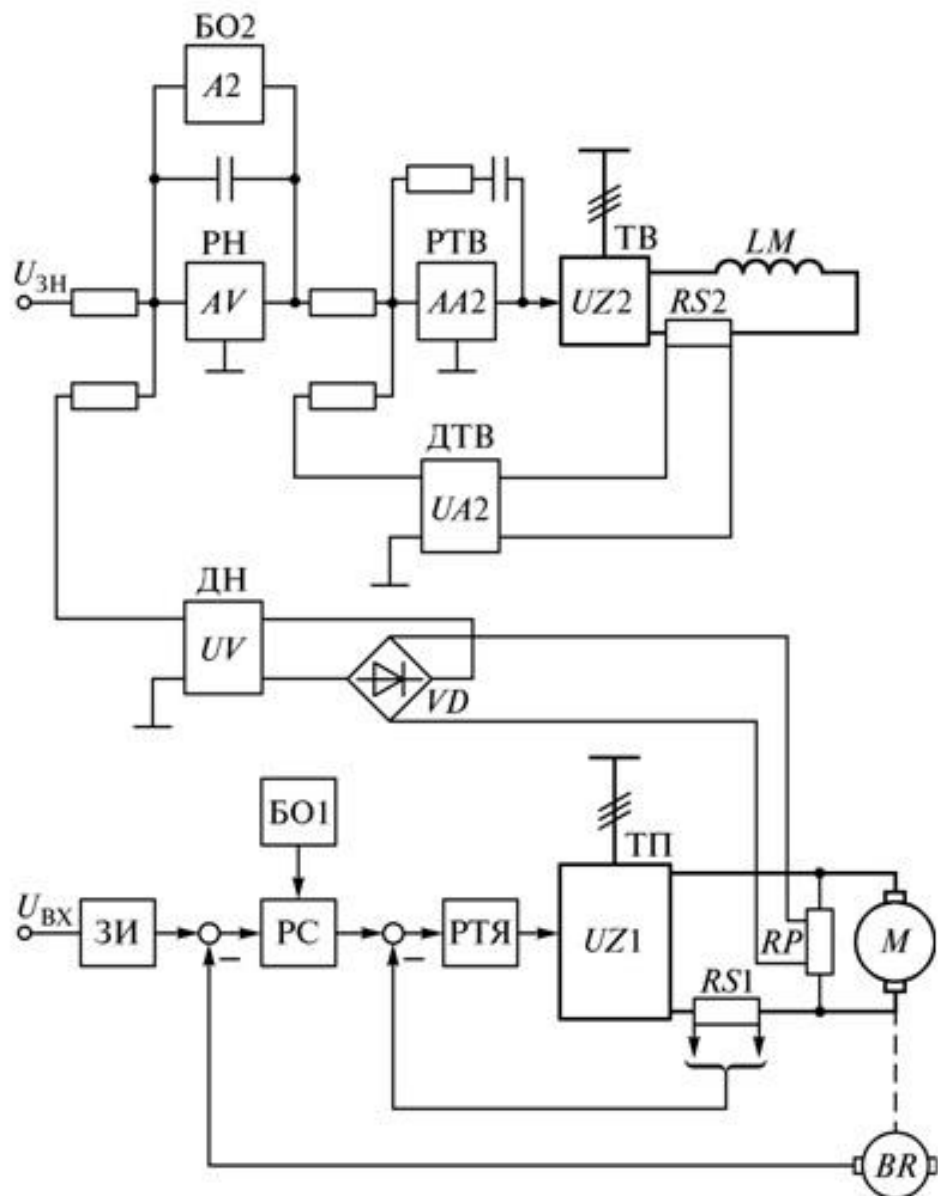


Рис. 3.16. Функциональная схема с двухзонным регулированием скорости

### 3.3.3. Ответы и пояснения

1. Изобразим предельные статические характеристики электропривода при ограничениях по току якоря, ЭДС и скорости. Рассмотрим случай, когда  $U_{ВХ} = 1,5 \cdot U_{ВХН}$ . Предельная механическая характеристика представлена на рис. 3.17 (кривая 1). На участке а–б этой кривой производится ограничение тока якоря выбором уровня ограничения напряжения на выходе регулятора скорости РС. При этом ток якоря равен  $I_{max}$ , а ЭДС двигателя меньше номинальной  $E_H$ . На участке б–в ток якоря равен  $I_{max}$ , а  $E_D = E_H$ .

Поддержание постоянства ЭДС двигателя осуществляется регулятором РН. На участке в–г скорость электропривода максимальна и постоянна:  $n = n_{max}$ , что обеспечивается выбором величины напряжения  $U_{ВХ}$  на входе задатчика интенсивности ЗИ.

Статическая характеристика  $E_D = f(M)$  (см. рис. 3.17, кривую 2) содержит два участка:

- на участке а–б при насыщенном регуляторе напряжения РН, т.е. при постоянном и равном номинальному потоке двигателя  $\Phi = \Phi_H$ , наблюдается увеличение ЭДС с ростом скорости;

- на участке б–в–г поддерживается постоянство ЭДС двигателя  $E_D = E_H$  благодаря работе контура регулирования напряжения.

Зависимость тока якоря от момента (см. рис. 3.17, кривая 3) выглядит следующим образом: на участке г–в ток якоря увеличивается пропорционально моменту, в точке “в” он достигает максимально допустимого значения. При работе электропривода на отрезке в–б–а механической характеристики ток якоря поддерживается постоянным и максимальным. Напряжение на выходе регулятора скорости РС в другом масштабе повторяет кривую тока якоря.

Рассмотрим случай, когда  $U_{ВХ} = 0,5U_{ВХН}$ . Механическая характеристика электропривода соответствует кривой 4 на рис. 3.17. Здесь работа электропривода происходит при

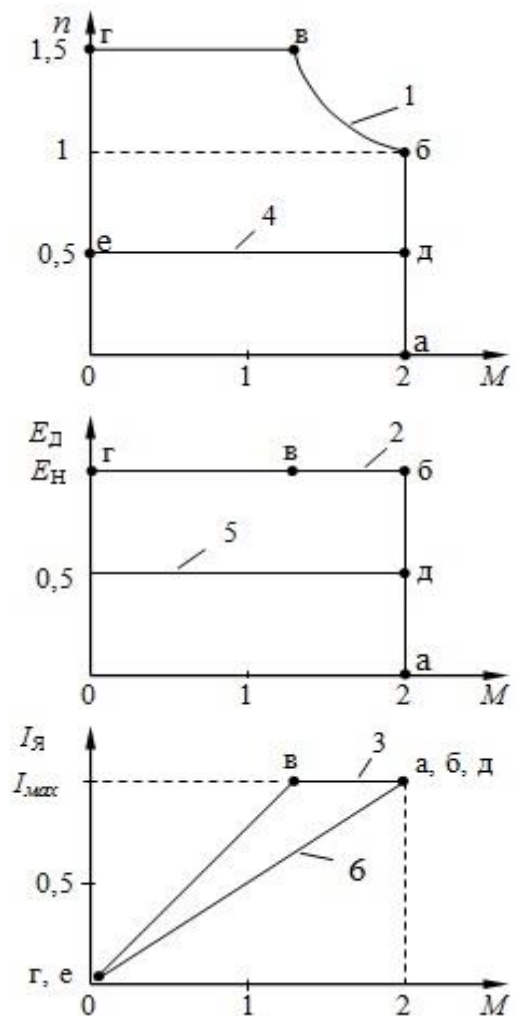


Рис. 3.17. Зависимости некоторых регулируемых переменных при изменении сигнала задания в схеме с двухзонным регулированием скорости

насыщенном регуляторе напряжения РН, т.е. при постоянном потоке двигателя  $\Phi = \Phi_H$ . На участке е–д обеспечивается поддержание заданного значения скорости  $n = 0,5 \cdot n_H$  выбором соответствующей величины сигнала  $U_{ВХ}$  на входе задатчика интенсивности ЗИ. На участке а–д ток якоря равен  $I_{\max}$ , так как работает блок ограничения БО1 в регуляторе скорости РС.

