

Федеральное агентство морского и речного транспорта
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Волжский государственный университет водного транспорта»

Кафедра электротехники и электрооборудования
объектов водного транспорта

Г.И. Коробко, В.В. Лебедев

Автоматизированные электроприводы объектов водного транспорта

Методическое пособие
к выполнению лабораторных работ
для студентов очного и заочного обучения
специальности 18.04.07 «Эксплуатация судового
электрооборудования и средств автоматики»

Нижний Новгород
Издательство ФГБОУ ВО «ВГУВТ»
2016

УДК 621.315.6
К68

Коробко, Г.И.

Автоматизированные электроприводы объектов водного транспорта : метод. пособие к выпол. лабор. работ для студ. оч. и заоч. обуч. спец-ти 18.04.07 «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики» / Г.И. Коробко, В.В. Лебедев. – Н. Новгород : Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2016. – 32 с.

Приведены общие сведения об автоматических электроприводах объектов водного транспорта. Даны функциональные и структурные схемы комплектных электроприводов на базе специальных двигателей. Сформулированы требования к основным областям применения комплектных электроприводов постоянного тока.

Для студентов очного и заочного обучения.

Работа рекомендована к изданию кафедрой электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта (протокол № 10 от 09.06.2015 г.).

© ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2016

Введение

Автоматизированный электропривод играет в промышленности исключительно важную роль. Его значение не ограничивается только преобразованием электрической энергии в механическую, хотя это одна из основных функций, выполняемых электроприводом в производственных машинах. Электропривод – это основной конструктивный элемент технологической машины, которую представляют как комплекс приводов, исполнительных органов, объединенных в систему управления циклом движения машиной.

Электропривод влияет на конструкцию производственной машины. Это влияние может проявляться на конструкцию любого узла и зависит от конструкции и типа электродвигателя. Часто электропривод оказывает воздействие на производственную машину, улучшая ее динамические характеристики и расширяя функциональные возможности. Основное значение электропривод приобрел на современном этапе развития техники как основное звено автоматизации.

Система электропривода является наиболее экономичной с энергетической и информационной точки зрения. Информационные функции электропривода очень важны, поскольку простыми методами определяют силовые параметры технологического процесса, осуществляют диагностику и контроль работы оборудования.

1. Сведения из теории

1.1. Состав электроприводов объектов водного транспорта

Группы электроприводов (ЭП) можно разделить на следующие типы:

- электроприводы подъемно-опускных механизмов слипов;
- ЭП технологических механизмов гидротехнических сооружений, к которым относятся различные ворота и затворы галерей;
- ЭП подъемно-транспортных механизмов, к ним относятся различные краны, лебедки, транспортеры. Они применяются широко в портах, судоремонтных и судостроительных заводах и др.;

– ЭП в составе технологических комплексов и линий используются в сварочном производстве, на автоматизированных складских комплексах, в металлорежущих станках и промышленных роботах и др.;

– ЭП в специальных автомобилях «карах».

Очевидно, что можно найти электроприводы, работающие в различных специальных технологических процессах. При этом разнообразии ввиду достаточно широкого использования ЭП требуется создание все более уникальных электроприводов.

Большое количество объектов, приводимых в движение электроприводами, имеют широкий диапазон регулирования: частоты вращения ω – до 1:10000 и мощности P – от доли ватта до тысячи киловатт. Требования, предъявляемые к различным электроприводам, приводят к разнообразным конструктивным, структурным и схемотехническим решениям. Несмотря на это можно составить обобщающую структурную схему автоматизированного электропривода (АЭП), которая отражает основные общие элементы, присущие любому ЭП.

1.2. Обобщенная структура автоматизированного электропривода

Обобщенная структурная схема автоматизированного электропривода представлена на рис. 1.1.

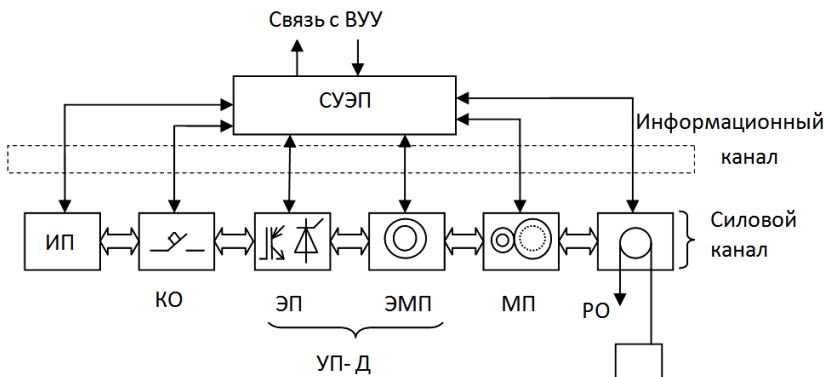


Рис. 1.1. Структурная схема АЭП

В структуре выделяются два взаимодействующих канала. Силовой канал, выполняющий функцию передачи и преобразования энергии из электрической в механическую. Информационный канал предназначен для управления потоком энергии, сбора и обработки сведений о состоянии и функционировании системы, а также для диагностики ее неисправностей. Он может взаимодействовать со всеми элементами силового канала, с оператором, другими системами ЭП (многосвязные ЭП) и системами верхнего уровня управления (ВУУ).

Силовой канал состоит из:

- ИП – источник питания (промышленная сеть или автономные источники питания: дизель-генератор, газопоршневые агрегаты, аккумуляторы и т. д.);

- КО – коммутационное оборудование (подает электрическую энергию на электропривод и выполняет функцию защиты). Основным элементом – автоматический выключатель QF – обеспечивает включение и отключение, а также защиту: максимальную (при коротком замыкании) и тепловую (при перегрузке);

- ЭП – электрический преобразователь, который преобразует переменный ток (напряжение) в постоянный, или наоборот, и регулирует параметры электроэнергии (обычно напряжение, ток и частоту);

- ЭМП – электромеханический преобразователь (электродвигатели постоянного и переменного тока, специальные электродвигатели, о которых будет сказано в разделе 2);

- МП – механический преобразователь (например редуктор) преобразует параметры движения: повышение или понижение скорости вращательного или поступательного движения и др.;

- РО – рабочий орган преобразует механическую энергию в полезную работу.

В силовом канале широкими стрелками между элементами показано направление мощности:

- 1) от ИП к РО – потребление;
- 2) от РО к ИП – рекуперация.

Рабочий орган может быть назван исполнительным механизмом (ИМ).

С технической точки зрения наибольший интерес представляют уникальные прецизионные системы электроприводов. Они созданы на основе последних достижений научной и технической мысли. Однако наибольший экономический эффект дает использование только массовых электроприводов.

1.3. Тенденции развития автоматизированного электропривода (на примере металлорежущих станков и промышленных роботов)

I. Приближение источника движения к исполнительному органу.

Эта тенденция приводит к упрощению конструкции механической части, увеличению ее жесткости, улучшению динамических качеств, повышению динамической точности, увеличению КПД.

В электроприводах механические передачи сведены к минимуму за счет того, что вал тихоходного электродвигателя непосредственно соединен с преобразователем вращательного движения в поступательное, например, ходовой винт.

В приводах роботов в большинстве случаев сохраняется редуктор. Исключение механических передач за счет применения тихоходных двигателей обычно увеличивает размеры и массу электропривода, а следовательно, и робота целом.

II. Использование специальных более совершенных исполнительных двигателей.

Доля специальных двигателей, предназначенных для станков и роботов, непрерывно растет (в Японии 70% всех двигателей – специальные, у нас – 30%). Такие электродвигатели обладают специальными свойствами и характеристиками. Важным условием является оснащение двигателя вспомогательными устройствами: тахогенератором, датчиком угла поворота вала (резольвер, ВТ, сельсин), электромагнитным тормозом, тепловой защитой и т.д. Среди специальных двигателей выделяются: высокомоментные, быстродействующие двигатели с гладким якорем, малоинерционные электродвигатели (с дисковым якорем или печатным).

