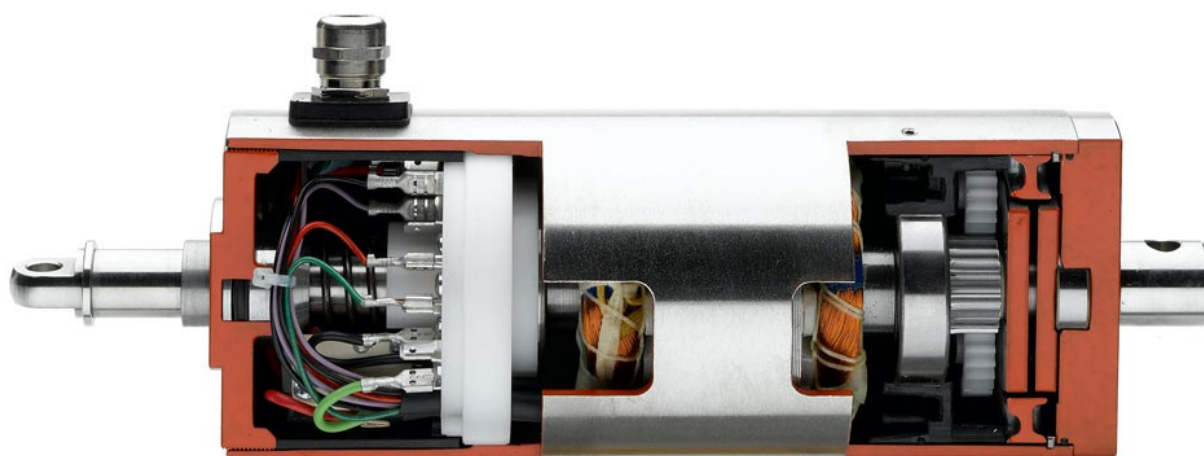


**Д.Н. Базылев, И.И. Вискнин, А.С. Кремлев,
А.А. Маргун, Р.А. Юрьева**

**ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРИВОД.
УСТРОЙСТВО И УПРАВЛЕНИЕ.**



**Санкт-Петербург
2020**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**Д.Н. Базылев, И.И. Висксин, А.С. Кремлев, А.А.
Маргун, Р.А. Юрьева**
**ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРИВОД.
УСТРОЙСТВО И УПРАВЛЕНИЕ.**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлению подготовки 12.04.01 Приборостроение
в качестве учебного пособия для реализации основных
профессиональных образовательных программ высшего образования
магистратуры,

**Санкт-Петербург
2020**

Базылев Д.Н., Виксин И.И., Кремлев А.С., Маргун А.А., Юрьева Р.А.,
Электромеханический привод. Устройство и управление.– СПб:
Университет ИТМО, 2020. – Электромеханический привод. Устройство
и управление. с.

Рецензент(ы):

Жиленков Антон Александрович, кандидат технических наук, доцент,
доцент факультета систем управления и робототехники, Университета
ИТМО.

В учебном пособии рассматривается устройство электромеханического привода, общие сведения о ролик-винтовой передачи, особенности управления и определение задачи разладки. Приводятся сведения о современных электромеханических приводах, используемых в авиа- и судостроении. Учебное пособие рекомендовано для обучающихся высших учебных заведений по направлениям подготовки 12.04.01 – Приборостроение.

Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2020

© Базылев Д.Н., Виксин И.И., Кремлев А.С., Маргун А.А., Юрьева Р.А.,
2020

Содержание

Введение	4
1 Общие сведения об ЭМП.....	5
Вопросы для самоконтроля.....	7
2 Теория РВП	7
Вопросы для самоконтроля.....	10
3 Разработка конструкции ЭМП для технологического оборудования	10
3.1 Конструкция ЭМП	10
3.2 Разработка конструкции электромеханического привода	11
Вопросы для самоконтроля.....	12
4 Система управления электромеханическим приводом	14
4.1 Преобразования систем координат	14
4.2 Математическая модель синхронного электродвигателя с постоянными магнитами	18
4.3 Векторное управление СДПМ	21
Вопросы для самоконтроля.....	24
5 Задача разладки в управлении ЭМП	25
Вопросы для самоконтроля.....	29
6 Разработка методики контроля эксплуатационных характеристик ЭМП.....	29
6.1 Программа и методика испытаний	29
6.2 Перечень испытательного и контрольно-измерительного оборудования	30
Вопросы для самоконтроля.....	31
Библиографический список	32

Введение

Поскольку Индустрия 4.0 набирает обороты, производители индустриального оборудования находятся под постоянным давлением: необходимо выполнять разработку важным отраслям промышленности высокотехнологичных машин в сжатые сроки на автоматизированном, а в перспективе и вовсе безлюдном, производстве.

При этом, учитывая, что Индустрия 4.0 подразумевает массовое внедрение киберфизических систем в производство для информирования и своевременного принятия оперативных решений в режиме реального времени, крайне важно, чтобы компоненты или системы по крайней мере были совместимы с требованиями, выдвигаемыми в рамках концепции четвертой промышленной революции, и имели возможность сетевого подключения и взаимодействия с внутренними и внешними сетями предприятия.

Всего этого можно легко достичь с помощью новых компонентов автоматизации. Чтобы обеспечить их совместимость, достаточно заменить все существующие системы, однако в реальной жизни сделать это достаточно дорогостоящее и в целом недоступно. Для этого понадобилось бы разработать множество устройств, не влияющих на имеющуюся логику управления процессами и обеспечивающих бы по меньшей мере базовое подключение к системам управления в рамках концепции Индустрии 4.0.

Что касается электромеханических приводов, являющихся темой методического пособия, то особым требованием для них является усовершенствование функциональности. Современные ЭМП уже сейчас обладают достаточным интеллектом для выполнения точного перемещения и контроля скорости. Еще одно ожидание, связанное с Индустрией 4.0, заключается в том, что системы управления приводами смогут получать данные о функциональности и производительности машины, а затем настраивать и передавать эту информацию во внешнюю среду для обработки системами аналитики больших данных.

На предприятиях и в высших учебных заведениях большое внимание должно уделяться подготовке высококвалифицированных инженерных и научных кадров, способных работать и вести научную деятельность в условиях бурной динамики развития промышленности. Факультет «Систем управления и робототехники» Университета ИТМО понимает, что большинство студентов пытаются участвовать в интересных проектах или искать работу на предприятиях с самых ранних курсов обучения с целью найти пространство для своей самореализации и построения профессиональной карьеры в самом ее начале. Факультет прикладывает все возможные усилия для создания условий, при которых студенты могли бы получать самое лучшее образование, соответствующее мировому уровню, при этом имели возможность работать или участвовать в проектах без ущерба для обучения. Методическое пособие поможет магистрантам изучить основы конструирования и разработки системы управления электромеханическим приводом.

Методическое пособие включает в себя подробное описание:

- общие сведения об электромеханическом приводе (ЭМП);
- теорию ролик-винтовой передачи в составе ЭМП;
- описание конструкции ЭМП;
- пример методики разработки системы управления ЭМП.

Пособие предназначено для обеспечения усвоения студентами учебного материала по дисциплинам «Киберфизические систем и технологии» и «Математическое и компьютерное моделирование элементов киберфизических систем» по направлениям подготовки 12.04.01 «Приборостроение». Пособие может быть использовано при самостоятельной работе студентов над теоретическим лекционным материалом.

1 Общие сведения об ЭМП

Большинство двигателей постоянного тока работают от тока, которые протекает через ротор и создает магнитное поле. Создавая петлю, катушка оборачивается вокруг ротора привода и позиционируется между полюсами постоянного магнита или электромагнита. Взаимодействие двух магнитных полей заставляет ротор вращаться вокруг своей оси, вращая вал двигателя (рис. 1, рис.2). Изменение направления тока, протекающего через ротор, приводит к тому, что ротор вращается в обратном направлении. Так электромеханический преобразователь (ЭМП) является и преобразователем электрической энергии в механический и исполнительный механизм.

Одним из основных рычагов снижения расхода топлива на уровне самолета является повышение эффективности систем управления. Сегодня они в основном снабжаются гидравлическими контурами, насосы которых приводятся в движение двигателями, а также пневматическими контурами, отбирающими сжатый воздух от двигателей, а эти различные схемы постоянно обеспечивают некоторую мощность, и, кроме того, они имеют довольно низкий коэффициент полезного действия, что ведет к некоторой большой потере энергии. Замена гидравлических приводом электромеханическими позволит значительно повысить эффективность авиационных систем и, как следствие, снизить потребление топлива на уровне двигателя, главным образом, если возможно интегрировать стратегии «мощность по запросу».

С другой стороны, гибкость, простота установки и возможный самоконтроль электрических систем позволят получить выгоду от приобретения и эксплуатации.

Электрические системы подразумевают три основные проблемы:

- демонстрация их зрелости и надежности в суровых условиях;
- оптимизация их массы;
- их безопасность и типы отказов (глава 5) с целью улучшения конфигурации.

Увеличение длительности полета регулируется элеронами, системами с высокой подъемной силой и регулируемые горизонтальными системами стабилизации.

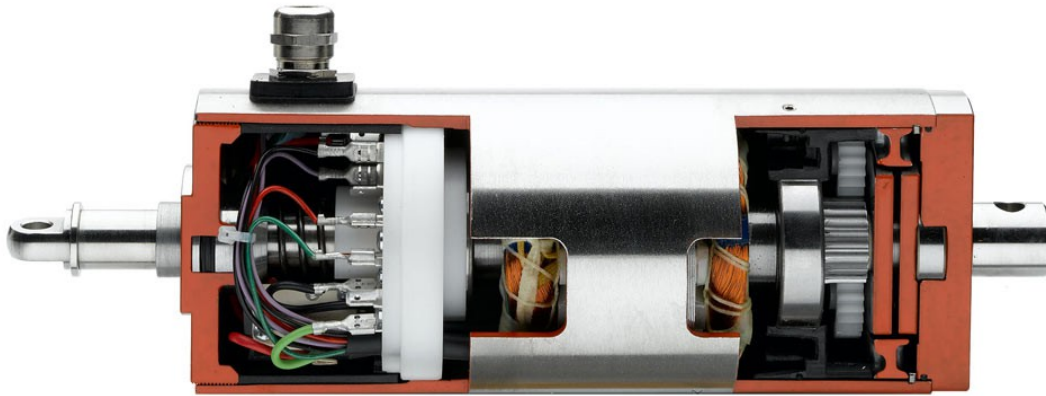


Рисунок 1 - Внешний вид ЭМП

Некоторые электрические приводы (рис.3) также могут быть использованы в качестве генераторов, как, к примеру, тяговый двигатель на транспортном средстве, который выполнять обе задачи. Электроприводы и генераторы часто называют электрическими машинами.

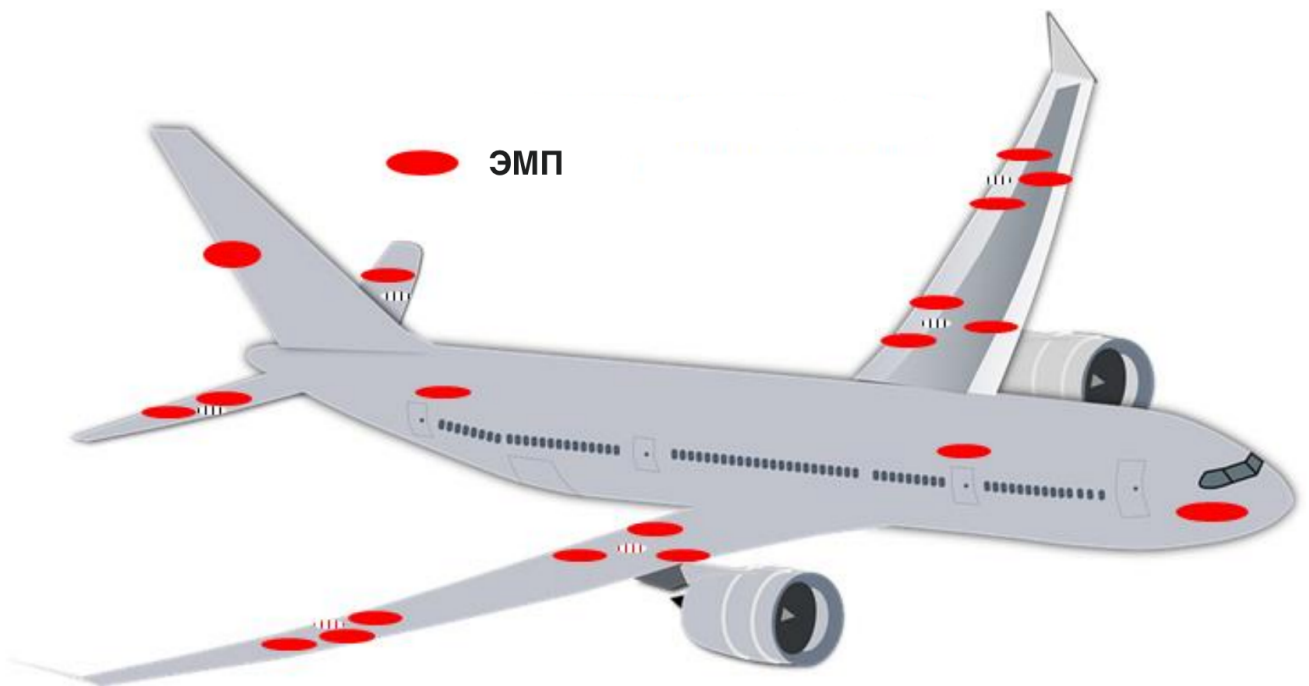


Рисунок 2 - ЭМП в самолете

Традиционные ЭМП обычно используют одно- или трехфазные асинхронные двигатели в качестве движущей силы. Проблема подобной конструкции заключается в следующем.