Статическая характеристика  $E_d = f(M)$  (кривая 5, см. рис. 3.17) содержит два участка:

- на участке а–д наблюдается увеличение ЭДС с ростом скорости;
- на участке д–е  $E_d = 0,5 \cdot E_H$ .

Зависимость тока якоря от момента (см. рис. 3.17, кривая 6) выглядит таким образом, что при нагружении электропривода на всей характеристике а–д–е ток якоря увеличивается пропорционально моменту и в точке “а” он достигает максимально допустимого значения. Напряжение на выходе регулятора скорости РС в другом масштабе повторяет кривую тока якоря.

2. Графики изменения переменных приведены на рис. 3.18.

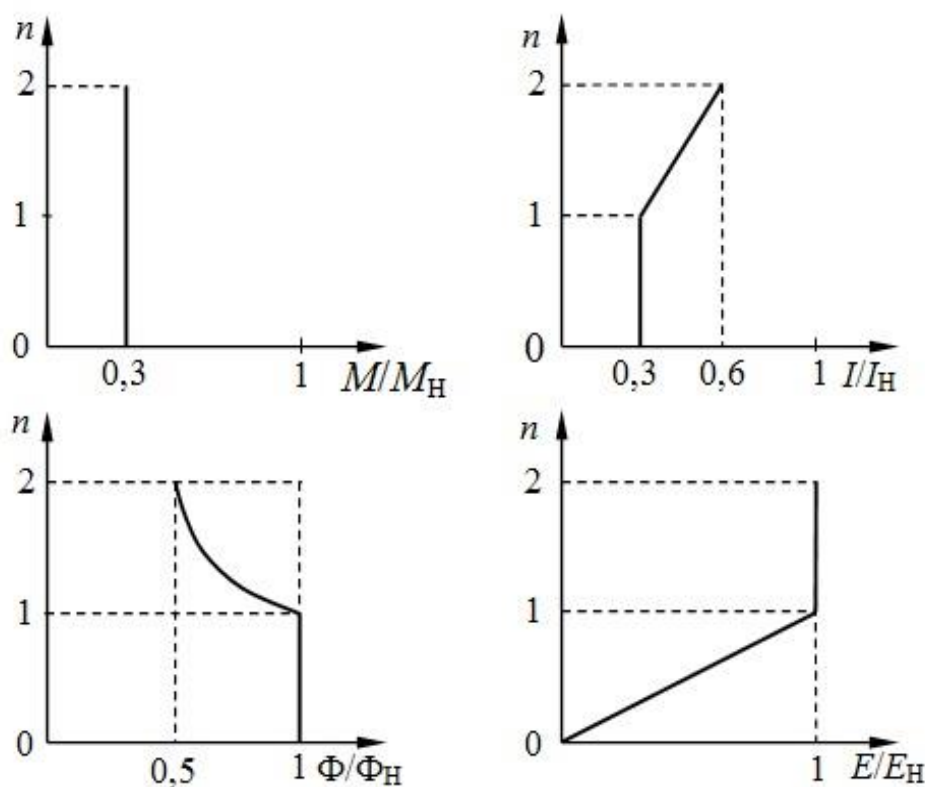


Рис. 2.18. К задаче 2

## 4. РЕГУЛИРУЕМЫЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

### 4.1. Синхронный электропривод с частотно-токовым управлением

#### 4.1.1. Исходные данные

В схеме электропривода (рис. 4.1) даны следующие параметры синхронного двигателя:  $U_{1H} = 200$  В,  $I_{1H} = 8$  А – номинальные фазные напряжение и ток статора;

$I_p = 10$  А – ток ротора (приведён к обмотке статора);

$\cos\varphi_{сд} = 1$  – на зажимах статора;

$n_0 = 1000$  об/мин – синхронная скорость двигателя при частоте  $f_H = 50$  Гц;

$\eta_H \approx 1$  – КПД двигателя;

$J = 50$  кг·м<sup>2</sup> – момент инерции электропривода.

Параметры звеньев схемы управления (рис. 4.1):

$K_{КРМ} = \Delta M / \Delta U_{РС} = 10$  Н·м/В – коэффициент усиления канала регулирования момента;

$K_{ДС} = 0,5$  В·с/рад – коэффициент усиления канала обратной связи по скорости;

$K_{РС} = 10$  В/В – коэффициент усиления пропорционального регулятора скорости.

#### 4.1.2. Задачи

1. Построить механическую характеристику электропривода, когда момент упора  $M_{max} = 2 \cdot M_H$ , а скорость холостого хода соответствует частоте напряжения на статоре 10 Гц. Построить графики  $U_1 = f(M)$ ,  $I_1 = f(M)$ . Падением напряжения в обмотках статора можно пренебречь. Какие следует выставить величины  $U_{ВХ}$  и  $U_{РСmax}$  для получения заданных характеристик?