III. Совершенствование полупроводниковой элементной базы:

– улучшаются технические характеристики тиристоров и транзисторов, а они являются основными силовыми элементами электрических преобразователей;

– создаются полностью управляемые тиристорные и транзисторные силовые преобразователи;

– повышается степень интеграции силовых полупроводниковых устройств, в результате созданы силовые модули. Их использование снижает массу и габариты, упрощает монтаж, повышает надежность;

– создаются специализированные интегральные микросхемы для систем управления (СУ): системы импульсно-фазового управления (СИФУ), регуляторы (тока, скорости, ЭДС и др.), блоки токоограничения, устройство компенсации нелинейностей и т.д.

IV. Расширение функциональных возможностей ЭП.

Ранее ЭП считался источником равномерного движения ($\omega \approx \text{const}$). Все сложные (взаимосвязанные) перемещения выполнялись различными механизмами: неполные зубчатые колеса, эксцентрики, механизмы для движения с остановками, точным позиционированием и т. д.

В настоящее время (положение резко изменилось) гибкая СУ привода обеспечивает необходимые на практике законы изменения координат ЭП:

– ЭП контролирует и ограничивает нагрузки в элементах конструкции;

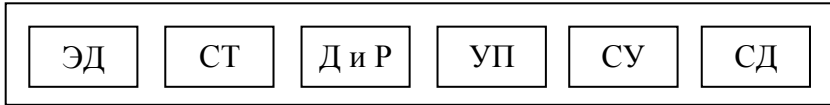
– обеспечивает большое число движений рабочего органа (инструмента) по сложной траектории.

Однако эта задача решена не полностью. Для точного воспроизведения заданной траектории необходима высокая точность отработки ЭП управляющих воздействий. Это может быть обеспечено только при инвариантности ЭП к многочисленным возмущениям. Возмущения характерны любому технологическому процессу. С этой точки зрения механические кинематические цепи обладают существенным преимуществом: высокой динамической жесткостью, а следовательно, и высокой точностью (нарезка резьбы и другие операции).

V. Комплектные системы ЭП.

Современный ЭП для ряда различных механизмов выполняется в виде комплекта электрооборудования. Тенденция комплектной поставки (продажи) развивается в двух направлениях.

Первое направление: увеличивается объем комплекта (то есть координаты), куда входит следующее оборудование:

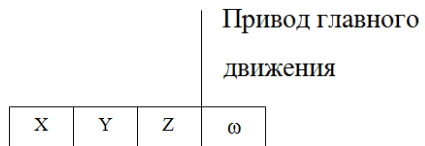


электродвигатель – ЭД,
силовой трансформатор – СТ,
сглаживающие дроссели и реакторы – Д и Р,
силовой управляющий преобразователь – УП,
система управления – СУ,
система диагностики – СД, обеспечивающая высокую надежность ЭП при работе и его быстрый ввод в эксплуатацию.

Второе направление: увеличивается число координат (электроприводов) в комплекте от двух до шести для роботов и до четырех координат – для станков.

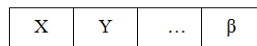
Металлорежущий станок:

ЭП трёхкоординатные:



Промышленный робот:

Шкаф (кассета)



Второе направление может сэкономить на трансформаторе и общем шкафу.

2. Специальные электродвигатели

2.1. Высокмоментные электродвигатели постоянного тока

Впервые высокмоментные двигатели (ВМД) начали выпускаться в США (конец 60-х годов) и, благодаря ряду существенных преимуществ по сравнению с другими типами ДПТ, получили широкое распространение в электроприводах станков и роботов.

Под ВМД понимают сравнительно тихоходные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов.

Замена электромагнитного возбуждения на возбуждение от высокоэнергетических постоянных магнитов обеспечила возможность многополюсного исполнения (до 12 полюсов) при этом:

- значительно повышается КПД двигателя (на 15–20%);
- снижаются габариты и масса;
- увеличивается момент, развиваемый двигателем.

Для увеличения момента (а следовательно, и тока) необходимы специальные щетки с большой перегрузочной способностью.

Многополюсное исполнение позволило снизить номинальную скорость до 1000 об/мин (и обеспечить непосредственное соединение вала двигателя с ходовым винтом).

Кроме того, у ВМД повышено отношение длины к диаметру якоря. Момент инерции (J) при этом уменьшается, а быстродействие возрастает.

Использован пазовый якорь с большим числом пазов и коллекторных пластин, что обеспечивает равномерность вращения двигателя на малых частотах (0,1 об/мин).

Отсутствуют люфты в соединении вала двигателя с датчиком скорости и пути, за счет встроенных тахогенератора (ТГ) и резольвера ВТ, что очень важно для повышения качества и устойчивости следящего привода. Общий вид ВМД представлен на рис. 2.1, его характеристики – на рис. 2.2.

Двигатель состоит из якоря 1, статора 2 и подшипников 3, 4. На статоре располагаются постоянные магниты.

На одном валу с якорем расположен ТГ 5. Датчик пути 6 соединен с валом якоря через редуктор с передаточным отношением 1:5.

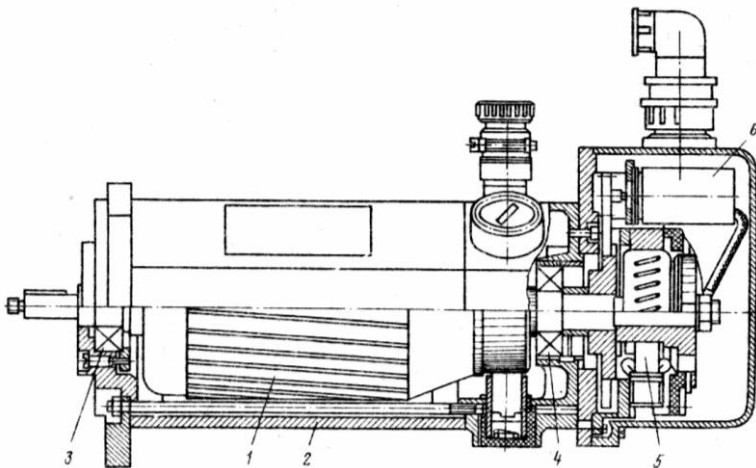


Рис. 2.1. Общий вид высокомоментного двигателя постоянного тока

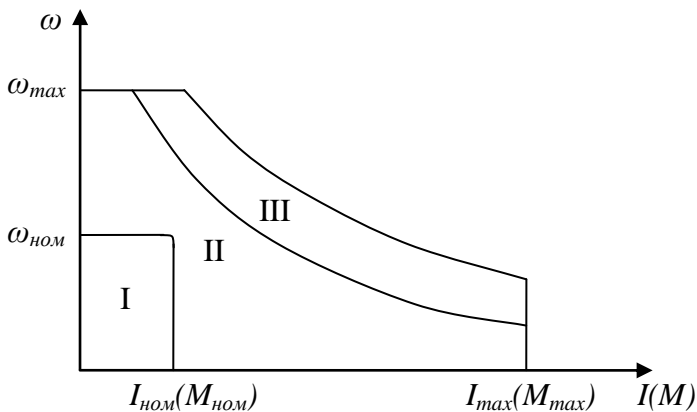


Рис. 2.2. Характеристики ВМД:

- I – зона длительной работы; II – зона кратковременной работы;
- III – зона, ограничивающая область допустимой работы в переходных режимах

Тахогенератор имеет до 100 коллекторных пластин. Использование большого их числа позволяет существенно снизить пульсации выходного напряжения датчика скорости, что особенно важно на малых скоростях.

Характеристики ВМД (см. рис. 2.2), определяют зависимость развиваемого момента от частоты вращения: $\omega = f(M)$.

Справа кривые II и III ограничены значением максимального момента – M_{\max} и тока – I_{\max} , полученного из условия размагничивания постоянных магнитов. Чем ограничена величина I_{\max} ? Величина максимального момента определяется предельно допустимым током якоря – I_{\max} , который может достигать 10–16-кратного значения по сравнению с номинальным значением $I_{\text{ном}}$.

