

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники

Направление подготовки – 15.03.06 Мехатроника и робототехника

ООП – Интеллектуальные робототехнические и мехатронные системы

Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА**

|  |
| --- |
| **Тема работы** |
| Разработка системы управления электроприводом рулевой рейки для беспилотного транспортного средства |

УДК Шифр УДК берется из личн. кабинета при отправке работы на проверку науч. рук-лю

Обучающийся

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Группа** | **ФИО** | **Подпись** | **Дата** |
| 8Е02 | Сокуров Руслан Ергалиевич |  |  |

Руководитель ВКР

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Должность** | **ФИО** | **Ученая степень, звание** | **Подпись** | **Дата** |
| Доцент ОАР ИШИТР | Ланграф С.В. | к.т.н. |  |  |

**КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Должность** | **ФИО** | **Ученая степень, звание** | **Подпись** | **Дата** |
| Доцент БШ | Жаворонок А.В. | к.э.н. |  |  |

По разделу «Социальная ответственность»

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Должность** | **ФИО** | **Ученая степень, звание** | **Подпись** | **Дата** |
| Старший преподаватель ОКД ИШНКБ | Мезенцева И.Л. | – |  |  |

Нормоконтроль

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Должность** | **ФИО** | **Ученая степень, звание** | **Подпись** | **Дата** |
| Старший преподаватель ОАР ИШИТР | Поберезкина Е.Е. | – |  |  |

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Руководитель ООП, должность** | **ФИО** | **Ученая степень, звание** | **Подпись** | **Дата** |
| Старший преподаватель ОАР ИШИТР | Беляев Александр Сергеевич | к.т.н. |  |  |

Томск – 2024 г.

**ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП**

| **Код компетенции** | **Наименование компетенции** |
| --- | --- |
| **Универсальные компетенции** | |
| УК(У)-1 | Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий. |
| УК(У)-2 | Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла. |
| УК(У)-3 | Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели. |
| УК(У)-4 | Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке( ах), для академического и профессионального взаимодействия |
| УК(У)-5 | Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия |
| УК(У)-6 | Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки |
| **Общепрофессиональные компетенции** | |
| ОПК(У)-1 | Способен формулировать цели и задачи исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать и создавать критерии оценки результатов исследований |
| ОПК(У)-2 | Способен осуществлять экспертизу технической документации в сфере своей профессиональной деятельности |
| ОПК(У)-3 | Способен организовывать работу по совершенствованию, модернизации и унификации выпускаемых изделий и их элементов |
| ОПК(У)-4 | "Способен разрабатывать методические и нормативные документы, в том числе проекты стандартов и сертификатов, с учетом действующих |
| ОПК(У)-5 | стандартов качества, обеспечивать их внедрение на производстве" |
| ОПК(У)-6 | Способен разрабатывать аналитические и численные методы при создании математических моделей машин, приводов, оборудования, систем, технологических процессов |
| ОПК(У)-7 | Способен осуществлять научно-исследовательскую деятельность, используя современные информационно-коммуникационные технологии, глобальные информационные ресурсы |
| ОПК(У)-8 | Способен проводить маркетинговые исследования и осуществлять подготовку бизнес-планов выпуска и реализации перспективных и конкурентоспособных изделий в области машиностроения |
| ОПК(У)-9 | Способен осуществлять анализ проектов стандартов, рационализаторских предложений и изобретений в области машиностроения подготавливать отзывы и заключения по их оценке |
| ОПК(У)-10 | Способен представлять результаты исследования в области машиностроения в виде научно-технических отчетов и публикаций |
| ОПК(У)-11 | Способен разрабатывать методы стандартных испытаний по определению технологических показателей автоматизированного производственного оборудования |
| ОПК(У)-12 | Способен разрабатывать современные методы исследования автоматизированного оборудования в машиностроении |
| **Профессиональные компетенции** | |
| ПК(У)-1 | Способен участвовать в формировании новых направлений научных исследований и опытно-конструкторских разработок в области систем промышленной безопасности (СПБ) АТПП (научно-исследовательская) |
| ПК(У)-2 | Способен разрабатывать проекты СПБ АТПП (проектно-конструкторская) |
| ПК(У)-3 | Способен осуществлять: организационно-техническое сопровождение СПБ АТПП; организацию производственного контроля внешних и экологических рисков, опасностей для здоровья и опасностей технологических объектов промышленных производств (производственно-технологическая) |



Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники

Направление подготовки – 15.03.06 Мехатроника и робототехника

Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

Обучающийся:

|  |  |
| --- | --- |
| **Группа** | **ФИО** |
| 8Е02 | Сокуров Руслан Ергалиевич |

Тема работы:

|  |  |
| --- | --- |
| Разработка системы управления электроприводом рулевой рейки для беспилотного транспортного средства | |
| *Утверждена приказом директора (дата, номер)* | 06.02.2024, №37–52/c |

|  |  |
| --- | --- |
| Срок сдачи обучающимся выполненной работы: | Дата за 10 дней до защиты ВКР |

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Исходные данные к работе**  *(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).* | | Система управления электроприводом рулевой рейкой должна разрабатываться с учётом имеющейся технической базы, а именно:  – Рулевая рейка с электромеханическим усилителем руля и импульсным датчиком положения Anhui Defu 3407 P006;  – Блок управления рулевой рейкой БУРР-30-С. |
| **Перечень разделов пояснительной записки подлежащих исследованию, проектированию и разработке**  *(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).* | | 1. Обзор и анализ существующих решений.  2. Исследование объекта управления.  3. Разработка и настройка контура управления током электропривода рулевой рейки с учётом физических ограничений, присущих системе.  4. Разработка и настройка контура управления скоростью электропривода рулевой рейки с учётом физических ограничений, присущих системе.  5. Разработка и настройка контура управления положением электропривода рулевой рейки с учётом физических ограничений, присущих системе.  6. Экспериментальное исследование разработанных контуров управления и анализ полученных результатов. |
| **Перечень графического материала**  *(с точным указанием обязательных чертежей)* | |  |
| **Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**  *(с указанием разделов)* | | |
| **Раздел** | **Консультант** | |
| Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение | Жаворонок Анастасия Валерьевна, доцент БШ, к.э.н. | |
| Социальная ответственность | Мезенцева Ирина Леонидовна, старший преподаватель ОКД ИШНКБ | |

|  |  |
| --- | --- |
| **Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику** | 06.02.2024 |

**Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Должность** | **ФИО** | **Ученая степень, звание** | **Подпись** | **Дата** |
| Доцент ОАР ИШИТР | Ланграф С.В. | к.т.н. |  | 06.02.2024 |

**Задание принял к исполнению обучающийся:**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Группа** | **ФИО** | **Подпись** | **Дата** |
| 8Е02 | Сокуров Руслан Ергалиевич |  | 06.02.2024 |



Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники

Направление подготовки (ООП) – 15.03.06 Мехатроника и робототехника

Уровень образования – Бакалавриат

Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники

Период выполнения – Весенний семестр 2023 /2024 учебного года

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН**

**выполнения выпускной квалификационной работы**

Обучающийся:

|  |  |
| --- | --- |
| **Группа** | **ФИО** |
| 8Е02 | Сокуров Руслан Ергалиевич |

Тема работы:

|  |
| --- |
| Разработка системы управления электроприводом рулевой рейки для беспилотного транспортного средства |

|  |  |
| --- | --- |
| Срок сдачи обучающимся выполненной работы: | за 10 дней до защиты ВКР |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Дата**  **контроля** | **Название раздела (модуля) /**  **вид работы (исследования)** | **Максимальный**  **балл раздела (модуля)** |
| *29.05.2023 г.* | *Основная часть ВКР* | *60* |
| *30.05.2023 г.* | *Раздел «Социальная ответственность»* | *20* |
| *30.05.2023 г.* | *Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»* | *20* |

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Должность** | **ФИО** | **Ученая степень, звание** | **Подпись** | **Дата** |
| Доцент ОАР ИШИТР | Ланграф С.В. | к.т.н. |  | 06.02.2024 |

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Должность** | **ФИО** | **Ученая степень, звание** | **Подпись** | **Дата** |
| Старший преподаватель ОАР ИШИТР | Беляев А.С. | к.т.н. |  | 06.02.2024 |

**Обучающийся**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Группа** | **ФИО** | **Подпись** | **Дата** |
| 8Е02 | Сокуров Руслан Ергалиевич |  | 06.02.2024 |

**Реферат**

Выпускная квалификационная работа с., рис., табл., \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_источников, прил.

Ключевые слова:

Объектом исследования (разработки) является (ются)

Цель работы –

В ходе работы проводились (исследования, расчеты и т.п.)

В результате (исследований, расчетов и т.п.)

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики:

Степень внедрения:

Область применения:

Экономическая эффективность/значимость работы

В будущем планируется

Содержание

[Введение 2](#_Toc164688816)

[1. Исследование коэффициента передачи электропривода рулевой рейки 3](#_Toc164688817)

[2. Разработка контура положения рулевой рейки 8](#_Toc164688818)

[3. Оптимизация контура управления током с учетом физических ограничений, присущих системе 13](#_Toc164688819)

[4. Оптимизация контура управления скоростью с учетом физических ограничений, присущих системе 14](#_Toc164688820)

[5. Оптимизация контура управления положением с учетом физических ограничений, присущих системе 16](#_Toc164688821)

[Заключение 20](#_Toc164688822)

[Список литературы 21](#_Toc164688823)

# Введение

Беспилотные автомобили являются одной из самых актуальных и перспективных тем в автомобильной индустрии. Они представляют собой транспортные средства, которые способны перемещаться без участия водителя. Согласно распоряжению Правительства РФ к 2035 году ожидается увеличении доли беспилотных автомобилей в общей структуре мировых продаж автотранспорта возрастёт до 10–15%. [1]

Актуальность беспилотных автомобилей объясняется несколькими факторами. Во-первых, они могут значительно повысить безопасность на дорогах. Около 90% аварий на дорогах вызваны ошибками водителей [2], и беспилотные транспортные средства, оснащенные передовыми системами безопасности и алгоритмами управления, могут снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций.

Основные проблемы внедрения технологий автономности включают в себя отсутствие в настоящее время в Российской Федерации ряда критичных электронных компонентов 2-го и 3-го уровней автономности [3].