Когда приводу необходимо изменить направление или запустить и остановить, работа ограничивается повышением температуры двигателя и, следовательно, имеет ограниченные рабочие циклы.

Использование бесщеточного электродвигателя постоянного тока с непрерывным режимом работы и выравнивание роликовых винтов помогает устранить это ограничение.

Датчик обратной связи позволяет очень точно контролировать положение и скорость штока привода.

Говоря об ЭМП, нельзя не привести сравнение его и гидравлического привода. Гидравлические приводы имеют некоторые преимущества в определенных случаях, например, высокую удельную мощность, низкую стоимость приобретения компонентов, высокую скорость, и являются широко используемой технологией.

Однако в определенных ситуациях гидравлические приводы могут быть менее полезными для системы. Они обладают умеренной точностью и повторяемостью без дополнительной помощи дополнительного тюнинг-оборудования.

Достижения в области ЭМП включают в себя соединение роторного серводвигателя в сочетании с роторно-линейной механической трансмиссией, такой как ролико-винтовая передача (РВП).



Рисунок 3 - Вариации реализаций штока ЭМП фирмы Rollvis Swiss

Вопросы для самоконтроля.

- Какие три основные проблемы электрических систем?
- В чем отличие гидравлического привода от электромеханического?
- Каким способом можно снизить потребление топлива на уровне двигателя?

2 Теория РВП

Работа винтовой пары винт-гайка реализуется трением скольжения, двух деталей: винта и гайки (рисунок 4).

Многие столетия этот механизм используют в различных областях из-за ряда достоинств:

- простота конструкции;
- высокая грузоподъемность;
- медленное плавное перемещение исполнительной детали;
- малые габариты;
- наличие технологий, оснастки и оборудования для изготовления деталей.

Однако, у конструкции «винт-гайка» из-за реализации движения трения скольжения существует ряд серьезных недостатков при высокой скорости работы:

- низкий КПД и высокие потери;
- невозможность реализации высокой скорости выходного звена;
- быстрый износ, приводящий к непостоянности выходных параметров;
- высокие температуры из-за трения;
- необходимость постоянной подачи смазки в места контактов резьбы;
- наличие люфта (радиальных зазоров) между витками резьбы винта и гайки, приводящее к снижению точности.

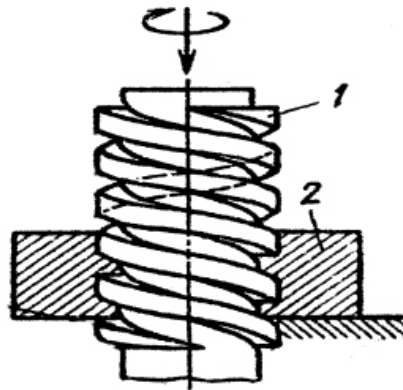


Рисунок 4 - Передача «винт-гайка» скольжения 1 – винт, 2 – гайка [1]

Последний недостаток можно решить конструктивно – добавив разрезную гайку, которую при сборке регулируют, сближая в осевом направлении, уменьшая люфт. Но это решение значительно усложнит конструкцию и сборочный процесс.

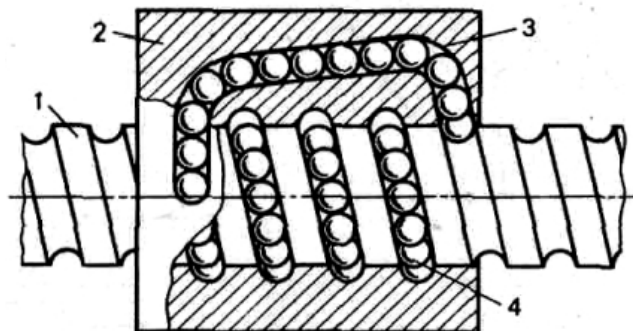


Рисунок 5 - Конструкция ШВМ: 1 – винт, 2 – шарики, 3 – гайка, 4 – механизм возврата шариков [1]

Появление шариковинтовых механизмов (ШВМ) (рисунок 5) частично устранило недостатки предыдущей конструкции, так как заменили трение скольжение трением качения. Такой переход стал допустим из-за добавления в

конструкцию тел качения между винтом и гайкой – шариков. Из-за конструктивных факторов количество точек контакта в шариковом винте ограничено размером шарика. Планетарные роликовые винты зачастую обеспечивают больше точек контакта (далее более подробно про планетарные роликовые винты), чем это возможно на шарике сопоставимого размера винту. Так как число точек контакта больше, роликовые винты имеют более высокую грузоподъемность и улучшенную жесткость. С практической точки зрения это означает, что обычно роликовый винтовой привод занимает гораздо меньше места, чтобы соответствовать заданной грузоподъемности. Движение шариков происходит по так называемым «дорожкам качения» - винтовым канавкам винта и гайки.

Шарики циркулируют по замкнутой траектории, возвращаясь в исходное положение. Конструируются механизмы с одной, двумя, но чаще с тремя группами шаров, каждая из которых независимо циркулирует по своей замкнутой траектории [3].

Основные достоинства ШВМ:

- высокая точность;
- высокий ресурс;
- высокий КПД.

Основной недостаток ШВМ:

- сложность конструкции.

Существуют два основных типа РВП:

1. Планетарные;
2. Рециркуляционные.

В инвертированном РВП вращательное движение совершает гайка, линейное перемещение – винт и ролики. Общий вид конструкции представлен на (рисунок 6).

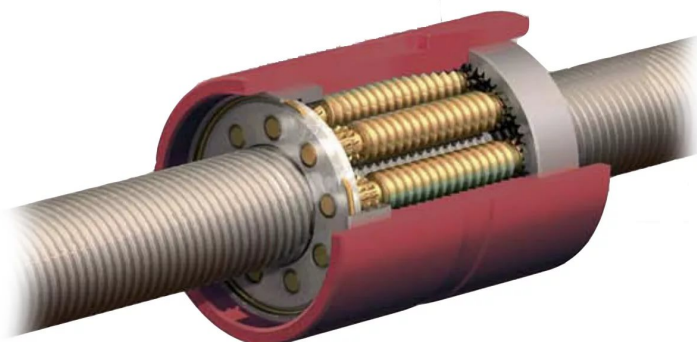


Рисунок 6 - Конструкция РВП

Данная РВП является реализующим механизмом в ЭМП линейного типа, назначение узла заключается в преобразовании вращательного движения гайки и ротора двигателя в линейное перемещение выходного штока. Линейное перемещение вдоль своих осей в данном случае будут совершать винт и ролики, гайка закреплена от поступательного перемещения в своей оси.

При проектировании деталей необходимо соблюдать важные условия для рабочих резьбовых поверхностей: длины резьбы гаек и роликов должны быть

одинаковы, а длина резьбы на гайки будет зависеть от заданных к РВП параметрам, чтобы обеспечить необходимый рабочий ход.

Данная конструкция необычна тем, что гайка так же - ротор синхронного двигателя, а значит, на поверхности гайки будут установлены магниты. Такая особенность конструкции обусловлена необходимостью уменьшения габаритных размеров конструкции ЭМП.

Типичные скорости шарикового винта ограничены 2000 об / мин из-за взаимодействия шариков, которые «трутся» друг с другом, когда вращается гонка. Напротив, ролики в РВП фиксируются планетарным способом на концах гайки и поэтому не имеют такого ограничения. Следовательно, роликовые винты могут работать при 5000 об/мин и более, производя сравнительно более высокие линейные скорости перемещения штока привода.

Вопросы для самоконтроля.

- Какие достоинства РВП Вы можете отметить?
- Какие достоинства ШВП?
- Опишите конструкцию РВП.

3 Разработка конструкции ЭМП для технологического оборудования

3.1 Конструкция ЭМП

В состав ЭМП входят роliko-винтовая передача и мощный бесщеточный электродвигатель постоянного тока, объединенные в единый узел для обеспечения исключительной производительности при компактных размерах и малой занимаемой площади.

Приводы на основе роliko-винтовой передачи хорошо подходят для применения в критически важных областях, в числе которых системы позиционирования, станки с ЧПУ, киберфизические системы для сварки, гибочные станки, машины для литья под давлением, средства цифровизации производства, а также дискретное производство.

Исходя из общих требований, решение базовой задачи проектирования ЭМП должно позволять синтезировать, оценивать и сравнивать возможные решения до начала детального проектирования.

Эти общие требования включают следующие:

1. Функциональные требования для различных режимов работы как входные данные для задачи проектирования архитектуры, которая должна определять, какие типы компонентов участвуют в работе системы и как они устроены.

2. Требования к производительности и конструктивные ограничения, в качестве входных данных для многоцелевого определения размеров компонентов.

При работе с этими требованиями на основе моделей разработчик часто не может быстро получить соответствующие параметры моделей компонентов. Чтобы сгенерировать модель оценки из уменьшенного числа ключевых данных, предложено классифицировать данные требования следующим образом.

1. Параметры интеграции, необходимые для оценки массы и основных размеров компонентов.

2. Параметры моделирования, необходимые для определения размеров из динамического моделирования (например, инерция или движущаяся масса, теплоемкость и соответствие редуктора).

3. Параметры рабочей области, необходимые для проверки использования компонента, например, срок службы или безопасные рабочие зоны.

На рисунке 7 представлена базовая конструкция ЭМП, на рисунке 8 – сборка роliko-винтовой передачи.

Конструкция привода обусловлена следующими основными аспектами для удовлетворения различных требований: интеграция (масса, геометрическая оболочка) между планером и нагрузкой, устойчивость к окружающей среде (тепловая и вибрационная) [37], мгновенная экономия энергии, динамические характеристики, срок службы, надежность и устойчивость к отказам.

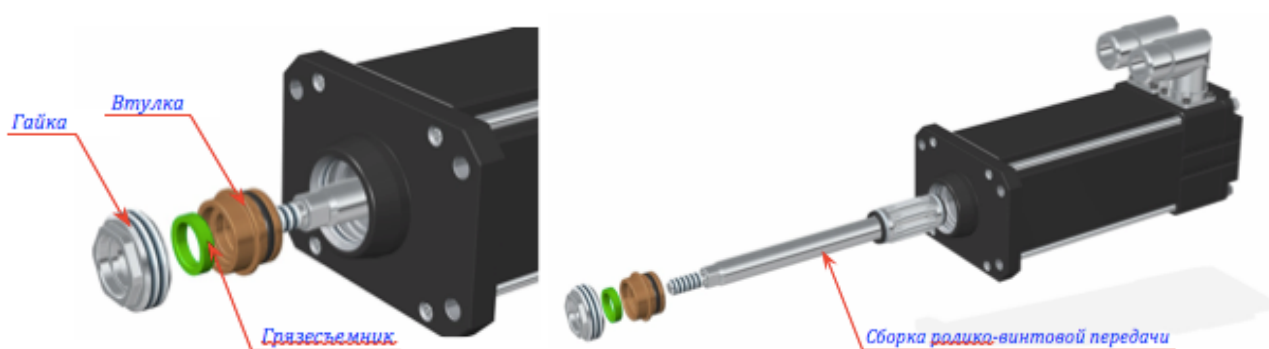


Рисунок 7 - Сборка роliko-винтовой передачи

3.2 Разработка конструкции электромеханического привода

Новые технологии ставят новые задачи, особенно для процесса предварительного проектирования исполнительных систем и компонентов. Основные технические характеристики представлены в таблице 1:

Таблица 1. Основные характеристики ЭМП

Наименование характеристики	Обозначение	Единица измерения
Диапазон перемещений выходного штока	l	мм
Номинальное усилие на выходном штоке	F_n	Н
Максимальная скорость перемещения выходного штока, не менее,	u	мм/с
Максимальное допустимое усилие на выходном штоке	F_n	Н
Осевой люфт выходного штока при 3% от номинального усилия, не более	$S_{o\pm 3\%}$	мм
Упругий мертвый ход выходного штока	$S_{o\pm 3:100\%}$	мм
Кинематическая погрешность РВП, не более	e_p	мм
Ошибка позиционирования при номинальном усилии на выходном штоке, не более	Δl	мм

Динамическая грузоподъемность, не менее	C_a	H
Ресурс при номинальном усилии, не менее	L_h	ч
Сопrotивление обмоток	R_{L-L}	Ом
Потребляемая мощность	$P_{вх}$	кВт
Механическая мощность	N	кВт
Кoэффициент полезного действия	η	%
Потребляемый ток на номинальном усилии, не более, 400 В (230 В)	I_n	A
Потребляемый ток при максимальном допустимом усилии, не более 400 В (230 В)	I_n	A
Степень защиты оболочек	IP	–

Сегодня конструкция и оптимизация ЭМП автоматизирована. Используя программное обеспечение, свойства ЭМП могут быть смоделированы, включая все электронные источники питания и механические воздействия машины. Концепция Индустрии 4.0 требует интеллектуальных современных ЭМП должны иметь самопрогнозирование/диагностику, чтобы оценить их надежность и дать уведомление о замене до поломки (глава 5).