По мере увеличения частоты вращения допустимая величина тока (а следовательно, и момента) значительно снижается из-за ухудшения коммутации.

ВМД кратковременно допускают работу на повышенных скоростях вращения, которые вследствие возбуждения от постоянных магнитов могут быть получены только за счет увеличения напряжения на якоре. Такое увеличение напряжения должно быть предусмотрено схемой преобразователя, от которого питается двигатель.

Зависимость максимально допустимого момента (т. е. тока) от частоты вращения имеет нелинейный характер, поэтому применяется система нелинейного токоограничения, входящая в состав системы управления электропривода.

Отечественной промышленностью выпускаются ВМД серии ПБВ (0,75–110 кВт), сейчас 2ПБВ, маломощная ДК-1, по лицензии фирмы «Фанук» (75, 220, 450 Вт). МВНСР (обращенная конструкция).

2.2. Малоинерционные электродвигатели

Второй путь повышения быстродействия ЭП привел к созданию малоинерционных ЭД. Наибольшее распространение получили ЭД с дисковым якорем, ЭД с полым и ЭД с гладким якорем (у которого длина намного больше диаметра).

Малоинерционные ЭД так же, как и ВМД, имеют возбуждение от постоянных магнитов. Конструкция двигателя с дисковым якорем представлена на рис. 2.3.

На валу 1, закреплен диск 2 из стеклотекстолита, на который печатным способом нанесены обмотки якоря.

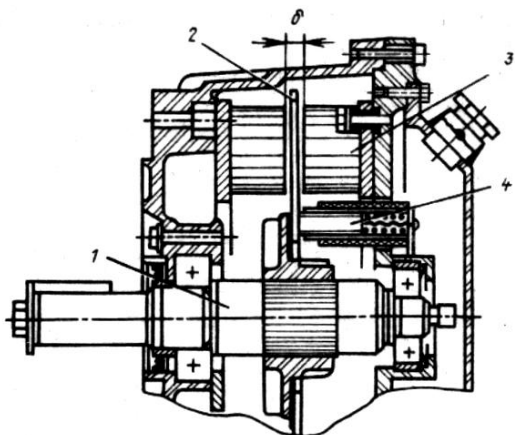


Рис. 2.3. Общий вид
дискового двигателя

Дисковый якорь вращается между полюсами 3, создающими в зазоре магнитный поток. Коллектор расположен на том же диске и выполнен таким же способом, как и обмотка. Щетка 4 скользит по проводникам и производит переключение секций обмотки.

Основные преимущества такого ЭД:

- высокое быстродействие, так как якорь ЭД имеет малый момент инерции. Отсутствие стального сердечника в магнитной цепи якоря уменьшает индуктивность обмотки якоря. Поэтому его электромагнитная постоянная времени $T_{\text{Э}}$ будет мала: и электрические переходные процессы имеют малую длительность;

- тонкие и широкие проводники обмотки якоря хорошо охлаждаются, поэтому допустимая плотность тока у таких ЭД выше, чем у обычных;

- конструкция дискового ЭД проста и технологична;

- отсутствуют потери на перемагничивание, так как вращающиеся части не содержат ферромагнитных материалов.

Недостатки дисковых ЭД:

- большой воздушный зазор требует использования более «сильных» постоянных магнитов;

- невысокая механическая прочность якоря-диска;

- ограниченное число витков обмотки якоря позволяет использовать сравнительно низкие напряжения питания – 24, 36, 48, 110, 220 В.

Типы дисковых ЭД: ПЯ, ДР, ДПУ 250 (120, 60, 500 Вт).

Наряду с дисковыми используются ЭД с полым цилиндрическим якорем. Якорь представляет собой полый пластмассовый стакан, на поверхности которого печатным способом наносится обмотка. Постоянные магниты расположены с наружной стороны якоря. Для замыкания магнитного потока внутри якоря установлен неподвижный магнитный сердечник.

Существуют ЭД, у которых момент инерции снижается за счет уменьшения диаметра якоря и увеличения длины. Такой якорь изготовлен из электротехнической стали, а обмотка размещена не в пазах, а на гладкой наружной поверхности (приклеена). Недостаток таких ЭД заключается в плохом охлаждении, так как отвод тепла из узкого и длинного канала между статором и якорем сложен.

2.3. Специальные электродвигатели переменного тока

Двигатели постоянного тока имеют существенный недостаток, ограничивающий их применение. У этих двигателей через щеточно-коллекторный узел проходит основной поток мощности. Наличие такого узла требует постоянного ухода в процессе эксплуатации. Искрение, возникающее на коллекторе, не позволяет применять такие двигатели в пожароопасных местах. Ухудшаются массогабаритные показатели, и повышается стоимость электрической машины.

Отмеченные факторы приводят к необходимости разработки и установке электроприводов переменного тока.

На базе электродвигателей основного исполнения серий 4А, 5А и других выполняются специальные асинхронные двигатели (АД) для регулируемого привода.

Такие двигатели снабжены электромагнитным тормозом, датчиками положения и скорости, датчиками температуры обмотки статора. Отличие резольвера заключается в прямом соединении с валом двигателя.

Электродвигатель закрытого исполнения выполнен без встроенного вентилятора. При необходимости наружный обдув осуществляется внешним вентилятором (наездником).

2.4. Специальные электродвигатели для двухзонного регулирования частоты вращения

При двухзонном регулировании в электроприводе главного движения (ПГД) используют двигатель постоянного тока. Для регулирования с постоянным максимально допустимым моментом необходимо изменять напряжение на якоре при постоянном (номинальном) потоке возбуждения. (Механические характеристики такого двигателя показаны ниже на рис. 3.7.) Частота вращения при этом регулируется вниз от номинального значения. Регулирование частоты вверх от номинальной обеспечивается с максимально допустимой постоянной мощностью за счет ослабления потока возбуждения ($I_B = \text{var}$; $\Phi = \text{var}$). Напряжение на якоре в этом случае остается постоянным, на уровне номинального значения. Верхний диапазон частоты ограничен коммутационной возможностью двигателя постоянного тока (ДПТ).

Для обычных ДПТ диапазон регулирования частоты во второй зоне равен $D_{II} = 1:2$ (2,5). В специальных двигателях (серия 4ПФ) увеличен до 1:6(8).

При $n_{\text{max}} = 5000$ об/мин в специальных ДПТ используют следующее:

а) шихтованная станина. Позволяет уменьшить потери пульсации тока якоря;

б) быстроходный щеточно-коллекторный узел. Применена система крепления щеток, исключающая вибрацию. Уменьшается износ щеток и коллектора при больших скоростях;

в) компенсационная обмотка использована в магнитной системе. Она исключает искажение магнитного потока в зоне основных потоков;

г) тахогенератор, встроенный в двигатель, а также термодатчики обмотки и подшипники.

Кроме ДПТ двухзонного регулирования могут применять асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором при частотном регулировании.

2.5. Показатели точности поддержания скорости и равномерности вращения

Наиболее жесткие требования с этой точки зрения предъявляются к приводам, например, координатным, следящим и другим специальным.

Таблица погрешностей.

Скорость двигателя (отн. ед)	Погрешность скорости, %			Коэффициент неравномерности
	суммарная	при изменении M_c	при реверсе	
1	0,5	0,2	0,2	0,05
0,1	2,5	1	1	0,1
0,01	5	2	2	0,1
0,001	15	5	5	0,15
0,0001	25	10	10	0,25

Коэффициент неравномерности определяет относительные колебания скорости:

$$K_{\text{н}} = \frac{\Delta\omega}{\omega_{\text{CP}}} = \frac{\omega_{\text{max}} - \omega_{\text{min}}}{\omega_{\text{max}} + \omega_{\text{min}}}$$

В значительной степени $K_{\text{н}}$ зависит от неточности измерения скорости тахометром при низких частотах вращения.

Основные погрешности скорости определяются изменением нагрузки на валу электродвигателя (M_c) и изменением его направления вращения. Первая составляющая зависит от неточности задания и измерения частоты вращения ЭД. Вторая составляющая объясняется несимметрией элементов силовой части и системы управления электропривода.