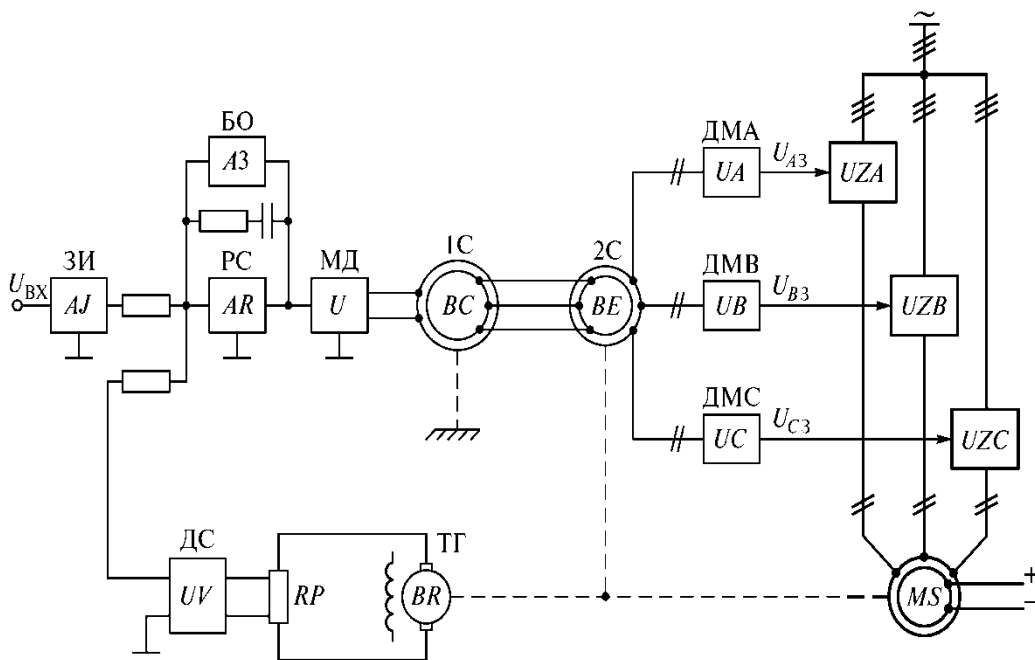


Рис. 4.1. Схема функциональная синхронного электропривода с частотно-токовым управлением

2. Как изменятся те же характеристики, если уставки регуляторов не изменять, а ток ротора уменьшить в 2 раза?

3. При неизменном токе возбуждения ротора изменили  $\cos\varphi$  на зажимах статора до значения  $\cos\varphi = 0,87$ . При моменте  $M = M_H$  и напряжении датчика интенсивности, полученном в п. 1, найти величину  $U_1$  и  $I_1$ . Какой при этом будет (опережающий или отстающий)  $\cos\varphi$  на зажимах статора?

4. Электропривод обрабатывает заданное перемещение по следующему закону: Сначала разгоняется до скорости, соответствующей уставке задания в п. 1, с моментом динамическим  $M_{дин} = M_H$ , затем в течение 10 с скорость электропривода постоянна, после чего электропривод тормозится с номинальным динамическим моментом. На всем отрезке перемещения момент статической нагрузки  $M_C = 0,5M_H$ . Изобразить от времени графики  $U_1$  и  $I_1$ . Найти время разгона и торможения электропривода.

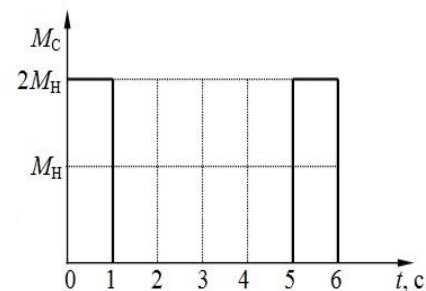


Рис. 3.2. Нагрузочная диаграмма электропривода

5. Электропривод присоединен к механизму циклического действия. Нагрузочная диаграмма приведена на рис. 3.2. Требуется нарисовать примерный вид изменения момента и скорости от времени.

### 4.1.3. Ответы и пояснения

1. Статические характеристики построим на основании структурной схемы (рис. 3.3).

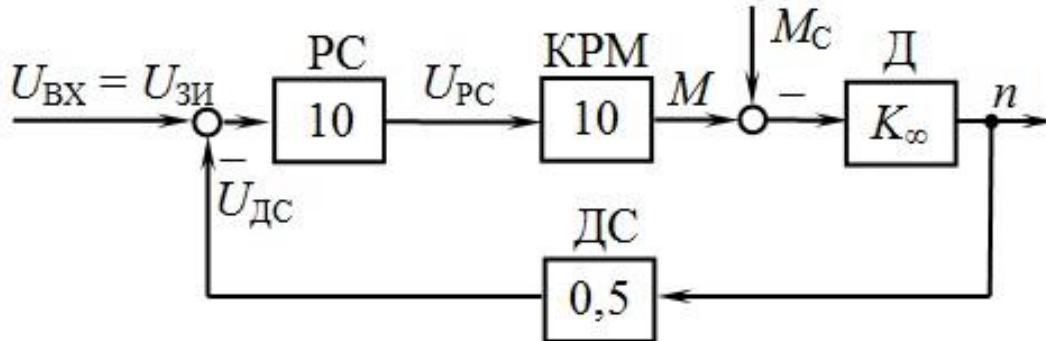


Рис. 4.3. Структурная схема электропривода

Эта характеристика содержит 2 участка (рис. 4.4 а):

– участок поддержания скорости с пологим наклоном. Величина наклона оценивается выражением:

$$\Delta n_c = \frac{\Delta M_c}{K_{КРС} \cdot K_{КРМ} \cdot K_{ДС}} = \frac{\Delta M_c}{10 \cdot 10 \cdot 0,5} = \frac{\Delta M_c}{50};$$

– и участок ограничения момента на заданном уровне.

Чтобы найти этот уровень, определим величину  $M_H$  двигателя:

$$M_H = \frac{P_H}{n_0} = \frac{4800}{100} = 48 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где  $P_H = 3U_{1H} \cdot I_{1H} \cdot \cos\varphi_H \cdot \eta_H = 3 \cdot 200 \cdot 8 \cdot 1 \cdot 1 = 4800 \text{ Вт}$ .

Для получения скорости холостого хода 20 рад/с, соответствующей  $f = 10 \text{ Гц}$ , на вход контура регулирования скорости необходимо подать напряжение  $U_{ЗИ} = n \cdot K_{ДС} = 20 \cdot 0,5 = 10 \text{ В}$ .

Для получения  $M_{max} = 2 \cdot M_H = 96 \text{ Н} \cdot \text{м}$  необходимо на выходе регулятора скорости РС иметь 9,6 В.

Для построения статических характеристик  $U_1 = f(M)$  и  $I_1 = f(M)$  воспользуемся моментным треугольником – векторной диаграммой токов синхронного двигателя (рис. 4.5).

Номинальному режиму соответствует моментный треугольник  $\Delta OAB$ , где  $I_{1H} = 8 \text{ А}$ ,  $I_{pH} = 10 \text{ А}$ , а так как  $\cos\varphi = 1$ , то  $\angle OBA = 90^\circ$ , следовательно,  $I_{\mu H} = 6 \text{ А}$ .

В частотнотоковой схеме угол между векторами  $I_p$  и  $I_1$  остается постоянным, следовательно, величина тока статора пропорциональна моменту, и при  $M = 2M_H$  ток  $I_1 = 2I_{1H} = 16 \text{ А}$  (см. рис. 4.4, б).