Поскольку рулевая рейка является одним из ключевых компонентов систем 2-го и 3-го уровней (например, система удержания в полосе) разработка системы управления рулевой рейкой является актуальной задачей.

В данной работе представлена разработка системы управления электроприводом рулевой рейки для беспилотного транспортного средства, включая контур управления током, скоростью и положением. Система управления разрабатывалась с учётом имеющейся технической базы, а именно: рулевая рейка с электромеханическим усилителем руля и импульсным датчиком положения Anhui Defu 3407 P006, блок управления рулевой рейкой БУРР-30-С.

# Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки

**ЭД** Электродвигатель

**ДПТ** Двигатель постоянного тока

**ПИД Регулятор** Пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор

**ЭМУР** Электромеханический усилитель руля

# Аналитический обзор

Существует несколько разных способов управления электроприводом рулевой рейки. Рассмотрим наиболее популярные известные алгоритмы управления:

1. Алгоритм управления на основе ПИД-регулирования. Данный способ использует обратную связь для определения ошибки между желаемым положением рулевой рейки и текущей позиции, а затем рассчитывает корректирующий сигнал, который и сдвигает рейку на нужную величину, достигая тем самым нужного положения. Данный алгоритм широко используется в силу своей простоты, но он также требует настройки коэффициентов регулятора.
2. Алгоритм адаптивного управления. Он непрерывно отслеживает изменения в параметрах автомобиля и дорожных условий, используя данные сенсоров и других источников информации. На основе этой информации алгоритм динамически корректирует управляющие воздействия, чтобы обеспечить оптимальное усилие на руле и улучшить управляемость автомобиля. [4].
3. Алгоритм на основе прогнозирующей модели. Он, как и предыдущий способ, использует математическую модель автомобиля, но уже с другой целью. После получения математической модели алгоритм прогнозирует будущее поведение автомобиля и его окружения, чтобы определить оптимальное управление. Этот метод учитывает ограничения системы и производит расчёт на несколько шагов вперед [5].

Такие методы, как генетическое программирование и нейронные сети, используют искусственный интеллект для автоматизации процессов управления. Они способны обучаться на больших объемах данных и не требуют явного задания конкретных алгоритмов регулирования. Вместо этого, они могут самостоятельно находить оптимальные стратегии на основе обучения на данных, что повышает их гибкость и способность адаптироваться к изменяющимся условиям [6].

Подведем итог обзора, составив таблицу достоинств и недостатков вышеперечисленных алгоритмов управления (Таблица 1.1).

Таблица 1.1 — Достоинства и недостатки алгоритмов управления

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Название | Достоинства | Недостатки |
| ПИД-регулирование | Простота реализации; Низкие требования к вычислительным ресурсам; Быстрая реакция на изменения параметров системы; | Требует настройки параметров;  Может быть неустойчивым при значительных изменениях параметров системы;  Ограниченная адаптивность; |
| Адаптивное управление | Высокая адаптивность к изменениям условий; | Сложность реализации и большая вычислительная нагрузка; Возможны временные задержки в адаптации |
| Управление на основе прогнозирующей модели | Возможность учета множества ограничений;  Способность прогнозировать поведение системы и окружающей среды; | Требуется наличие данных прошлых измерений;  Высокие требования к вычислительным ресурсам;  Возможны ошибки при неточности моделей и данных; |
| Искусственный интеллект | Способность к самообучению; Высокая гибкость и адаптивность; | Сложность разработки и внедрения; Высокая вычислительная нагрузка; Необходимость больших объемов данных для обучения; |

После тщательного анализа различных алгоритмов управления рулевой рейкой с электромеханическим усилителем руля (ЭМУР), было принято решение выбрать ПИД-регулирование в качестве основного метода. Алгоритмы ПИД-регулирования легко реализуются на большинстве микроконтроллеров и программируемых логических контроллерах (ПЛК). Это упрощает их интеграцию в существующие системы управления и снижает требования к оборудованию и программному обеспечению. Кроме того, ПИД-регуляторы широко применяются в различных отраслях промышленности и автомобильной техники. Это обеспечивает наличие большого количества примеров, справочной литературы и практического опыта, что значительно упрощает разработку и настройку систем на их основе.

# 2. Исследование характеристик электропривода рулевой рейки

Для разработки системы управления электроприводом рулевой рейки необходимо произвести идентификацию объекта управления, т. е. найти характеристики и параметры ДПТ рулевой рейки.

1. Определение сопротивления обмотки якоря 

Для определения сопротивления обмотки якоря была произведена фиксация штока рулевой рейки, с целью ограничить возможность вращения электропривода. Это приведет к отсутствию противоЭДС. В этом случае ток якоря будет полностью равен току, потребляемому электроприводом. Затем, с помощью лабораторного источника питания, было подано определенное напряжение на обмотки ЭД. Эквивалентное сопротивление было найдено по закону Ома для линейного участка цепи: .

Таблица 2.1 — Определение сопротивления обмотки якоря

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| U, В | I, А | R, Ом |
| 1 | 2,522 | 0,396511 |
| 1,09 | 3,069 | 0,355165 |
| 1,64 | 5,123 | 0,320125 |

Тогда, среднее значение сопротивления:



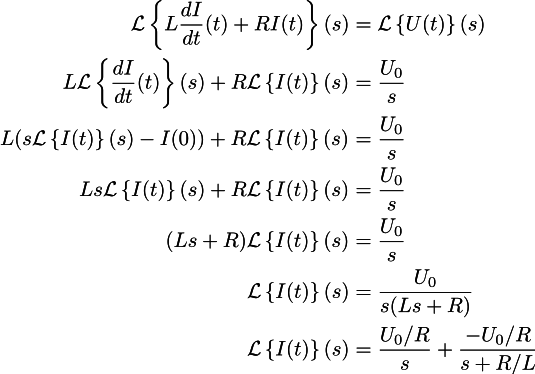
1. Определение индуктивности и сопротивления обмотки якоря

Чтобы проверить предыдущие вычисления, были рассчитаны индуктивность и сопротивление обмотки якоря другим способом.

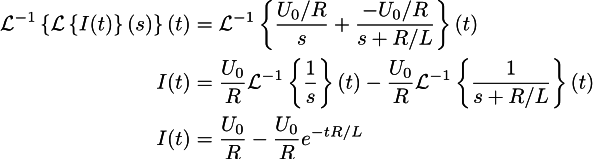
У ДПТ протекающий ток  и напряжение на клеммах связаны следующим дифференциальным уравнением [7]:



Здесь  — скорость вращения двигателя. Поскольку вал двигателя заблокирован, то влияние конструктивного параметра в виде ЭДС вращения двигателя исключено. Далее было выполнено преобразование Лапласа от левой и правой частей уравнения (2.1):



Перейдём к оригиналам:



Таким образом, по истечении нескольких миллисекунд после подачи питания ступенчатой формы питания индуктивность двигателя уже не будет иметь большое значение на протекающий в обмотке ток, а в самом начале ток будет экспоненциально нарастать, причём скорость возрастания (время переходного процесса) напрямую зависит от индуктивности [7]. Затем была получена переходная характеристика тока, при подаче ступенчатого напряжения используя измерительный щуп осциллографа подключенный к токовым клещам Aktakom ATK-2120, которыми замерялся уровень тока в обмотке ДПТ.



Рисунок 2.1 — Переходный процесс по току при ступенчатом сигнале напряжения

Зная напряжение, что было на двигателе в момент снятия характеристики , можем подобрать такую кривую, которая максимально точно бы повторяла полученный переходный процесс. Для этого зададим закон изменения кривой, и с помощью метода curve\_fit библиотеки scipy\_optimize в языке Python произведём подбор [8]:

Листинг 2.1 — Подбор кривой

1. import numpy as np

2. from scipy.optimize import curve\_fit

3. import matplotlib.pyplot as plt

4.

5. U0 = 1.2

6.

7. def unit\_step\_current(x, R, L):

8.     return [U0/R - U0/R\*np.exp(-t\*R/L) for t in x]

9.

10. data = np.genfromtxt('Oscil\_3A.csv', delimiter=',', names=['t', 'A'])

11.

12. [R, L] = curve\_fit(unit\_step\_current, data['t'], data['A'])[0]

13. print(R, L)

14.

15. fig = plt.figure()

16. ax1 = fig.add\_subplot(1,1,1)

17.

18. ax1.set\_title("Подбор сопротивления/индуктивности")

19. ax1.set\_xlabel('Время, с')

20. ax1.set\_ylabel('Ток, А')

21.

22. #ax1.plot(data['t'], U0, color='b', label='input tension')

23. #ax1.plot(U0, color='b', label='input tension')

24. ax1.plot(data['t'], data['A'], color='g', label='измеренный ток')

25. model=unit\_step\_current(data['t'], R, L)

26. ax1.plot(data['t'], model, color='r', label='подобранная кривая')

27. ax1.legend()

28.

29. plt.show()



Рисунок 2.2 — Результат выполнения листинга 2.1

По итогам выполнения листинга 2.1 было рассчитано значение значения сопротивления обмотки и индуктивности якорной цепи , . Сопротивление от найденного в п.1 отличается не более чем на 8,6%, что подтверждает корректность проведенных вычислений.