Таким образом, больше не имеет смысла переходить к определению размеров по точкам (как для гидравлических приводов). Вместо этого необходимо принимать во внимание профили, охватывающие все возможные драйверы определения размеров (например, максимальную скорость и крутящий момент, усталость, термическое поведение, вибрации и удары) и учитывающие различные критерии проектирования (например, геометрический охват, вес и надежность). Для этой цели должны быть разработаны соответствующие инструменты оценки верхнего уровня для поддержки эффективного предварительного проектирования.

Современное состояние также выдвигает на первый план различные стадии дизайна, которые встречаются в ранних предварительных исследованиях. Затем была предложена классификация проектных параметров, связанных с этими этапами, чтобы вписаться в модельный подход к проектированию. Быстрое и простое получение этих параметров является критической проблемой для расчета размеров и раннего моделирования.

Вопросы для самоконтроля.

- Какие основные требования к ЭМП Вы можете назвать?
- Как оценить ЭМП?
- Назовите основные характеристики ЭМП.

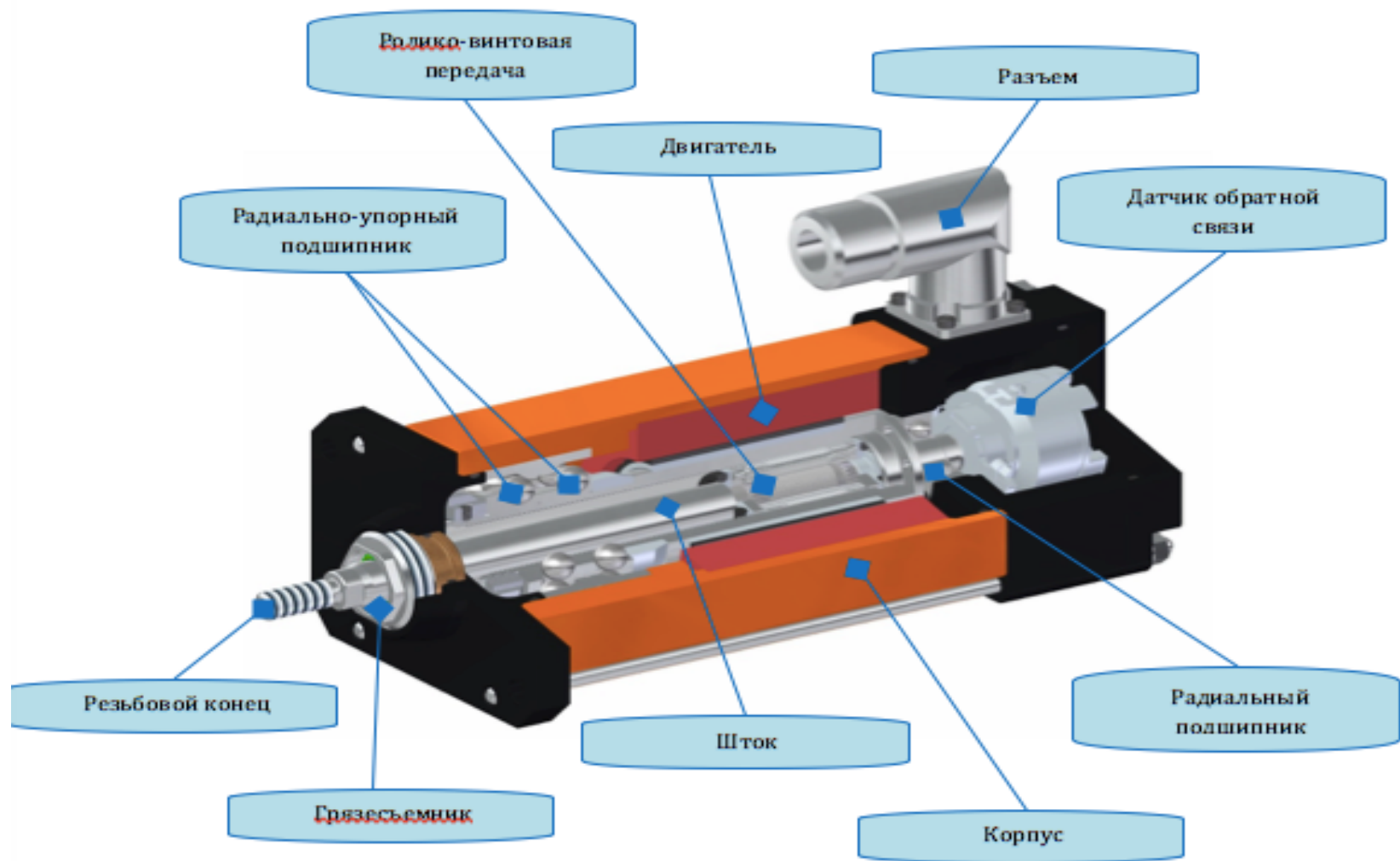


Рисунок 8 - Базовая конструкция ЭМП

4 Система управления электромеханическим приводом

Для изучения принципов управления синхронным электродвигателем с постоянными магнитами построим его математическую модель, после чего рассмотрим векторный подход к задаче управления.

4.1 Преобразования систем координат

Токи, потоки, напряжения двигателя переменного тока могут быть представлены как векторы в некоторой системе координат. В зависимости от используемой системы координат соотношения, описывающие процессы, происходящие в двигателе, будут иметь различный вид. Рассмотрим системы координат, используемые при описании синхронных двигателей [2].

4.1.1 Неподвижная трехфазная система координат

Данная система получила свое распространение в связи с широким использованием трехфазных двигателей в промышленности. Рассматриваемая система координат имеет три оси, расположенные на плоскости под углом в 120° друг к другу с точкой пересечения в начале координат.

Использование данной системы позволяет отобразить процессы, происходящие в двигателе, на плоскость при представлении токов, напряжений и потокосцеплений в виде вращающихся векторов (рисунок 18).

Например, трехфазный ток в обмотках статора двигателя можно представить в виде вектора I_s с амплитудой, соответствующей фазному току, центром в начале координат и угловой скоростью вращения, соответствующей частоте питающего напряжения.

Для удобства можно считать, что неподвижная трехфазная система координат ориентирована по статору, а ее оси совпадают с электрическими осями соответствующих обмоток двигателя.

При этом ток в каждой из фаз (I_{SA}, I_{SB}, I_{SC}) будет изменяться по синусоидальному закону с частотой питания, амплитудой I_s и сдвигом фаз в 120° относительно друг друга.

Отметим, что всегда будет выполняться условие симметрии трехфазной системы:

$$I_{SA} + I_{SB} + I_{SC} = 0. \quad (1)$$

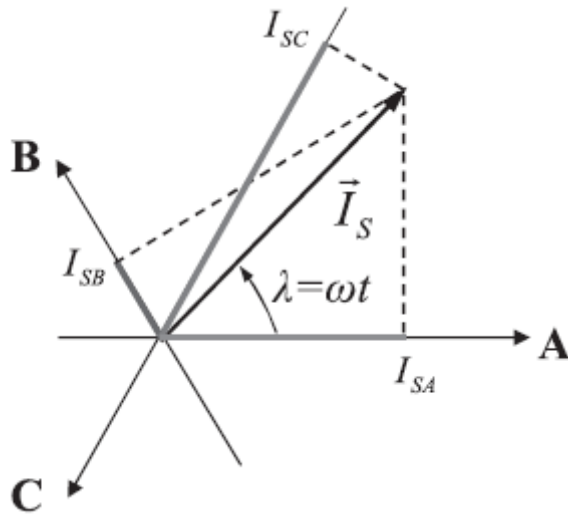


Рисунок 9 - Трехфазная система координат

4.1.2 Неподвижная Декартова система координат

Данная система координат имеет две взаимно перпендикулярные оси α с и β началом в центре трехфазной системы координат (рисунок 11).

Переход из трехфазной системы в Декартову используется для упрощения расчетов и снижения сложности математического описания.

Данную замену координат называют переходом от реальной физической трехфазной машины к обобщенной двухфазной или преобразованием Кларк.

Переход осуществляется по уравнениям:

$$\begin{aligned} I_{\alpha} &= I_{SA}, \\ I_{\beta} &= \frac{I_{SB} - I_{SC}}{\sqrt{3}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Обратное преобразование:

$$\begin{aligned} I_{SA} &= I_{\alpha}, \\ I_{SB} &= \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\beta} - \frac{1}{2} I_{\alpha}, \\ I_{SC} &= -\frac{1}{2} I_{\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\beta}. \end{aligned} \quad (3)$$