2.6. Моменты и силы, действующие в механических системах автоматических электрических приводов

В каждом электроприводе имеется механическое устройство, преобразующее характер и параметры вращательного движения вала ЭД. Используются зубчатые и червячные передачи, рычажные

и цепные, передачи винт – гайка (шарик. пара), реечные передачи и т.д. Моменты, приложенные к механической системе со стороны двигателя, называют движущими (M_d), со стороны нагрузки – моментом сопротивления (M_c). Последние разделяют на активные и реактивные. Активные моменты обусловлены действием внешних сил (силы тяжести, силы ветра, набегающего потока воды и др.). Они не зависят от направления движения и от скорости, хотя могут и изменяться с увеличением или уменьшением скорости. В станках активные моменты встречаются редко, но в промышленных роботах их следует учитывать. Наиболее характерны активные моменты для подъемно-транспортных механизмов и промышленных роботов.

Реактивные моменты – реакция на движение исполнительного органа. Они обусловлены силами трения и резания. Реактивные моменты всегда действуют противоположно движению. При изменении направления движения реактивные моменты меняют знак.

Реактивные моменты сопротивления, связанные с технологическим процессом обработки на станках, представляют собой нелинейную функцию скорости $M_c = f_c(\omega)$, следует учитывать, что $M_c = M_c(t)$ меняется во времени.

3. Комплектные электроприводы

3.1. Комплектный электропривод БТУ 3601

Комплектный привод предназначен для регулирования скорости вращения как обычных двигателей постоянного тока с независимым возбуждением, так и высокомоментных электродвигателей.

Блок-схема комплектного электропривода БТУ 3601 представлена на рис. 3.1.

Силовая схема привода включает в себя:

- автоматический выключатель (QF);
- силовой согласующий трансформатор (ТР) для согласования напряжения сети с номинальным напряжением двигателя;
- тиристорный преобразователь состоит из двух комплектов – K_v и K_n , каждый из которых выполнен по трехфазной мостовой схеме. Управление комплектами раздельное;

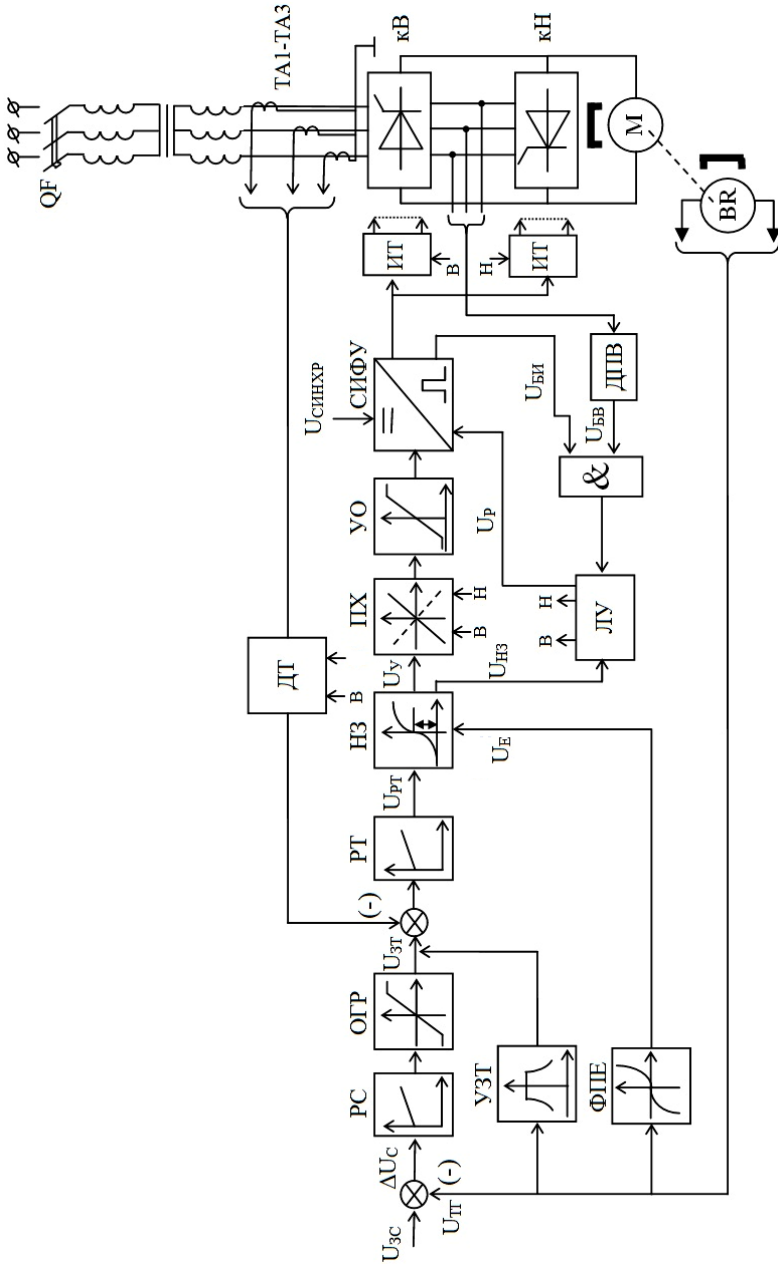


Рис. 3.1. Блок-схема комплексного электропривода БТУ 3601

– высокомоментный двигатель (М) используется для возбуждения от постоянных магнитов.

На входе тиристорного преобразователя установлены трансформаторы тока ТА1 – ТА3. Тахогенератор (ВР) представлен машиной постоянного тока с постоянными магнитами.

Система управления ЭП выполнена по двухконтурной схеме подчиненного регулирования. Внутренний контур регулирования тока и внешний контур регулирования скорости построены с использованием ПИ-регуляторов тока (РТ) и скорости (РС).

На входе регулятора скорости сравнивают два сигнала: задания скорости $U_{зс}$ и сигнал отрицательной обратной связи, поступающий с тахогенератора $U_{тт}$. В результате сравнения получается сигнал рассогласования ΔU_c . На выходе регулятора скорости установлен ограничитель ОГР, ограничивающий выходное напряжение регулятора скорости с целью ограничения величины $U_{зт}$, то есть максимально допустимую величину задания тока якоря. В схеме используется косвенное измерение тока якоря за счет измерения тока, потребляемого преобразователем. Данное решение справедливо только при раздельном управлении комплектами преобразователей. Датчик тока ДТ преобразует сигнал переменного тока в сигнал постоянного тока с учетом знака, который задается сигналами В и Н («вперед» и «назад»).

Нелинейное звено НЗ используется для линеаризации характеристики преобразователя в режиме прерывистого тока. Функциональный преобразователь ЭДС – ФПЕ, служит для реализации положительной, нелинейной обратной связи по ЭДС двигателя E_d , необходимой для линеаризации регулировочной характеристики преобразователя. Система управления реализуется на основании уравнения двигателя постоянного тока:

$$U_y = E_d + I_y \cdot r_y,$$

где U_y , I_y , r_y – напряжение, ток и сопротивление якоря соответственно.

В соответствии с приведенным уравнением формируется напряжение управления для СИФУ:

$$U_y = k_{нз} \cdot U_{рт} + k_c U_{тт}.$$

Первое слагаемое определяется током якоря, то есть сигналом на выходе регулятора тока $U_{рт}$, второе слагаемое определяется ЭДС двигателя, то есть сигналом тахогенератора – $U_{тг}$ ($E_d \equiv U_{тг}$).

Напряжение положительной обратной связи определяется $U_e = k_e \cdot U_{тг}$, где k_e представляет нелинейную функцию ФПЕ, величина $k_{нз}$ является нелинейной функцией НЗ по входу $U_{рт}$.

В режиме холостого хода $U_я = E_d$, поэтому напряжение для СИФУ должно определяться только сигналом положительной обратной связи по E_d , $U_y = k_e U_{тг}$ ($U_{рт} = 0$).