Определение конструктивного параметра электродвигателя 

Поскольку конструктивный параметр электродвигателя характеризует взаимосвязь между уровнем тока в обмотках ЭД и моментом вращения, то для определения конструктивного параметра необходимо и достаточно знать величину момента электропривода при определенном уровне тока. Чтобы выяснить это, был жестко закреплен рычаг к валу, затем при определенном уровне тока, известном с лабораторного источника питания, были произведены замеры линейных усилий, развиваемые электроприводом с учётом рычага приложения к валу двигателя:



Рисунок 2.3 — Определение конструктивного коэффициента

Линейное усилие измерялось динамометром, с пересчётом значений в [Н] с учётом :

Таблица 2.2 — Полученное значение момента

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| U, В | I, А | Замеренное усилие, кг | Усилие, Н | Длина рычага, м | Момент вращения ЭД, Н \* м |
| 10 | 15 | 0,5 | 4,9 | 0,146 | 0,7154 |
| 10 | 20 | 0,7 | 6,86 | 0,146 | 1,00156 |
| 10 | 25 | 0,9 | 8,82 | 0,146 | 1,28772 |
| 15 | 30 | 1,1 | 10,78 | 0,146 | 1,57388 |
| -10 | -15 | 0,5 | 4,9 | 0,146 | 0,7154 |
| -10 | -20 | 0,7 | 6,86 | 0,146 | 1,00156 |
| -15 | -25 | 0,8 | 7,84 | 0,146 | 1,14464 |
| -15 | -30 | 1 | 9,8 | 0,146 | 1,4308 |
| -20 | -35 | 1,3 | 12,74 | 0,146 | 1,86004 |

Расчёт конструктивного параметра электродвигателя был выполнен исходя из линеаризованного уравнения ДПТ: . Тогда таблица 2.2 расширяется на один столбец:

Таблица 2.3 — Рассчитанное значение конструктивного параметра

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| U, В | I, А | Замеренное усилие, кг | Усилие, Н | Длина рычага, м | Момент вращения ЭД, Н \* м | Конструктивный параметр Cм |
| 10 | 15 | 0,5 | 4,9 | 0,146 | 0,7154 | 0,047693333 |
| 10 | 20 | 0,7 | 6,86 | 0,146 | 1,00156 | 0,050078 |
| 10 | 25 | 0,9 | 8,82 | 0,146 | 1,28772 | 0,0515088 |
| 15 | 30 | 1,1 | 10,78 | 0,146 | 1,57388 | 0,052462667 |
| -10 | -15 | 0,5 | 4,9 | 0,146 | 0,7154 | 0,047693333 |
| -10 | -20 | 0,7 | 6,86 | 0,146 | 1,00156 | 0,050078 |
| -15 | -25 | 0,8 | 7,84 | 0,146 | 1,14464 | 0,0457856 |
| -15 | -30 | 1 | 9,8 | 0,146 | 1,4308 | 0,047693333 |
| -20 | -35 | 1,3 | 12,74 | 0,146 | 1,86004 | 0,053144 |

По итогам усреднения значений,  = 0,049570785.

Затем была выполнена проверка полученного значения конструктивного параметра. Для этого была снята блокировка вала ДПТ и подана серия напряжений, а тахометром Sinometer DT6236B была снята скорость вращения вала в режиме холостого хода:

Таблица 2.4 — Рассчитанный иным способом конструктивный параметр

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| U, В | I, А | (скорость), об/мин | , рад/с | (сопротивление обмотки якоря), Ом | См (конструктивный параметр), В\*с/рад |
| 3 | 0,74 | 400 | 41,887902 | 0,357267 | 0,06530817 |
| 4 | 0,79 | 564 | 59,0619419 | 0,357267 | 0,06294678 |
| 5 | 0,83 | 745 | 78,0162176 | 0,357267 | 0,06028834 |
| 6 | 0,88 | 910 | 95,2949772 | 0,357267 | 0,05966322 |
| 7 | 0,94 | 1085 | 113,620934 | 0,357267 | 0,05865265 |
| 8 | 0,98 | 1265 | 132,47049 | 0,357267 | 0,05774779 |
| 9 | 1,02 | 1450 | 151,843645 | 0,357267 | 0,05687158 |
| 10 | 1,08 | 1637 | 171,426239 | 0,357267 | 0,05608331 |
| 11 | 1,13 | 1828 | 191,427712 | 0,357267 | 0,05535399 |
| 12 | 1,19 | 2018 | 211,324466 | 0,357267 | 0,05477289 |
| 13 | 1,28 | 2207 | 231,1165 | 0,357267 | 0,05427003 |
| 14 | 1,28 | 2397 | 251,013253 | 0,357267 | 0,05395212 |
| 15 | 1,35 | 2575 | 269,653369 | 0,357267 | 0,05383834 |
| 16 | 1,42 | 2760 | 289,026524 | 0,357267 | 0,05360297 |
| 17 | 1,45 | 2944 | 308,294959 | 0,357267 | 0,05346167 |
| 18 | 1,59 | 3145 | 329,34363 | 0,357267 | 0,05292935 |

В данной таблице конструктивный параметр  рассчитывается исходя из формулы статического движения ДПТ:  (из механической характеристики ДПТ).

Среднее значение  = 0,056858951, отличается на 14% от прошлого значения, что является допустимым отклонением, а значит конструктивный параметр был вычислен верно.

1. Расчёт момента инерции электропривода

Согласно второму закону динамики вращательного движения, момент инерции тела связан с моментом вращения по следующему закону: , где М – вращающий момент, J – механический момент инерции тела,  – угловое ускорение.

Угловое ускорение  может быть найдено как первая производная скорости по времени: . Поскольку необходимо вычислить момент инерции всей системы (включая рулевую рейку и кинематические связи), то электродвигатель был возвращён в состав рулевой рейки, кинематическая схема которой представлена на рисунке 2.4. Далее рейка была помещена на проверочный стенд (рисунок 2.5).

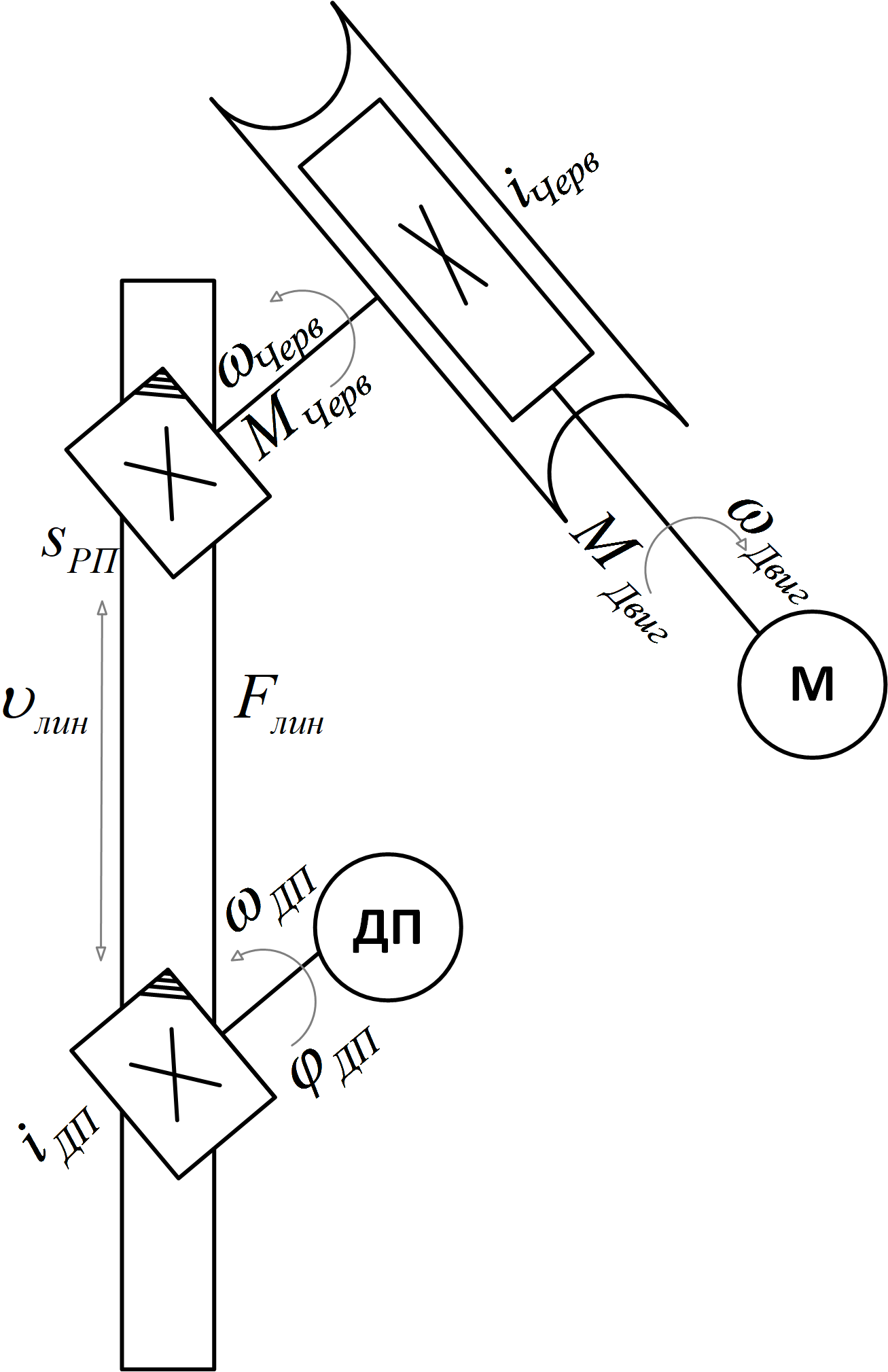


Рисунок 2.4 — Кинематическая схема рулевой рейки с ЭМУР



Рисунок 2.5 — Проверочный стенд с рулевой рейкой

Поскольку на данном этапе уже известно, как взаимосвязаны ток и момент двигателя, то второй закон динамики вращательного движения можно преобразовать:



Если принять, что  в пределах разгона двигателя, можно допустить что и вращающий момент на валу ДПТ также является постоянным в течение времени разгона ДПТ.

Выведем на осциллограф в сервисной программе MViewer [9] изменение скорости и подадим ток определенной стабилизированной величины на обмотку двигателя.

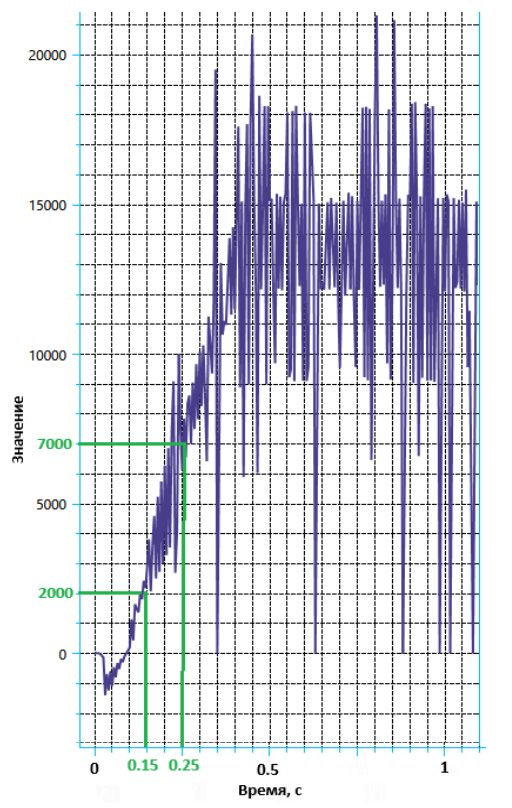


Рисунок 2.6 — График нарастания скорости при токе равным 8А

Здесь переменная Speed.Spd изменилась на 5000 единиц за время сек, что соответствует изменению скорости на 91,1755 рад/с. При этом, поскольку стабилизированный ток в обмотках двигателя был равен 8А, то постоянный момент вращения:

.