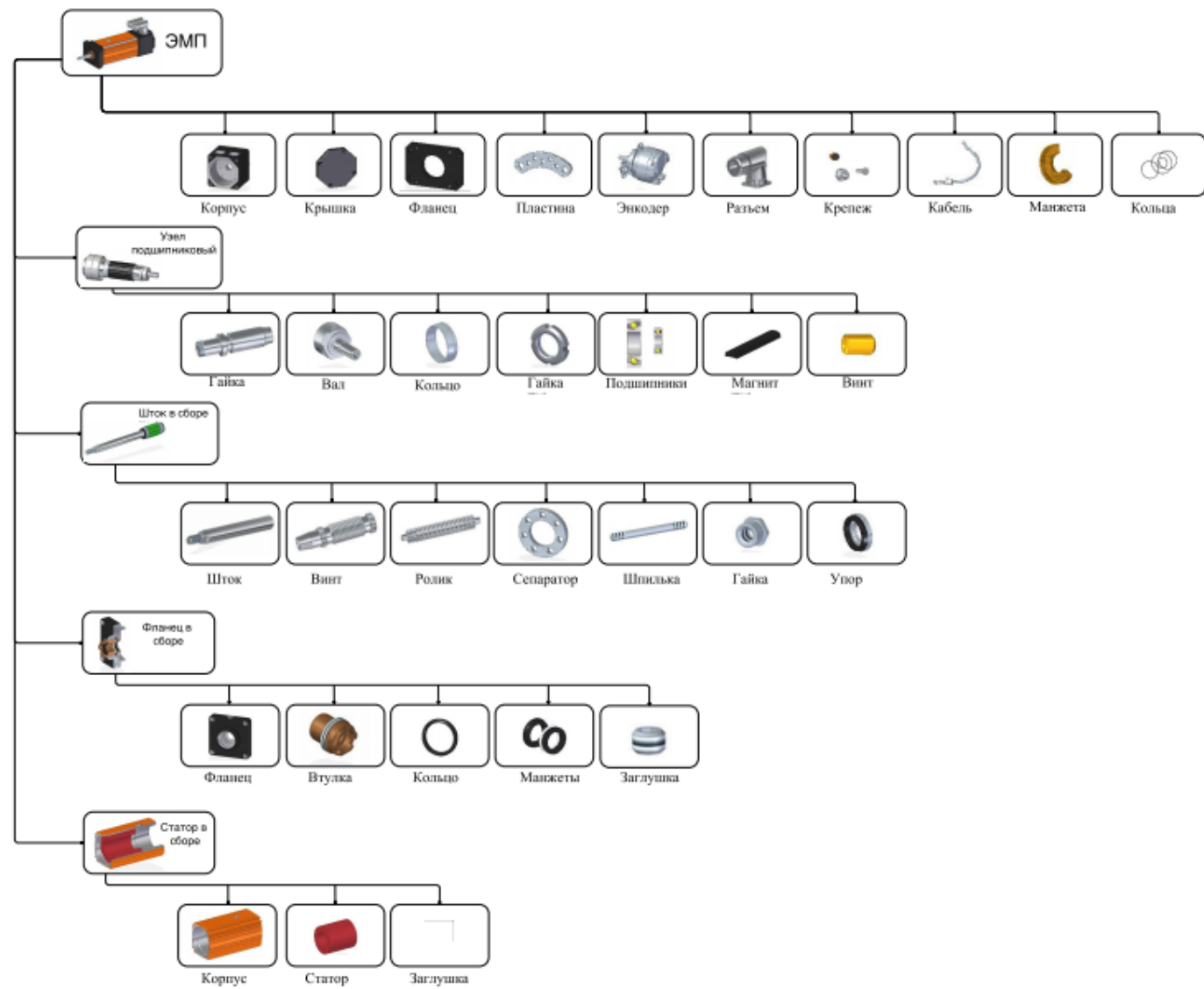


Рисунок 10 - Составные детали описываемого ЭМП

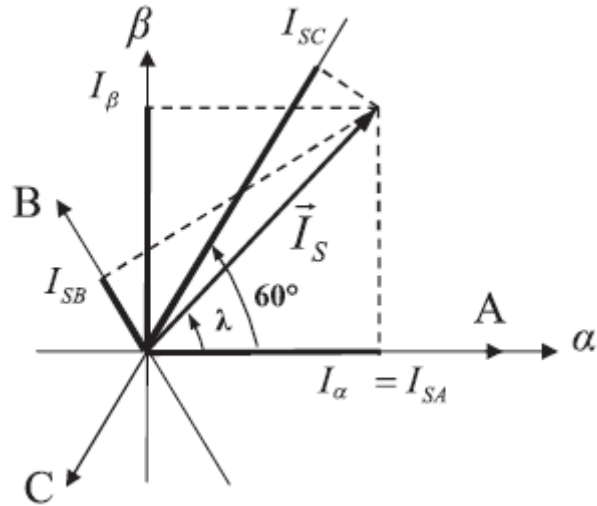


Рисунок 11 - Неподвижная Декартова система координат

Иногда удобно описывать вектора в системе $\alpha\beta$, пользуясь математическим аппаратом комплексной плоскости. При этом ось β считают мнимой, а ось α – вещественной.

Вращающаяся Декартова система координат.

Данная система координат имеет две перпендикулярные оси d и q , вращающиеся с произвольной скоростью ω_K относительно начала координат (рисунок 12).

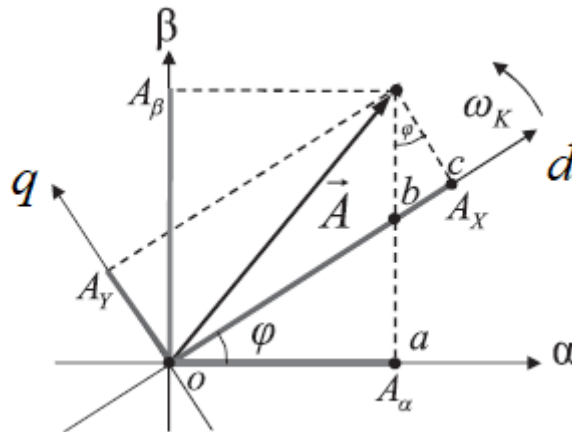


Рисунок 12 - Вращающаяся Декартова система координат

Переход от неподвижной к вращающейся системе координат (преобразование Парка) можно получить геометрически или с использованием комплексных чисел:

$$\begin{aligned} A_d &= A_\alpha \cos \varphi + A_\beta \sin \varphi, \\ A_q &= A_\beta \cos \varphi - A_\alpha \sin \varphi. \end{aligned} \quad (4)$$

Обратное преобразование:

$$\begin{aligned} A_{\alpha} &= A_d \cos \varphi - A_q \sin \varphi, \\ A_{\beta} &= A_d \sin \varphi + A_q \cos \varphi. \end{aligned} \quad (5)$$

Вращающаяся система координат, на первый взгляд, кажется достаточно искусственной, но именно в ней основаны современные системы векторного управления. Система управления строится в системе координат, вращающейся вместе с управляемым вектором. Дело в том, что в такой системе дифференциальные уравнения, описывающие двигатель, принимают простейший вид, схожий с динамическим описанием двигателя постоянного тока. Кроме того, поскольку управляемый вектор не вращается относительно данной системы координат, его амплитуда и фаза определяются двумя скалярными величинами проекций на оси координат этой системы. Следовательно, управление двигателем, в данном случае, можно свести к управлению величиной и знаком его проекций. Вращение системы учитывают с помощью рассмотренных выше формул координатных преобразований, измеряя или вычисляя угол ее поворота относительно неподвижной системы координат.

4.2 Математическая модель синхронного электродвигателя с постоянными магнитами

Самым простым примером синхронной машины с постоянными магнитами является компас: его магнитная стрелка является ротором, вращающимся под действием магнитного поля статора - Земли. В синхронном приводе магнитное поле создается электромагнитами, расположенными на статоре, представляющими из себя катушки, по которым течет ток. Схематично принцип действия изображен на рисунке 21:

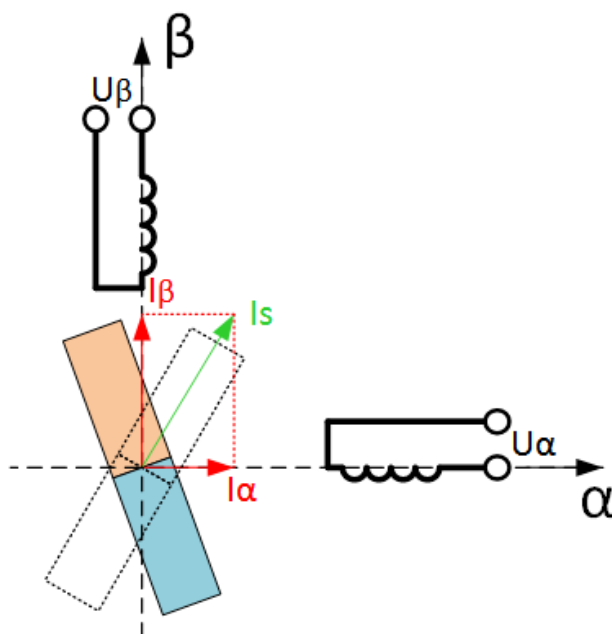


Рисунок 13 - Принцип действия синхронной электрической машины

Магнитный поток поля катушки пропорционален силе тока, протекающего через него. Магнитные потоки двух перпендикулярно расположенных катушек векторно складываются, образуя для взаимодействия с ротором один общий поток. Но так как поток пропорционален току в катушке, удобно рисовать непосредственно вектора токов, сонаправив их с потоком. На рисунке изображены токи i_{α} , i_{β} , создающие магнитные поля по осям α и β , соответственно. i_s обозначает

равнодействующую от двух токов. На рисунке ротор расположен в произвольном положении, но из этого положения ротор будет стремиться повернуться согласно магнитному потоку статора, т.е. по вектору i_s (положение ротора в этом случае показано пунктирной линией). Соответственно, если подать ток только в фазу α , ротор встанет горизонтально, а если в β , то вертикально. Если подать ток i_α по закону синуса, а i_β по закону косинуса от времени, то будет создано вращающееся магнитное поле. Ротор будет следовать за ним и вращаться (как стрелка компаса следует за вращением магнита руками). Это базовый принцип работы синхронной машины, в данном случае двухфазной с одной парой полюсов [1].

На Рисунок 14 приведена зависимость момента, развиваемого двигателем, в зависимости от угла между валом ротора и вектором тока I_s (угловая характеристика).

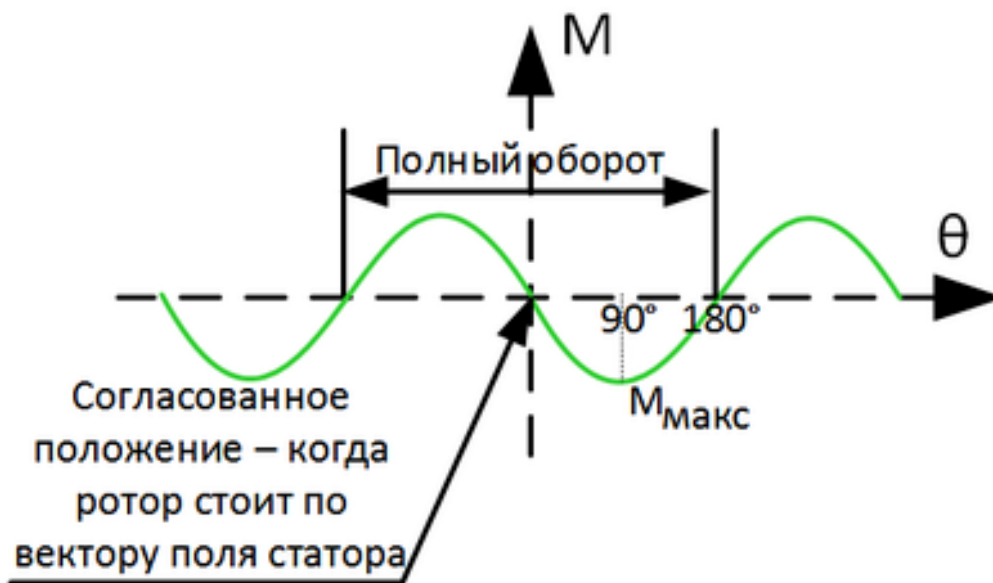


Рисунок 14 - Угловая характеристика синхронного двигателя

Из этой характеристики следует, что двигатель развивает наибольший момент, когда вектор магнитного поля ротора перпендикулярен вектору тока. Соответственно из соображений повышения эффективности при управлении двигателем мы должны выдерживать угол 90° между внешним магнитным полем статора и магнитным полем ротора. При этом момент двигателя регулируется амплитудой силы тока, проходящего через обмотки статора.

Рассмотрим классическую динамическую модель двухфазного ненасыщенного синхронного двигателя с постоянными магнитами [2], [3]:

$$\begin{aligned} \dot{\lambda}_{\alpha\beta} &= v_{\alpha\beta} - Ri_{\alpha\beta}, \\ j\dot{\omega} &= -f\omega + \tau_e - \tau_L, \\ \dot{\theta} &= \omega, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\lambda_{\alpha\beta}^T = [\lambda_\alpha \ \lambda_\beta]$ – вектор общего магнитного потока, состоящий из составляющих λ_α и λ_β – магнитных потоков, порождаемых обмотками статора;

$i_{\alpha\beta}^T = [i_\alpha \ i_\beta]$ – силы токов, протекающих через обмотки статора;

$v_{\alpha\beta}^T = [v_\alpha \ v_\beta]$ – напряжения обмоток статора;

$R > 0$ – сопротивление обмоток статора;

$j > 0$ – момент инерции ротора;

$\theta \in S := [0, 2\pi)$ – механическое угловое положение ротора;

$\omega \in R$ – механическая угловая скорость ротора;

$f \geq 0$ – коэффициент вязкого трения;

$\tau_L \in R$ – момент внешней нагрузки;

τ_e – момент сил, развиваемый двигателем.

Электрические угол и скорость магнитного поля ротора связаны с механическими через число пар полюсов n_p :

$$\begin{aligned}\theta_e &= n_p \theta, \\ \omega_e &= n_p \omega\end{aligned}\quad (7)$$

Для синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ) и неявнополюсным ротором индуктивности обмоток статора L_d и L_q во вращающейся системе координат dq , связанной с магнитным полем ротора равны:

$$L = L_d = L_q. \quad (8)$$

Тогда общий магнитный поток может быть представлен в виде

$$\lambda_{\alpha\beta} = Li_{\alpha\beta} + \lambda_m C(\theta), \quad (9)$$

где L – индуктивность статора, λ_m – магнитный поток, генерируемый постоянными магнитами ротора, а вектор $C(\theta) = \text{col}(\cos(n_p\theta), \sin(n_p\theta))$ введен для удобства обозначений.

Дифференцируя (8) получим

$$\dot{\lambda}_{\alpha\beta} = L \frac{di_{\alpha\beta}}{dt} + \lambda_m \omega C'(\theta), \quad (10)$$

где для простоты векторной записи часть производной вектора $C(\theta)$ обозначена в виде $C'(\theta) = n_p J C(\theta)$ с матрицей поворота $J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$.