При появлении момента нагрузки на валу двигателя значение U_y должно возрастать на величину $k_{нз} U_{рт}$, пропорциональную току якоря.

Этим увеличением U_y компенсируется падением напряжения в якорной цепи ($I_я R_я$), а скорость вращения поддерживается постоянной.

НЗ предназначено для улучшения динамических характеристик привода при работе в зоне прерывистых токов, где регулировочная характеристика тиристорного преобразователя имеет участок с малым коэффициентом передачи (рис. 3.2).

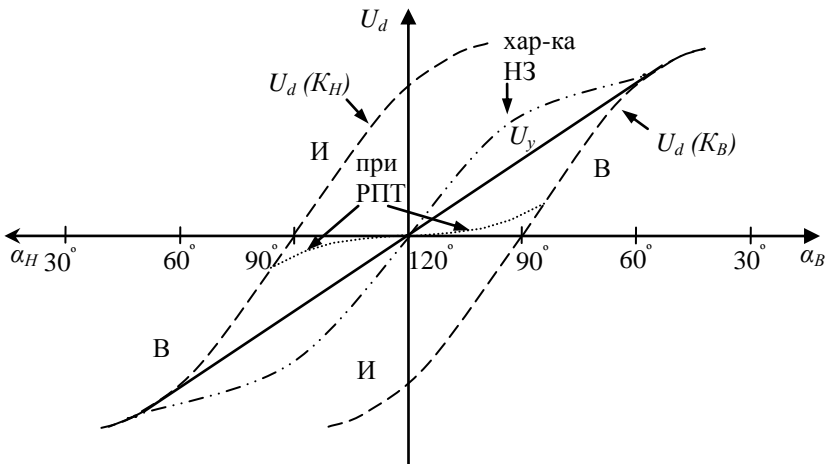


Рис. 3.2. Характеристики тиристорного преобразователя, нелинейного звена и сигнала управления U_y

Вид регулировочной характеристики $U_d = f(\alpha)$ при согласовании комплектов с $\alpha_{нач} = 120^\circ$. Точечная линия соответствует работе преобразователя в режиме прерывистого тока (РПТ).

Режим прерывистых токов (при $E_d = 0$) находится в диапазоне $90^\circ < \alpha < 120^\circ$ и характеризуется низким коэффициентом передачи преобразователя. В области ($\alpha < 90^\circ$) непрерывного тока коэффициент передачи преобразователя возрастает.

Таким образом, НЗ должно иметь характеристику, обратную регулировочной характеристике ТП в зоне прерывистых токов, поскольку последовательное включение двух звеньев (элементов) с взаимно-обратными характеристиками обеспечивает постоянство результирующего коэффициента передачи $k_{рез} = k_{нз} \cdot k_{тп} = \text{const}$ в контуре тока. Этим достигается независимость динамических характеристик системы регулирования от режима работы якорной цепи.

ФПЕ предназначен для преобразования сигнала $U_{тг}$, пропорционального E_d , в сигнал U_e , приведенный ко входу СИФУ.

Приведение E_d ко входу СИФУ осуществляется в связи с нелинейной регулировочной характеристикой управляемого выпрямителя (УВ), которая в режиме непрерывного тока описывается зависимостью:

$$U_d = U_{d0} \sin \frac{\pi}{2} \cdot \frac{U_y}{U_{y0}},$$

где U_{d0} и U_{y0} – выпрямленное и управляющее напряжения при $\alpha = 0$.

Структурная схема компенсации внутренней отрицательной обратной связи по ЭДС представлена на рис. 3.3.

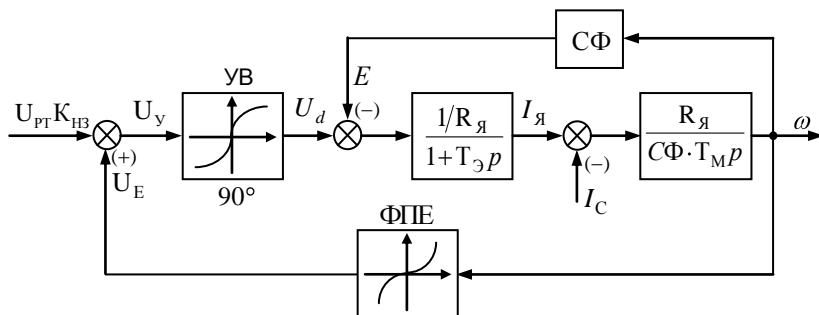


Рис. 3.3. Структурная схема компенсации внутренней отрицательной обратной связи по ЭДС

Суммирование в напряжении U_y сигнала U_e обеспечивается действием положительной обратной связи по ЭДС двигателя и компенсирует внутреннюю отрицательную обратную связь по ЭДС. Для точной компенсации ЭДС характеристика ФПЕ обратна регулировочной характеристике УВ. Компенсация внутренней обратной связи позволяет увеличить динамическую точность работы электропривода.

Узел зависимости тока (УЗТ) служит для изменения уставки токоограничения в функции скорости для ВМД. Он получает зависимость выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ от $U_{\text{ТР}}$ вида реальной коммутационной кривой ВМД.

Переключатель характеристик (ПХ) служит для согласования реверсивного выходного сигнала НЗ с однополярной характеристикой СИФУ. В статическом режиме работы на выходе ПХ формируется только отрицательная полярность напряжения.

Отрицательная ось выходного напряжения соответствует выпрямительному режиму комплектов В и Н, положительная – инверторному режиму.

Управляющий орган СИФУ (УО) служит для ограничения минимального и максимального углов управления, а также для установки начального угла, то есть формирует регулировочную характеристику СИФУ $\alpha = f(U_{\text{ВХ}})$.

Характеристика УО показана на рис. 3.4.

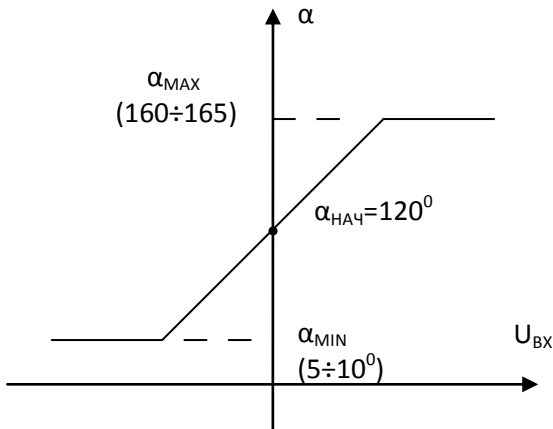


Рис. 3.4. Характеристика управляющего органа СИФУ

Система импульсно-фазового управления СИФУ преобразует напряжение управления (U_y) в сигнал с углами управления тиристоров преобразователя.

Логическое устройство (ЛУ) отдельного управления служит для формирования сигналов вперед – В и назад – Н, управляющих ключами датчика тока – ДТ, переключателя характеристик – ПХ и в цепях импульсных трансформаторов – ИТ. Командой для ЛУ на переключение комплектов служит изменение полярности сигнала на входе нелинейного звена – $U_{нз}$.

Контроль отсутствия тока через тиристоры производится датчиком проводимости вентилях – ДПВ.

Элемент И осуществляет логическое умножение блокировочных сигналов по импульсам ($U_{би}$) и по вентилям ($U_{бв}$). На выходе элемента И будет логическая единица – «1», когда отсутствует ток через тиристоры и отсутствует управляющий импульс на тиристорах.

При изменении знака $U_{нз}$ сигнал U_p запрещает формирование импульсов в СИФУ. По приходу сигнала «1» с выхода элемента И запускается элемент отсчета выдержки времени, по истечении которой происходит подключение импульсных трансформаторов к заданному комплекту и разрешается формирование импульсов в СИФУ.

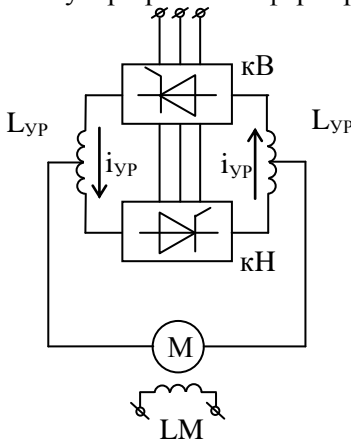


Рис. 3.5. Реверсивный тиристорный преобразователь с совместным управлением комплектами

Рассмотренный привод БТУ 3601 обладает высоким быстродействием, линейностью характеристик, однако его использование в следящем ЭП нежелательно из-за низкого быстродействия при реверсе. Для следящих ЭП, требующих высокого быстродействия, необходимо использовать управляемый преобразователь с совместным управлением комплектами. При совместном управлении выходные напряжения комплектов (их средние значения) равны данным на рис. 3.5.

При этом один комплект работает в выпрямительном режиме, а другой – в инверторном.

Условные согласования комплектов $\alpha_{в} + \alpha_{н} = 180^\circ$, $\alpha_{внач} = \alpha_{ннач} = 90^\circ$.

В связи с неравенством мгновенных напряжений на выходе комплектов между ними протекает уравнивающий ток $i_{ур}$. Для ограничения величины этого тока используют уравнивательные дроссели ($L_{ур}$).

Величина уравнивающего тока обычно составляет: $i_{ур} = 5\text{--}20\%$.

Наличие $i_{ур}$ приводит к снижению КПД преобразователя. Для измерения тока якоря нельзя использовать трансформаторы тока на входе ТП.

3.2. Комплектный электропривод постоянного тока «Кемток»

Блок-схема электропривода «Кемток» показана на рис. 3.6.

Комплектный привод выполнен на базе высокомоментного двигателя (ВМД). Силовая часть привода включает в себя согласующий трансформатор (Т), вторичная обмотка которого соединена в схему «зигзаг». Обмотка W_3 слаботочная и используется для подачи в СИФУ синхронизирующих напряжений.

Тиристорный преобразователь (ТП) выполнен по трехфазной реверсивной нулевой схеме с уравнивательными реакторами. Управление комплектами ТП – совместное на низких частотах и раздельное на высокой частоте вращения. Совместное управление обеспечивает высокое быстродействие электропривода. Переход к раздельному управлению повышает КПД тиристорного преобразователя и привода в целом.

Контактор КМ обеспечивает динамическое торможение при отключении привода от сети или исчезновении питающего напряжения. Контроль тока якоря осуществляется с помощью шунта RS.

Система управления выполнена по двухконтурной схеме подчиненного регулирования. Имеет внутренний контур регулирования тока с ПИ-регулятором тока. В состав регулятора тока (РТ)

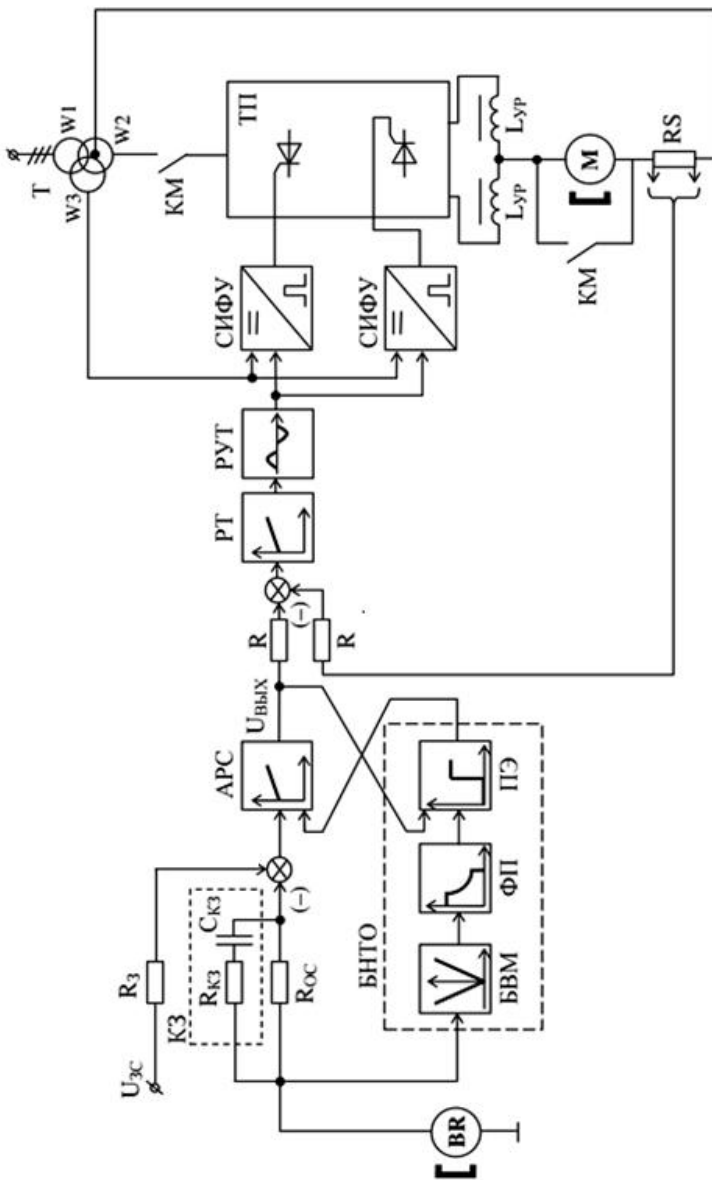


Рис. 3.6. Блок-схема комплектного электропривода «Кемток»

входит регулятор уравнивающего (начального) тока якоря (РУТ). Он задает начальный ток якоря при остановленном двигателе. Создающий начальный момент удерживает вертикальные координаты от падения.

Внешний контур регулирования скорости выполнен на базе адаптивного регулятора скорости (АРС). Он обеспечивает реализацию ПИ-регулятора и, кроме того, выполняет регулирование коэффициента передачи в функции скорости $K_{\pi} = f(\omega)$. Это позволяет скомпенсировать нелинейность регулировочной характеристики ТП. Она вызвана наличием пилообразного опорного напряжения в СИФУ. Таким образом, АРС обеспечивает высокое качество переходных процессов во всей зоне регулирования частоты вращения. На входе АРС использовано корректирующее звено (КЗ), состоящее из дифференцирующей RC-цепочки. КЗ обеспечивает увеличение запаса по фазе, а следовательно, снижает перерегулирование и колебательность замкнутого контура регулирования.

БНТО – блок нелинейного токоограничения, предназначен для ограничения тока якоря высокомоментного двигателя в функции частоты вращения в соответствии с коммутационной кривой ВМД.

БВМ – блок выделения модуля скорости.

В функциональном преобразователе (ФП) формируется коммутационная кривая, определяющая величину максимально допустимого тока якоря при данной скорости. В пороговом элементе (ПЭ) сравнивается сигнал допустимого значения тока с выхода ФП – $U_{\text{фп}}$ и сигнал с выхода АРС – $U_{\text{вых}}$, пропорциональный фактическому току якоря.

Если $U_{\text{вых}} < U_{\text{фп}}$, то пороговый элемент не действует на вход АРС. И ток ограничения не работает.

Если $U_{\text{вых}} > U_{\text{фп}}$, пороговый элемент воздействия на вход АРС, заставляет последний снижать величину выходного напряжения – $U_{\text{вых}}$, который ограничит величину тока якоря до допустимого значения.

Для перехода к раздельному управлению необходимо увеличивать угол управления комплекта, работающего в инверторном режиме несколько быстрее, чем угол комплекта, работающего в выпрямительном режиме.

Формирование управляющих импульсов для комплекта, работающего в инверторном режиме, прекратится, и в работе останется только один комплект, работающий в выпрямительном режиме.

3.3. Электроприводы с двухзонным регулированием скорости

В электроприводах с двухзонным регулированием скорости преимущественно применяются двигатели постоянного тока с независимым электромагнитным возбуждением или частотно-регулируемые электроприводы на базе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

Характеристики ДПТ для двухзонного регулирования частоты вращения показана на рис. 3.7.