Тогда момент инерции электропривода:



Однако, данный эксперимент имел место быть на рулевой рейке, которая в составе испытательного стенда прикреплена вертикально. Соответственно, гравитация тоже оказывала значительное влияние на возможности перемещения рулевой рейки. Для компенсирования влияния гравитации было выполнено перемещение в противоположную сторону:

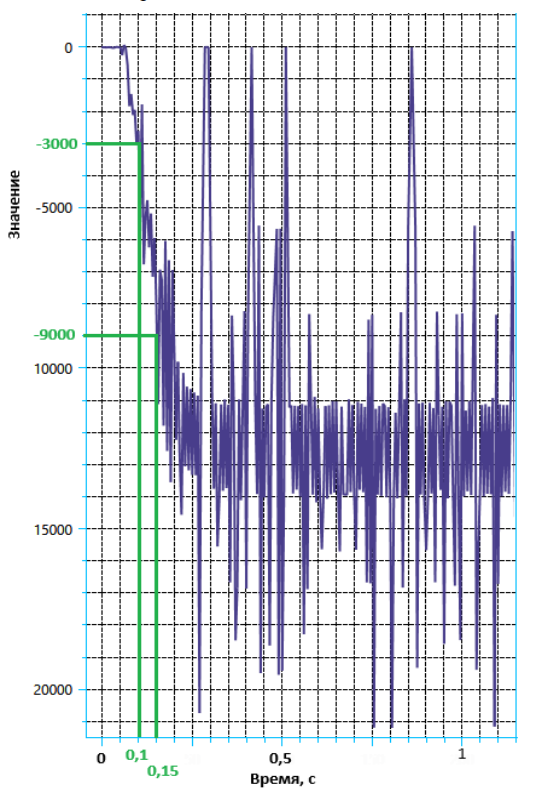


Рисунок 9 — Снятие скорости при токе равным -8А

Здесь переменная Speed.Spd изменилась на 6000 за время сек, что соответствует изменению скорости на 109,410632 рад/с. При этом, поскольку стабилизированный ток в обмотках двигателя был равен 8А, то постоянный момент:

.

Тогда момент инерции:



Истинное значение момента инерции определим как усредненное значение:



1. Поддержка датчика положения

Рулевая рейка имеет на своём борту абсолютный энкодер с импульсным интерфейсом. С данного датчика на микроконтроллер приходит два ШИМ сигнала: А и B (Рисунок 3.1).



Рисунок 3.1 — ШИМ сигнал с датчика положения ротора: здесь сигнал B находится сверху, сигнал A — снизу

Во время движения скважность ШИМ этих сигналов меняется (Рисунок 3.2), благодаря чему мы можем вычислить положение ротора.



Рисунок 3.2 — Осциллограмма ШИМ сигнала во время движения рулевой рейки, сигнал А находится снизу, сигнал B — сверху.

Для характеристики ШИМ сигнала будем использовать время включенного состояния сигнала за один период. Искать его будем следующим образом: заведём по таймеру для каждого из сигналов. Этот таймер в ходе работы микроконтроллера будет просто накапливаться, достигать максимального значения и сбрасываться вновь (Рисунок 3.3).



Рисунок 3.3 — График работы TIM2

Начнём фиксировать значения таймера в момент изменения состояния соответствующего сигнала, то есть при переходе из 0 в 1 или из 1 в 0 (Рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 — Соотношение сигнала А с независимым таймером

Как видно из рисунка, нам сразу становится известно  и  — время включённого и выключенного состояния сигнала А. Сложив эти две переменные, мы получим период сигнала.

Поскольку при перемещении рулевой рейки меняется скважность ШИМ, но не меняется период, то введём величину (для каждого сигнала отдельно), которая будет равняться отношению длительности включения (состояния 1, ) к периоду ШИМ:



Здесь T — период ШИМ сигнала А, в среднем  (зависит от рулевой рейки),  принимает разные значения в зависимости от позиции рулевой рейки. Её примерные границы от 0,13 до 0,93 мс.

Выведем *PilaA\_orig* на график и запустим рейку в движение от края до края (Рисунок 3.3).



Рисунок 3.3 — Отображение пилы А

Получили пилообразный сигнал. Пила Б будет иметь такую же форму, но с большим периодом:



Период (что подтверждается рисунками 3.1–3.2),  принимает разные значения в зависимости от позиции рулевой рейки. Её примерные границы: от 0,6 до 4,2 мс.



Рисунок 3.4 — Отображение пилы Б

Промоделируем эти сигналы в MATLAB Simulink. В качестве блока генерации пилообразного сигнала будем использовать Repeating Table. Исходя из рисунков 3.3 и 3.4, можно посчитать количество пил, которые рейка проходит при перемещении из одного крайнего положения в другое. Для сигнала А это 29,2 пилы, для сигнала Б — 3,94 пилы. Тогда, графики этих пил:



Рисунок 3.5 — Графики пил

Построим итоговую пилу, которая будет изменяться от 0 до 1 за весь ход рулевой рейки от -1000 до 1000. Строить её будем, используя пилы A и B. Умножим пилу A на 2, а пилу B на 15 и назовём эти переменные PilaA\_shift и PilaB\_shift соответственно. Тогда за перемещение от -1000 до +1000 будет насчитано 58,4 pilaA\_shift и 59,1 pilaB\_shift. Коэффициенты 2 и 15 были выбраны не просто так. В идеале, итоговые значения pilaA\_shift и pilaB\_shift должны отличаться на единицу, для лучшей точности определения позиции рулевой рейки. У нас же получилось добиться разницы равной 59,1 – 58,4 = 0,7.

Теперь выведем большую пилу, которая будет считаться по следующему условию: если значение pilaA\_shift больше чем pilaB\_shift, то итоговая равняется разности 1 – (pilaA\_shift – pilaB\_shift), а если pilaB\_shift > pilaA\_shift, то итоговая равняется pilaB\_shift – pilaА\_shift. Графически это условие будет выглядеть следующим образом:



Рисунок 3.6 — Расчёт большой пилы



Рисунок 3.7 — График высчитанной пилы

Именно используя эту высчитанную пилу, полученную из двух (А и Б), и считается местоположение рулевой рейки. Величина наклона рассчитанной пилы высчитывается исходя из разницы pilaB\_shift и pilaA\_shift. Чем больше эта разница, тем сильнее наклон прямой, тем точнее мы определяем положение (поскольку разница между двумя соседними значениями больше). Чрезмерно большая разница приведёт к тому, что на один полный ход рейки рассчитанной пилы будет несколько штук, что недопустимо, поскольку создаёт неоднозначность позиции по одному рассчитанному значению.

# 2. Разработка контура управления током электродвигателя рулевой рейкой

Теперь, зная характеристики и параметры электродвигателя, можем разработать контур управления током. Контроль тока будем осуществлять через пропорционально-интегрирующий регулятор. Тогда структурная схема контура выглядит следующим образом:



Рисунок 9 — Структурная схема контура управления током

На структурной схеме приняты следующие сокращения:

 — коэффициент передачи инвертора по напряжению;

 — постоянная времени инвертора;

 — эквивалентное активное сопротивление фазы обмотки якоря;

 — постоянная времени фазы обмотки статора;

 — коэффициент пропорционального усиления регулятора тока;

 — коэффициент усиления интегральной составляющей регулятора тока.

При проведении оптимизации контура управления током рассматриваются следующие допущения:

– область изменения рабочих параметров не достигает максимально-допустимых ограничений и таким образом модель можно считать линеаризованной;

– время дискретизации, обусловленное несущей частотой ШИМ инвертора значительно меньше, чем постоянная времени объекта регулирования;

– при проведении оптимизации в контуре тока предполагаем полное отсутствие внешних возмущений, обусловленных вращением ротора и нагрузкой приложенной к валу синхронного двигателя.

*Kinv* — определяется исходя из величины рабочего напряжения Udc на шине конденсаторе и коэффициенте ШИМ:

.

 — можно определить, зная несущую частоту ШИМ инвертора блока управления БУРР-30(Гц):

(сек).

*Re* — эквивалентное сопротивление, было получено экспериментальным путём:

(Ом).

*Te* — постоянная времени электромагнитной составляющей двигателя, определяется исходя из индуктивности якорной цепи (которая была также определена экспериментально) (Гн) и активного сопротивления якорной цепи Ом:

(сек).

**Оптимизация контура управления током**

Воспользуемся принципами оптимизации линейных систем и определим параметры управляющего регулятора для контура тока. Основываясь на методике настройки на модульный оптимум, предложенной Кесслером (Keßler) [методичка пдф] постараемся привести передаточную функцию замкнутого контура к желаемому виду:



Выполнив несложные преобразования, можно получить эквивалентную желаемую передаточную функцию, но применительно к разомкнутому контуру и с единичной обратной связью:



В данном случае становится наиболее удобно определить параметры регулятора, отталкиваясь от имеющейся передаточной функции объекта управления:



Здесь  — передаточная функция инвертора, а  — передаточная функция электромагнитного контура двигателя.

В конечном итоге получаем расчётное выражение для передаточной функции регулятора в следующем виде:



Согласно методике оптимизации на модульный оптимум в линейной системе, следующим шагом необходимо выбрать величину малой некомпенсируемой постоянной времени . В рассматриваемом контуре минимальной постоянной времени, определяющей максимально-достижимое быстродействие системы является постоянная времени инвертора  и, следовательно, далее можно полагать, что .