Тогда комбинируя (10) и первое уравнение системы (6) получим уравнение, описывающее динамику токов:

$$\frac{di_{\alpha\beta}}{dt} = \frac{1}{L} \left(-Ri_{\alpha\beta} + v_{\alpha\beta} - \lambda_m \omega C'(\theta) \right) \quad (11)$$

Момент, генерируемый СДПМ, определяется как

$$\tau_e = n_p (\lambda_\alpha i_\beta - \lambda_\beta i_\alpha). \quad (12)$$

Заметим, что τ_e может быть представлен в виде

$$\tau_e = n_p i_{\alpha\beta}^T J \lambda_{\alpha\beta} = \lambda_m i^T C'(\theta). \quad (13)$$

Таким образом, динамика СДПМ описывается системой дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned}
L \frac{di_{\alpha\beta}}{dt} &= -Ri_{\alpha\beta} + v_{\alpha\beta} - \lambda_m \omega C'(\theta), \\
j\dot{\omega} &= -f\omega + \lambda_m i^T C'(\theta) - \tau_L, \\
\dot{\theta} &= \omega.
\end{aligned} \tag{14}$$

4.3 Векторное управление СДПМ

Будем считать, что постоянные параметры двигателя R, L, λ_m, j, n_p известны, а переменные $i_{\alpha\beta}, v_{\alpha\beta}, \theta(t), \omega(t)$ являются измеряемыми величинами. Также допустим, что двигатель является идеальным, т.е. отсутствуют потери, связанные с силами трения: $f = 0$.

Ставится задача разработать систему управления моделью СДПМ, которая обеспечивает слежение за заданной скоростью $\omega^*(t)$.

При векторном регулировании СДПМ осуществляется управление электромагнитным моментом путем разложения тока статора на составляющие, пропорциональные величине магнитного потока ротора и величине электромагнитного момента, генерируемого двигателем.

Рассмотрим первое уравнение системы (13). Заметим, что правая часть данного уравнения содержит члены, умноженные на гармонические функции угла θ_e . Наличие таких нелинейных связей существенно усложняет решение дифференциальных уравнений. Для упрощения выполняется перепараметризация модели - переход в вращающуюся систему координат dq , связанную с ротором.

Данный переход выполняется с помощью преобразования Парка (см. раздел 5.1)

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_e & \sin \theta_e \\ -\sin \theta_e & \cos \theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix}. \tag{15}$$

Получим уравнение для общего магнитного потока (9) в новой системе координат dq

$$\begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda_q \end{bmatrix} = L \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \lambda_m \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}. \tag{16}$$

Первое уравнение системы (19) примет вид

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + L \begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -n_p \omega L i_q \\ n_p \omega (L i_d + \lambda_m) \end{bmatrix}. \tag{17}$$

Момент, развиваемый двигателем в новых координатах, определяется как

$$\tau_e = n_p (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d). \tag{18}$$

Ток i_d пропорционален величине магнитного потока, а ток i_q пропорционален величине электромагнитного момента. В связи с этим опорный ток i_d^* задают нулевым, а управление электромагнитным моментом осуществляют заданием i_q^* . Выбор нулевого тока i_d^* связан с наличием постоянных магнитов в роторе, которые генерируют постоянный поток. Также это приводит к уменьшению тока статора и повышению эффективности работы двигателя.

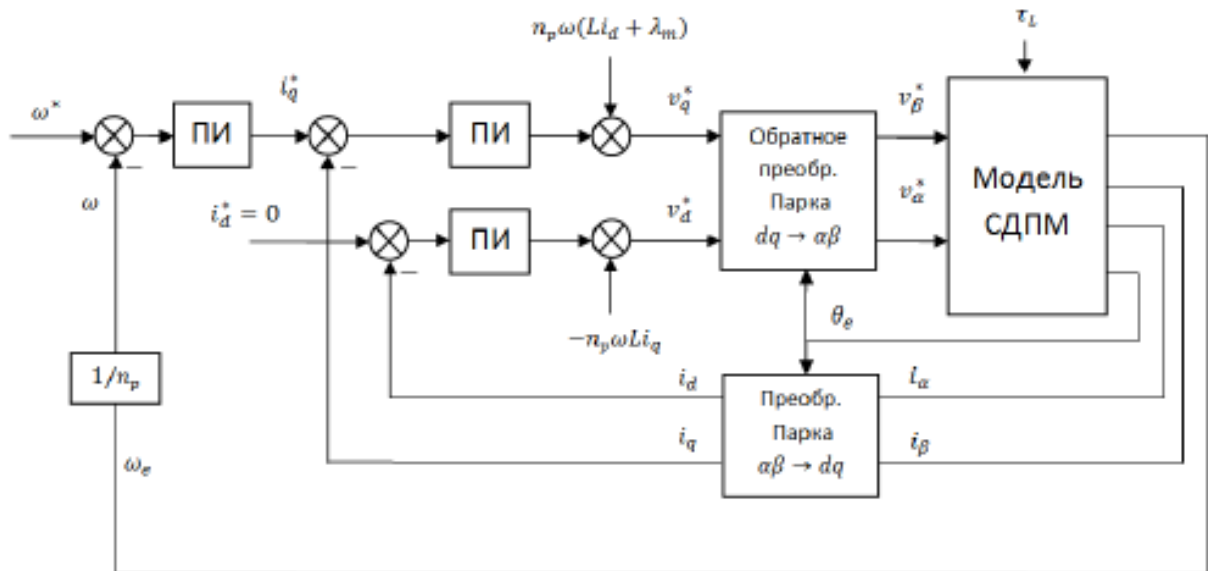


Рисунок 15 - Схема векторного управления СДПМ

Типовая схема векторного управления приведена на рисунке 15. Выходными переменными модели двигателя являются токи $i_{\alpha\beta}$, а также угловое положение θ_e и скорость вращения ω_e магнитного поля ротора. Входами СДПМ являются напряжения $v_{\alpha\beta}$. Проекции токов i_{dq} во вращающейся системе координат рассчитываются с помощью преобразования Парка (20). Схема управления содержит контур d , контролирующий общий магнитный поток, а также контур q , который регулирует момент и скорость двигателя. Контур по d включает в себя ПИ-регулятор по току i_d с нулевым задающим воздействием. Контур по q содержит два последовательно соединенных регулятора. Внутренний является ПИ-регулятором по току i_q . Задающий сигнал для i_q^* поступает от внешнего ПИ-регулятора по скорости. Управление моментом с помощью i_q осуществимо, поскольку при $i_d = 0$ уравнение (23) имеет вид

$$\tau_e = n_p \lambda_d i_q. \quad (19)$$

Заметим, что уравнения (24) содержат перекрестные связи по осям d и q . Ввиду этого, для обеспечения полностью независимого управления напряжениями статора, ПИ-регулятор по току дополняется компенсацией противо-ЭДС и развязывающими членами

$$\begin{bmatrix} v_d^* \\ v_q^* \end{bmatrix} = (\text{PI}) \begin{bmatrix} i_d^* - i_d \\ i_q^* - i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -n_p \omega L i_q \\ n_p \omega (L i_d + \lambda_m) \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Далее, с помощью обратного преобразования Парка выполняется переход v_{dq}^* к $v_{\alpha\beta}^*$.

Коэффициенты ПИ-регуляторов тока и скорости могут быть выбраны с привлечением теории модального управления. Для этого необходимо:

- построить соответствующие передаточные функции $W_d(s) = \frac{i_d(s)}{i_d^*(s)}$, $W_q(s) = \frac{i_q(s)}{i_q^*(s)}$ и $W_\omega(s) = \frac{\omega(s)}{\omega^*(s)}$;
- выбрать желаемые характеристические полиномы (например, Ньютона или Баттерворта);

- за счет выбора коэффициентов регулятора привести характеристические полиномы передаточных функций $W_d(s)$, $W_q(s)$ и $W_\omega(s)$ к желаемым.

Также коэффициенты ПИ-регуляторов могут быть настроены экспериментально с использованием методов Циглера-Николса [4] или Чьена-Хронеса-Резвика [5]. Также возможно применение расчетных методов, описанных в [6].

Пример

Рассмотрим СДПМ ВМР0701F с параметрами, приведенными в таблице 2.

Таблица 2 - Параметры СДПМ

Параметр	Обозначение	Величина
Число пар полюсов	n_p	3
Магнитный поток, Вб	λ_m	0.162
Момент инерции, кг·м ²	j	0.1
Индуктивность, Гн	L	0.007
Сопротивление, Ом	R	0.0065

Для данного привода были выбраны следующие параметры регулятора на основе модального управления:

- Регулятор скорости: $k_p = 640, k_i = 1280$;
- Регулятор i_d : $k_p = 17.5, k_i = 0.6935$;
- Регулятор i_q : $k_p = 640, k_i = 1280$.

Результаты компьютерного моделирования приведены на рис.18 – 21.