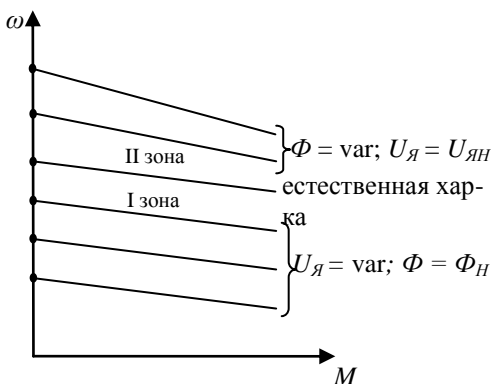


Рис. 3.7. Механические характеристики ДПТ при работе в двух зонах

В первой зоне регулируют $U_{я}$ при постоянном номинальном потоке — Φ_H , во второй зоне регулируют (ослабляют) магнитный поток электродвигателя при ($U_{я} = \text{const}$).

Математическое описание двигателя постоянного тока при регулировании напряжения $U_{я}$ и потока возбуждения существенно усложняется.

Если пренебречь влиянием реакции якоря, вихревыми токами и потоком рассеивания в магнитной системе, то можно записать следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} U_{я} &= R_{я} i_{я} + L_{я} \frac{di_{я}}{dt} + E_{д} \\ E_{д} &= c\Phi\omega \\ U_{в} &= R_{в} i_{в} + L_{в} \frac{di_{в}}{dt} \\ \Phi &= f i_{в} \\ M_{д} &= c\Phi i_{я} \end{aligned} \right\},$$

где $L_{я}$ – индуктивность обмотки якоря;
 $i_{в}, R_{в}$ и $L_{в}$ – ток, сопротивление и индуктивность обмотки возбуждения;
 c – конструктивная постоянная двигателя.

Система содержит нелинейности двух типов: первая – это нелинейная зависимость потока Φ от тока возбуждения $i_{в}$, объясняемая нелинейностью кривой намагничивания; вторая нелинейность связана с произведением переменных, определяющих $E_{д}$ и $M_{д}$. Даже если предположить магнитную систему ненасыщенной, умножение переменных оставляет систему существенно нелинейной. К этой системе уравнений необходимо добавить уравнение механического равновесия:

$$M_{д} = M_{с} + J \frac{d\omega}{dt},$$

и получим выражение, полностью описывающее двигатель постоянного тока. Усложненная структурная схема электродвигателя как объекта регулирования показана на рис. 3.8.

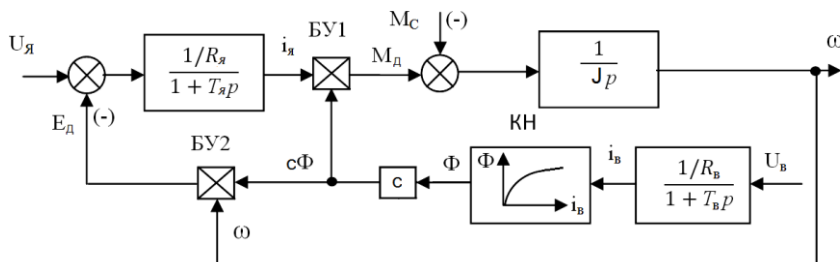


Рис. 3.8. Структурная схема двигателя постоянного тока:
 БУ1, БУ2 – блоки умножения; КН – кривая намагничивания;

$T_{я} = \frac{L_{я}}{R_{я}}$, $T_{в} = \frac{L_{в}}{R_{в}}$ – постоянные времени: якоря и возбуждения соответственно

Исходя из структурной схемы, привод должен иметь два тиристорных преобразователя: один – для питания обмотки якоря ($U_{я}$), другой – для обмотки возбуждения ($U_{в}$). В соответствии с этим образуются два канала регулирования скорости напряжением якоря – $U_{я}$ и потоком возбуждения – Φ .

Регулирование скорости изменением напряжения на якоре и изменением потока возбуждения может производиться независимо от двух автономных задатчиков.

Однако применяют двухзонное зависимое управление. При зависимом управлении магнитный поток двигателя остается номинальным до тех пор, пока частота вращения ниже номинальной. Затем повышение скорости обеспечивается за счет автоматического! ослабления магнитного потока ЭД. Блок-схема ЭП с двухзонным регулированием скорости показана на рис. 3.9.

Система управления имеет один задатчик скорости (ЗС), воздействующий непосредственно только на регулятор скорости (РС).

Система управления напряжением якоря имеет замкнутый контур регулирования скорости с регулятором скорости (РС) и подчиненный ему контур регулирования тока якоря с регулятором тока (РТ). В целом эта часть системы управления совпадает с двухконтурной системой управления электропривода. Некоторое отличие заключается в том, что если электропривод имеет большую мощность и момент инерции, то входная цепь привода имеет, как правило, задатчик интенсивности (ЗИ), ограничивающий скорость нарастания и спада управляющего сигнала. Это необходимо, чтобы избежать резких бросков тока в переходных режимах и обеспечить плавный разгон и торможение электропривода. Система управления возбуждением Φ связана с ЭДС двигателя. Поскольку ЭДС двигателя E_d зависит от потока Φ и частоты вращения ω ($E_d = c\Phi\omega$), стабилизация E_d во второй зоне приводит к тому, что частота вращения двигателя будет изменяться обратно пропорционально магнитному потоку ЭД.

Измерение E_d в статическом режиме используют в вычислительном устройстве (ВУ) путём реализации уравнения

$$E_d = U_{\text{я}} - R_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}}.$$

Сигнал, пропорциональный E_d на входе регулятора ЭДС (РЭ) сравнивается с номинальным значением ЭДС E_n . При этом начнется процесс ослабления поля. Выходной сигнал РЭ является заданием на ток возбуждения $U_{\text{звт}}$. Сигнал о фактическом значении тока возбуждения снимается с шунта $RS_{\text{в}} - U_{\text{осв}}$. Контур регулирования тока возбуждения является подчиненным контуром регулирования

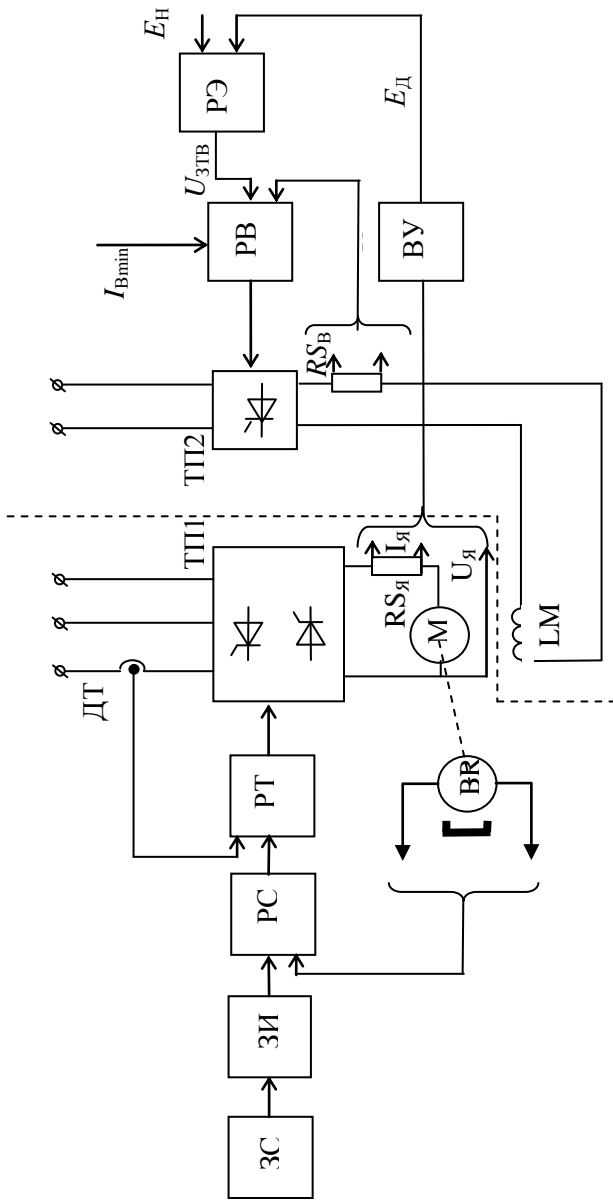


Рис. 3.9 Блок-схема электропривода с двухзонным регулированием скорости

ЭДС. Его регулятор (РЭ) управляет работой тиристорного преобразователя (ТП2), питающего обмотку возбуждения (LM). Поскольку мощность возбуждения невелика, то используют упрощенный однофазный преобразователь.

На вход регулятора возбуждения (РВ) подается третий сигнал $I_{\text{вmin}}$, ограничивающий минимальную величину тока возбуждения (следовательно, снижения магнитного потока не происходит).

До тех пор пока частота вращения двигателя меньше номинальной ($E < E_n$), регулятор ЭДС насыщен и в обмотке возбуждения протекает номинальный ток. При возрастании E_d до E_n начинается процесс ослабления потока двигателя и частота вращения двигателя будет увеличиваться ($\omega > \omega_n$).

При работе во второй зоне совместное действие РС и РЭ обеспечивает постоянную величину ЭДС, т.е. является $E_d = \text{const}$. Контуры регулирования ЭДС считают зависимым от контура регулирования скорости.

Графики изменения параметров электродвигателя при разгоне частоты вращения до максимальной величины показаны на рис. 3.10.

В качестве примера показана блок-схема системы второй зоны регулирования магнитного потока привода главного движения «Кемтор» на рис. 3.11.

Силовая часть системы регулирования тока обмотки возбуждения включает в себя полууправляемый преобразователь на базе однофазной мостовой схемы с двумя тиристорами VS1 и VS2 и двумя диодами VD1 и VD2. Для согласования напряжения сети с напряжением обмотки возбуждения LM используется трансформатор T.

В СУ привода использован упрощенный вариант без РЭ, где вместо вычисления сигнала E_d используют на входе сигнал U_d .

Блок выделения модуля (БВМ) предназначен для получения на входе однополярного сигнала напряжения якоря $|U_d|$.

В системе выполнен ПИ-регулятор тока (РТ), на вход которого подаются три сигнала: $U_{\text{вн}}$ – задающий сигнал, пропорциональный номинальному току возбуждения, $U_{\text{осв}}$ – сигнал отрицательной обратной связи по току возбуждения с выхода усилителя тока (УТ), $U_{\text{пз}}$ – сигнал с выхода порогового элемента (ПЭ). С шунта RS_B снимается сигнал о фактической величине тока возбуждения (I_B).

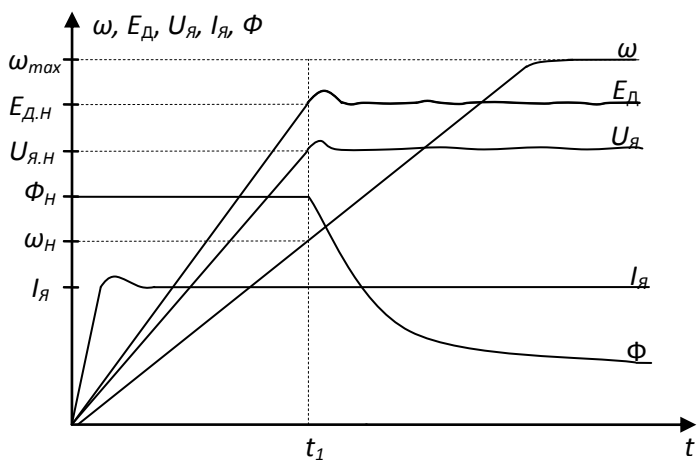


Рис. 3.10. Переходные процессы при разгоне системы от 0 до ω_{max} (при двухзонном регулировании частоты вращения)

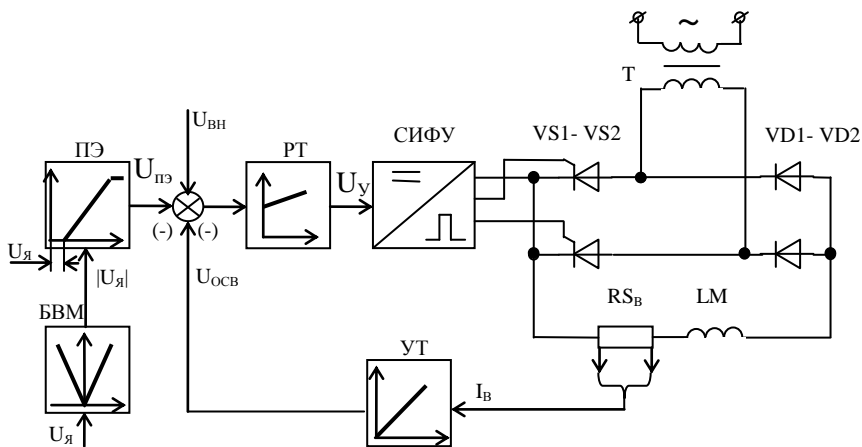


Рис. 3.11. Блок-схема системы управления током возбуждения привода «Кемтор»

При работе в первой зоне сигнал на выходе ПЭ равен нулю и снижение тока возбуждения, а следовательно, ослабление потока двигателя отсутствует. При $U_{\text{я}} > U_{\text{ян}}$ на выходе ПЭ появляется отрицательный сигнал $U_{\text{пз}}$, что приведет к снижению величины задания на ток возбуждения. При этом магнитный поток будет снижаться, а частота вращения двигателя увеличивать, переходя во вторую зону.

Библиографический список

1. **Белов, М.П.** Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов : учебник / М.П. Белов, В.А. Новиков, Л.Н. Рассудов; доп. Мин-вом образов. РФ для студ. вузов электротех. спец. – 3-е изд., испр. – М. : Академия, 2007. – 576 с.
2. **Михайлов, О.П.** Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов / О.П. Михайлов. – М. : Машиностроение, 1990.
3. **Белов, Б.А., Орлов, В.С.** Электрооборудование и электропитание береговых установок речного транспорта / Б.А. Белов, В.С. Орлов. – М. : Транспорт, 1991.
4. **Онищенко, Г.Б.** Электрический привод : учебник / Г.Б. Онищенко ; доп. Мин-вом образов. РФ для студ. вузов электротех. спец. – М. : Академия, 2006. – 288 с.

Оглавление

Введение	3
1. Сведения из теории	3
1.1. Состав электроприводов объектов водного транспорта	3
1.2. Обобщенная структура автоматизированного электропривода	4
1.3. Тенденции развития автоматизированного электропривода (на примере металлорежущих станков и промышленных роботов)	6
2. Специальные электродвигатели	9
2.1. Высокмоментные электродвигатели постоянного тока	9
2.2. Малоинерционные электродвигатели	11
2.3. Специальные электродвигатели переменного тока	13
2.4. Специальные электродвигатели для двухзонного регулирования частоты вращения	14
2.5. Показатели точности поддержания скорости и равномерности вращения	15
2.6. Моменты и силы, действующие в механических системах автоматических электрических приводов	15
3. Комплектные электроприводы	16
3.1. Комплектный электропривод БТУ 3601	16
3.2. Комплектный электропривод постоянного тока «Кемток»	23
3.3. Электроприводы с двухзонным регулированием скорости	26
<i>Библиографический список</i>	32

Григорий Иванович Коробко, Василий Владимирович Лебедев

Автоматизированные электроприводы объектов водного транспорта

Методическое пособие

Ведущий редактор *Н.С. Алёшина*

Корректор *Д.В. Богданов*, Вёрстка *М.М. Сибатулиной*

Подписано в печать 25.05.2016.

Формат 60×84 ¹/₁₆. Гарнитура «Таймс». Ризография. Усл. печ. л. 1,9.

Тираж 80 экз. Заказ 090.

Издательско-полиграфический комплекс ФГБОУ ВО «ВГУВТ»

603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5