В соответствии с этим можно выполнить ряд преобразований над передаточной функцией регулятора, упрощающих её вид:



Анализируя полученное выражение, приводим его к виду, соответствующему канонической форме пропорционально-интегрального регулятора:

,

Таким образом, мы получили ПИ-регулятор с коэффициентами  и . В соответствии с полученными результатами аналитических вычислений, получим численные значения коэффициентов:



сек – постоянная времени интегрирования.

.

**Ожидаемые показатели качества**

Для определения ожидаемых показателей качества оптимизированной системы электропривода будет удобно воспользоваться методикой оптимизации на модульный оптимум. Ниже представлен ряд показателей качества, характеризующий работоспособность системы.

(сек) – время вхождения в 5-ти процентную зону от установившегося значения при ступенчатом сигнале задания;

% – величина перерегулирования при отработке системой ступенчатого входного сигнала;

(рад/сек) — полоса пропускания контура по модулю и по фазе.

Полученные ожидаемые показатели качества системы сведём в таблицу 1

Таблица 1. Ожидаемые показатели качества оптимизированной системы

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Эквивалентная малая постоянная времени , сек | Время переходного процесса , сек | Перерегулирование при ступенчатом сигнале задания , % | Полоса пропускания по модулю , рад/сек | Полоса пропускания по фазе , рад/сек |
| 0.00026 | 0.001066 | 4.32 | 2730 | 2730 |

4. Имитационное моделирование переходных процессов

Для проверки правильности проведённой оптимизации и соответствия показателей качества ожидаемым, воспользуемся методом имитационного моделирования. Программный пакет Matlab Simulink даёт возможность для детальной имитации системы на уровне структурной схемы. На рисунке 3 представлена имитационная модель системы в соответствии с её структурной схемой, рисунок 10.

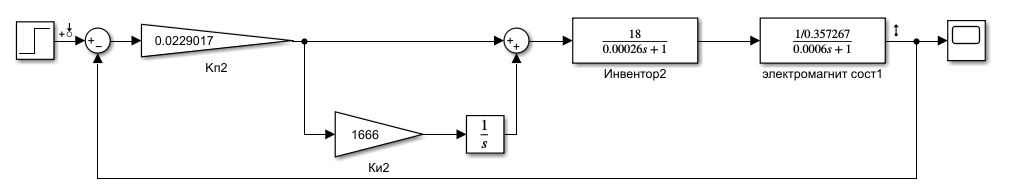


Рисунок 10 — Контур управления током в Matlab Simulink

Для расчёта переходных процессов использовался численный метод Эйлера первого порядка с фиксированным шагом dt = 1/1000000. На рисунках 11 и 12 представлены графики переходного процесса при ступенчатом входном сигнале задания и частотные характеристики, полученные посредством инструмента из пакета Simulink Model Linearizer.

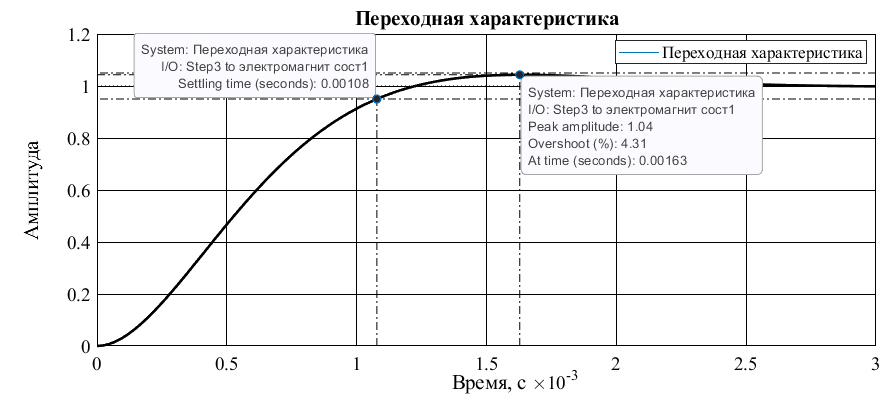


Рисунок 11 — Переходный процесс по току

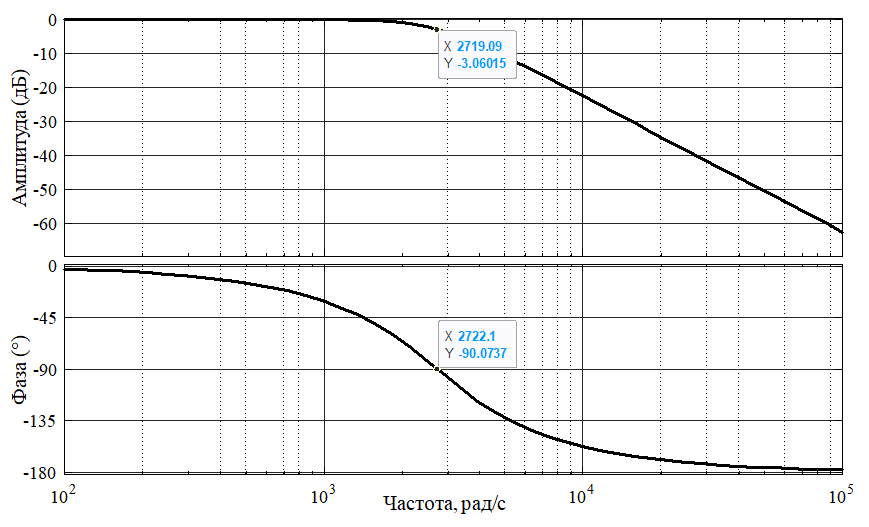


Рисунок 12 — АЧХ и ФЧХ контура тока

В таблице 2 представлено сравнение ожидаемых показателей качества и полученных в результате имитационного моделирования в пакете Matlab-Simulink.

Таблица 2. Сравнение ожидаемых и экспериментальных показателей качества

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Время переходного процесса , сек | Перерегулирование при ступенчатом сигнале задания , % | Полоса пропускания по модулю , рад/сек | Полоса пропускания по фазе , рад/сек |
| Ожидаемый | 0.001066 | 4.32 | 2730 | 2730 |
| Эксперимент | 0.00108 | 4.31 | 2710 | 2710 |

Анализируя полученные результаты можно сделать положительный вывод о работоспособности системы управления и правильности проведённой оптимизации контура тока.

# 3. Разработка контура управления скоростью рулевой рейки с ЭМУР

При разработке контура управления скоростью рулевой рейки будем брать за основу разработанный ранее контур управления током рулевой рейки в п.2. Тогда схема контура скорости выглядит следующим образом:

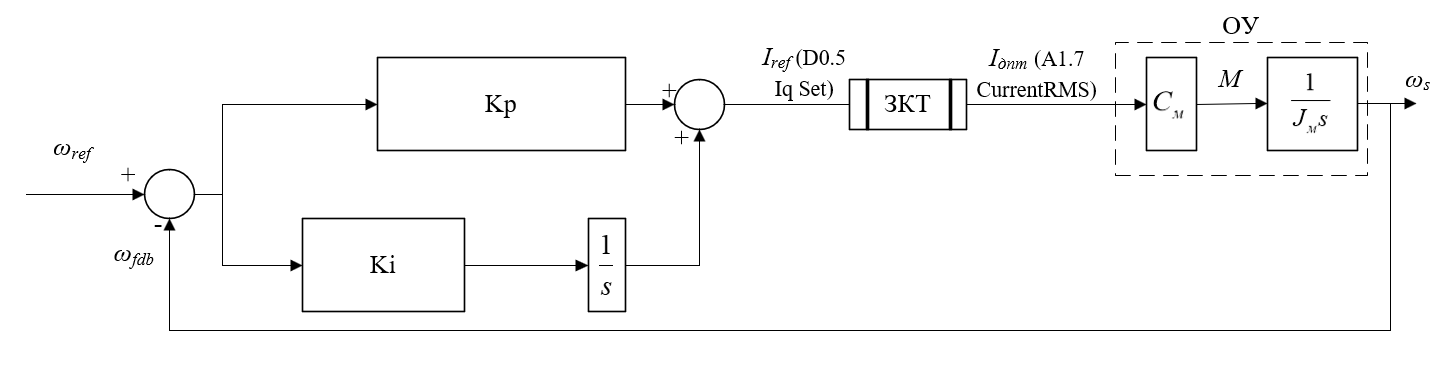


Рисунок 13 — Контур управления скоростью ДПТ

На структурной схеме приняты следующие сокращения:

 — конструктивный параметр электродвигателя;

 — момент инерции рулевой рейки;

ЗКТ — Замкнутый контур тока;

 — коэффициент пропорционального усиления регулятора скорости;

 — коэффициент усиления интегральной составляющей регулятора скорости.

При проведении оптимизации контура управления скоростью рассматриваются следующие допущения:

– область изменения рабочих параметров не достигает максимально-допустимых ограничений и таким образом модель можно считать линеаризованной;

- Не принимаются во внимание ЭДС вращения вала

 был определен в пункте 1 и равен 0,053215.

 был определен в пункте 1 и равен 0,058..

**Оптимизация контура управления скоростью**

Контур скорости можно настроить как на модульный оптимум, так и на симметричный. В данной работе была выбрана настройка на симметричный оптимум, поскольку требования к быстродействию переходного процесса невелики, но требуется отсутствие статической ошибки.

Воспользуемся принципами оптимизации линейных систем и определим параметры управляющего регулятора для контура скорости. Основываясь на методике настройки на симметричный оптимум, приведем передаточную функцию замкнутого контура к желаемому виду [методичка ПДФ] нужно описать что такое wкс со w зкт:

.

В то же время 



В данном случае наиболее удобно определить параметры регулятора, отталкиваясь от имеющейся передаточной функции объекта управления:

, где

.

Однако, для облегчения расчёта регулятора скорости, а также в силу того, что  аппроксимируем контур тока как



В итоге получаем расчётное выражение для передаточной функции регулятора скорости в следующем виде:



Где.

**Ожидаемые показатели качества**

Для определения ожидаемых показателей качества оптимизированной системы электропривода будет удобно воспользоваться методикой оптимизации на симметричный оптимум. Ниже представлен ряд показателей качества, характеризующий работоспособность системы.

Время вхождения в 5-ти процентную зону от установившегося значения при ступенчатом сигнале задания:

;

 – величина перерегулирования при отработке системой ступенчатого входного сигнала;

Полученные ожидаемые показатели качества системы сведём в таблицу 3.