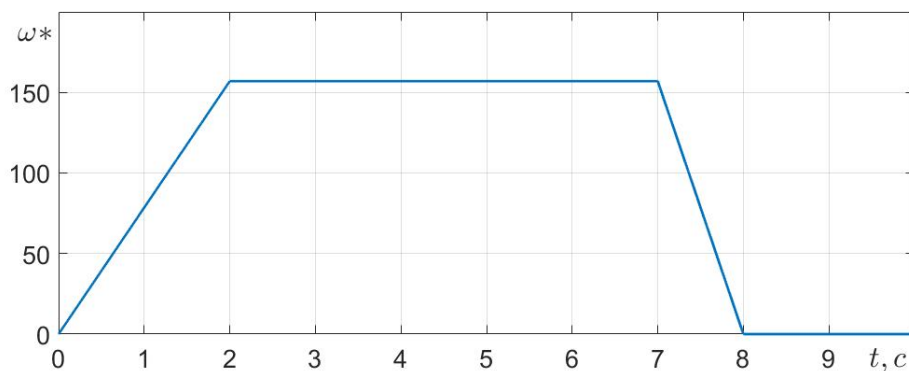


Рисунок 16 - Желаемая скорость вращения СПДМ

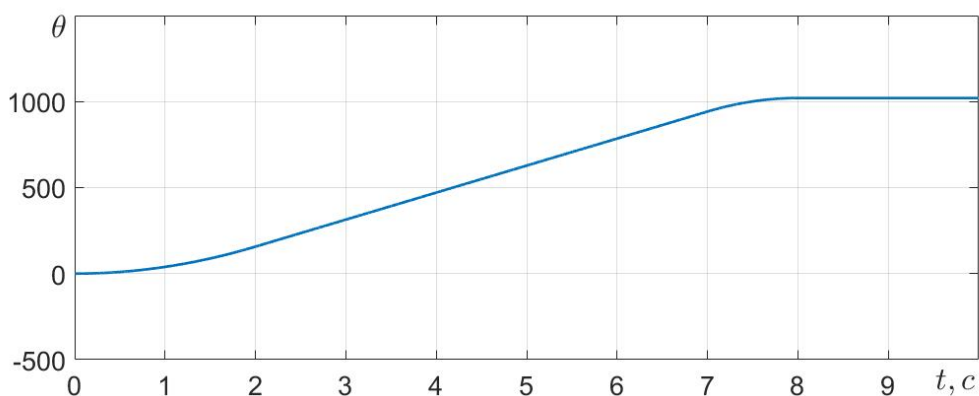


Рисунок 17 - Угол поворота СПДМ

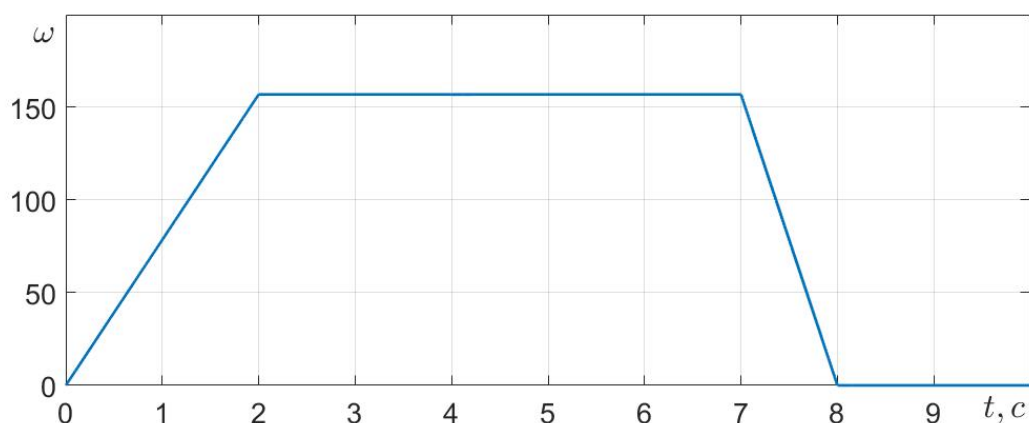


Рисунок 18 - Скорость вращения двигателя

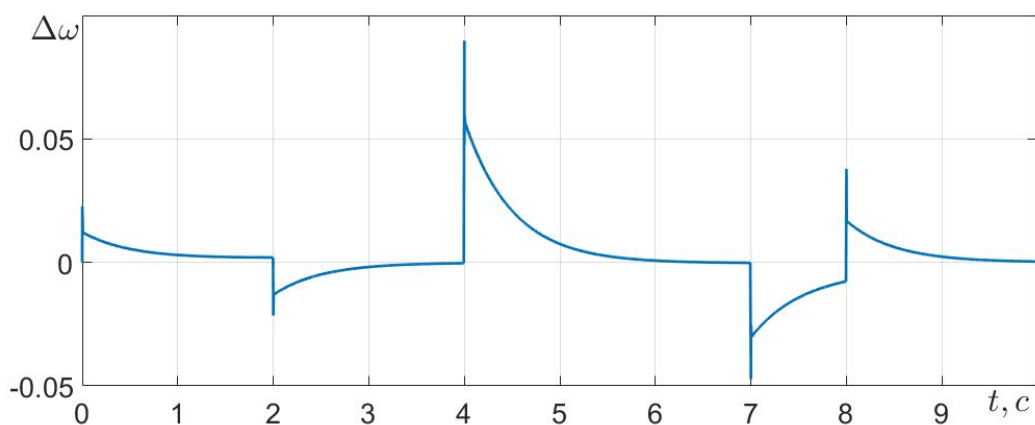


Рисунок 19 - Рассогласование между желаемой и фактической угловой скоростью

Как видно из результатов моделирования, векторный метод управления обеспечивает слежение угловой скорости вращения вала за желаемой с высокой степенью точности. Обеспечение желаемой точности слежения и времени переходного процесса может быть выполнено путем настройки коэффициентов регулятора.

Вопросы для самоконтроля.

- Как преобразовать систему координат при построении системы управления ЭМП?

- Как построить математическую модель ЭМП?
- Что такое «векторное управление»?
- Как найти рассогласование между желаемой и фактической скоростями

5 Задача разладки в управлении ЭМП

Разладка – некоторое изменение характеристик в наблюдаемой системе. Не имеет значение, в худшую или лучшую сторону произошло изменение, оно все равно называется разладкой. Обнаружение разладки позволит принять большое количество оптимизационных решений – от количества деталей, необходимого для изготовления для выполнения плана (с учетом наличия бракованных деталей), до даты обслуживания станка. Возможность обнаружения разладки называется наблюдаемостью системы – определение расхождения штатного режима работы системы и реального при отсутствии внешних факторов.

В контексте Индустрии 4.0 и цифровизации производства все актуальной становится контроль состояния системы на основе ее цифрового двойника (рис.19).

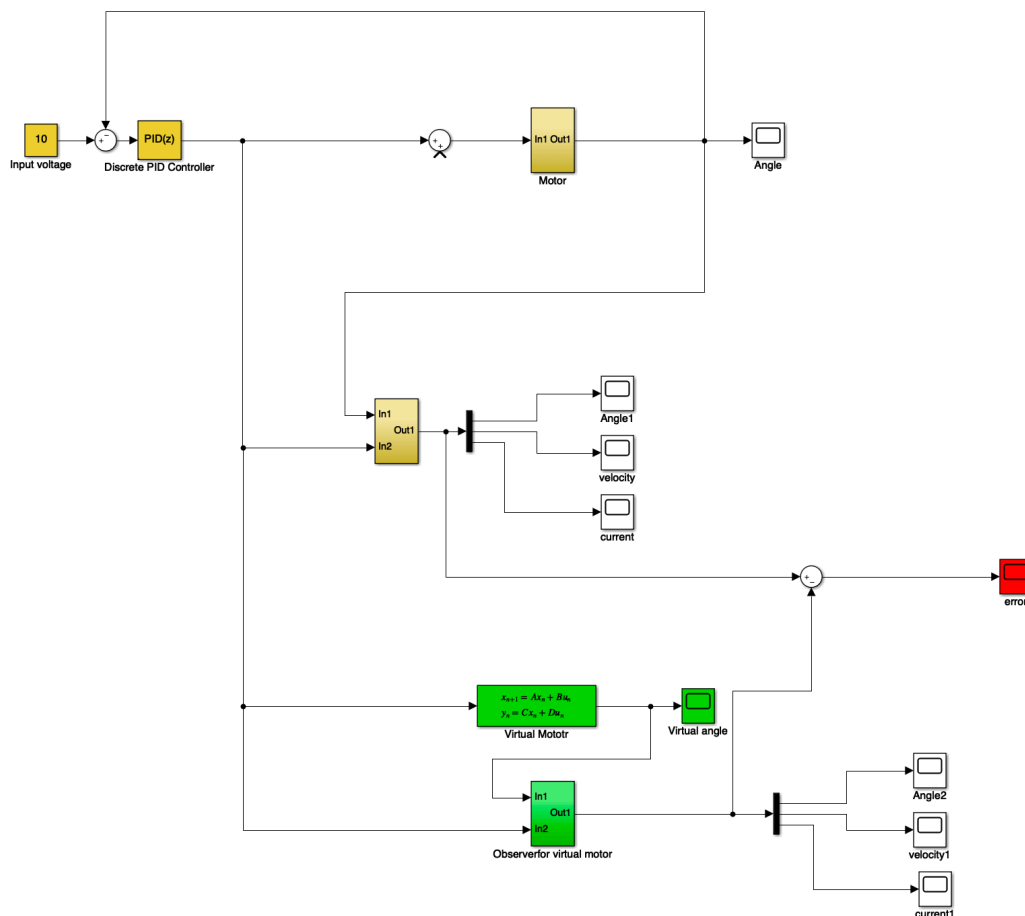


Рисунок 20 - Цифровой двойник электромеханического привода

Полученная в результате моделирования цифровая тень позволяет проанализировать наличие разладки в системе (по току, скорости, углу поворота), предсказать дальнейшее поведение, а также сделать вывод о необходимости немедленной остановки работы системы или ее надежности.

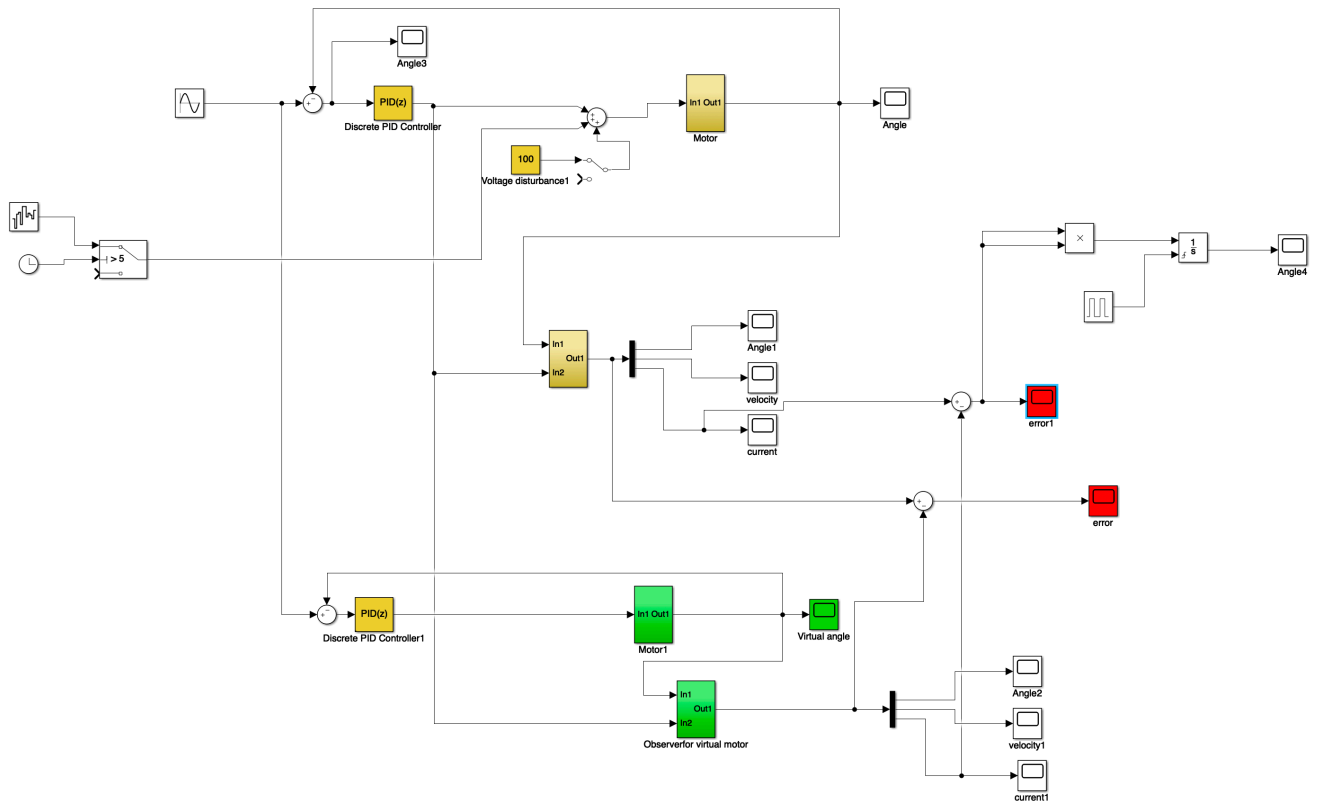


Рисунок 21 - Обнаружение разладки в работе привода на основе виртуальной модели

При наличии внешних деструктивных воздействий на систему (рис. 20) появляются различия между нормальным поведением, представленным виртуальной моделью, и реальным поведением объекта (рис.21).

Разладка может быть критичной для работы системы. В таком случае необходимо остановить работу системы и провести внеплановую проверку.

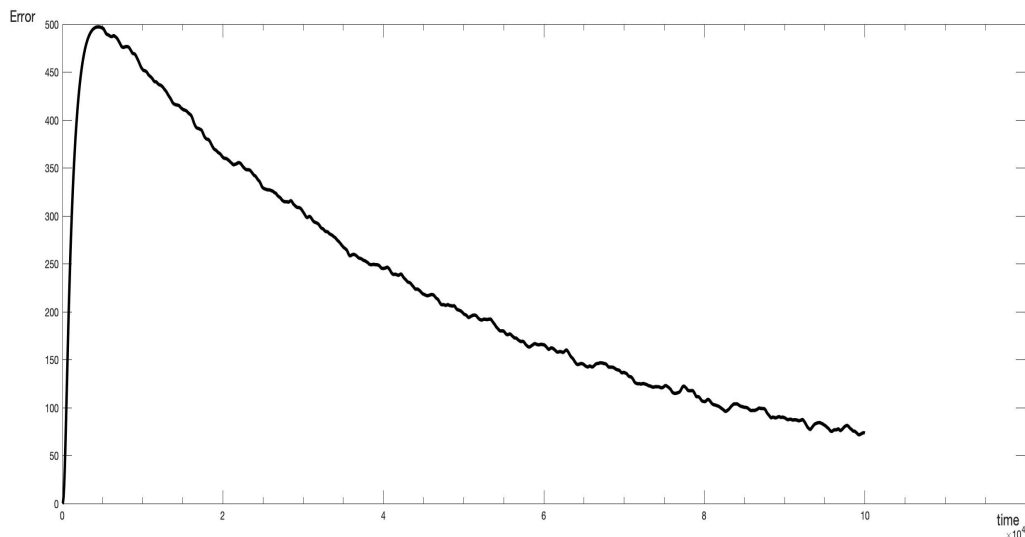


Рисунок 22 – Разладка по углу между реальным режимом работы привода и его виртуальной моделью

На рисунке 21 (разладка определяется по углу поворота реального привода и виртуальной модели) представлена разладка системы, уменьшающаяся со

временем, так как с внешними возмущениями система справляется в штатном режиме.

Дискретизация разладки по углу представлена на рисунке 24. Исходными для обнаружения разладки являются данные о распределениях значений анализируемого процесса до и после возможной разладки, реализация случайного процесса, а в некоторых случаях координата момента разладки.

Задача обнаружения разладки, иными словами, установление факта разладки, и оценка момента разладки (рис.22-24) возможна благодаря скачкообразному скачку значений, однако вывод о необходимости внепланового контроля состояния системы сделать невозможно на данном этапе, так как система самостоятельно выходит в штатный режим. Для принятия решения необходимо собрать базу статистических знаний и составить Карту Шухарта для исследуемого процесса.