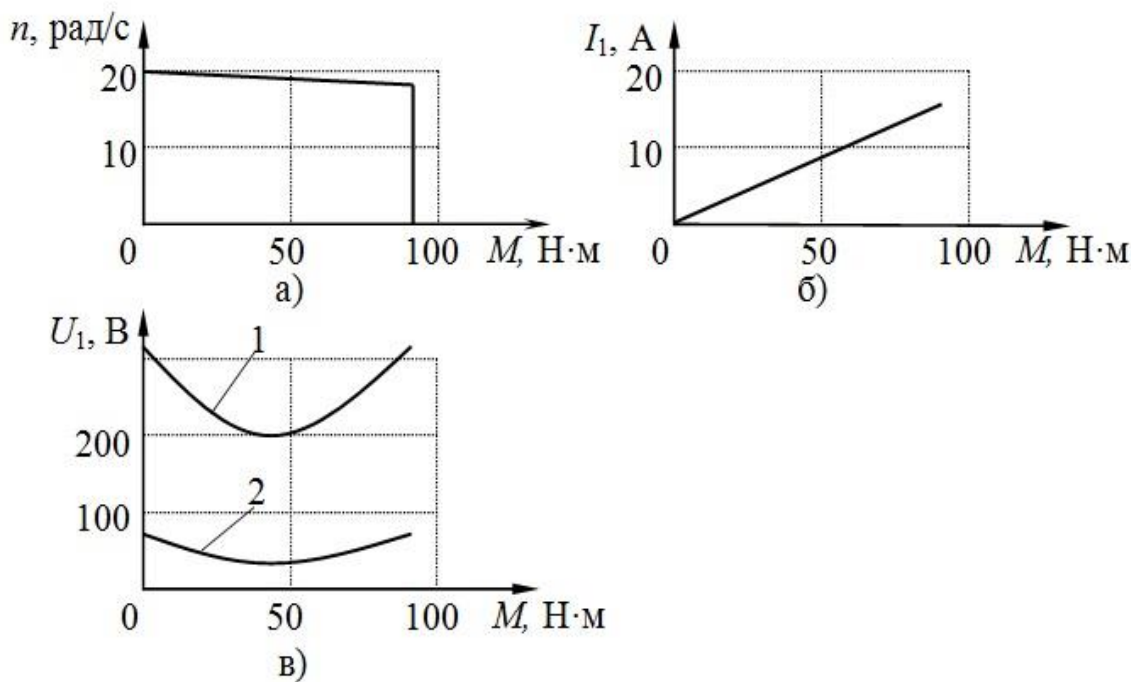


Рис. 4.4. Статические характеристики электропривода

При построении графика  $U_1 = f(M)$  учтем, что в диапазоне рабочих нагрузок скорость почти постоянна, тогда можно считать, что напряжение на зажимах статора на участке поддержания скорости пропорционально длине вектора  $I_\mu$ .

В номинальном же режиме двигателя, когда  $I_\mu = 6$  А,  $n = n_0 \approx 100$  рад/с, напряжение на статоре двигателя  $U_1 = 200$  В. При изменении момента статической нагрузки конец вектора  $I_\mu$  скользит вдоль вектора  $I_1$ , что приводит к изменению величины тока  $I_\mu$ , магнитного потока двигателя и изменению напряжения на статоре двигателя в соответствии с кривой 1 на рис. 4.4 в. Когда скорость двигателя снижают до 20 рад/с, то во столько же раз будет снижаться напряжение на статоре (кривая 2, см. рис. 4.4 в) и при номинальном моменте оно будет равно 40 В.

2. При уменьшении тока  $I_p$  в 2 раза и сохранении неизменных уставок регуляторов моментный треугольник изменится следующим образом:  $I_p$  соответствует отрезку  $\Gamma-A$  (см. рис. 4.6), который в 2 раза короче  $OA$ , величины  $M$ ,  $I_1$  и  $U_1$  определяются аналогично предыдущему случаю, в частности, при номинальном токе статора электромагнитное состояние

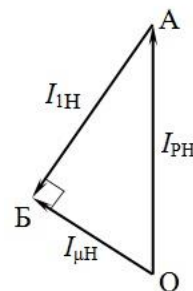


Рис. 4.5. К задаче 1

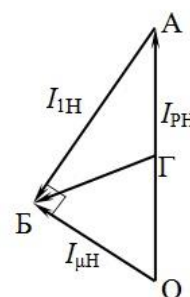


Рис. 4.6. К задаче 2

двигателя определяется треугольником  $\Delta ГАБ$ . Статические характеристики электропривода для этого случая приведены на рис. 4.7. Максимальное значение момента в режиме упора составит 48 Нм. Ток статора в режиме упора сохранится прежним. Напряжение на статоре следует брать пропорциональным длине вектора  $ГБ$  (см. рис. 4.6).

3. Так как в новом режиме ток ротора остается прежний, а момент  $M = M_H$ , то за исходный следует принять моментный треугольник  $ОАБ$  (см. рис. 4.5). Искомый треугольник получается перемещением вершины  $Б$  исходного треугольника параллельно вектору  $I_r$  до тех пор, пока угол между векторами  $I_1$  и  $I_{\mu}$  будет равен  $60^\circ$  (рис. 4.8). Из полученного треугольника определяем величину тока статора:

$$I_1 = I_{1H} \frac{АБ'}{АБ} = 3,8 \approx 4 \text{ А};$$

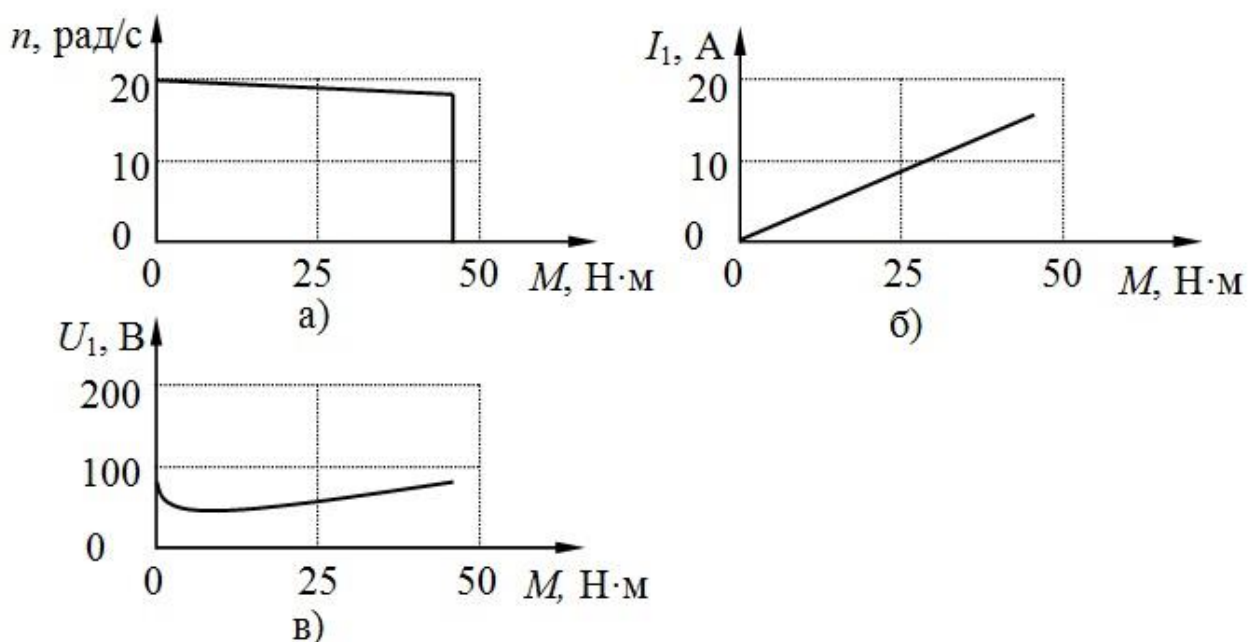


Рис. 4.7. Статические характеристики электропривода; пояснения к задаче 2

Напряжение на статоре  $U_1$  пропорционально длине вектора  $ОБ'$  или  $ОБ''$ . Когда режим синхронного двигателя определяется при скорости  $n \approx 20$  рад/с треугольником  $\Delta ОАБ'$ , то напряжение на статоре:

$$U_1 = 40 \frac{ОБ'}{ОБ} = 40 \frac{11,5}{6,0} \approx 77 \text{ В};$$

Когда состояние двигателя определяется треугольником  $\Delta ОАБ''$ , то напряжение на статоре:

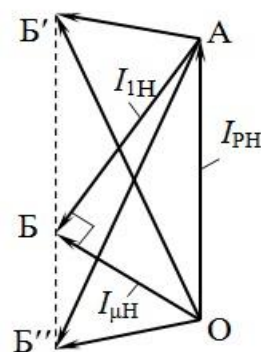


Рис. 4.8. К задаче 3

$$U_1 = 40 \frac{OB''}{OB} = 40 \frac{4,9}{6,0} \approx 33 \text{ В};$$

4. Определим время разгона электропривода:

$$t_p = \frac{J \cdot n}{M_{\text{дин}}} = \frac{50 \cdot 20}{48} \approx 20 \text{ с.}$$

Так как при торможении электропривода величина  $M_{\text{дин}}$  такая же, как при разгоне, и равна  $M_{\text{н}}$ , то времена разгона и торможения равны между собой, т.е.  $t_p = t_T$ ,

Идеализированные кривые изменения тока  $I_1$  и напряжения  $U_1$  при заданном перемещении механизма, представлены на рис. 4.9.

В идеальном варианте скорость изменяется по трапецеидальному закону, электромагнитный момент двигателя  $M = M_{\text{дин}} + M_{\text{ст}}$  и на участке разгона  $M = 1,5M_{\text{н}}$ , на участке установившегося движения  $M = 0,5M_{\text{н}}$ , на участке торможения  $M = -0,5M_{\text{н}}$

Графики  $I_1(t)$ ,  $U_1(t)$  удобнее построить, если воспользоваться моментным треугольником (рис. 4.10) для трех значений момента:

$\triangle OAB'$  – для  $M = 0,5M_{\text{н}}$ ;

$\triangle OAB$  – для  $M = M_{\text{н}}$ ;

$\triangle OAB''$  – для  $M = 1,5M_{\text{н}}$ .

Кривая тока  $I_1(t)$  в другом масштабе повторяет кривую абсолютной величины момента и при заданной величине момента  $M$  может быть определена на основании выражения:

$$I_1 = I_{1\text{н}} \frac{M}{M_{\text{н}}}.$$

Величина напряжения определялась на основании уравнения связи между напряжением на статоре, частоты переменного тока и током намагничивания:

$$U_1 = \frac{I_{\mu} \cdot n \cdot U_{1\text{н}}}{I_{\mu\text{н}} \cdot n_0},$$

где величина  $I_{\mu}$  соответствует длине вектора  $I_{\mu}$  на рис. 4.10.

Наибольшее значение напряжения  $U_1$  наблюдается в конце разгона и равно:

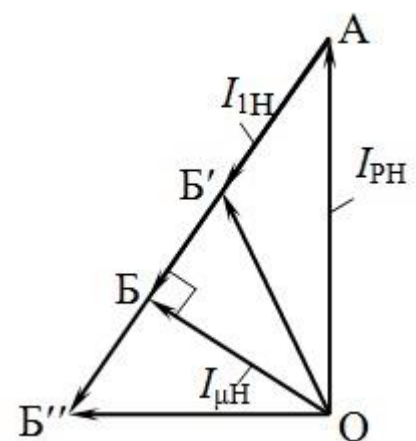
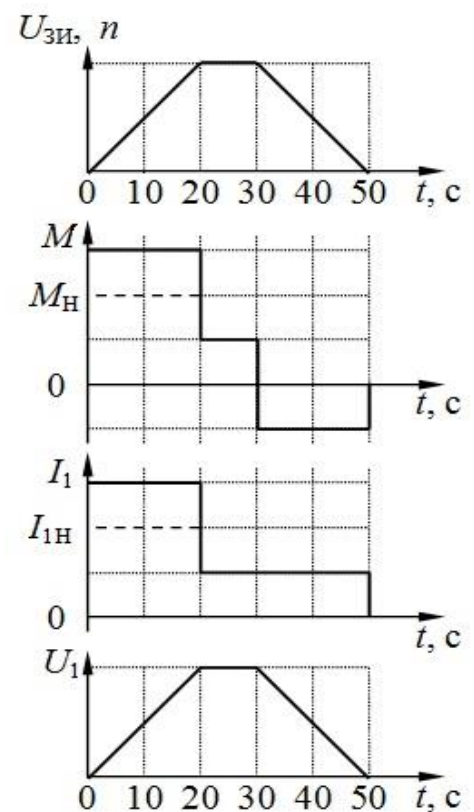


Рис. 4.10. К задаче 4

$$U_1 = \frac{n}{n_0} \cdot \frac{I_\mu}{I_{\mu H}} \cdot U_{1H} = \frac{n}{n_0} \cdot \frac{OB''}{OB} \cdot U_{1H} = \frac{20}{100} \cdot \frac{7,3}{6,0} \cdot 200 = 49 \text{ В};$$

на участке движения электропривода с постоянной скоростью:

$$U_1 = \frac{n}{n_0} \cdot \frac{OB''}{OB} \cdot U_{1H} = \frac{20}{100} \cdot \frac{7,2}{6,0} \cdot 200 = 48 \text{ В}.$$

5. Структурная схема электропривода, соответствующая режиму ударной нагрузки, приведена на рис. 3.11.

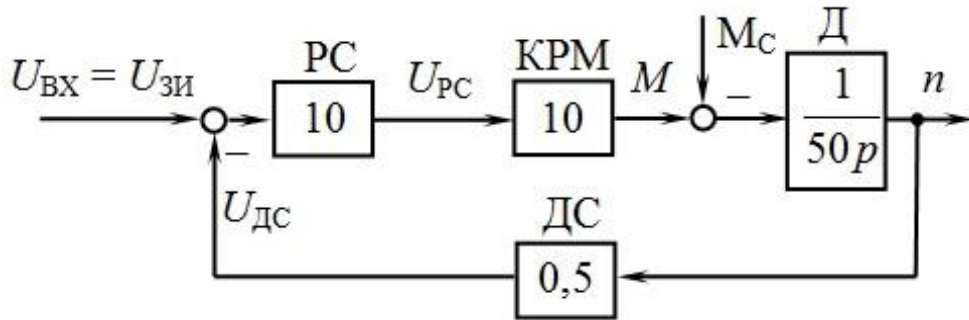


Рис. 4.11. Структурная схема электропривода

Из этой схемы следует, что в переходном процессе, вызванном приложением ударной нагрузки, электропривод ведет себя, как апериодическое звено первого порядка с передаточными функциями:

– по каналу “момент статической нагрузки  $M_c$  – скорость  $n$ ”

$$W_{ЭП1} = \frac{\Delta n}{\Delta M_c} = \frac{W_D}{1 + W_D \cdot W_{ДС} \cdot W_{РС} \cdot W_{КРМ}} = \frac{1}{50(1 + p)};$$

– по каналу “момент статической нагрузки  $M_c$  – момент электромагнитный двигателя  $M$ ”

$$W_{ЭП2} = \frac{\Delta M}{\Delta M_c} = \frac{1}{1 + p}.$$

Кривые переходных процессов (рис. 4.12) описываются экспонентами с постоянной времени 1 с [5,6]. За время  $t = 1$  с момент возрастает до значения  $0,63 \cdot M_c = 1,26 \cdot M_H$ .

Наибольшее динамическое падение скорости наблюдается при  $t = 1$  с и составит

$$\Delta n_g \approx 0,63 \cdot 0,02 \cdot \Delta M_c \approx 1,2 \text{ рад/с}.$$

Здесь  $M_c = 2M_H = 96 \text{ Н}\cdot\text{м}$ .

Во время паузы момент и скорость успевают возвратиться к исходному значению.

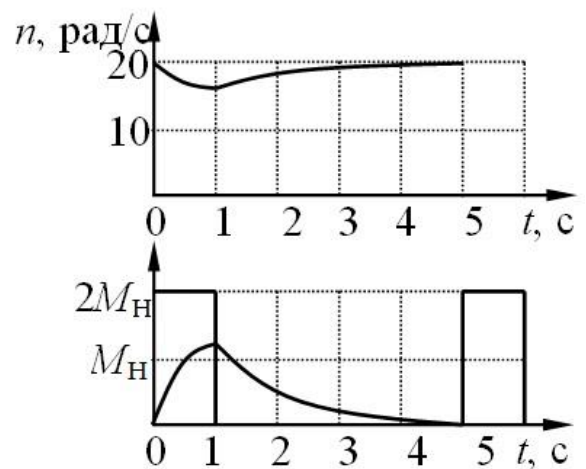


Рис. 4.12. График переходных процессов

## 4.2. Асинхронный электропривод с частотнотоковым управлением

### 4.2.1. Исходные данные

В схеме (рис. 4.13) даны следующие параметры асинхронного двигателя:

$U_{1H} = 200$  В – номинальное напряжение статора;

$I_{1H} = 10$  А – номинальный ток статора;

$\cos\varphi_H = 0,8$ ;

$\eta = 0,95$  – КПД двигателя при номинальной нагрузке;

$s_H = 5\%$  – номинальное скольжение;

$n_0 = 1500$  об/мин – номинальная синхронная скорость;

$f_H = 50$  Гц – номинальная частота;

$M_K = 3 \cdot M_H$  – критический момент.

### 4.2.2. Задачи

1. Построить статические характеристики  $f_1 = f(M)$ ,  $U_1 = f(M)$ ,  $I_1 = f(M)$ , если известно, что в электроприводе обеспечивается прямоугольная механическая характеристика, когда на участке поддержания скорости  $n = 600$  об/мин = *const*, а на участке ограничения момента  $M = 2M_H = \text{const}$ . Указать численные значения  $f_1$ ,  $U_1$ ,  $I_1$ , когда состояние электропривода определяется следующими точками на механической характеристике:

– при  $M = M_H$ ;

– точке начала действия ограничения по моменту;

– и работе электропривода на упор.

Падение напряжения в обмотке статора можно не учитывать.

2. В электроприводе, находящемся в заторможенном состоянии, плавно изменяя сигнал задания, увеличивают момент двигателя от нуля до  $2 \cdot M_H$ . Как в зависимости от величины момента изменяются скорость  $n$ , частота  $f_1$ , напряжение  $U_1$ , ток  $I_1$ ?

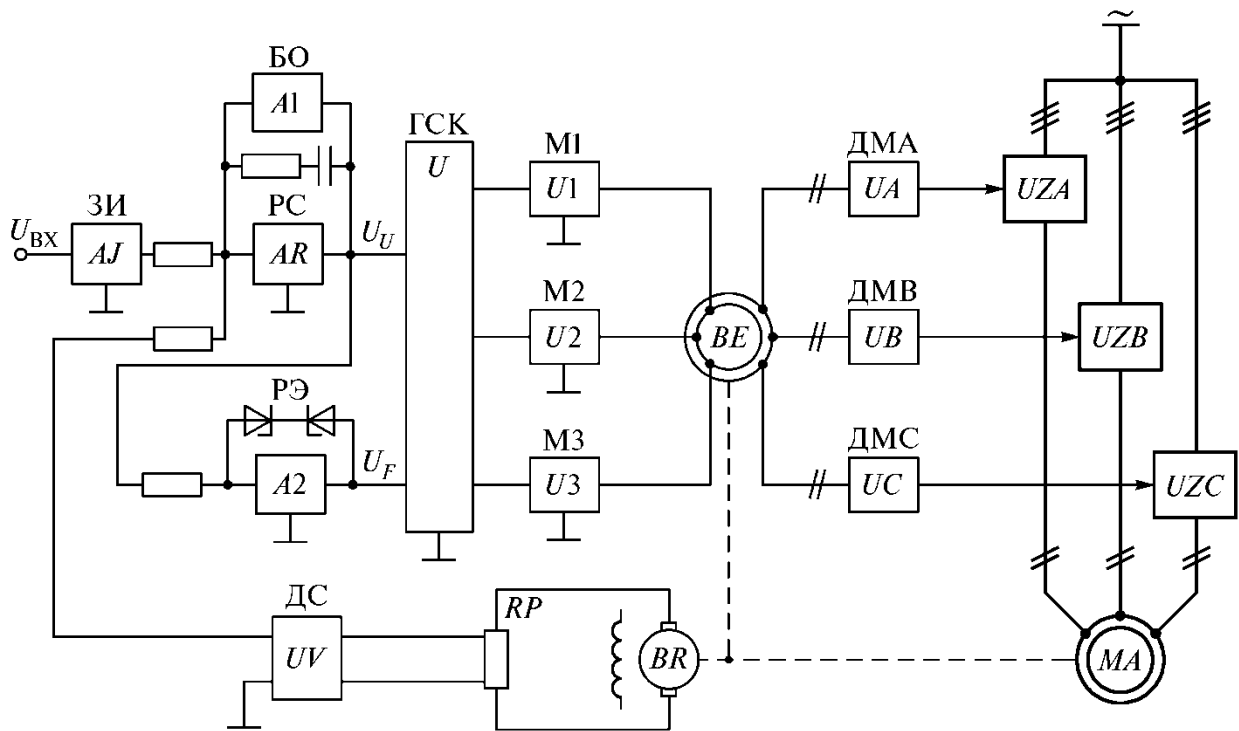


Рис. 4.13. Схема функциональная асинхронного электропривода с частотно-токовым управлением

3. Построить графики изменения во времени напряжения на статоре  $U_1 = f(t)$ , тока статора  $I_1 = f(t)$ , частоты напряжения на статоре  $f_1 = f(t)$ , когда электропривод обрабатывает заданное перемещение по трапецеидальному закону: сначала в течение 1 с разгоняется равномерно до  $n = 600$  об/мин с величиной динамического момента  $M_{\text{дин}} = 0,5M_H$ , затем в течение 1 с поддерживает постоянную угловую скорость  $n = 600$  об/мин, наконец, в течение последней секунды тормозится равномерно до нуля. Момент статической нагрузки принять равным нулю.

#### 4.2.3. Ответы и пояснения

1. Статические характеристики электропривода представлены на рис. 3.14 [8-10]. Укажем численные значения переменных состояния электропривода при работе его с  $M = M_H$  и  $n_A = 600$  об/мин, что соответствует точке А на статических характеристиках:

– скольжение, измеренное в единицах частоты напряжения на статоре

$$s_A = f_{1H} \cdot s_H = 50 \cdot 0,05 = 2,5 \text{ Гц};$$

– частота напряжения на статоре

$$f_{1A} = f_A + s_A = 20 + 2,5 = 22,5 \text{ Гц},$$

где  $f_A = f_{1H} n_A / n_0 = 50 \cdot 600 / 1500 = 20$  Гц – частота, соответствующая расчетной синхронной скорости холостого хода асинхронного двигателя 600 об/мин;

– напряжение на статоре

$$U_{1A} = U_{1H} \cdot f_{1A} / f_{1H} = 200 \cdot 22,5 / 50 = 86 \text{ В};$$

– ток статора



$$I_{1A} = I_{1H} = 10 \text{ A.}$$

Так как схемой обеспечивается режим постоянного скольжения, то при работе электропривода в точке В механической характеристики:

- частота напряжения на статоре  $f_{1B} = 22,5 \text{ Гц}$ ;
- напряжение на статоре

$$U_{1B} = U_{1A} \cdot \sqrt{\frac{M_B}{M_A}} = 86 \cdot \sqrt{2} \approx 110 \text{ В};$$

–ток статора

$$I_{1B} = I_{1A} \cdot \sqrt{\frac{M_B}{M_A}} = 10 \cdot \sqrt{2} \approx 14 \text{ А};$$

При работе электропривода на упор (точка G на механической характеристике):

- частота напряжения на статоре соответствует величине скольжения, поддерживаемого схемой  $f_{1G} = 2,5 \text{ Гц}$ ;
- ток статора  $I_{1G} = I_{1B} = 14 \text{ А}$ ;
- напряжение на статоре  $U_{1G} = U_{1H} \cdot f_{1G} / f_{1H} = 200 \cdot 2,5 / 50 = 10 \text{ В}$ .

2. Скорость  $n = 0$ , частота напряжения на статоре  $f_1 = 2,5 \text{ Гц}$ ; напряжение на статоре увеличивается от нуля при  $M = 0$  до  $U_1 = 10 \text{ В}$  (см. точку G на рис. 4.14) пропорционально корню квадратному из величины момента; график тока статора  $I_1 = f(M)$  останется таким же, как на рис. 4.14.

3. График скорости  $n = f(t)$  имеет форму трапеции с высотой  $n = 600 \text{ об/мин}$ ; а график момента – это прямоугольники с высотой  $M / M_H = \pm 0,5$  (рис. 4.15).

Частота напряжения на статоре при  $t = 0$  изменяется скачком до  $f_{10} = 2,5 \text{ Гц}$ , затем на участке разгона увеличивается по линейному закону до  $f_{11} = 22,5 \text{ Гц}$  при  $t = 1 \text{ с}$ . Затем при  $t = 1 \text{ с}$  происходит скачкообразное уменьшение частоты до  $f_1 = 20 \text{ Гц}$ . В момент времени  $t = 2 \text{ с}$  происходит очередной скачок частоты до  $f_{12} = 17,5 \text{ Гц}$ , затем – ее снижение с таким же темпом до  $f_{13} = -2,5 \text{ Гц}$ . Здесь знак “минус” означает смену порядка следования фаз в кривой напряжения на статоре двигателя в конце процесса торможения.

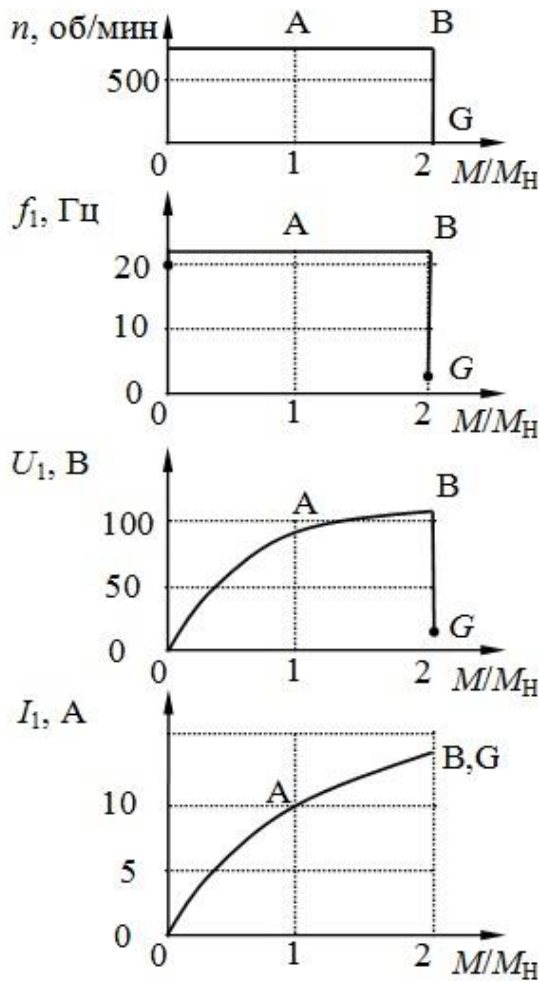


Рис. 4.14. Статические характеристики электропривода

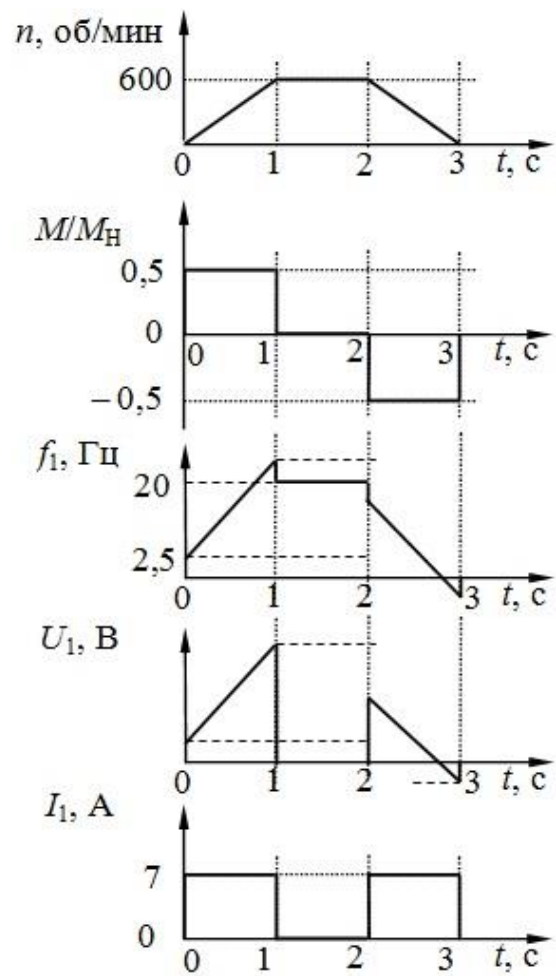


Рис. 4.15. Графики переходных процессов

Напряжение на статоре в процессе отработки заданного перемещения сначала при  $t = 0$  изменяется скачком до

$$U_1 = U_{1H} \cdot \frac{f_{10}}{f_{1H}} \cdot \sqrt{\frac{M}{M_H}} = 200 \cdot \frac{2,5}{50} \cdot \sqrt{0,5} \approx 7 \text{ В};$$

Затем на участке разгона увеличивается по линейному закону до

$$U_1 = U_{1H} \cdot \frac{f_{11}}{f_{1H}} \cdot \sqrt{\frac{M}{M_H}} = 200 \cdot \frac{22,5}{50} \cdot \sqrt{0,5} \approx 67 \text{ В};$$

Далее при  $t = 1$  с происходит скачкообразное снижение напряжения на статоре до нуля. В момент времени  $t = 2$  с напряжение на статоре скачком увеличивается до

$$U_1 = U_{1H} \cdot \frac{f_{12}}{f_{1H}} \cdot \sqrt{\frac{M}{M_H}} = 200 \cdot \frac{17,5}{50} \cdot \sqrt{0,5} \approx 49 \text{ В};$$

после чего в процессе торможения снижается до нуля, проходит через нулевое значение и при  $t = 3$  с принимает значение  $\approx 7$  В, но с обратной последовательностью чередования фаз.

Кривая тока статора представляет собой два прямоугольника на участках разгона и торможения с амплитудой тока

$$I_1 = I_{1H} \cdot \sqrt{\frac{M}{M_H}} = 10 \cdot \sqrt{0,5} \approx 7 \text{ А}.$$

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Терехов В.М. Системы управления электроприводов: Учебник для студентов высших учебных заведений / В.М.Терехов, О.И.Осипов; под ред. В.М. Терехова. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 304 с.
2. Усынин Ю.С. Системы управления электроприводов: Учебное пособие. – 2-е издание, испр. и доп. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2004. – 328с.
3. Григорьев М.А. Замкнутые системы управления электропривода. Сборник задач с пояснениями / М.А. Григорьев; под ред. проф. Ю.С. Усынин. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 32 с.
4. Усынин, Ю.С. Сборник задач по курсу “Системы управления электроприводов” / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, Н.Ю. Сидоренко; под ред. Ю.С. Усынина. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. – 31 с.
5. Sinamics [Электронный ресурс] URL [http://iadt.siemens.ru/products/motors\\_drives/converters/ac-converters/sinamics\\_g/sinamics-g120p/](http://iadt.siemens.ru/products/motors_drives/converters/ac-converters/sinamics_g/sinamics-g120p/) (Дата обращения: 28.04.2013)
6. Unidrive [Электронный ресурс] URL <http://www.controltechniques.ru/downloads.aspx/> (Дата обращения: 06.05.2013).
7. ABB (DTC) [Электронный ресурс] URL <http://www.abb.com/product/ap/seitp322/dc47706b5b2eabd4c125748a003ac770.aspx/> (Дата обращения: 28.04.2013)
8. Direct Torque Control of AC motor drives / M. Aaltonen, P. Tiitinen, J. Laku, S. Heikkilä / ABB Review – 1995. - №3. – pp. 19-24.
9. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для студентов высших учебных заведений / Г.Г. Соколовский. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 272 с.
10. Рудаков, В.В. Системы управления электроприводов. Прямое управление моментом в электроприводе переменного тока: Учебное пособие / В.В. Рудаков, А.Е. Козярук. Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет). Санкт-Петербург, 2007. - 75 с.
11. Беспалов В.Я. Электрические машины: учебное пособие для студентов высших учебных заведений / В.Я. Беспалов, Н.Ф. Котеленец. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 320 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Оценка возможностей регулируемых электроприводов с позиций реализации предельных режимов	
1.1 Обобщенные требования технологического процесса к электроприводам, реализующим предельные режимы работы по быстродействию и перегрузочной способности .....	3
1.2 Новые подходы к синтезу современных регулируемых электроприводов переменного тока.....	8
1.3. Новые типы электроприводов .....	13
1.4. Этапы синтеза регулируемых электроприводов, реализующих предельные режимы работы.....	16
2. Способы формирования процессов пуска и поддержания скорости электропривода	
2.1. Формирование прямоугольной токовой диаграммы с помощью отрицательной обратной связи по току якоря	
2.1.1. Исходные данные .....	18
2.1.2. Задачи .....	18
2.1.3. Методические указания.....	18
2.2. Поддержание скорости с помощью отрицательной обратной связи по скорости вращения двигателя	
2.2.1. Исходные данные .....	22
2.2.2. Задачи .....	22
2.2.3. Методические указания к решению .....	23
3. Регулируемые электроприводы постоянного тока	
3.1. Система управления электроприводом постоянного тока с обратными связями по скорости и току якоря	
3.1.1. Исходные данные .....	25
3.1.2. Задачи .....	26
3.1.3. Ответы и пояснения .....	26
3.2. Электропривод постоянного тока по схеме источник тока – двигатель	
3.2.1. Исходные данные .....	31
3.2.2. Задачи .....	32
3.2.3. Ответы и пояснения .....	33
3.3. Электропривод постоянного тока с двухзонным регулированием скорости	
3.3.1. Исходные данные .....	35
3.3.2. Задачи .....	35
3.3.3. Ответы и пояснения .....	38
4. Регулируемые электроприводы переменного тока	
4.1. Синхронный электропривод с частотно-токовым управлением	
4.1.1. Исходные данные .....	40

4.1.2. Задачи .....	40
4.1.3. Ответы и пояснения .....	42
4.2. Асинхронный электропривод с частотнотоковым управлением	
4.2.1. Исходные данные .....	47
4.2.2. Задачи .....	47
4.2.3. Ответы и пояснения .....	48
Библиографический список .....	52

*Учебное издание*

**Усынин Юрий Семенович**  
**Григорьев Максим Анатольевич**  
**Журавлев Артем Михайлович**

**ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

Учебное пособие

Техн. редактор А.В. Миних

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 11.10.2016. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 3,25. Тираж 100 экз. Заказ 374.

Отпечатано в типографии «Тета»  
г. Челябинск, ул. Смирных, 7.