Таблица 3. Ожидаемые показатели качества оптимизированной системы

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Эквивалентная малая постоянная времени , сек | Время переходного процесса , сек | Время переходного процесса , сек | Перерегулирование при ступенчатом сигнале задания , % |
| 0.00052 | 0.001508 | 0.007644 | 43.4 |

**Имитационное моделирование переходных процессов**

Для проверки правильности проведённой оптимизации и соответствия показателей качества ожидаемым, воспользуемся методом имитационного моделирования. Программный пакет Matlab Simulink даёт возможность для детальной имитации системы на уровне структурной схемы. На рисунке 3 представлена имитационная модель системы в соответствии с её структурной схемой, рисунок 10.

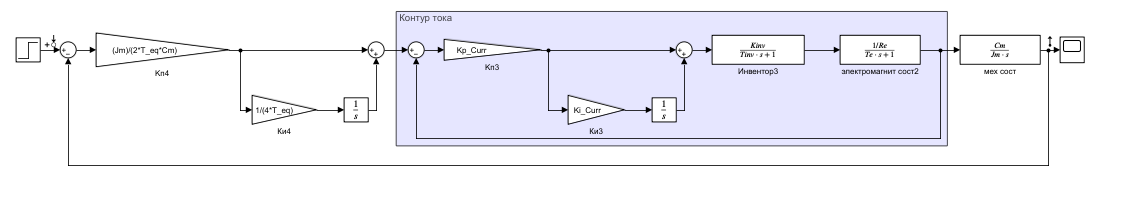


Рисунок 14 — Контур управления скоростью в Matlab Simulink

Для расчёта переходных процессов использовался численный метод Эйлера первого порядка с фиксированным шагом dt = 1/1000000. На рисунке 15 представлен график переходного процесса при ступенчатом входном сигнале задания и частотные характеристики, полученные посредством инструмента из пакета Simulink Model Linearizer.

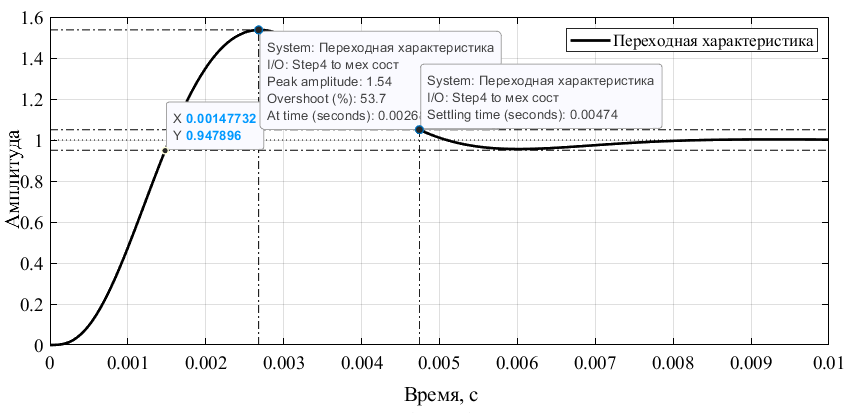


Рисунок 15 — Переходный процесс по скорости

В таблице 4 представлено сравнение ожидаемых показателей качества и полученных в результате имитационного моделирования в пакете Matlab-Simulink.

Таблица 4. Сравнение ожидаемых и экспериментальных показателей качества

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Время переходного процесса , сек | Время переходного процесса , сек | Перерегулирование при ступенчатом сигнале задания , % |
| Ожидаемый | 0.001508 | 0.007644 | 43.4 |
| Эксперимент | 0.00148 | 0.00474 | 53.7 |

Как видно, полученные экспериментально данные отличаются от ожидаемых. Вспомним, что настройку на симметричный оптимум мы делали для аппроксимированного контура тока, ПФ которого выглядела следующим образом:



Для проверки совершенных ранее вычислений, выясним, как работает рассчитанный нами регулятор на аппроксимированном замкнутом контуре тока, для этого вновь соберем модель:

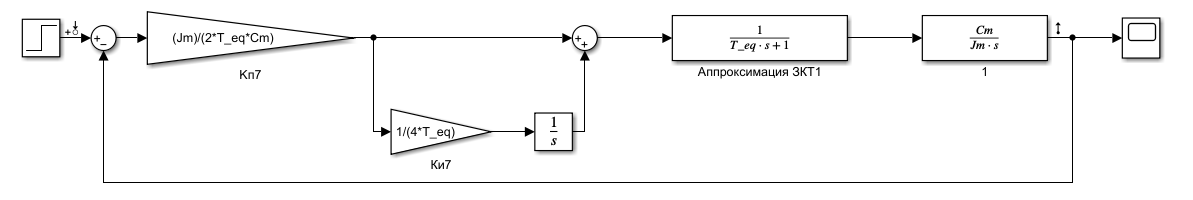


Рисунок 16 — Имитационная модель с аппроксимированным ЗКТ

И снимем переходную характеристику:

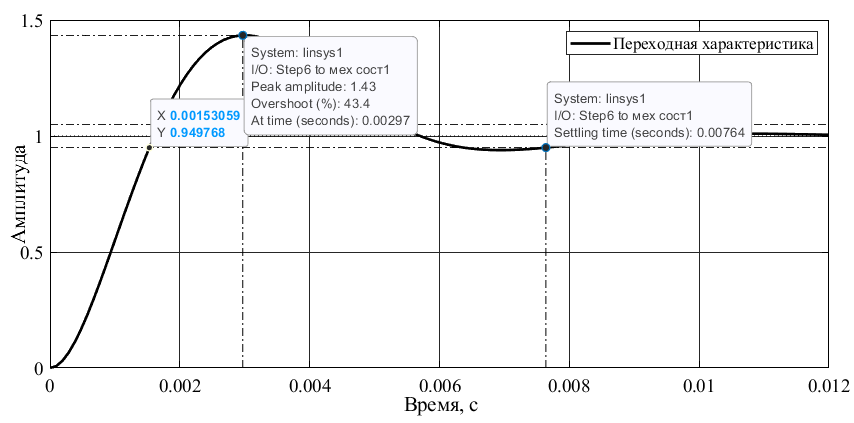


Рисунок 17 — Переходная характеристика с аппроксимированным ЗКТ

Дополним таблицу новыми данными:

Таблица 5. Сравнение ожидаемых и экспериментальных показателей качества

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Время переходного процесса , сек | Время переходного процесса , сек | Перерегулирование при ступенчатом сигнале задания , % |
| Ожидаемый | 0.001508 | 0.007644 | 43.4 |
| Эксперимент | 0.00148 | 0.00474 | 53.7 |
| Эксперимент с аппроксимацией ЗКТ | 0.00153 | 0.00764 | 43.4 |

Анализируя полученные результаты можно сделать положительный вывод о настройки контура управления скоростью на симметричный оптимум, а неточности, полученные в ходе эксперимента, связаны с тем, что при расчётах регуляторов ЗКТ был аппроксимирован апериодическим звеном первого порядка.

Однако, несмотря на то, что настройка контура удалась, значение перерегулирования 53% является слишком большой величиной для корректной работы контура скорости в составе рулевой рейки. Исправим эту ситуацию, задав оптимизирующий фильтр в канале управления, передаточная функция которого .[] Тогда имитационная модель выглядит следующим образом:

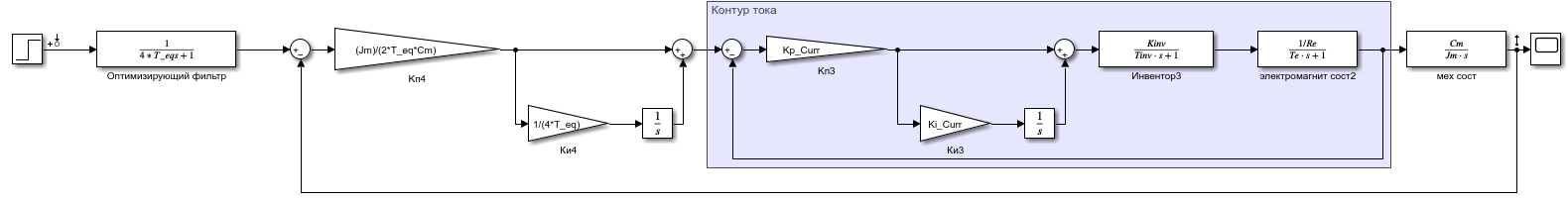


Рисунок 18 — Имитационная модель с оптимизирующим фильтром

И рассчитаем ожидаемые показатели качества с оптимизирующим фильтром в канале управления при ступенчатом входном воздействии.

Таблица 5. Сравнение ожидаемых и экспериментальных показателей качества

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Время переходного процесса , сек | Время переходного процесса , сек | Перерегулирование при ступенчатом сигнале задания , % |
| Ожидаемый | 0.001508 | 0.007644 | 43.4 |
| Эксперимент | 0.00148 | 0.00474 | 53.7 |
| Эксперимент с аппроксимацией ЗКТ | 0.00153 | 0.00764 | 43.4 |
| Ожидаемый с опт. фильтром | 0.00364 | 0.00624 | 8.1 |

Снимем переходную характеристику:

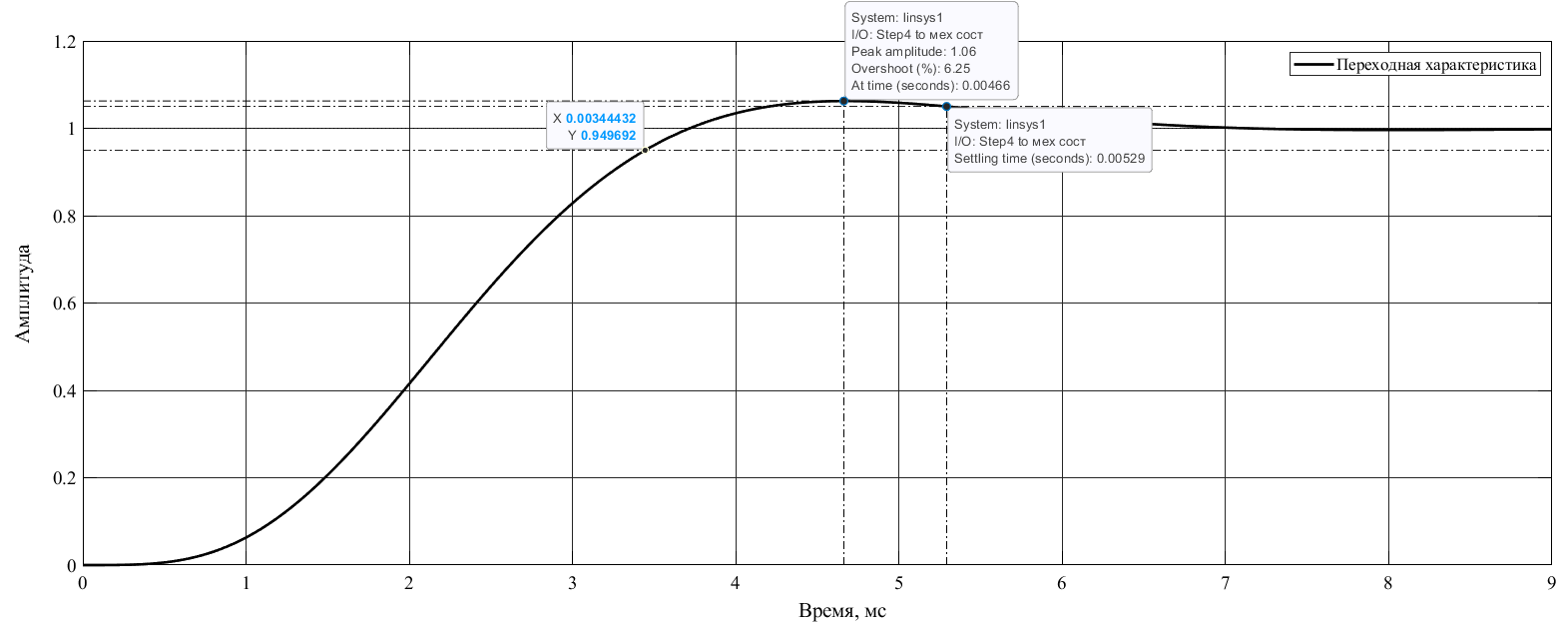


Рисунок 19 — Переходная характеристика с оптимизирующим фильтром

Полученные показатели качества запишем в таблицу:

Таблица 6. Сравнение ожидаемых и экспериментальных показателей качества

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Время переходного процесса , сек | Время переходного процесса , сек | Перерегулирование при ступенчатом сигнале задания , % |
| Ожидаемый | 0.001508 | 0.007644 | 43.4 |
| Эксперимент | 0.00148 | 0.00474 | 53.7 |
| Эксперимент с аппроксимацией ЗКТ | 0.00153 | 0.00764 | 43.4 |
| Ожидаемый с опт. фильтром | 0.00364 | 0.00624 | 8.1 |
| Эксперимент с опт. фильтром | 0.00344 | 0.00529 | 6.25 |

Полученные экспериментально данные незначительно отличаются от ожидаемых, что говорит об успешной настройке контура скорости.

# Разработка и оптимизация контура положения при отсутствии ограничений

При разработке контура управления положением рулевой рейки будем использовать разработанный ранее контур управления скоростью рулевой рейки.

Тогда структурная схема контура выглядит следующим образом:

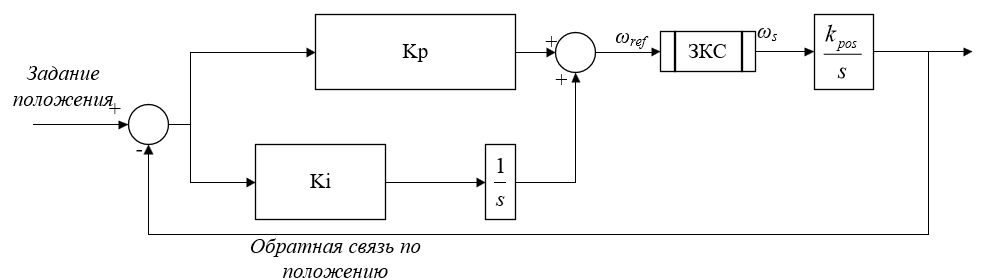


Рисунок 11 — Контур управления положением ДПТ

На структурной схеме приняты следующие сокращения:

— коэффициент передачи редуктора относительно рад/c;

ЗКC — Замкнутый контур скорости;

 — коэффициент пропорционального усиления регулятора скорости;

 — коэффициент усиления интегральной составляющей регулятора скорости.

При проведении оптимизации контура управления положением рассматриваются следующие допущения:

– область изменения рабочих параметров не достигает максимально-допустимых ограничений и таким образом модель можно считать линеаризованной;

Найдём  учитывая вычисления, проделанные в прошлом пункте. Мы знаем, что 1 оборот двигателя перемещает рейку на 2.48мм. Поскольку обороты и радианы взаимосвязаны следующим выражением . Таким образом , где .

**Оптимизация контура управления положением**

Воспользуемся принципами оптимизации линейных систем и определим параметры управляющего регулятора для контура положения.

Настроим контур положения на симметричный оптимум с целью устранения статической и динамической ошибки при работе контура.[4]

Воспользуемся принципами оптимизации линейных систем и определим параметры управляющего регулятора для контура положения. Основываясь на методике настройки на симметричный оптимум, приведем передаточную функцию замкнутого контура к желаемому виду:

.

В данном случае становится наиболее удобно определить параметры регулятора, отталкиваясь от имеющейся передаточной функции объекта управления:





В силу того, что  и , можем аппроксимировать замкнутый контур скорости апериодическим звеном первого порядка:



Тогда ПФ объекта управления:



В итоге получаем расчётное выражение для передаточной функции регулятора в следующем виде:



Где.

Для проверки полученных значений соберем имитационную модель контура управления положением в Matlab Simulink и подадим ступенчатый сигнал на вход:

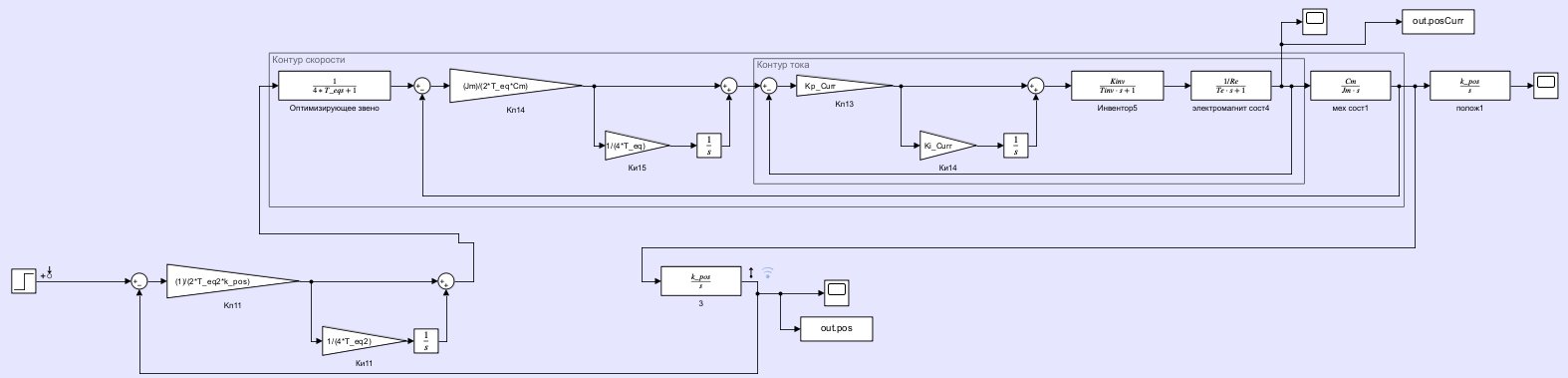


Рисунок 12 — Имитационная модель контура положения

Переходная характеристика в этом случае:



Рисунок 13 — Переходная характеристика по положению при ступенчатом сигнале

При этом перерегулирование составило 50.9%, а время регулирования — 0.0194 секунды. Для компенсации большого перерегулирования введем задатчик интенсивности.

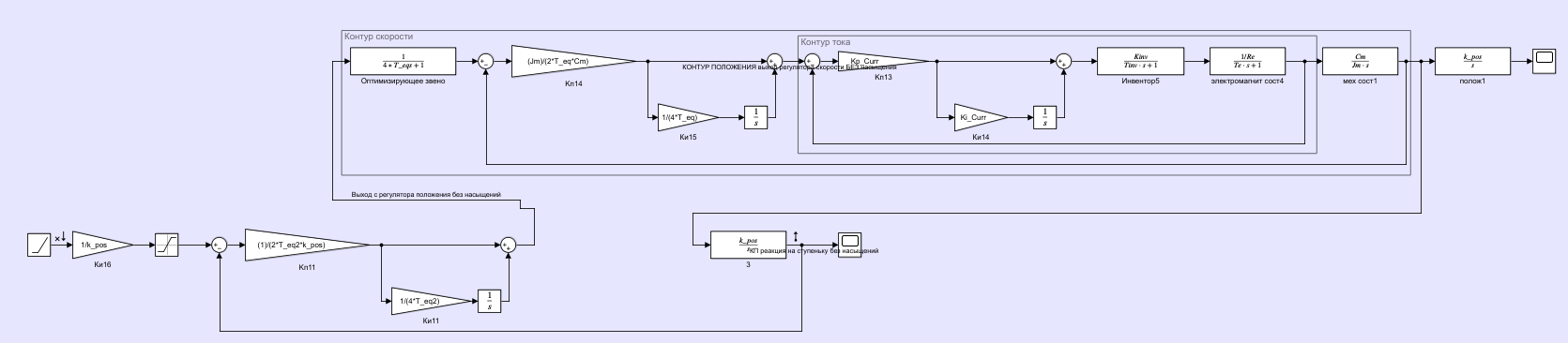


Рисунок 14 — Имитационная модель контура положения вместе с задатчиком интенсивности

И сформируем команду на перемещение рулевой рейки на 96мм, что соответствует перемещению из одного крайнего положения в другое. Снимем график перемещения рейки:



Рисунок 14 — Переходная характеристика контура положения с задатчиком интенсивности

По результатам наблюдений, можно отметить значительное снижение перерегулирования, сопровождаемое существенным увеличением времени, необходимого для завершения процесса регулирования. Тем не менее, в процессе разработки контуров управления не были учтены физические ограничения, существующие в реальном мире. Например, при анализе переходных характеристик контура положения, изображенных на рисунке 14, можно наблюдать, что выходное значение контура регулирования скоростью (то есть задание на контур тока) изменяется в соответствии со следующей кривой:



Рисунок 15 — Выход контура управления током

Очевидно, что ток достигает значений, приблизительно равных 60 килоамперам, что превышает предельные допустимые значения для электродвигателя рулевой рейки.