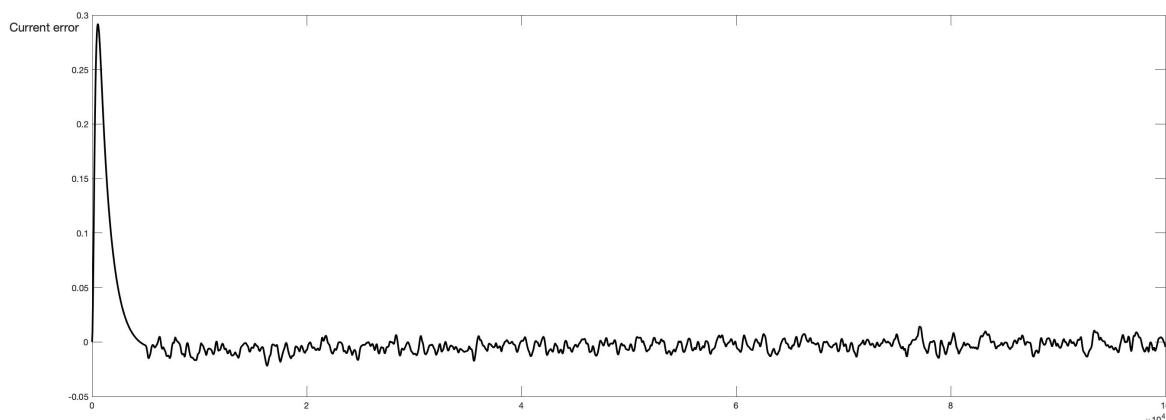


Рисунок 23 - Разладка по току

Контрольные карты Шухарта [50] разработаны инженером-физиком Уолтером Шухартом. Шухарт выяснил, что результаты работы система, находящейся в управляемом, устойчивом состоянии (иными словами – стабильном), можно предсказывать с определенной точностью, пока что-то или кто-то не выведет ее из стабильного состояния. Такая система называется «статистически управляемой».

Предсказуемость системы очень важна, так как позволяет управлять процессом. В случае вмешательств извне система становится не только непредсказуемой, но и неуправляемой. Тогда надо как можно быстрее выявить и устранить источник внешнего вмешательства и вернуть ее в управляемое состояние. Карта Шухарта требует данных, которые должны быть получены выборочно из процесса работы привода через примерно равные интервалы.

Интервалы могут быть заданы либо по времени (например, ежечасно или через какие-то такты), либо по количеству продукции (каждая партия, если привод используется для киберфизической системы, предназначенной для сварки).

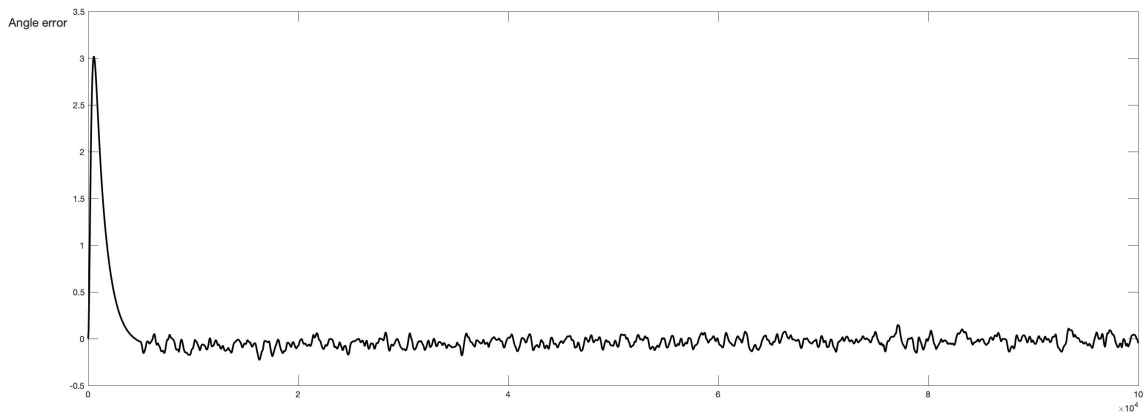


Рисунок 24 - Разрядка по скорости

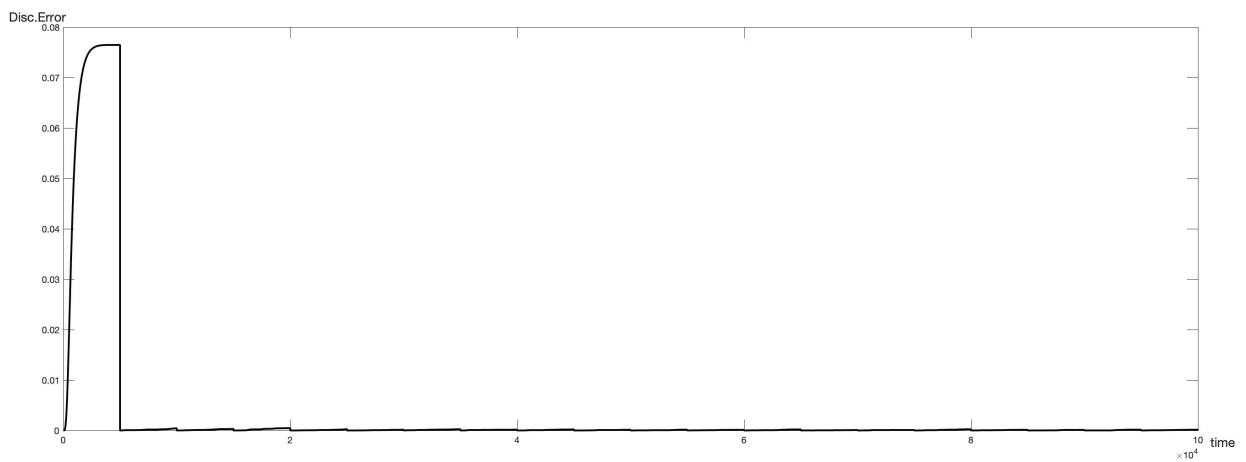


Рисунок 25 - Дискретизация ошибки

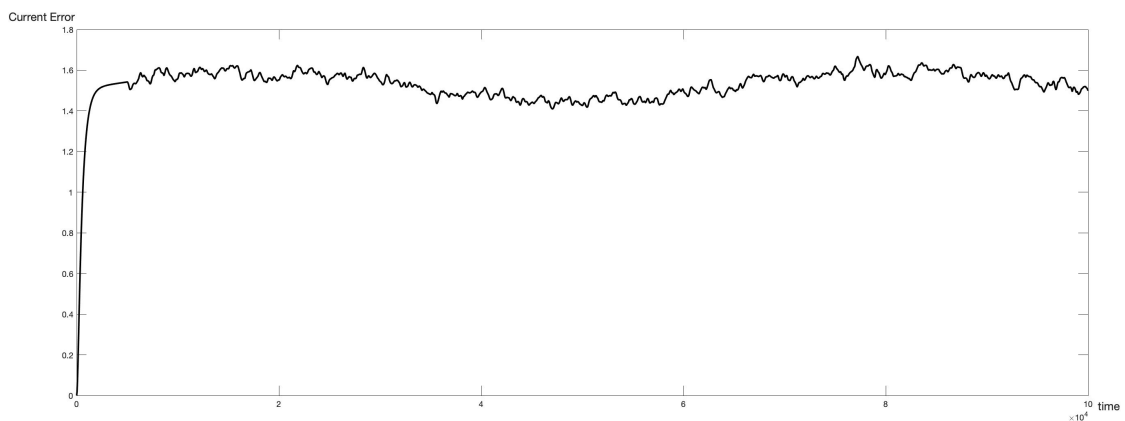


Рисунок 26 - Разрядка по току при выходе системы из строя

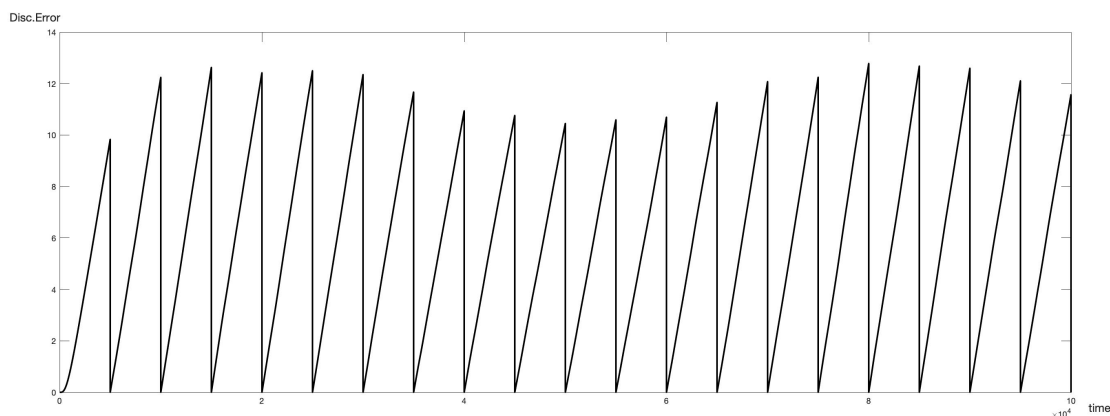


Рисунок 27 - Дискретизация ошибки

Разладка, с которой система не способна справиться и необходимо остановить работу, представлена на рисунке 26 (разладка по току). Дискретизация данной ошибки – на рисунке 27.

Вопросы для самоконтроля.

- Что такое «задача разладки»?
- Дайте определение контрольным картам Шухарта.
- Что такое «цифровой двойник»?

6 Разработка методики контроля эксплуатационных характеристик ЭМП

6.1 Программа и методика испытаний

Контроль и испытания являются важнейшим этапом изготовления новой продукции. Для этого разрабатывают программу и методику испытаний.

Программа и методика испытаний содержит описание того, что и как необходимо сделать, чтобы убедиться в том, что изделие удовлетворяет все поставленные требования. Фактически, этот документ является определяющим при проведении приемо-сдаточных испытаний.

Испытания проводятся с целью оценки соответствия технических характеристик ЭМП требованиям, которые определены в технических требованиях на разрабатываемое изделие и оценки соответствия параметров ЭМП требованиям конструкторской документации.

По результатам испытаний принимается решение о готовности образца ЭМП к приёмочным испытаниям [53]. Для проведения испытания используют специально разработанные испытательные стенды.

В ходе проведения испытаний ЭМП рекомендуется вести журнал для письменного фиксирования результатов проверок, их анализа и оценки. После окончания испытаний необходимо оформить протокол, отражающий все результаты, выводы и замечания комиссии. Результаты испытаний оформляются актом, который отражает их оценку и подтверждает завершение испытаний в установленном объеме [53].

Программа и методика испытаний [53] должна содержать следующие разделы:

- объект испытаний;
- цель испытаний;
- требования к программе;
- требования к программной документации;

- средства и порядок испытаний;
- методы испытаний.

6.2 Перечень испытательного и контрольно-измерительного оборудования

Все контрольно-измерительное оборудование, которое применяется при проведении испытаний должно иметь действующие сертификаты о поверке или калибровке либо оттиск поверительного клейма. Вся документация на используемое контрольно – измерительное оборудование должна быть приложена к актам и протоколам испытаний.

Испытательное оборудование, которое используется при испытаниях должно быть аттестовано в соответствии с требованиями ГОСТ Р 8.568-97, и иметь соответствующие документы, такие как паспорт, аттестат и т.п.

В зависимости от особенностей документа допускается вводить дополнительные разделы.

В разделе «Объект испытаний» указывают наименование, область применения и обозначение испытываемой программы.

В разделе "Требования к программной документации" должны быть указаны состав программной документации, предъявляемой на испытания, а также специальные требования, если они заданы в техническом задании на программу.

В разделе "Средства и порядок испытаний" должны быть указаны технические и программные средства, используемые во время испытаний, а также порядок проведения испытаний [53].

В разделе "Методы испытаний" должны быть приведены описания используемых методов испытаний. Методы испытаний рекомендуется по отдельным показателям располагать в последовательности, в которой эти показатели расположены в разделах "Требования к программе" и "Требования к программной документации".

Таблица 3 - Средства измерений

Наименование	Основные технические характеристики	Рекомендуемый тип или обозначение
Линейка измерительная металлическая	Длина не менее 1000 мм; погрешность измерения ± 1 мм	ГОСТ 427
Мультиметр	Диапазон измерений от 0 до 10 А; Основная погрешность от $\pm 1,2\%$ до $\pm 2\%$;	M890 G
Вольтметр	От 0 до 750 В; погрешность измерения $\pm 2,5\%$	B7-78 ГОСТ 8711
Весы	От 0 до 1000 кг; погрешность измерения $\pm 0,2$ кг	1СКУ ГОСТ 24104
Мегаомметр	От 100 кОм до 10 ГОм; погрешность измерения $\pm 3\%$	M 4122
Миллиомметр	От 0 – 200 мОм; погрешность измерения $\pm (0,01_{\text{Ризм}} + 4 \text{ емр})$	AM-6000
Динамометр образцовый универсальный	От 0,2 до 20 кН; погрешность измерения $\pm 0,2\%$	ДОУ-3-20И ГОСТ 9500

Транспортир	От 0 до 360°; погрешность измерения $\pm 1^\circ$	
Индикатор многооборотный	От 0 до 2 мм, цена деления 0,002 мм	2МИГ ГОСТ 9696
Рулетка измерительная Р20Н2К	Длина 20 м; погрешность измерения ± 1 мм; класс точности 2	ГОСТ 7502
Штангенциркуль	От 0 до 250 мм, цена деления 0,05 мм	ШЦ-II ГОСТ 166
Динамометрический ключ	От 5 до 110 Нм	"UNIOR" арт.264
Токоизмерительные клещи	От 0,5 до 75,0 А	КП46-50-500
Координатно-измерительная машина	погрешность 2 мкм на длине 300 мм	ZEISS DuraMax 5/5/5

В разделе "Методы испытаний" должны быть приведены описания используемых методов испытаний. Методы испытаний рекомендуется по отдельным показателям располагать в последовательности, в которой эти показатели расположены в разделах "Требования к программе" и "Требования к программной документации".

В методах испытаний должны быть приведены описания проверок с указанием результатов проведения испытаний (перечней тестовых примеров, контрольных распечаток тестовых примеров и т. п.).

В приложение к документу могут быть включены тестовые примеры, контрольные распечатки тестовых примеров, таблицы, графики и т.п.

Вопросы для самоконтроля.

- Из чего состоит программа и методика испытаний ЭМП?
- Назовите средства измерений для проведения испытаний ЭМП?

Библиографический список

1. Пашкевич, М. Ф. Планетарные шариковые и роликовые редукторы и их испытания / М. Ф. Пашкевич, В. В. Геращенко. – Минск : БелНИИТИ, 1992. – 248 с.
2. Пашкевич, М. Ф. Новые виды планетарных шариковых и роликовых редукторов / М. Ф. Пашкевич. – Минск : БелНИИТИ, 1990. – 47 с.
3. Тайц, Б. А. Точность и контроль зубчатых колес / Б. А. Тайц. – М. : Машиностроение, 1972. – 367 с. 4. Тайц, Б. А. Нормы точности и контроль зубчатых колес / Б. А. Тайц, Н. Н. Марков. – М. : Машгиз, 1962. – 104 с.
4. Ионак, В. Ф. Приборы кинематического контроля / В. Ф. Ионак. – М. : Машиностроение, 1981. – 128 с.
5. Чуев, Ю. В. Прогнозирование количественных характеристик процессов / Ю. В. Чуев, Ю. Б. Михайлов, В. И. Кузьмин. – М. : Сов. радио, 1975. – 400 с.
6. Якушев, А. И. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения / А. И. Якушев. – М. : Машиностроение, 1979. – 352 с.
7. Толстов, Г. П. Ряды Фурье / Г. П. Толстов. – М. : Наука, 1980. – 384 с.
8. https://habr.com/company/npf_vektor/blog/367653/
9. Калачев Ю.Н. Векторное регулирование (заметки практика). г. Москва, ЭФО 2013, 63 стр.
10. Nam, K. AC motor control and electric vehicle applications. CRC Press, 2010. – P. 435.
11. Ziegler J.G., Nichols N.B. Optimum settings for automatic controllers // Trans. ASME, 1942, vol. 64. P. 759-768.
12. Chien K.L., Hrones J.A., Reswick J.B. On automatic control of generalized passive systems // Trans. ASME, 1952, vol. 74. P. 175-185.
13. Виноградов А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока // ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина». - Иваново: ИГЭУ, 2008. - 98 с.
14. А. В. Капитонов, С. Г. Черняков Исследование кинематической точности планетарных роликовых передач методами гармонического анализа и контроля в сборе Вестник Белорусско-Российского университета. 2011. № 4 (33)
15. Патент РФ № 2427750 «Электромеханический привод» / Федосовский М.Е., Николаев В.В., Дунаев В.И. / Б.И. 2011. №24
16. Eversheim, W., Nyemeier, R., Schernikau, J., Zohm, F.: Unternehmerische Chancen und Herausforderungen durch die Mechatronik in der Automobilzulieferindustrie, Materialien zur Automobilindustrie Band 23. Frankfurt a M.: VDA-Verlag, 2000
17. Kallenbach, E., Zöppig, V., Birli, O., Feindt, K., Strhla, T., Saffert, E., Schmidt, J.: Integration Mechatronischer Systeme. Innovative Produktentwicklungen, 4. VDI Mechatronik Tagung, 12./13. Sept. 2001, Frankenthal, VDI-Berichte 1631, Düsseldorf: VDI Verlag, 2001
18. Патент РФ № 2522646 «Электромеханический линейный привод» / Алексашин А.А., Урсу В.Е. / Б.И. 2014. №20
19. Патент РФ № 2386067 «Механизм преобразования вращательного движения в поступательное движение» / Хори К., Хасимото Х., Киносита Я., Накамура К., Цузуки М., Сатох О. / Б.И. 2010. №10
20. Lens T, Von Stryk O, Design and dynamics model of a lightweight series elastic tendon-driven robot arm. Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation 2013; 4512–4518

21. Makino, et al.: Development of Active Suspension System Using Electric Linear Motors for Railway Cars. Proc. 13th Jointed Railway Technology Symposium. Japan Society of Mechanical Engineers, No. 06-52, 519-522 (2006)
22. Янгулов В.С. Проектирование передач с линейными перемещениями выходного звена / Учебное пособие. Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 169 с.
23. Gausemeier, J., Ebbesmeier, P., Kallmeier, F.: Produktinnovation – Strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen. München, Sien: Carl Hansen Verlag, 2001
24. Zirn, O., Treib, T.: Similarity Laws of Serial and Parallel Manipulators for Machina Tools, MOVIC 98 Zürich, Switzerland, 25. – 28. August 1998, Vol. 3, pp. 865-870
25. R. S. Trask et al., “Self-healing of composite structures in a space environment”, ICCM15 - 15th International Conference on Composite Materials proc ., Durban, 2005.
26. Расчет на прочность деталей машин: Справочник / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич. – 4 изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1993. – 640 с.
27. Brahmani K., Roy K.S, Arm 7 Based Robotic Arm Control by Electronic Gesture Recognition 2013; 4: 1245–1248.
28. Park, M.K., Go, S.J., Lee, Y.J., Sung, K.G.: Design and Performance Evaluation of Lightweight Dual Arm Robot Featuring Hollow Shaft Servo Assembly. Advanced Science Letters 4, 1901–1907 (2011)
29. Elfasakhany A, Design and Development of a Competitive Low-Cost Robot Arm with Four Degrees of Freedom. Modern Mechanical Engineering 2011; 01: 47–55.
30. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3 т. Т. 1. – 8-е изд., перераб. и доп. Под ред. И.Н. Жестковой. – М.: Машиностроение, 2001. – 920 с.
31. Орлов П.И. Основы конструирования: Справочно-методическое пособие. В 2-х кн. Кн. 2. Под ред. П.Н. Усачева.–3-е изд., исправл. – М.: Машиностроение, 1988. –544 с
32. Блинов Д. С. Планетарные роликвинтовые механизмы. Конструкции, методы расчетов: науч. Изд-е / Д. С. Блинов. – М: МГТУ им. Баумана, 2006. – 222 с.
33. S. A. Velinsky, B. Chu, and T. A. Lasky, “Kinematics and efficiency analysis of the planetary roller screw mechanism,” Journal of Mechanical Design, vol. 131, no. 1, 2009. 8 p.
34. P. C. Lemor, “Roller screw, an efficient and reliable mechanical component of electro-mechanical actuators,” in Proceedings of the 31st Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (IECEC '96), vol. 1, 1996. pp. 215–220.
35. Lückel, J., Koch, T., Schmitz, J.: Mechatronik als integrative Basic für innovative Produkte. VDI-Tagung: Mechatronik – Mechanisch/Elektrische Antriebstechnik. 29./30.März 2000, Wiesloch, Düsseldorf: VDI Verlag, 2000
36. Kallenbach, E., Saffert, E., Schäffel, Chr.: MUlti-coordinate Drive Systems – Opportunitics and Limits, 3rd International Heinz Nixdorf Symposium, May 1999, Paderborn, Proceedings, pp. 11-24
37. A. Siqueira and M. Terra, “A fault tolerant manipulator robot based on h2, h ∞ and mixed h2/h markovian controls,” in Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications, pp. 309–314, Taipei, Taiwan, 2004.
38. Centre for Connected and Autonomous Vehicles, Pathway to driverless cars: Proposals to support advanced driver assistance systems and automated vehicle technologies, July 2016.
39. Yoshimura, T. & Teramura, I. (2005). Active suspension control of a one-wheel car model using single input rule modules fuzzy reasoning and a disturbance observer,

Journal of Zhejiang University SCIENCE, Vol.6A, No.4, pp.251-256, ISSN 1009-3095 Chen, W. P.; Chan, H. L. W.; Yiu, F. C. H.; Ng, K. M. W.; Liu, P. C. K., Applied Physics Letters, 80 (2002) 19, S. 3587-3589.

40. John Matley, Malika Gandhi, Emily Yoo, Bill Jarmuz and Stefan Peterson, Insuring the future of mobility, Deloitte University Press, May 13, 2016, <https://dupress.deloitte.com/dup-us-en/focus/future-of-mobility/mobility-ecosystem-future-of-auto-insurance.html>

41. Dickenson T. Valves, Piping and Pipelines Handbook 2 ed. — Elsevier Science, 1999. — 888 p.

42. Hedrick, J.K. & Wormely, D.N. (1975). Active suspension for ground support transportation, ASME AMD, Vol. 15, pp. 21-40, ISSN 0160-8835

43. V. Filaretov, A. Zhirabok, A. Zuev, and A. Protchenko, "Fault identification in nonlinear dynamic systems," in Proceedings of the 2016 5th International Conference on Systems and Control (ICSC), pp. 273–277, Marrakesh, Morocco, May 2016.

44. LLC Fisher Controls International, Emerson Process Management. Control Valve Handbook 4 ed. — Fisher, 2005. — 297 p.

45. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления Пер. с англ. Б. И. Копылова. — М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. — 832 SKF roller screws: SKF. Printed in France, 2008. 88 p.

46. F. Carpi, C. Menon, D. DE Rossi, Bio -inspired distributed system for thermal (or particles) transport - Final Report, ESA Contract Number: 19704/06/NL/HE, 2006

47. Uekura, et al.: Development of Active Suspension Control System by Actuator of Decreased Air Consumption. Proc. 17th Jointed Railway Technology Symposium. Japan Society of Mechanical Engineers, S5-1- 1, 305-308 (2010)

48. Лифиц И.М. Основы стандартизации, метрологии и сертификации // М.: Юрайт, 2001. 270 стр.

49. Брюханов В.А. О действующих государственных стандартах на методы контроля и испытаний // Стандарты и качество. 1996. № 11. С. 18—20. 4

50. ГОСТ Р 50779.42-99 (ИСО 8258-91). Статистические методы. Контрольные карты Шухарта. Воронин Г.П. Госстандарт России сегодня: некоторые итоги, проблемы, задачи // Стандарты и качество. 1998. № 12. С.20—23.

51. Исаев Л. К., Малинский В. Д. Метрология и стандартизация в сертификации. М.: ИПК Издательство стандартов, 1996. 169 с.

52. Резниченко В.А. и др. Проблемы качества и сертификации в автомобилестроении // Стандарты и качество. 1996. № 9. С. 54—59.

53. ГОСТ 19.301-79 Программа и методика испытаний. Требования к содержанию и оформлению. — Введ. 01.01.1981. — Гос. комитет СССР по стандартам, 1979

54. ГОСТ Р 15.201-2000 Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки продукции на производство. — М.: Изд-во стандартов, 2005. - С. 1 – 9

Юрьева Радда Алексеевна
Кремлев Артем Сергеевич
Базылев Дмитрий Николаевич
Маргун Алексей Анатольевич
Викснин Илья Игоревич

Электромеханический привод. Устройство и управление.

Учебное пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж
Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверский пр., 49