# 3. Оптимизация контура управления током с учетом накладываемых ограничений

В связи с ограничениями напряжения, присутствующими в системе, предлагается внедрить механизм насыщения на выходе регулятора тока на уровне 18 вольт в связи с ограничениями, накладываемыми напряжением бортовой сети беспилотного ТС, силовым преобразователем и номинальным напряжением двигателя. Кроме того, для предотвращения насыщения регулятора также предлагается внедрить дополнительное воздействие на интегральную составляющую регулятора в соответствии со следующей схемой:

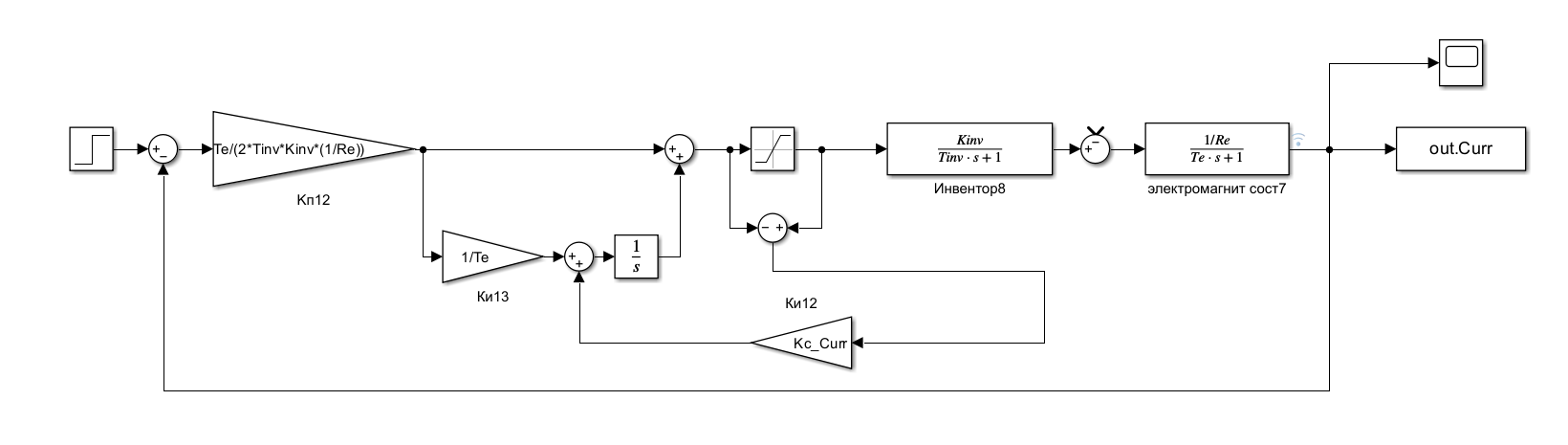


Рисунок 16 — Имитационная модель контура тока

В ПИД регуляторе интегральная составляющая отвечает за коррекцию системных ошибок по времени. Она интегрирует разницу между желаемым и фактическим состоянием системы во времени и применяет корректировку, чтобы минимизировать эту ошибку. Без ограничений интегральная составляющая может продолжать нарастать бесконечно, что может вызвать нестабильность системы. Благодаря введению дополнительного воздействия, становится возможно предотвратить переполнения интегральной составляющей. Это становится проблемой, если ошибку не удаётся устранить в связи с ограничениями системы, ведь в этом случае интегральная составляющая будет расти бесконечно. Также это позволяет уменьшить время на восстановление регулирования после больших ошибок, например когда задание было гораздо больше чем то, что можно реализовать на выходе контура.

Рассмотрим реакцию контура тока на задание, которое сильно превышает реально достижимый ток в системе:



Рисунок 17 — Значения сигналов

Таким образом, при попытке установить значения тока в обмотке двигателя выше физически допустимого предела, модель будет ограничивать значение тока на максимально достижимом уровне.

# 4. Оптимизация контура управления скоростью с учетом накладываемых ограничений

В связи с физическими ограничениями, накладываемыми на силовой преобразователь и двигатель, предлагается установить ограничение на выходе регулятора скорости на уровне максимального допустимого тока, соответствующего 70 амперам, с целью предотвращения возможных перегревов и сохранения необходимого уровня момента (достаточного для работы). Данный уровень тока соответствует допустимой кратковременной токовой перегрузке. Кроме того, для предотвращения насыщения регулятора также предлагается внести корректировки в интегральную составляющую регулятора в соответствии с указанной схемой:

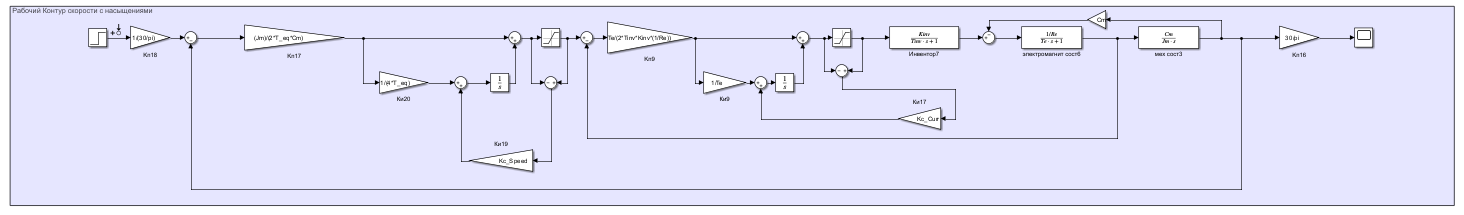


Рисунок 18 — Имитационная модель контура скорости с ограничениями



Рисунок 19 — Реакция контура скорости на ступенчатый сигнал

При этом во вложенном контуре управления током сигналы изменялись по следующим кривым



Рисунок 20 — Управление током во время отработки скорости

Таким образом, была проведена проверка эффективности механизма, который предотвращает насыщение регулятора.

Если сравнить отработку контура скорости текущего варианта с идеализированным предыдущим, то увидим такую картину:



Рисунок 21 — Сравнение контуров

На рисунке 21 можно увидеть, что время регулирования стало в разы больше.

# 5. Оптимизация контура управления положением с учетом накладываемых ограничений

Из-за физических ограничений, связанных с невозможностью бесконечного увеличения скорости вращения двигателя для более быстрого установления рейки в нужное положение, необходимо ограничить максимальную скорость вращения двигателя на номинальном уровне 875 оборотов в минуту. Для предотвращения насыщения регулятора также предлагается внести корректировки в интегральную составляющую регулятора в соответствии с указанной схемой:

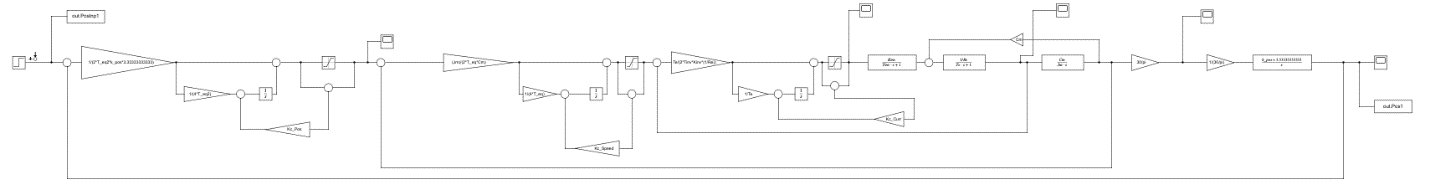


Рисунок 21 — Имитационная модель контура положения с ограничениями

Подадим команду на перемещение на 96мм, что соответствует перемещению рулевой рейки из одного крайнего положения в другое:



Рисунок 22 — Переходная характеристика контура положения

Исходя из рисунка 22 видно, что система входит в автоколебания, что является неудовлетворительным поведением системы. Происходит это из-за соответствующей формы регулятора положения:



Рисунок 23 — Сравнение выходного сигнала КП с выходом регулятора положения

Для достижения стабильной контура положения, выполним корректировку коэффициента регулятора положения с учётом следующего: уменьшим  в 20 раз,  в 16,66 раз. В результате получим следующую картину:



Рисунок 24 — Полученный результат перемещения из одного крайнего положения рейки в другое

Сравнение качеств переходного процесса. Несмотря на значительное увеличение времени переходного процесса в контуре положения, удалось достигнуть удовлетворительных показателей качества по форме перемещений с учётом всех имеющихся ограничений в контурах тока, скорости и положения.

При этом скорость изменяется в соответствии со следующим законом:



Рисунок 25 — Работа контура скорости

Из графика на рисунке 25 видно, что при отработке задания в контуре положения электродвигатель выходит на номинальные обороты, что соответствует максимально эффективному использованию мотора.

При этом ток в цепи электродвигателя изменяется в соответствии с последующей кривой:



Рисунок 26 — Работа контура тока

Из графика на рисунке 26 видно, что при отработке задания в контуре положения в цепи электродвигателя происходит увеличение тока до уровня соответствующего допустимой кратковременной токовой перегрузке в 70А, что соответствует максимальной эффективности использования мотора и силового преобразователя без перегрузки.

Полученный результат можно считать успешным, поскольку система остается устойчивой, время переходного процесса удовлетворительное, и линейная ошибка по положению рулевой рейки отсутствует. Кроме того, значения тока и скорости не принимают неадекватных значений. (мотор использован на 100% по скорости току и энергетической эффеткивноси двигателя по моменту).

# Реализация контура управления током на блоке управления БУРР-30-С.

Для реализации контура управления током необходимо в первую очередь наладить считывание текущего уровня тока в обмотках ДПТ. Датчики тока располагаются в силовом канале согласно следующей схеме: