

Инженерная школа энергетики  
 Направление подготовки – 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника  
 Отделение электроэнергетики и электротехники

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
<b>Сервопривод рулевой рейки беспилотного транспортного средства</b>
УДК 629.73.062-519

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ71	Чичманов Константин Николаевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ланграф С.В.	К.Т.Н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Подопригора И.В.	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Куликова О.А.	К.Т.Н.		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Гарганеев А.Г.	Д.Т.Н.		

**ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП  
13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»**

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<b>Универсальные компетенции</b>	
P1	<i>Совершенствовать</i> и развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, добиваться нравственного и физического совершенствования своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности.
P2	<i>Свободно</i> пользоваться русским и иностранным языками как средством делового общения, способностью к активной социальной мобильности
P3	<i>Использовать</i> на практике навыки и умения в организации научно-исследовательских и производственных работ, в управлении коллективом, использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности.
P4	<i>Использовать</i> представление о методологических основах научного познания и творчества, роли научной информации в развитии науки, готовностью вести работу с привлечением современных информационных технологий, синтезировать и критически резюмировать информацию.
<b>Профессиональные компетенции</b>	
P5	Применять углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики и электротехники
P6	Ставить и решать инновационные задачи инженерного анализа в области электроэнергетики и электротехники с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределенности
P7	Выполнять инженерные проекты с применением оригинальных методов проектирования для достижения новых результатов, обеспечивающих конкурентные преимущества электроэнергетического и электротехнического производства в условиях жестких экономических и экологических ограничений.
P8	Проводить инновационные инженерные исследования в области электроэнергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.
P9	Проводить технико-экономическое обоснование проектных решений; выполнять организационно-плановые расчеты по созданию или реорганизации производственных участков, планировать работу персонала и фондов оплаты труда; определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса.
P10	Проводить монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные работы электроэнергетического и электротехнического оборудования объектов и систем электроэнергетики и электротехники.
P11	Осваивать новое электроэнергетическое и электротехническое оборудование; проверять техническое состояние и остаточный ресурс оборудования и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт.
P12	Разрабатывать рабочую проектную и научно-техническую документацию в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами; организовывать метрологическое обеспечение электроэнергетического и электротехнического оборудования; составлять оперативную документацию, предусмотренную правилами технической эксплуатации оборудования и организации работы.

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Инженерная школа энергетики

Направление подготовки – 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Уровень образования – Магистр

Отделение электроэнергетики и электротехники

Период выполнения \_\_\_\_\_ весенний семестр 2018/2019 учебного года \_\_\_\_\_

Форма представления работы:

магистерская диссертация

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН  
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
16.04.2019г	Расчет и построение характеристик электропривода рулевой рейки	
05.05.2019г	Разработка имитационной модели следящего электропривода в среде Matlab	
12.05.2019г	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	
19.05.2019г	Социальная ответственность	
25.05.2019г	Оформление пояснительной записки	

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ланграф С.В.	к.т.н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Гарганеев А.Г.	д.т.н.		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа энергетики  
 Направление подготовки – 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника  
 Отделение электроэнергетики и электротехники

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_ А.Г. Гарганеев  
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации
--------------------------

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5ГМ71	Чичманов Константин Николаевич

Тема работы:

<b>Сервопривод рулевой рейки беспилотного транспортного средства</b>	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><i>(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.).</i></p>	<p>Максимальная скорость вращения обода рулевого колеса: 1 об/с; Максимальная нагрузка на управляемую ось: 1550 кг; Разработка электропривода производится на базе существующего электромеханического усилителя рулевого управления автомобилей семейства ВАЗ; Разрабатываемый электропривод должен применяться в пассажирском транспорте, со снаряженной массой 2.5 т. В качестве прототипа автомобиля рассматривается ГАЗ -322132; Требования к следящему электроприводу: Учесть при определении оптимальной конструкции</p>
---	--

	сервопривода рулевого управления, наличие ограничений по скорости, моменту; обеспечить требуемые параметры технологического процесса; Разработать адекватную компьютерную модель управления системы следящего электропривода.
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b> <i>(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).</i>	1. Анализ конструкции и электроприводов рулевого управления автомобилей; 2. Математическая модель электромеханической системы рулевого управления автомобиля; 3. Синтез системы автоматического управления и построение структуры следящего электропривода рулевой рейки; 4. Исследование имитационной модели синхронного электропривода
<b>Перечень графического материала</b> <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	1. Функциональная и структурная схемы; 2. Имитационная модель; 3. Результаты исследований.
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> <i>(с указанием разделов)</i>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Подопригора Игнат Валерьевич
«Социальная ответственность»	Куликова Ольга Александровна
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	
Введение; обзор литературы по вопросам следящего электропривода рулевой рейки, составление математического описания используемого электродвигателя; заключение.	

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	09.12.2019
---	------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ланграф Сергей Владимирович	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ71	Чичманов Константин Николаевич		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5ГМ71	Чичманову Константину Николаевичу

<b>Школа</b>	<b>ИШЭ</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	<b>Электроэнергетики и электротехники</b>
<b>Уровень образования</b>	Магистр	<b>Направление/специальность</b>	Электроприводы и системы управления электроприводов

Тема ВКР:

<b>Сервопривод рулевой рейки беспилотного транспортного средства</b>	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
<p>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</p>	<p>Синхронный следящий электропривод рулевого управления колесного беспилотного транспортного средства.</p> <p>Рабочая зона – сборочный цех, также, испытательная лаборатория</p> <p>Область применения – автомобили, наземные транспорты.</p>
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
<p><b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Специальные правовые нормы трудового законодательства</li> <li>– Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны</li> </ul>	<p>1. ТК РФ, Статья 221. Обеспечение работников средствами индивидуальной защиты.</p> <p>2. ТК РФ. Глава 15. Рабочее время. Общие положения.</p> <p>3. Федеральным законом от 24.07.1998 г. № 125-ФЗ «Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний».</p> <p>4. ТК РФ, Статья 213. Медицинские осмотры некоторых категорий работников.</p>
<p><b>2. Производственная безопасность</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Анализ выявленных вредных и опасных факторов; обоснование мероприятий по снижению воздействия</li> </ul>	<p>Выявленные вредные и опасные факторы производственной среды:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Шум;</li> <li>2. Механические повреждения;</li> <li>3. Недостаток естественного света;</li> <li>4. Метеоусловия в цеху;</li> <li>5. Опасность поражения электричеством</li> </ol>
<p><b>3. Экологическая безопасность:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– защита селитебной зоны</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Сборочный цех и лаборатория находятся вне селитебной зоны</li> <li>2. Необходимо рассмотреть негативное влияние производства в сборочном цеху</li> </ol>

<ul style="list-style-type: none"> <li>– анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);</li> </ul>	<p>и испытательной лаборатории зала на окружающую среду, а именно:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– гидросферу;</li> <li>– литосферу.</li> </ul>
<p><b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения;</li> <li>– выбор наиболее типичной ЧС;</li> <li>– разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;</li> <li>– разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.</li> </ul>	<p>Наиболее вероятной чрезвычайной ситуацией является пожар, по причине:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-нарушения работы электрооборудования, приведшего к возгоранию;</li> <li>-неосторожности обращения с огнем в помещении;</li> <li>-короткого замыкания, приводящего к возгоранию;</li> </ul> <p>Система пожарной защиты предусматривает следующие меры:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-предотвращение распространения пожара за пределы очага;</li> <li>-применение средств пожаротушения;</li> <li>-эвакуация людей в случае пожара;</li> <li>-применение средств пожарной сигнализации средств извещения;</li> <li>-Средства индивидуальной защиты органов дыхания (респираторы, тканевые повязки).</li> </ul>

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отд. общетехнических дисциплин	Куликова Ольга Александровна	к. т. н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ71	Чичманов Константин Николаевич		

## ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5ГМ71	Чичманову Константину Николаевичу

<b>Школа</b>	<b>ИШЭ</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	Электроэнергетики и электротехники
<b>Уровень образования</b>	Магистр	<b>Направление/специальность</b>	Электроприводы и системы управления электроприводов

Тема ВКР:

<b>Сервопривод рулевой рейки беспилотного транспортного средства</b>	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость материальных ресурсов определялась по средней стоимости по г. Томску Оклад руководителя 19500 Оклад инженера 17000.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	30 % премии; 20 % надбавки; 16% накладные расходы; 30% районный коэффициент; 33,3 % норма амортизации.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	28% отчисления на социальные нужды
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Анализ конкурентных технических решений
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Планирование НИ: - Составление плана работ; - Определение трудоемкости работ; - Построение диаграммы Ганта . Формирование бюджета затрат на НИ: - материальные затраты; - заработная плата (основная и дополнительная); - отчисления на социальные цели; - амортизация; - накладные расходы.
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Определение эффективности исследования
<b>Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):</b>	



1. Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений
2. Диаграмма Ганта
3. Бюджет затрат НИИ

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент	Подопригора И.В.	к.э.н		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
5ГМ71	Чичманов Константин Николаевич		

## Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 106 страниц, 33 рисунка, 17 таблиц, 33 источника, 1 приложение.

Ключевые слова: рулевое управление; сервопривод рулевой рейки; синхронный электропривод; динамические характеристики; электрический усилитель руля, синхронный двигатель с постоянными магнитами.

Целью работы разработка схемы управления следящего электропривода рулевой рейки для беспилотного транспортного средства, предназначенного для перевозки пассажиров в пределах городской черты, с полной массой 2,5 тонны, режиме максимальной нагрузки, разработать математическую модель управления сервоприводом рулевой рейки в среде Matlab Simulink с учетом контуров регулирования. Провести анализ полученных и ожидаемых показателей качества работы контуров управления электроприводом. Выполнить сравнение желаемой и реальной кривых движения.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Office Word 2010 с использованием пакетов: Microsoft Visio 2010, Matlab Simulink и представлена на диске (в конверте на обороте обложки).

## **Используемые сокращения**

БТС – беспилотное транспортное средство;

ДПР – датчик положения ротора;

ДРК – двигатель рулевой колонки;

САУ – система автоматического управления;

СУД – система управления двигателем;

ЭБУ – электронный блок управления;

ЭМУР – электромеханический усилитель руля;

ЭУР – электрический усилитель руля.

## Оглавление

Реферат .....	10
Используемые сокращения .....	11
Введение.....	14
1 Обзор литературы .....	16
1.1 Развитие современных беспилотных автомобилей .....	16
1.2 Электромеханические усилители рулевого управления.....	20
2 Принципы построения следящего электропривода рулевой рейки БТС .....	24
2.1 Режимы работы электропривода рулевой рейки .....	24
2.2 Рассматриваемая компоновка электропривода рулевого управления .....	26
2.3 Математическое описание синхронного двигателя с постоянными магнитами.....	28
2.3.1 Модель синхронной машины в неподвижной системе координат .....	30
2.3.2 Модель синхронной машины во вращающейся системе координат.....	32
3 Расчет параметров элементов силовой цепи и синтез контуров регулирования.....	38
3.1 Механическая система.....	38
3.2 Линеаризованная структурная схема следящего синхронного электропривода.....	40
3.3 Синтез контуров регулирования синхронным электроприводом .....	42
3.3.2 Синтез регулятора скорости.....	45
3.1.4 Оптимизация контура положения .....	49
4 Имитационное моделирование следящего электропривода рулевой рейки	51
4.1 Описание имитационной модели .....	51
4.2 Результаты моделирования .....	56
5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение..	58
5.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	59
5.1.1 Анализ конкурентных технических решений .....	59

5.1.2 Планирование научно – исследовательских работ .....	61
5.1.2.1 Структура работ в рамках научного исследования .....	61
5.1.2.2 Разработка графика проведения научного исследования .....	62
5.2 Бюджет научно – технического исследования (НТИ).....	65
5.2.1 Расчет затрат на оборудование проекта.....	65
5.2.1.2 Расчет затрат на оборудование и программное обеспечение.....	66
5.2.1.3 Основная заработная плата исполнителей темы .....	66
5.2.1.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы.....	68
5.2.1.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	68
5.2.1.6 Накладные расходы.....	70
5.2.1.7 Формирование бюджета затрат научно-технического исследования .	70
5.3 Определение эффективности исследования.....	71
6. Социальная ответственность .....	72
6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	73
6.2 Анализ вредных и опасных производственных факторов.....	74
6.2.1 Шум .....	75
6.2.2 Механические повреждения .....	76
6.2.3 Недостаток естественного света.....	77
6.2.3.1 Выбор системы освещения .....	78
6.2.3.2 Выбор осветительных приборов.....	78
6.2.3.3 Выбор коэффициента запаса.....	79
6.2.4 Микроклимат .....	79
6.2.5 Электропоражение .....	80
6.3 Экологическая безопасность.....	81
6.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	83
Заключение .....	86
Список использованных источников .....	87
Приложение А .....	90

## **Введение**

В современном автомобилестроении чётко прослеживаются тенденции постепенного перехода к интеллектуальным системам управления транспортными средствами без участия человека. Для безопасной и качественной работы беспилотного транспортного средства требуется решить множество задач, связанных с организацией управления исполнительными органами.

Многие из функций переходят от водителя к системам высокоточного электропривода и решение задач, связанных с разработками надёжного и компактного сервопривода рулевой рейки беспилотного транспортного средства выходит на приоритетный уровень. Задача разработки исполнительного электропривода для управления углом поворота колёс беспилотного транспортного средства является в настоящее время перспективной и актуальной.

Целью данной работы является разработка следящего электропривода рулевой рейки для беспилотного транспортного средства, предназначенного для перевозки пассажиров в пределах городской черты, с полной массой 2,5 тонны.

При достижении поставленной цели будут выполнены следующие задачи: разработка структурной схемы, функциональной схемы, выбор двигателя, выбор метода и системы управления, выбор элементной базы, математическое и имитационное моделирование при различных видах нагрузок, экспериментальная часть.

Объектом исследования представленной работы следует считать разработку сервопривода рулевой рейки с заданными параметрами при условии достижения оптимальных технических и экономических характеристик. Предметом исследования является система следящего электропривода рулевой рейки беспилотного транспортного средства.

Практическая ценность проделанной работы заключается в получении более оптимального решения в отношении рулевого управления беспилотного автобуса, путем использования дешевого и распространенного варианта электропривода усилителя руля, добиваясь при этом, необходимых требований к управлению.

# 1 Обзор литературы

## 1.1 Развитие современных беспилотных автомобилей

Развитие промышленности и экономики передовых стран существенным образом зависит от дальнейшего совершенствования транспортных средств и систем, которые должны обеспечивать повышение мобильности населения, эффективности грузопассажирских перевозок, повышение безопасности дорожного движения, снижение экологической нагрузки на окружающую среду, повышение комфортности водителей и пользователей транспорта. Одним из приоритетных направлений при решении этих задач является создание наземных беспилотных транспортных средств (БТС) и систем помощи водителю [1].

Беспилотный автомобиль или БТС — транспортное средство, оборудованное системой автоматического управления, которое может передвигаться без участия человека.

В последнее десятилетие разработка беспилотных транспортных средств переживает технологический бум в автомобильной отрасли всех ведущих стран мира. Наиболее активно работы по созданию беспилотных транспортных средств ведутся в США, Германии, Японии, Китае, Великобритании, Швеции, Франции, Корее. Значительный объем работ по созданию БТС проводится по закрытой тематике в рамках оборонных заказов и по этой причине результаты исследований мало публикуются в открытой печати. Сложные наукоемкие технические решения, математический аппарат, алгоритмы управления движением, программное обеспечение, датчики систем управления БТС во многих странах отнесены к продукции двойного назначения.

- Основными преимуществами БТС являются:
- улучшение транспортной и экологической безопасности, минимизация ДТП и числа человеческих жертв в них;



- снижение времени и затрат на транспортировку грузов и пассажиров;
- снижение расхода топлива, выброса вредных веществ в атмосферу;
- более эффективное использование пропускной способности дорог;
- расширение возможностей использования автомобилей для людей с ограниченными возможностями;
- возможность перевозки грузов в опасных зонах, во время природных и техногенных катастроф или военных действий;
- повышение комфортности пассажиров.

Наиболее сложной и наукоемкой в наземном БТС является автоматическая система управления движением (СУД). На рисунке 1 представлена типовая функциональная схема основных подсистем автоматической системы управления движением БТС.



Рисунок 1 – Типовая функциональная схема основных подсистем автоматической системы управления БТС.

Система навигации и ориентации обеспечивает определение положения БТС на местности. Система технического зрения формирует картину окружающей обстановки, обеспечивает распознавание других транспортных средств (ТС), препятствий на маршруте движения, дорожной разметки, дорожных знаков, показаний светофоров. Информационно - управляющая система является ядром системы управления движением БТС, отвечающим за построение маршрута движения, экстренное принятие

решений в зависимости от окружающей дорожной обстановки и формирование управляющих сигналов на исполнительные приводы. Исполнительные приводы в соответствии с управляющими сигналами обеспечивают управляющее воздействие на агрегаты и системы БТС, имитируя действия водителя. В зависимости от конструкции шасси БТС система исполнительных приводов обеспечивает работу приводов управления тяговым двигателем (подачей топлива при применении ДВС), сцеплением, коробкой передач, рулевым механизмом, тормозной системой, стартером, световыми приборами и др.

Система автоматического управления принимает решения исходя из данных, полученных с различных информационных каналов, например, датчиков, устанавливаемых на борту транспорта.

Обычно устанавливаемые датчики:

- LIDAR (Light Identification Detection and Ranging) — дальномер оптического распознавания;
- Система стереозрения;
- Система глобального позиционирования (Глонасс);
- Гиростабилизатор.

Программное обеспечение беспилотного автомобиля может включать машинное зрение и нейросети.

Некоторые системы полагаются на инфраструктурные системы (например, встроенные в дорогу или около неё), но более продвинутые технологии позволяют имитировать присутствие человека на уровне принятия решений о изменении положения руля и скорости, благодаря набору камер, сенсоров, радаров и систем спутниковой навигации.

В современных беспилотных автомобилях используются алгоритмы на основе Байесовского метода одновременной локализации и построения карт (SLAM, simultaneous localization and mapping). Суть работы алгоритмов состоит в комбинировании данных с датчиков автомобиля (real-time) и данных карт (offline). SLAM и метод обнаружения и отслеживания движущихся

объектов (DATMO, detection and tracking of moving objects) разработаны и применяются в автомобилях дочерней компании Google Waymo. Google судилась с Uber по поводу воровства последней технологий у Google. Тем не менее с 2017 года Google выложила библиотеку SLAM в открытый доступ для бесплатного использования любой сторонней компанией.

Существует Классификация автоматизации автомобилей разработана Сообществом автомобильных инженеров и содержит 6 уровней:

- 0-й уровень: отсутствие контроля над машиной, но может присутствовать система уведомлений
- 1-й уровень: водитель должен быть готов в любой момент взять управление на себя. Могут присутствовать следующие автоматизированные системы: круиз-контроль (ACC, Adaptive Cruise Control), автоматическая парковочная система и система предупреждения о сходе с полосы (LKA, Lane Keeping Assistance) 2-го типа.
- 2-й уровень: водитель должен реагировать, если система не смогла справиться самостоятельно. Система управляет ускорением, торможением и рулением. Система может быть отключена.
- 3-й уровень: водитель может не контролировать машину на дорогах с "предсказуемым" движением (например, автобаны), но быть готовым взять управление.
- 4-й уровень: аналогичная 3-му уровню, но уже не требует внимания водителя.
- 5-й уровень: со стороны человека не требуется никаких действий кроме старта системы и указания пункта назначения. Автоматизированная система может доехать до любой точки назначения, если иное не запрещено законом.

При высоком уровне автоматизации транспорта широко открыт вопрос о его точном управлении, а, следовательно, и выборе конструктивных узлов, отвечающих за эту точность. На сегодняшний день максимальную

управляемость обеспечивает использование рулевой рейки с высокоточным сервоприводом. Также, помимо точности управления, использование сервопривода рулевой рейки имеет ряд других преимуществ:

- удобство регулирования характеристик рулевого управления;
- высокая информативность рулевого управления;
- высокая надежность в связи с отсутствием гидравлической системы;
- топливная экономичность, обусловленная экономным расходом энергии (снижение расхода топлива до 0,5 л. на 100 км).

Такой привод используется в электрическом усилителе рулевого управления, иначе говоря, является конструктивным элементом рулевого управления автомобиля, в котором дополнительное усилие при повороте рулевого колеса создается с помощью электрического привода.

## **1.2 Электромеханические усилители рулевого управления**

Электромеханический усилитель рулевого управления (ЭМУР), как и любой другой усилитель, призван уменьшить усилие, прилагаемое водителем при воздействии на рулевое колесо, тем самым повышая уровень комфорта и легкость управления автомобилем. Дополнительное усилие создается за счет электрического привода. Отсутствие гидравлических элементов в системе повышает ее надежность и создает дополнительные возможности для реализации таких функций, как автоматическая парковка.

К основным преимуществам электроусилителя в сравнении с гидроусилителем можно отнести:

- высокую надежность за счет отсутствия гидравлики: исключается вероятность появления утечек и других неисправностей, характерных для гидравлического усилителя;
- более высокую точность и удобство регулирования рулевого управления;

- экономию топлива за счет того, что электроусилитель работает только во время поворота руля.

Разновидностью ЭМУР является система адаптивного электроусилителя, работающая совместно с системой курсовой устойчивости. Она дает важные преимущества с точки зрения безопасности: корректирует углы поворота колес, повышая устойчивость автомобиля, а также компенсирует недостаточную или избыточную поворачиваемость автомобиля.

- Надежность;
- Возможность реализации автоматического управления автомобилем;
- Простота обслуживания и бесшумная работа;
- Экологическая и технологичность безопасности;
- Возможность управления транспортным средством в случае выхода системы из строя;
- Обеспечение легкости и плавности рулевого управления;
- Обеспечение соответствия между углами поворота управляемых колес и руля;
- Обеспечение пропорциональности между силами сопротивления повороту колес и усилием на рулевом колесе;

Также данный тип усилителя имеет недостатки по сравнению с гидравлическими:

- низкая мощность;
- трудности настройки системы управления при проектировании нового автомобиля;
- при поломке усилитель заменяется единым сборным узлом

Различают две основных схемы компоновки электроусилителя рулевого управления:

- усилие электродвигателя передается на вал рулевого колеса;
- усилие электродвигателя передается на рейку рулевого механизма.

Наиболее востребован электроусилитель с приводом на рулевую рейку. Известными конструкциями такого усилителя являются усилитель руля с двумя шестернями и усилитель руля с параллельным приводом.

Основные составляющие такого усилителя представлены на рис.2.

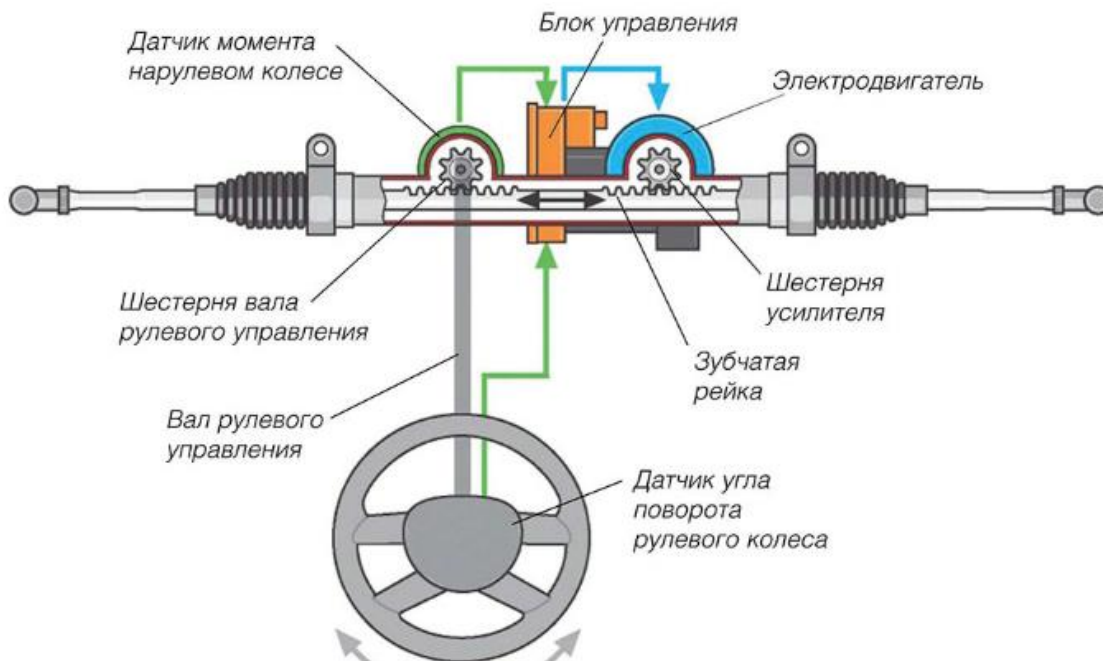


Рисунок 2 – Электромеханический усилитель рулевого управления с двумя шестернями

Механическая передача обеспечивает передачу крутящего момента от электродвигателя к рейке рулевого механизма. В электроусилителе с двумя шестернями одна шестерня передает крутящий момент на рейку рулевого механизма от рулевого колеса, другая – от электродвигателя усилителя. Для этого на рейке предусмотрены два участка зубьев, один из которых служит приводом усилителя.



Рисунок 3 - Электромеханический усилитель рулевого управления с параллельным приводом

В электроусилителе с параллельным приводом усилие от электродвигателя передается на рейку рулевого механизма с помощью ременной передачи и специального шариковинтового механизма.

Система управления электроусилителем руля включает входные датчики, электронный блок управления и исполнительное устройство.

К входным датчикам относятся датчик угла поворота рулевого колеса и датчик крутящего момента на рулевом колесе. Система управления электроусилителем руля также использует информацию, поступающую от блока управления ABS (датчик скорости автомобиля) и блока управления двигателем (датчик частоты коленчатого вала двигателя).

Электронный блок управления обрабатывает сигналы датчиков. В соответствии с заложенной программой вырабатывается соответствующее управляющее воздействие на исполнительное устройство – электродвигатель усилителя.

## **2 Принципы построения следящего электропривода рулевой рейки БТС**

### **2.1 Режимы работы электропривода рулевой рейки**

Электропривод рулевой рейки обеспечивает работу рулевого управления автомобиля в следующих режимах:

- поворот автомобиля в обычных условиях;
- поворот автомобиля на малой скорости;
- поворот автомобиля на большой скорости;
- активный возврат колес в среднее положение;
- поддержание среднего положения колес;

Поворот автомобиля осуществляется поворотом рулевого колеса. Крутящий момент от рулевого колеса передается через торсион на рулевой механизм. Закрутка торсиона измеряется датчиком крутящего момента, угол поворота рулевого колеса – датчиком угла поворота рулевого колеса. Информация от датчиков, а также информация о скорости автомобиля, частоте вращения коленчатого вала двигателя, передаются в электронный блок управления.

Блок управления рассчитывает необходимую величину крутящего момента электродвигателя усилителя и путем изменения величины силы тока обеспечивает ее на электродвигателе. Крутящий момент от электродвигателя передается на рейку рулевого механизма и далее, через рулевые тяги, на ведущие колеса.

Таким образом, поворот колес автомобиля осуществляется за счет объединения усилий, передаваемых от рулевого колеса и электродвигателя усилителя.

Поворот автомобиля на небольшой скорости обычно производится при парковке. Он характеризуется большими углами поворота рулевого колеса. Электронная система управления обеспечивает в данном случае



максимальный крутящий момент электродвигателя, соответствующий значительному усилению рулевого управления (т.н. «легкий руль»).

При повороте на высокой скорости, напротив электронная система управления обеспечивает наименьший крутящий момент и минимальное усиление рулевого управления (т.н. «тяжелый руль»).

Система управления может увеличивать реактивное усилие, возникающее при повороте колес. Происходит т.н. активный возврат колес в среднее положение.

При эксплуатации автомобиля нередко возникает потребность в поддержании среднего положения колес (движение при боковом ветре, разном давлении в шинах). В этом случае система управления обеспечивает коррекцию среднего положения управляемых колес.

В программе управления электроусилителя руля предусмотрена компенсация увода переднеприводного автомобиля, вызванного различной длиной приводных валов.

В ряде систем активной безопасности электроусилитель функционирует без участия водителя. В системе курсовой устойчивости он обеспечивает обратное подруливание колес, а в парковочном автопилоте - автоматическую параллельную и перпендикулярную парковку [4].

При разработке сервопривода рулевой рейки беспилотного транспортного средства, следует учитывать, что усилие, передаваемое от обода руля может отсутствовать полностью и компенсирующий момент рулевого механизма обусловлен исключительно электромагнитным моментом двигателя. Это значит, что двигатель, используемый в составе электропривода рулевого управления беспилотного транспорта должен иметь более высокий номинальный и кратковременный электромагнитный момент.

Среди представленных режимов работы электропривода рулевого управления следует выделить наиболее тяжелый – поворот колес на месте, когда автомобиль находится на сухом асфальтобетонном покрытии, т.к. в таком случае обеспечивается максимальный коэффициент сцепления с

поверхностью, а, следовательно, и максимальный статический момент нагрузки. По этой причине данный режим является расчетным, максимальный момент сопротивления повороту колес принимаем как максимальный момент статической нагрузки электропривода.

## **2.2 Рассматриваемая компоновка электропривода рулевого управления**

На некоторых отечественных автомобилях, таких как Lada Granta, Lada Priora, Lada Kalina устанавливают электродвигатели электроусилителя руля с так называемым, прямым приводом, это значит, что ось электродвигателя представляет собой часть рулевого вала. При такой компоновке, двигатель приходится использовать гораздо более мощный, высокой точностью позиционирования вала по углу поворота. Однако, конструкция механической части предельно проста.

В данный момент такая компоновка является самым дешевым и распространенным вариантом электроприводов усилителей руля для автомобилей отечественного производства. Учитывая эти факторы было принято решение рассматривать именно этот вариант компоновки для разработки следящего электропривода рулевого управления

Исследование электропривода производится на базе существующего электромеханического усилителя рулевого управления автомобилей семейства ВАЗ (рис. 4).

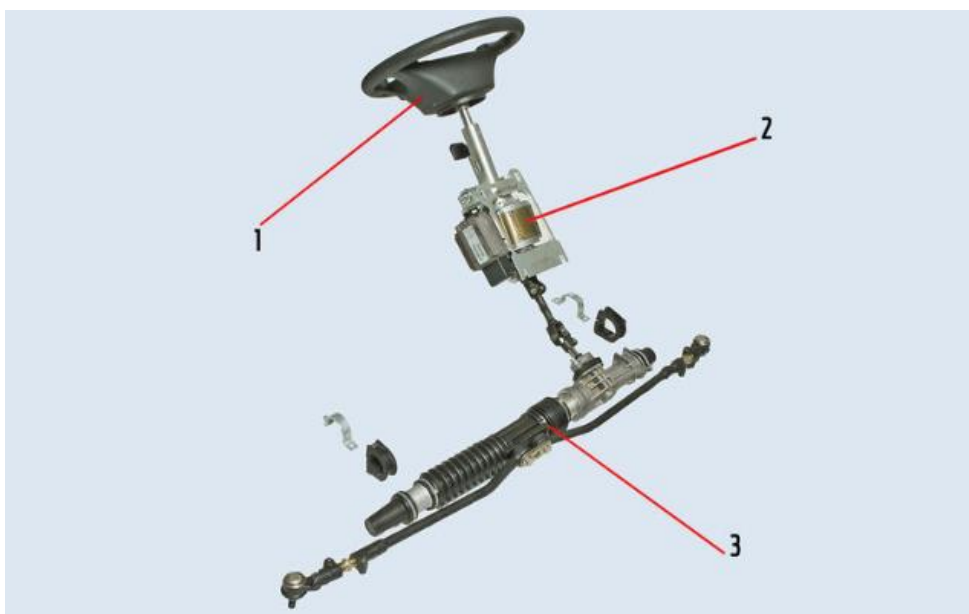


Рисунок 5 – Внешний вид электропривода усилителя рулевого управления

На рисунке приняты обозначения:

1 – рулевое колесо, 2 – синхронный электродвигатель с постоянными магнитами, 3 – механизм рулевой рейки.

В составе данного усилителя руля используется синхронный двигатель с постоянными магнитами. Синхронный двигатель обеспечивает нужный уровень позиционирования и габаритов при повышенном уровне мощности.

Упомянутый усилитель рулевого управления имеет трехфазный синхронный двигатель рулевой колонки ДРК-СНбс производства АО «СЭГЗ» со следующими основными техническими характеристиками, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Основные характеристики синхронного двигателя с постоянными магнитами ДРК-СНбс

Название параметра	Значение
Номинальная мощность, Вт	530
Фазное напряжение питания, В	14,5
Номинальный момент, Н·м	10.1

Максимальный момент, Н·м	30
КПД, %	76
$\cos\varphi$ , о.е.	0.93
Масса, кг	5.6
Число пар полюсов	8
Частота питающего напряжения, Гц	66,67
Номинальная частота вращения, об/мин	500

Данный двигатель предназначен для работы с преобразователем частоты, встроенным в блок управления усилителем руля, который питается от бортовой сети транспорта (12/24 В).

### 2.3 Математическое описание синхронного двигателя с постоянными магнитами

В современных следящих системах электроприводов используется синхронная машина, в которой управление токами статорных обмоток осуществляется в функции углового положения ротора, измеряемого датчиком положения ротора. Рассмотрим физическую модель синхронной вентильной машины, представленную на рис. 6.

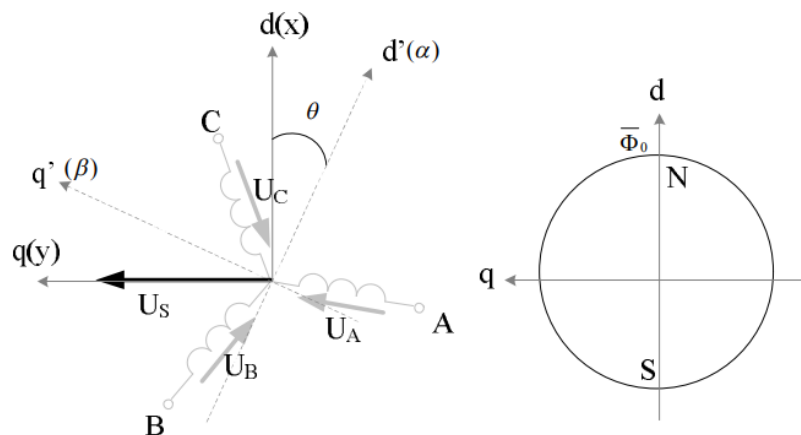


Рисунок 6 - Физическая модель синхронной машины с постоянными магнитами

На рис. 6 обозначены:

$\bar{U}_A, \bar{U}_B, \bar{U}_C$  – векторы фазных напряжений;

$\bar{U}_S$  – пространственный вектор напряжения;

$\bar{\Phi}_0$  – пространственный вектор магнитного потока ротора (машина с возбуждением от постоянных магнитов);

$d'q'(\alpha\beta)$  – неподвижная система координат;

$dq(xy)$  – вращающаяся система координат.

При построении математической модели двигателя приняты следующие допущения:

- отсутствуют: насыщение магнитной цепи, потери в стали, эффект вытеснения тока;
- обмотки статора симметричны;
- индуктивность рассеяния не зависит от положения ротора в пространстве;
- отсутствует вязкое трение в подшипниках ротора.

С учетом этих допущений уравнения равновесия ЭДС на обмотках статора в неподвижной системе координат, базирующиеся на втором законе Кирхгофа (ротор не имеет обмоток) запишутся в виде:

$$\left. \begin{aligned} U_A &= R_A i_A + \frac{d\Psi_A}{dt} \\ U_B &= R_B i_B + \frac{d\Psi_B}{dt} \\ U_C &= R_C i_C + \frac{d\Psi_C}{dt} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где для машины с возбуждением от постоянных магнитов

$$\left. \begin{aligned} \Psi_A &= L_A i_A + \Phi_0 \cos \omega t \\ \Psi_B &= L_B i_B + \Phi_0 \cos(\omega t - 120^\circ) \\ \Psi_C &= L_C i_C + \Phi_0 \cos(\omega t + 120^\circ) \end{aligned} \right\},$$

$\Phi_0 = const$  – магнитный поток создаваемый постоянными магнитами статора.

Для преобразования уравнений в мгновенных значениях к уравнениям в пространственных векторах умножим первое уравнение на  $\frac{2}{3}$ , второе – на  $\frac{2}{3}\bar{\alpha}$ , третье – на  $\frac{2}{3}\bar{\alpha}$ , и сложим, тогда получим

$$\left. \begin{aligned} U_s &= R_s \bar{i}_s + \frac{d\bar{\Psi}_s}{dt} \\ \bar{\Psi}_s &= L_s \bar{i}_s + \Phi_0 e^{j\alpha} = L_s \bar{i}_s + \bar{\Phi}_0 \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где  $L_s$  – индуктивность статора,  $\bar{\Psi}_s$  – вектор потокосцепления статора  $\bar{\Phi}_0$  – вектор магнитного потока от постоянных магнитов ротора.

Электромагнитный момент, развиваемый на валу двигателя равен:

$$M = \frac{3}{2} z_p \cdot |\bar{\Psi}_s \times \bar{i}_s|. \quad (3)$$

Уравнения равновесия моментов на валу двигателя (основное уравнение электромеханики):

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_c, \quad (4)$$

где  $\omega_m = \frac{\omega}{z_p}$ ,  $z_p$  – число пар полюсов.

### 2.3.1 Модель синхронной машины в неподвижной системе координат

Уравнения вентильной машины в пространстве:

$$\left. \begin{aligned} U_S &= R_S i_S + L_S \frac{d\bar{i}_S}{dt} + j\omega \bar{\Psi}_S \\ M &= \frac{3}{2} z_p \cdot |\bar{\Psi}_S \times \bar{i}_S| \\ J \frac{d\omega_m}{dt} &= M - M_c \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Разложим уравнения по осям неподвижной системы координат ( $\alpha\beta$ ):

$$\left. \begin{aligned} U_{S\alpha} &= R_S i_{S\alpha} + L_S \frac{d\bar{i}_{S\alpha}}{dt} - \omega \Psi_\beta \\ U_{S\beta} &= R_S i_{S\beta} + L_S \frac{d\bar{i}_{S\beta}}{dt} + \omega \Psi_\alpha \\ M &= \frac{3}{2} z_p \cdot (\Psi_\alpha i_{S\beta} - \Psi_\beta i_{S\alpha}) \\ J \frac{d\omega_m}{dt} &= M - M_c \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Проекция пространственного вектора потокосцепления  $\bar{\Psi}_S$  на оси  $\alpha, \beta$ , с учетом  $\bar{\Psi}_S = L_S \bar{i}_S + \Phi_0 e^{j\omega t} = L_S \bar{i}_S + \Phi_0$  (второе уравнение системы (2)), запишем в виде:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_\alpha &= \Psi_S \cos \omega t = L_\alpha i_{S\alpha} + \Phi_0 \cos \omega t \\ \Psi_\beta &= \Psi_S \sin \omega t = L_\beta i_{S\beta} + \Phi_0 \sin \omega t \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где  $L_\alpha, L_\beta$ , – индуктивности обмоток статора по продольной и поперечной осям ротора соответственно. Для частного случая неявнополюсной машины

$$L_\alpha = L_\beta = L_S.$$

Для машины с постоянными магнитами:

$$\frac{d\Phi_0}{dt} = 0; \quad \Phi_0 = const.$$

Откуда запишем с учетом условия (7) перепишем систему (6) в виде:

$$\left. \begin{aligned}
 U_{S\alpha} &= R_S i_{S\alpha} + L_S \frac{d\bar{i}_{S\alpha}}{dt} - \omega L_S i_{S\beta} - \omega \Phi_0 \sin \omega t \\
 U_{S\beta} &= R_S i_{S\beta} + L_S \frac{d\bar{i}_{S\beta}}{dt} + \omega L_S i_{S\alpha} + \omega \Phi_0 \cos \omega t \\
 M &= \frac{3}{2} z_p \cdot (i_{S\beta} (L_S i_{S\alpha} + \Phi_0 \cos \omega t) - i_{S\alpha} (L_S i_{S\beta} + \Phi_0 \sin \omega t)) \\
 J \frac{d\omega_m}{dt} &= M - M_c
 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Структурная схема соответствующая системе уравнений показана на рис. 7.

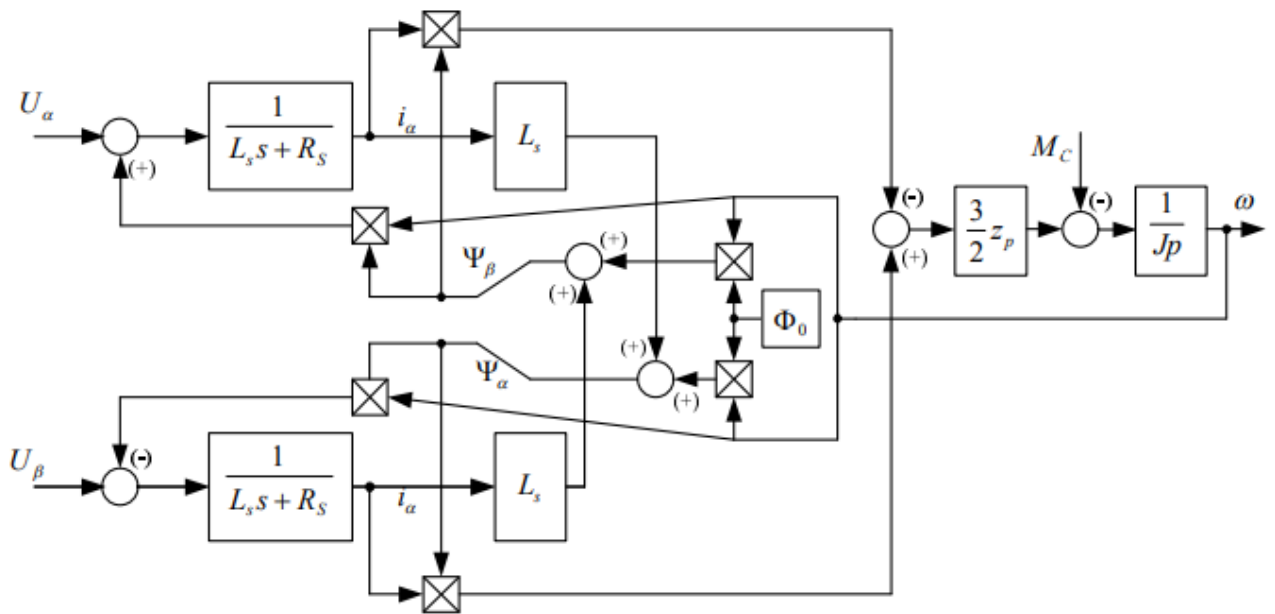


Рисунок 7 - Структурная схема синхронного вентильного двигателя в неподвижной системе координат

### 2.3.2 Модель синхронной машины во вращающейся системе координат

Для упрощения расчетов динамических процессов в двигателе вводится вращающаяся система координат с ориентацией по положению ротора вентильной машины.

При переходе из неподвижной во вращающуюся систему и обратно из вращающейся в неподвижную систему пользуются преобразователями координат. Математическая основа преобразования поясняется рис.8.



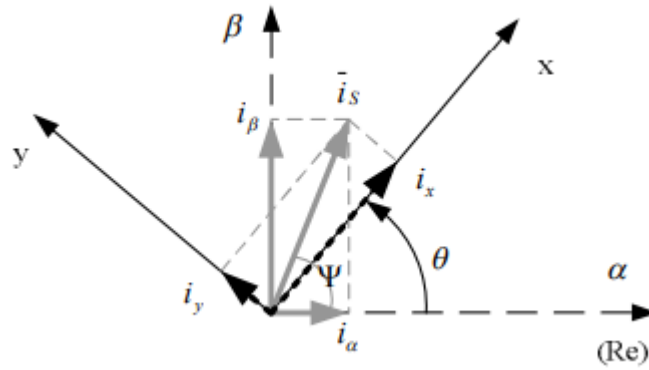


Рисунок 8 - Математическая основа преобразования координат

В неподвижной системе координат  $(\alpha\beta)$  вектор тока (напряжения, потокосцепления) может быть представлен в алгебраической и показательной форме:

$$\bar{i}_s = i_\alpha + j i_\beta = I_m e^{j\psi}.$$

Аналогично во вращающейся системе координат  $(xy)$  тот же самый вектор может быть представлен в виде:

$$\bar{i}_{s.BP} = i_x + j i_y = I_m e^{j(\psi-\theta)} = \bar{i}_s \cdot e^{-j\theta}.$$

Отсюда легко получить уравнения перехода от неподвижной системы координат к вращающейся и наоборот:

$$\left. \begin{aligned} i_x &= i_\alpha \cos \theta + i_\beta \sin \theta \\ i_y &= -i_\alpha \sin \theta + i_\beta \cos \theta \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} i_\alpha &= i_x \cos \theta - i_y \sin \theta \\ i_\beta &= i_x \sin \theta + i_y \cos \theta \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

Эти уравнения получили название соответственно прямого (9) и обратного (10) преобразования Парка–Горева.

Имитационные модели преобразователей, составленные по уравнениям (9), (10) представлены на рис. 9, 10.

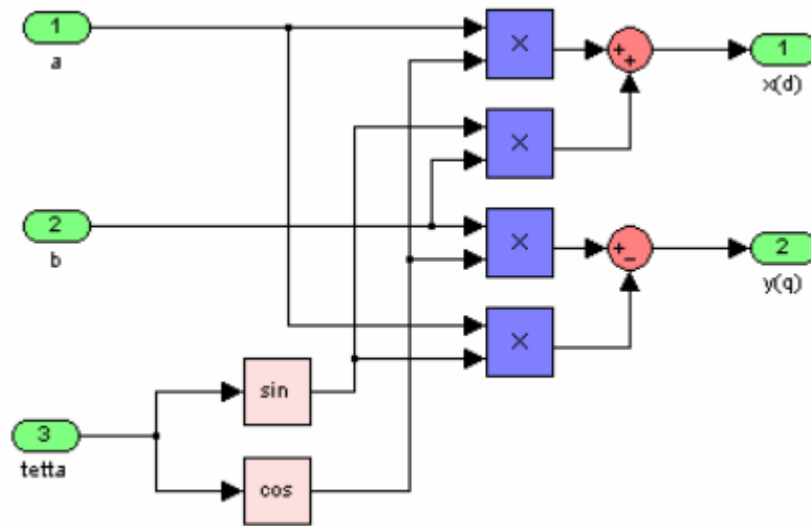


Рисунок 9 - Прямое преобразование Парка-Горева

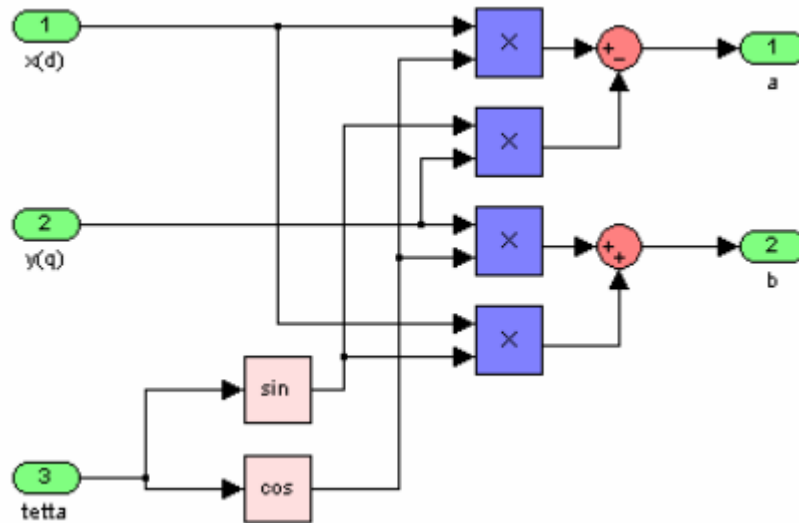


Рисунок 10 - Обратное преобразование Парка-Горева

При построении реальных систем электропривода переменного тока, как синхронных, так и асинхронных, практически всегда в систему управления включаются преобразователи координат. Это обусловлено тем, что реализация регуляторов возможна лишь во вращающейся системе координат, а реальные токи, протекающие в обмотках статора – это вектора в неподвижной системе координат.

Поэтому, как правило, современные электропривода переменного тока содержат преобразователи обоих типов. Кроме того, они содержат преобразователи фаз 2 к 3 и 3 к 2. Первые преобразовывают токи  $i_\alpha, i_\beta$  в фазные токи  $i_A, i_B, i_C$  в соответствии с выражениями:

$$i_A = i_\alpha, \quad i_B = -\frac{1}{2}i_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}i_\beta, \quad i_C = -\frac{1}{2}i_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}i_\beta.$$

А вторые преобразовывают фазные токи  $i_A, i_B, i_C$  в проекции  $i_\alpha, i_\beta$  в соответствии с выражениями:

$$i_\alpha = i_A, \quad i_\beta = \frac{i_B - i_C}{\sqrt{3}}.$$

В итоге функциональная схема электропривода приобретает вид, представленный на рис. 11.

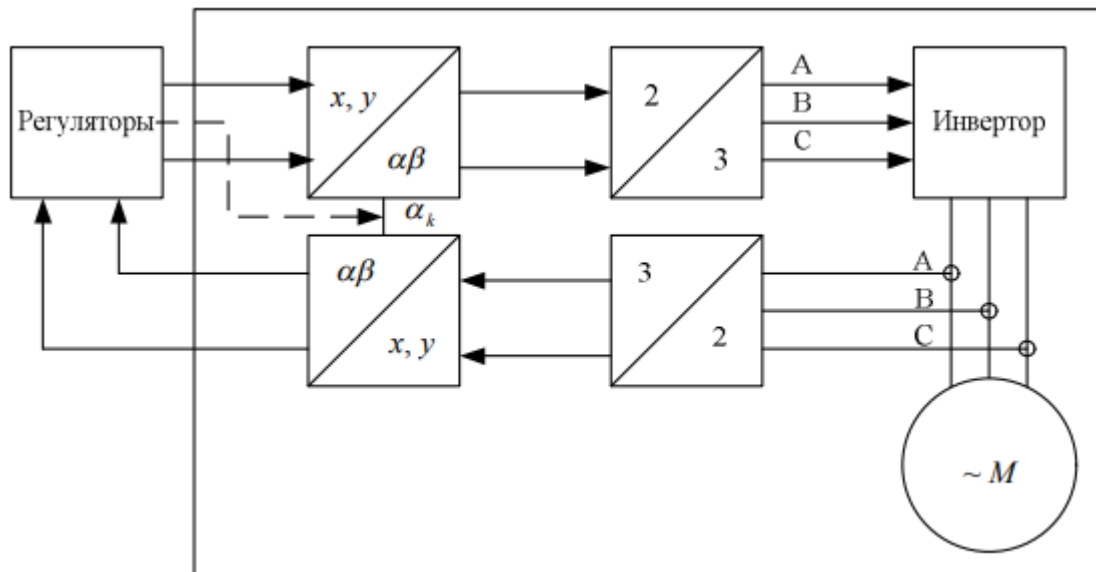


Рисунок 11 - Функциональная схема электропривода переменного тока

Введем в рассмотрение систему координат (dq) связанную с ротором и вращающуюся вместе с ним. Ее скорость вращения всегда равна синхронной скорости. Вектор потока, создаваемого постоянными магнитами ротора вентильной машины может быть представлен пространственным вектором, неподвижным относительно ротора и вращающегося вместе с ним, а, следовательно, вместе с системой координат (dq). Поэтому направив ось d по вектору потока ротора, можно избавиться от проекции вектора на ось q. Таким образом имеем:

$$\left. \begin{aligned} \bar{\Phi}_0 &= \bar{\Phi}_d \\ 0 &= \bar{\Phi}_q \end{aligned} \right\}.$$

Разложим систему (2) в осях вращающейся системе координат dq на

проекции:

$$\left. \begin{aligned} U_{sd} &= R_S i_{sd} + L_S \frac{d\bar{i}_{sd}}{dt} - \omega \Psi_q \\ U_{sq} &= R_S i_{sq} + L_S \frac{d\bar{i}_{sq}}{dt} + \omega \Psi_d \\ M &= \frac{3}{2} z_p \cdot (i_{s\beta} \Psi_q - i_{s\alpha} \Psi_d) \\ J \frac{d\omega_m}{dt} &= M - M_c \end{aligned} \right\}. \quad (11)$$

Проекция пространственного вектора потокосцепления  $\bar{\Psi}_s$  на оси  $d, q$ , с учетом  $\bar{\Psi}_s = L_S \bar{i}_s + \Phi_0 e^{j\omega t} = L_S \bar{i}_s + \bar{\Phi}_0$  (второе уравнение системы (2)), запишем в виде:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_d &= L_d \cdot i_{sd} + \Phi_0 \\ \Psi_q &= L_q \cdot i_{sq} \end{aligned} \right\}. \quad (12)$$

Для частного случая неявнополюсной машины  $L_d = L_q = L_S$ .

С учетом (12) система (11) запишется в виде:

$$\left. \begin{aligned} U_{sd} &= R_S i_{sd} + L_S \frac{d\bar{i}_{sd}}{dt} - \omega L_S \cdot i_{sq} \\ U_{sq} &= R_S i_{sq} + L_S \frac{d\bar{i}_{sq}}{dt} + \omega L_S \cdot i_{sd} + \omega \Phi_0 \\ M &= \frac{3}{2} z_p \cdot (i_{sd} \cdot (L_S \cdot i_{sq}) - i_{sq} (L_S \cdot i_{sd} + \Phi_0)) \\ J \frac{d\omega_m}{dt} &= M - M_c \end{aligned} \right\}. \quad (13)$$

Структурная схема двигателя, соответствующая системе (12) показана на рис.12.

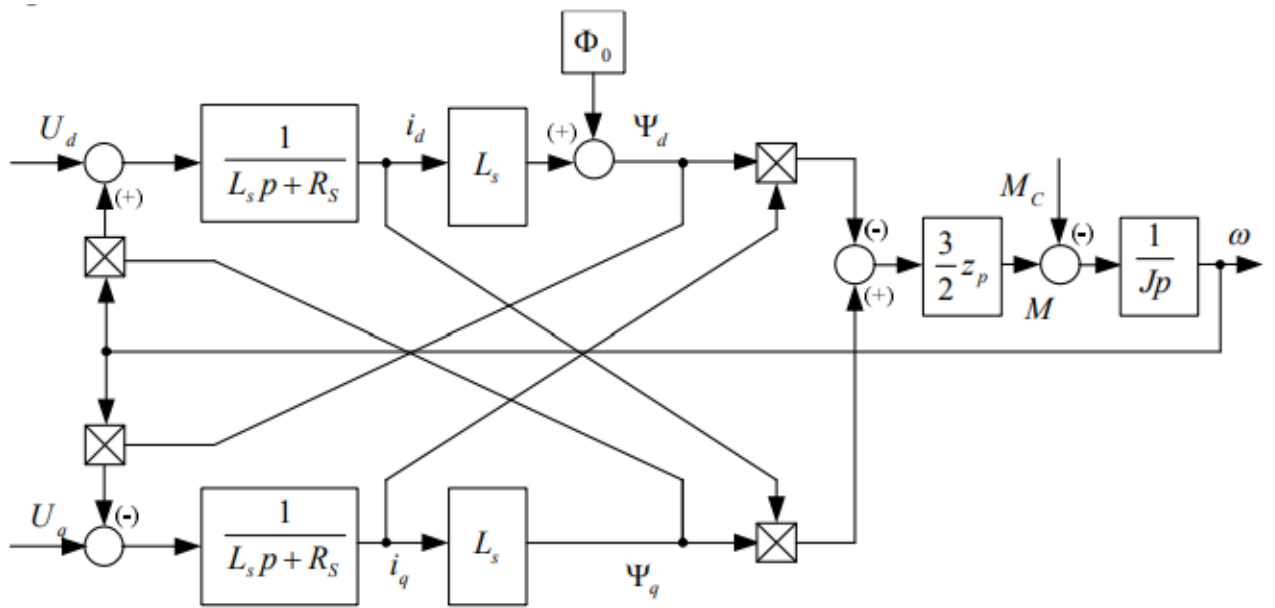


Рисунок 12 - Структурная схема синхронного вентильного двигателя во вращающейся системе координат

### 3 Расчет параметров элементов силовой цепи и синтез контуров регулирования

#### 3.1 Механическая система

Согласно расчетным данным из [8], момент сопротивления пары управляемых колес, приходящийся на автомобиль (нагруженный) с массой в 2.5 т составляет порядка 240 Н·м с учетом потерь на механические передачи рулевого управления. Учитывая большую величину момента на валу электродвигателя, следует установить редуктор следующим звеном после электродвигателя.

Общую систему имитационного электропривода можно представить несколькими основными блоками:

- двигатель, отвечающий за электромеханические преобразования;
- преобразователь частоты, регулирующий электрическое преобразование энергии;
- механическая система нагрузки.

В основу структурной схемы силового канала электропривода (рис. 13) заложена структурная схема двухфазного синхронного двигателя во вращающейся системе координат.

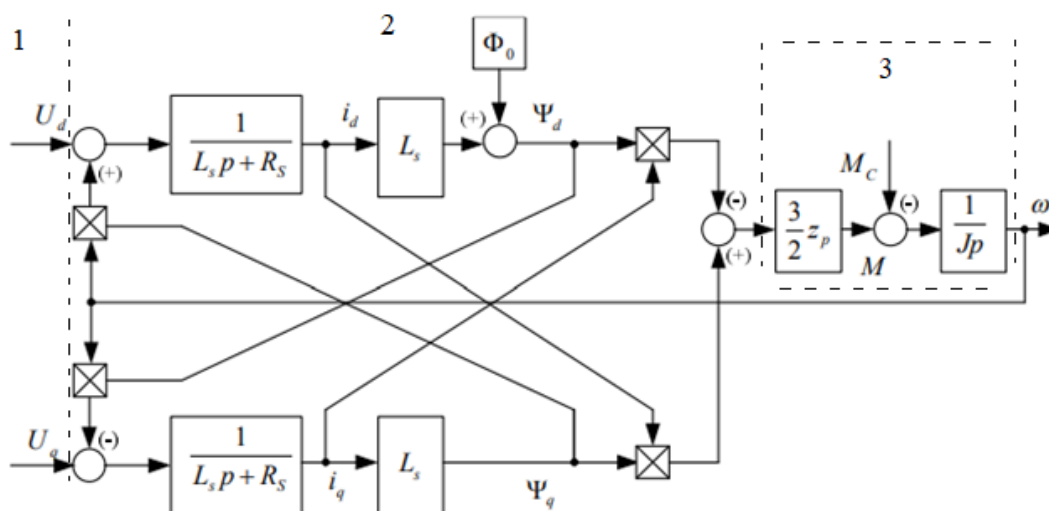


Рисунок 13 – Структурная схема силового канала синхронного электропривода

В данной системе учтены обратные связи от электродвигателя. На рисунке 4 обозначены: 1 – преобразователь; 2 – асинхронный двигатель во вращающейся системе координат; 3 – одномассовая механическая система.

В отсутствие явных упругих связей механическая система принята одномассовой. Однако, в системе есть несколько механических звеньев (электродвигатель, редуктор, рулевой механизм), имеющих свой момент инерции. Необходимо рассчитать приведенный момент инерции механизма к валу электродвигателя.

Паспортные данные электродвигателя представлены ниже в таблицах 2,3.

Таблица 2 - Паспортные данные электродвигателя ДРК-СНбс

$n_0$ , об/мин	$U_{дв.н.}$ , В	$P_{дв.н.}$ , Вт	$\cos\varphi$ , о.е.	$\eta_n$ , %	$J_{дв.}$ , кг·м <sup>2</sup>
500	14,5	530	0,93	76%	0.0054

Таблица 3 – Паспортные данные электродвигателя ДРК-СНбс

$m_k = \frac{M_{макс}}{M_{дв.н.}}$	$L_q$ , Гн	$L_d$ , Гн	$\Phi_0$ , Вб	$f_{num}$ , Гц	$R_s$ , Ом
3	0,00225	0,00525	0,0362	66,67	0,1536

При кратковременном моменте сопротивления механизма равному 240 Н·м и максимальном моменте электродвигателя выбираем передаточное число редуктора:

$$i = \frac{M_{мех}}{M_{макс}} = \frac{240}{30} = 8 \quad (14)$$

В подобных механических системах выбирают планетарные редуктора (также можно использовать и другие редуктора, что повлечет за собой изменение в компоновках, так, чтобы водитель сидящий за рулем беспилотного авто совершая 3 оборота рулевого колеса, а двигатель тем временем совершил 24, можно использовать компоновку с параллельным расположением двигателя на рулевой колонке), имеющие при малых габаритах относительно большое передаточное число.

Момент инерции редуктора принимаем исходя из [16]:  $J_{\partial\delta}=0,367$  кг·м<sup>2</sup>.

Момент инерции механизма рулевого управления принимаем:  
 $J_{\partial\delta}=0,377$  кг·м<sup>2</sup>.

Рассчитаем момент инерции, приведенный к валу двигателя:

$$J_{\Sigma} = J_{\partial\delta} + \frac{J_{ред}}{i^2} + \frac{J_{мех}}{i^2 \cdot i_{pn}^2} = 0,0054 + \frac{0,0367}{8^2} + \frac{0,377}{8^2 \cdot 1,3^2} = 0,0015 \text{ кг}\cdot\text{м}^2, \quad (15)$$

где  $i_{pn}$  - передаточное число рулевого механизма.

### **3.2 Линеаризованная структурная схема следящего синхронного электропривода**

Согласно источнику [3], линеаризованная структурная схема следящего синхронного электропривода представлена на рисунке 14.





Данная схема наглядно описывает строение подчиненного регулирования следящего электропривода, принимая некоторые допущения. Такие как принятие в учет силового преобразователя в качестве апериодического звена с постоянной времени, равной периоду ШИМ. Также безинерционность цепей обратной связи.

### 3.3 Синтез контуров регулирования синхронным электроприводом

#### 3.3.1 Синтез регулятора тока

Структурная схема контура тока по оси  $d$  представлена на рис.15.

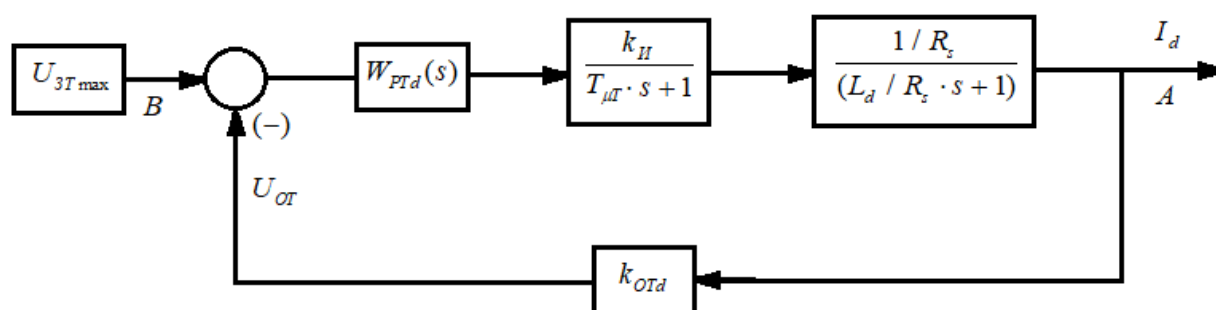


Рисунок 15 – Структурная схема контура тока по оси  $d$

$$k_{от d} = \frac{U_{3T \max}}{I_{\max}} - \text{коэффициент обратной связи по току, В/А;}$$

Максимально допустимое значение тока на выходе преобразователя принимаем 100А, т.к. данное ограничение накладывает производитель электродвигателя в режиме предельно допустимых.

Принимаем  $U_{3T \max} = 10 \text{ В}$ ;

Несущую частоту широтно-импульсной модуляции принимаем

$$f_{шум} = 5000 \text{ Гц.};$$

$T_{\mu T}$  - наименьшая некомпенсируемая постоянная времени контура тока,

с. Принимаем  $T_{\mu T} = T_{II} = \frac{1}{f_{шум}} = \frac{1}{5000} = 0.0002 \text{ с}$  – постоянная времени

автономного инвертора;

Оптимизация контура тока производится по модульному оптимуму.

Передаточная функция разомкнутого контура тока, оптимизированного по модульному оптимуму представлена ниже:

$$W_{PKT}^{MO}(s) = W_{PTd}(s) \cdot W_{OV1}(s) \cdot W_{OV2}(s) \cdot k_{OTd} = \frac{1}{2 \cdot s \cdot T_{\mu T} \cdot (s \cdot T_{\mu T} + 1)}, \quad (16)$$

где  $W_{PTd}(s)$  - передаточная функция регулятора тока  $i_d$ ;

$$W_{OV1}(s) = \frac{k_{II}}{T_{II} \cdot s + 1} - \text{передаточная функция автономного инвертора.}$$

Здесь,  $k_{II}$  - коэффициент усиления инвертора, равный

$$k_{II} = \frac{U_{\phi}}{U_{3T}} = \frac{14,5}{10} = 1,45.$$

$$W_{OV2}(s) = \frac{1/R_s}{(L_d/R_s \cdot s + 1)} - \text{передаточная функция цепи статора.}$$

Выразим передаточную функцию регулятора тока:

$$\begin{aligned} W_{PTd}(s) &= \frac{1}{\frac{2 \cdot s \cdot T_{\mu T} \cdot (s \cdot T_{\mu T} + 1)}{k_{II}} \cdot \frac{1/R_s}{(T_{II} \cdot s + 1) \cdot (L_d/R_s \cdot s + 1)} \cdot k_{OTd}} = \frac{(T_{II} \cdot s + 1) \cdot (L_d/R_s \cdot s + 1) \cdot R_s}{2 \cdot s \cdot T_{\mu T} \cdot (s \cdot T_{\mu T} + 1) \cdot k_{II} \cdot k_{OTd}} = \\ &= \frac{(T_{II} \cdot s + 1) \cdot (L_d/R_s \cdot s + 1) \cdot R_s}{2 \cdot s \cdot T_{\mu Td} \cdot (s \cdot T_{\mu Td} + 1) \cdot k_{II} \cdot k_{OTd}}, \text{ учитывая, что } T_{II} = T_{\mu Td}, \text{ то получим:} \\ &= \frac{(L_d/R_s \cdot s + 1) \cdot R_s}{2 \cdot s \cdot T_{\mu Td} \cdot k_{II} \cdot k_{OTd}} = \frac{(L_d/R_s \cdot s + 1) \cdot R_s \cdot L_d/R_s}{2 \cdot s \cdot T_{\mu T} \cdot k_{II} \cdot k_{OTd} \cdot L_d/R_s} = \\ &= \frac{(T_{PTd} \cdot s + 1) \cdot R_s \cdot T_{PTd}}{2 \cdot s \cdot T_{\mu Td} \cdot k_{II} \cdot k_{OTd} \cdot T_{PTd}} = k_{Td} \cdot \frac{(T_{PTd} \cdot s + 1)}{s \cdot T_{PTd}}, \end{aligned} \quad (17)$$

$$\text{где } k_{Td} = \frac{L_d}{2 \cdot T_{\mu Td} \cdot k_{II} \cdot k_{OTd}} = \frac{0,00525}{2 \cdot 0,0002 \cdot 1,45 \cdot 0,1} = 93,81 - \text{коэффициент}$$

пропорциональности ПИ-регулятора

$$T_{PTd} = L_d/R_s = 0,03418 - \text{постоянная времени регулятора тока по оси } i_d$$

Аналогичным образом производится синтез регулятора тока по оси  $q$ , коэффициент пропорциональности и постоянная времени регулятора будут иметь следующие значения:

$$k_{Td} = \frac{L_d}{2 \cdot T_{\mu d} \cdot k_{II} \cdot k_{OTd}} = \frac{0,00225}{2 \cdot 0,0002 \cdot 1,45 \cdot 0,1} = 38.78 \quad (18)$$

$$T_{PTq} = L_q / R_s = 0,01465$$

Ожидаемые показатели качества работы контура тока:

Используя встроенную функцию линейного анализа замкнутого контура получили следующий график (рис.16).

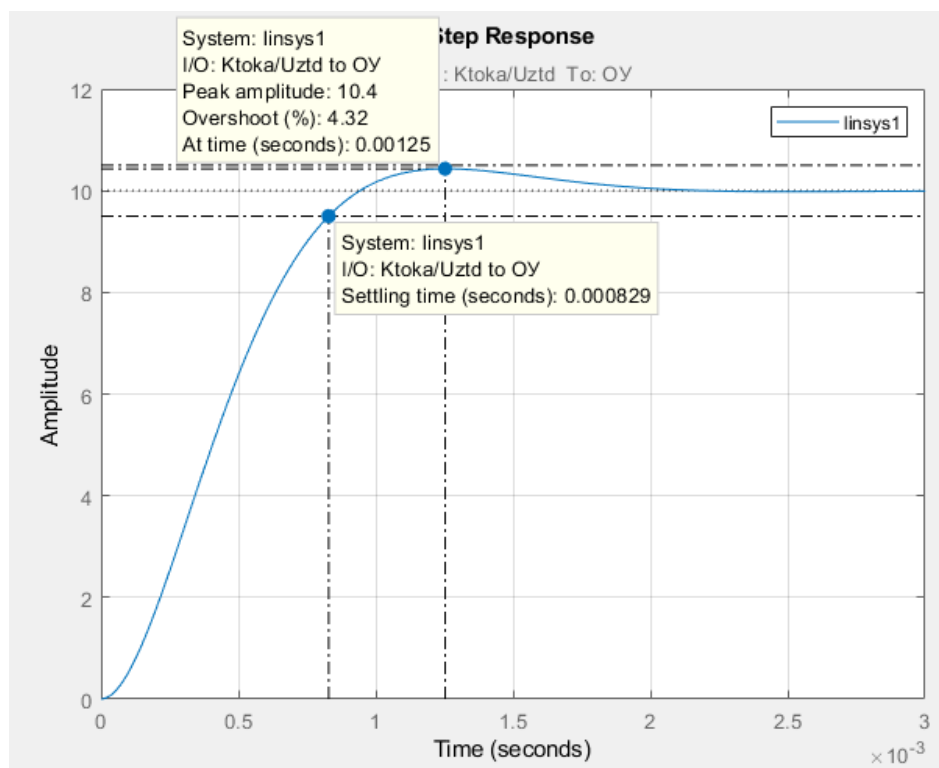


Рисунок 16 – График переходного процесса в контуре тока

По графику видно, что:

- установившаяся ошибка  $\Delta I_{уст} = 0$ ;
- перерегулирование  $\sigma = 4,32\%$ ;
- время первого и окончательного вхождения в 5% зону при отработке ступенчатого задания  $t_{py1} = t_{py2} = 4,1 \cdot T_{\mu T} = 0,000829$  с.

### 3.3.2 Синтез регулятора скорости

Структурная схема контура скорости представлена на рис.17.

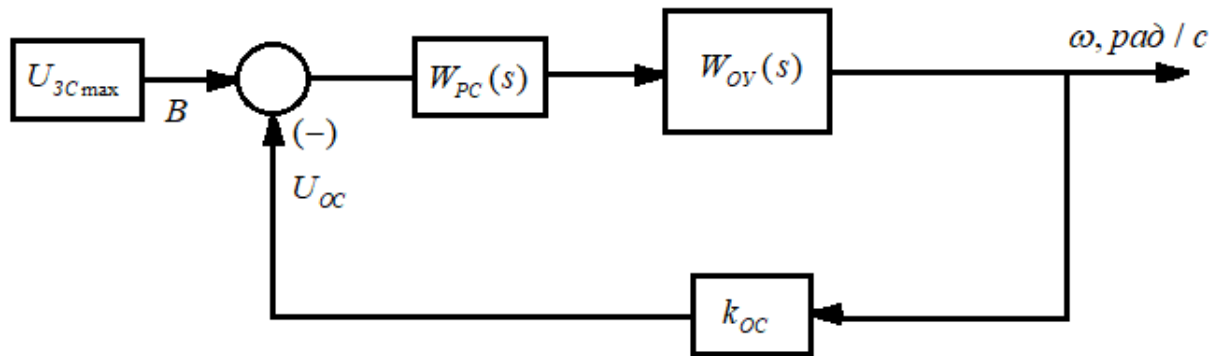


Рисунок 17 – Структурная схема контура скорости

Здесь,  $U_{3Cmax} = 10 \text{ В}$  - максимальное задание по скорости, В;

$k_{oc}$  - коэффициент обратной связи по скорости:

$$k_{oc} = \frac{60 \cdot U_{3Cmax}}{n_n \cdot 2\pi} = \frac{60 \cdot 10}{500 \cdot 2 \cdot 3,14} = 0,191 \quad (19)$$

Контур скорости оптимизируем на симметричный оптимум.

Передаточная функция разомкнутого контура скорости, оптимизированного на симметричный оптимум имеет вид:

$$W_{PKC}^{CO}(s) = W_{PC}(s) \cdot W_{OY}(s) \cdot k_{oc} = \frac{s4T_{\mu C} + 1}{8 \cdot s^2 \cdot T_{\mu C}^2 \cdot (s \cdot T_{\mu C} + 1)}, \quad (20)$$

где  $W_{PC}(s)$ - передаточная функция регулятора скорости;

$$W_{OY}(s) = W_{3PT}^{MO}(s) \cdot \Phi_0 \cdot \frac{3}{2} z_p \cdot \frac{1}{J_{\Sigma} \cdot s} \cdot k_{oc};$$
 - объекта управления;

$$W_{3PT}^{MO}(s) = \frac{1/k_{OT}}{2 \cdot s \cdot T_{\mu T} \cdot (s \cdot T_{\mu T} + 1) + 1};$$
 - передаточная функция замкнутого

контура тока, оптимизированного на модульный оптимум;

Преобразуем передаточную функцию замкнутого контура тока, оптимизированного на модульный оптимум к упрощенному виду:

$$W_{3KT}^{MO}(s) = \frac{1/k_{OT}}{2 \cdot s \cdot T_{\mu T} \cdot (s \cdot T_{\mu T} + 1) + 1} = \frac{1/k_{OT}}{2 \cdot s^2 \cdot T_{\mu T}^2 + 2 \cdot s \cdot T_{\mu T} + 1}, \quad (21)$$

т.к., слагаемое  $2 \cdot s^2 \cdot T_{\mu T}^2$  будет иметь чрезвычайно малую величину, то им можно пренебречь, приняв для дальнейшего расчета следующее выражение для передаточной функции:

$$W_{ЗКТ}^{МО}(s) = \frac{1/k_{OT}}{2 \cdot s \cdot T_{\mu T} \cdot (s \cdot T_{\mu T} + 1) + 1} \approx \frac{1/k_{OT}}{2 \cdot s \cdot T_{\mu T} + 1}. \quad (22)$$

Приняв во внимание вышесказанное, выразим передаточную функцию регулятора скорости:

$$W_{PC}(s) = \frac{\frac{s \cdot 4T_{\mu C} + 1}{8s^2 \cdot T_{\mu C}^2 \cdot (s \cdot T_{\mu C} + 1)}}{\frac{1/k_{OT}}{2s \cdot T_{\mu T} + 1} \cdot \Phi_0 \cdot \frac{3}{2} zP \cdot \frac{1}{J_{\Sigma} \cdot s} \cdot k_{OC}} = \frac{(s \cdot 4T_{\mu C} + 1) \cdot (2s \cdot T_{\mu T} + 1) \cdot k_{OT}}{8s^2 \cdot T_{\mu C}^2 \cdot (s \cdot T_{\mu C} + 1) \cdot \Phi_0 \cdot \frac{3}{2} zP \cdot \frac{1}{J_{\Sigma} \cdot s} \cdot k_{OC}}. \quad (23)$$

Для дальнейшей оптимизации необходимо преобразовать часть числителя полученного выражения к виду, приемлемого для последующих действий:

$$(s \cdot 4T_{\mu C} + 1) \cdot (2s \cdot T_{\mu T} + 1) = s^2 \cdot 8T_{\mu C} \cdot T_{\mu T} + s \cdot 4T_{\mu C} + 2s \cdot T_{\mu T} + 1,$$

Пренебрегая слагаемым  $s^2 \cdot 8T_{\mu C} \cdot T_{\mu T}$  в силу его малой величины, получим:

$$s^2 \cdot 8T_{\mu C} \cdot T_{\mu T} + s \cdot 4T_{\mu C} + 2s \cdot T_{\mu T} + 1 \approx s \cdot 4T_{\mu C} + 2s \cdot T_{\mu T} + 1 = s \cdot (4T_{\mu C} + 2T_{\mu T}) + 1,$$

теперь докажем, что полученное выражение можно представить в следующем виде:

$$(s \cdot T_{\mu C} + 1) \cdot (s \cdot 3T_{\mu C} + 1) \cdot (2s \cdot T_{\mu T} + 1)$$

Преобразуем упомянутое выражение:

$$\begin{aligned} (s \cdot T_{\mu C} + 1) \cdot (s \cdot 3T_{\mu C} + 1) \cdot (2s \cdot T_{\mu T} + 1) &= (s^2 \cdot 3T_{\mu C}^2 + s \cdot T_{\mu C} + s \cdot 3T_{\mu C} + 1) \cdot (2s \cdot T_{\mu T} + 1) = \\ &= (s^2 \cdot 3T_{\mu C}^2 + s \cdot 4T_{\mu C} + 1) \cdot (2s \cdot T_{\mu T} + 1), \end{aligned}$$

далее следует пренебречь слагаемым  $s^2 \cdot 3T_{\mu C}^2$ , т.к. оно также имеет чрезвычайно малую величину. Имеем:

$$(s \cdot T_{\mu C} + 1) \cdot (s \cdot 3T_{\mu C} + 1) \cdot (2s \cdot T_{\mu T} + 1) \approx (s \cdot 4T_{\mu C} + 1) \cdot (2s \cdot T_{\mu T} + 1),$$

Преобразовав, получим:

$$(s \cdot 4T_{\mu C} + 1) \cdot (2s \cdot T_{\mu T} + 1) = s^2 \cdot 8T_{\mu C} \cdot T_{\mu T} + s \cdot 4T_{\mu C} + 2s \cdot T_{\mu T} + 1,$$

как и ранее, слагаемым  $s^2 \cdot 8T_{\mu C} \cdot T_{\mu T}$  пренебрегаем, получив следующее:

$$(s \cdot 4T_{\mu C} + 1) \cdot (2s \cdot T_{\mu T} + 1) \approx s \cdot 4T_{\mu C} + 2s \cdot T_{\mu T} + 1 = s \cdot (4T_{\mu C} + 2T_{\mu T}) + 1.$$

Очевидно, приняв серию допущений, числитель передаточной функции регулятора скорости допустимо представить в виде:

$$(s \cdot T_{\mu C} + 1) \cdot (s \cdot 3T_{\mu C} + 1) \cdot (2s \cdot T_{\mu T} + 1).$$

Поэтому производим замену числителя и произведем дальнейшие преобразования:

$$\begin{aligned} W_{PC}(s) &= \frac{(s \cdot 4T_{\mu C} + 1) \cdot (2s \cdot T_{\mu T} + 1) \cdot k_{OT}}{8s^2 \cdot T_{\mu C}^2 \cdot (s \cdot T_{\mu C} + 1) \cdot \Phi_0 \cdot \frac{3}{2} z_p \cdot \frac{1}{J_{\Sigma} \cdot s} \cdot k_{OC}} \approx \\ &\approx \frac{(s \cdot T_{\mu C} + 1) \cdot (s \cdot 3T_{\mu C} + 1) \cdot (2s \cdot T_{\mu T} + 1) \cdot k_{OT}}{8s^2 \cdot T_{\mu C}^2 \cdot (s \cdot T_{\mu C} + 1) \cdot \Phi_0 \cdot \frac{3}{2} z_p \cdot \frac{1}{J_{\Sigma} \cdot s} \cdot k_{OC}} = \\ &= \frac{(s \cdot 3T_{\mu C} + 1) \cdot (2s \cdot T_{\mu T} + 1) \cdot k_{OT}}{8s^2 \cdot T_{\mu C}^2 \cdot \Phi_0 \cdot \frac{3}{2} z_p \cdot \frac{1}{J_{\Sigma} \cdot s} \cdot k_{OC}} = \frac{(s^2 \cdot 6T_{\mu C} \cdot T_{\mu T} + s \cdot 3T_{\mu C} + 2s \cdot T_{\mu T} + 1) \cdot k_{OT}}{8s^2 \cdot T_{\mu C}^2 \cdot \Phi_0 \cdot \frac{3}{2} z_p \cdot \frac{1}{J_{\Sigma} \cdot s} \cdot k_{OC}}, \quad (24) \end{aligned}$$

Также, принимаем допущение относительно слагаемого  $s^2 \cdot 6T_{\mu C} \cdot T_{\mu T}$ , в силу его малозначимости:

$$W_{PC}(s) = \frac{(s^2 \cdot 6T_{\mu C} \cdot T_{\mu T} + s \cdot 3T_{\mu C} + 2s \cdot T_{\mu T} + 1) \cdot k_{OT}}{8s^2 \cdot T_{\mu C}^2 \cdot \Phi_0 \cdot \frac{3}{2} z_p \cdot \frac{1}{J_{\Sigma} \cdot s} \cdot k_{OC}} \approx \frac{(s \cdot (3T_{\mu C} + 2 \cdot T_{\mu T}) + 1) \cdot k_{OT}}{8s \cdot T_{\mu C}^2 \cdot \Phi_0 \cdot \frac{3}{2} z_p \cdot \frac{1}{J_{\Sigma}} \cdot k_{OC}}. \quad (25)$$

В силу инерционности процессов в контуре скорости, примем значение постоянной времени контура скорости, относительно постоянной времени контура тока равным:

$$T_{\mu C} = 32T_{\mu T},$$

Теперь, выражение передаточной функции контура скорости преобразуется к следующему виду:

$$W_{PC}(s) = \frac{(s \cdot (3T_{\mu C} + 2 \cdot T_{\mu T}) + 1) \cdot k_{OT}}{8s \cdot T_{\mu C}^2 \cdot \Phi_0 \cdot \frac{3}{2} z_p \cdot \frac{1}{J_{\Sigma}} \cdot k_{OC}} = \frac{(s \cdot 98 \cdot T_{\mu T} + 1) \cdot k_{OT}}{8s \cdot 32^2 T_{\mu T}^2 \cdot \Phi_0 \cdot \frac{3}{2} z_p \cdot \frac{1}{J_{\Sigma}} \cdot k_{OC}} =$$

$$= \frac{s \cdot 98 \cdot T_{\mu T} + 1}{s \cdot 98 T_{\mu T}} \cdot \frac{98 T_{\mu T} \cdot 2 \cdot J_{\Sigma} \cdot k_{OT}}{8 \cdot 32^2 T_{\mu T}^2 \cdot \Phi_0 \cdot 3 z_p \cdot k_{OC}} = \frac{s \cdot 98 T_{\mu T} + 1}{s \cdot 98 T_{\mu T}} \cdot k_{PC}.$$

где  $k_{PC} = \frac{98 \cdot 2 \cdot J_{\Sigma} \cdot k_{OT}}{8 \cdot 32^2 T_{\mu T} \cdot \Phi_0 \cdot 3 z_p \cdot k_{OC}} = \frac{98 \cdot 2 \cdot 0,0015 \cdot 38,78}{8 \cdot 32^2 T_{\mu T} \cdot 0,0362 \cdot 3 \cdot 8 \cdot 0,191} = 1,0814$

- коэффициент пропорциональности контура скорости.

В результате, получили ПИ-регулятор контура скорости с постоянной времени регулятора  $T_{PC} = 98T_{\mu T} = 0,0196$  с:

$$W_{PC}(s) = \frac{s \cdot T_{PC} + 1}{s \cdot T_{PC}} \cdot k_{PC} \quad (27)$$

Ожидаемые показатели качества работы контура скорости:

Используя встроенную функцию линейного анализа замкнутого контура получили следующий график (рис.18).

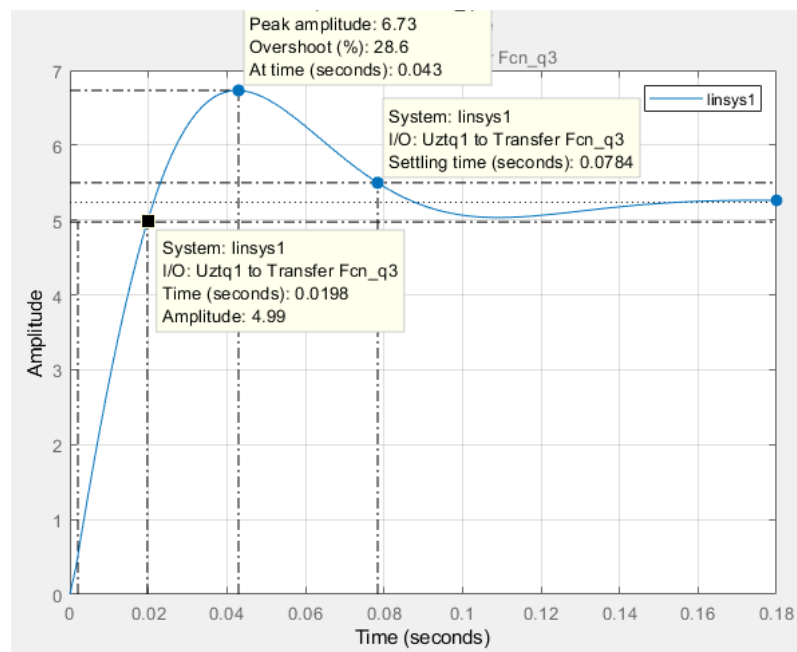


Рисунок 18 – График переходного процесса в контуре скорости

По графику видно, что:

- установившаяся ошибка  $\Delta \omega_{уст} = 0$ ;
- перерегулирование  $\sigma = 28,6\%$ ;



– время первого и окончательного вхождения в 5% зону при обработке ступенчатого задания:  $t_{py1} = 0,0198 \text{ с}$ ,  $t_{py2} = 0,0784 \text{ с}$

Для уменьшения перерегулирования обычно следует устанавливать фильтр на входе контура, однако в дальнейшем, учитывая влияние перекрестных обратных связей в модели синхронного двигателя, имеем величину перерегулирования гораздо меньшую.

### 3.1.4 Оптимизация контура положения

Структурная схема контура положения с безынерционной обратной связью представлена на рис.19.

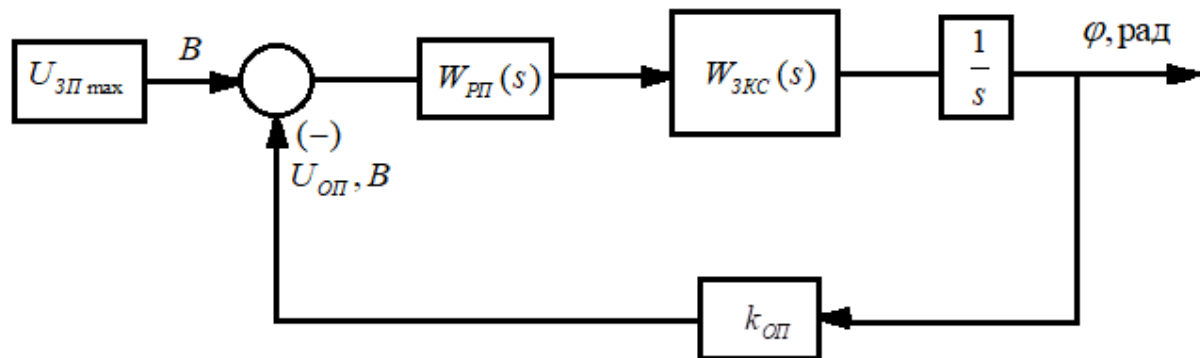


Рисунок 19 – Структурная схема контура положения

Принимаем, что на валу ротора установлен датчик положения ротора (ДПР), который имеет разрешение в 1000 меток (дискрет) на 1 оборот вала.

Здесь,  $U_{ЗП\max} = 10 \text{ В}$  - максимальное задание по положению, которое соответствует 24000 меток датчика положения ротора, учитывая то, что при трех оборотах рулевого колеса совершается 24 оборота вала двигателя;

$k_{ОП}$  - коэффициент обратной связи по положению:

$$k_{ОП} = \frac{1000 \cdot U_{ЗС\max}}{24000 \cdot 2\pi} = \frac{1000 \cdot 10}{24000 \cdot 2 \cdot 3,14} = 0,0663. \quad (28)$$

$W_{ЗКС}(s)$  - передаточная функция замкнутого контура скорости;

Для оптимизации контура положения по МО выбирается П-регулятор с передаточной функцией:

$$W_{PC}(s) = \frac{k_{OC}}{2 \cdot T_{\mu\Pi} \cdot k_{OP}}. \quad (29)$$

Здесь, малая постоянная времени контура положения принимается равной, постоянной времени контура скорости, поэтому передаточная функция П-регулятора равна:

$$W_{PC}(s) = \frac{0,191}{2 \cdot 98 \cdot 0,0002 \cdot 0,0663} = 73,4694. \quad (30)$$

Используя встроенную функцию линейного анализа замкнутого контура получили следующий график (рис.20).

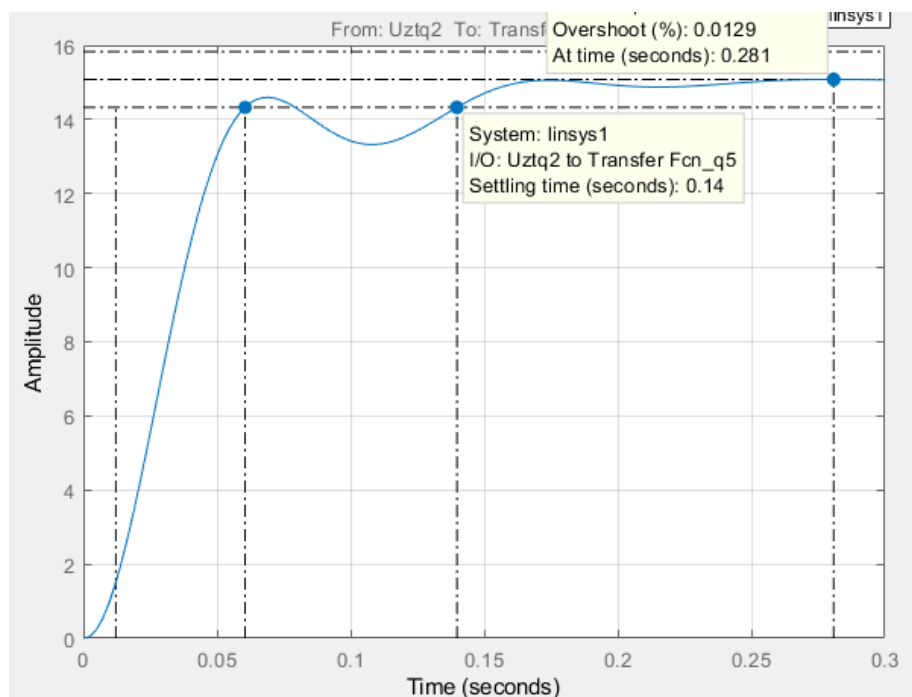


Рисунок 20 – График переходных процессов в контуре положения

По графику видно, что:

- установившаяся ошибка  $\Delta\varphi_{уст} = 0$ ;
- перерегулирование  $\sigma = 0,0129\%$ ;
- время первого и окончательного вхождения в 5% зону при обработке ступенчатого задания:  $t_{py1} = 0,604 \text{ с}$ ,  $t_{py2} = 0,14 \text{ с}$

## 4 Имитационное моделирование следящего электропривода рулевой рейки

### 4.1 Описание имитационной модели

На основании математического описания синхронной машины с постоянными магнитами, представленного в предыдущих разделах была построена имитационная модель синхронного двигателя в неподвижной системе координат (рис.21). Данная модель заключена в подсистеме СДПМ на рис.

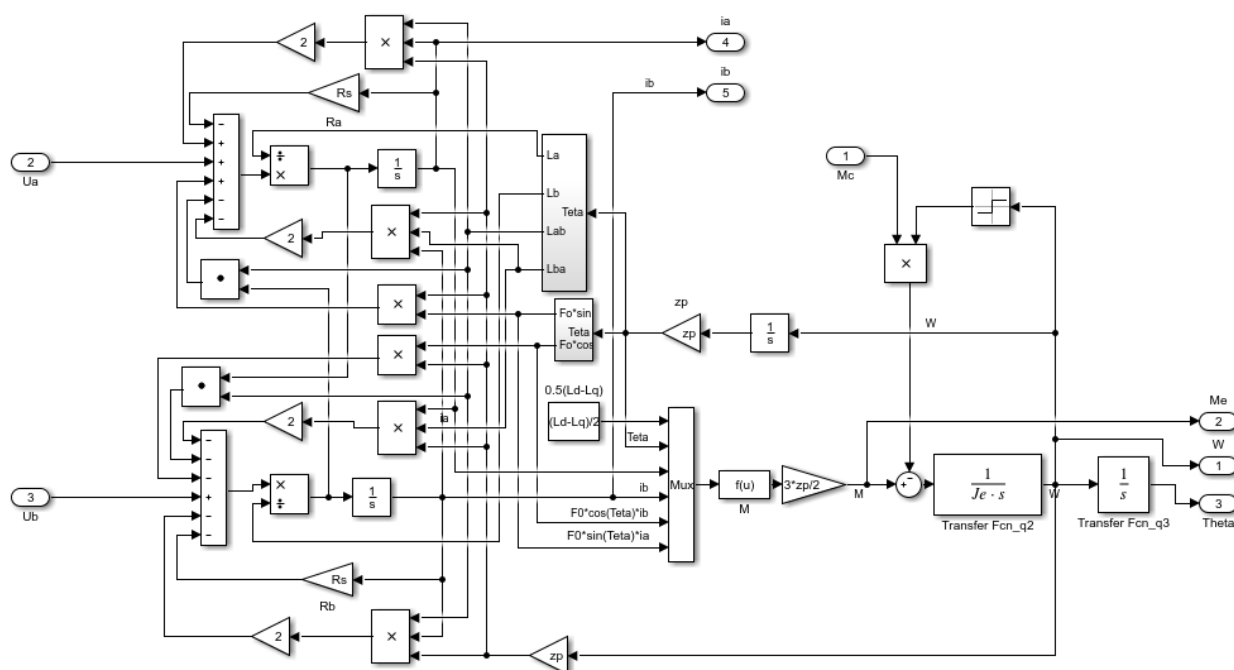


Рисунок 21– Модель синхронного двигателя с постоянными магнитами в неподвижной системе координат

Математическое описание СДПМ в неподвижной системе координат достаточно сложное. Для упрощения синтеза системы регулирования используется модель двигателя во вращающейся системе координат, имеющая упрощенное математическое описание. Модель во вращающейся системе координат представлена на рис.22.

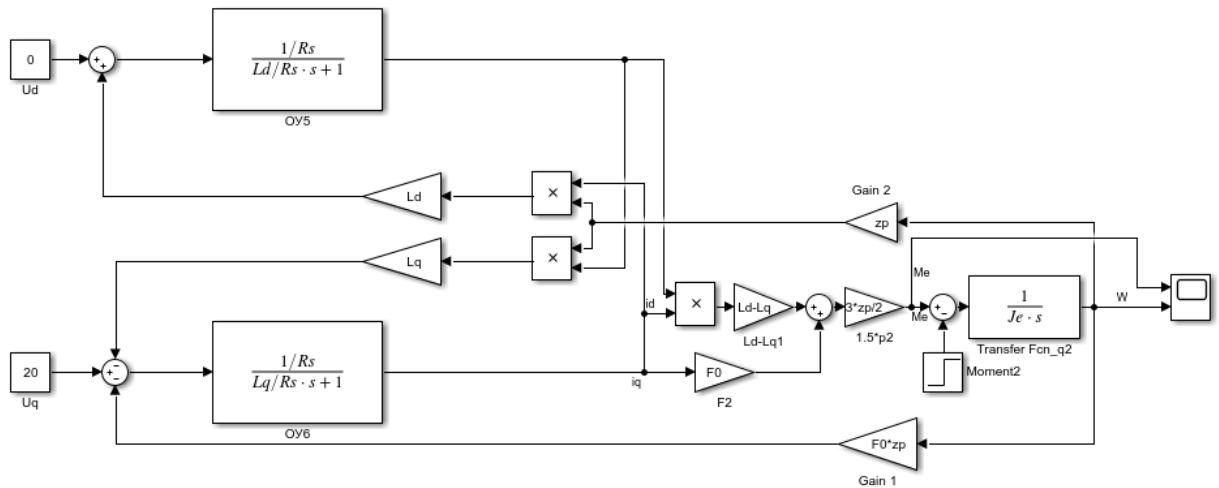


Рисунок 22 – Модель синхронного двигателя с постоянными магнитами во вращающейся системе координат

Для реализации координатных преобразователей Парка-Горева были построены блоки, объединенные в подсистемы *Прямое преобразование* и *Обратное преобразование*. Внутренняя структура этих блоков представлена на рис 23, 24.

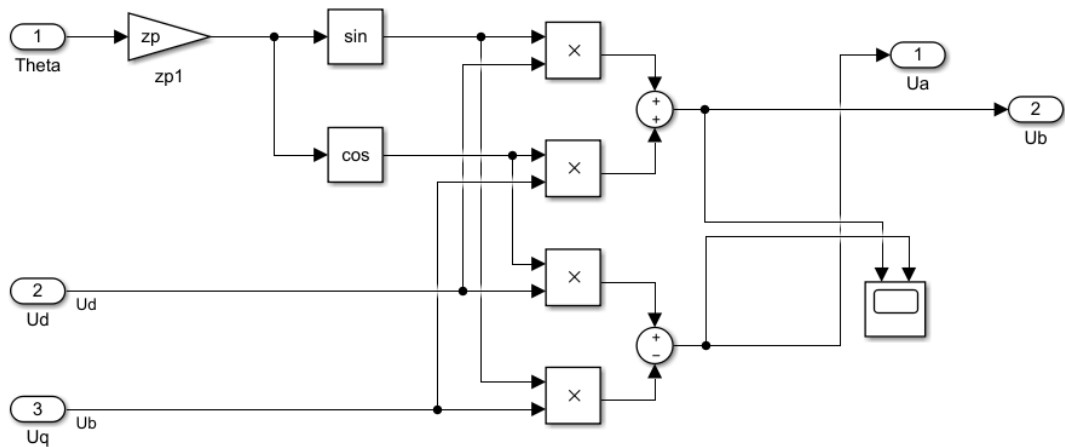


Рисунок 23 – Внутреннее строение блока прямого преобразования Парка-Горева

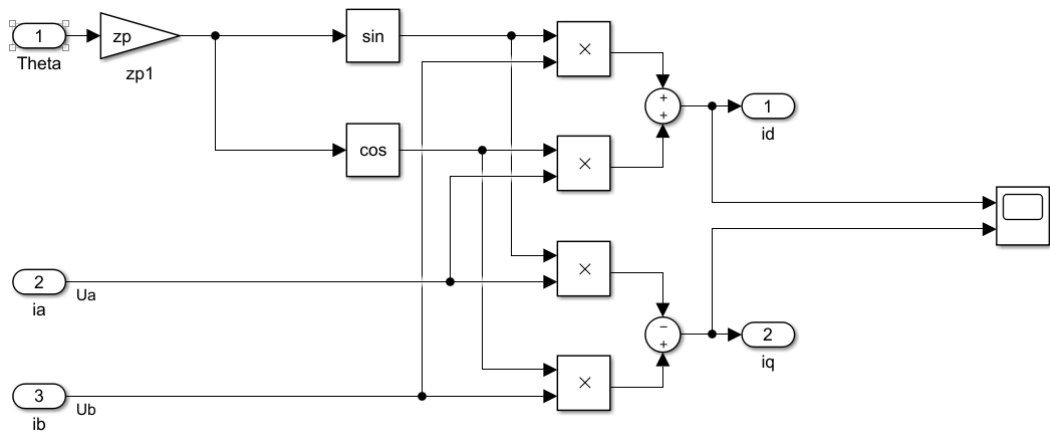


Рисунок 24 – Внутреннее строение блока обратного преобразования Парка-Горва

В имитационном моделировании также используются подсистемы регуляторов тока, скорости и положения для реализации контуров регулирования с ограничениями. Внутреннее строение нелинейных регуляторов показано на рис 25, 26, 27.

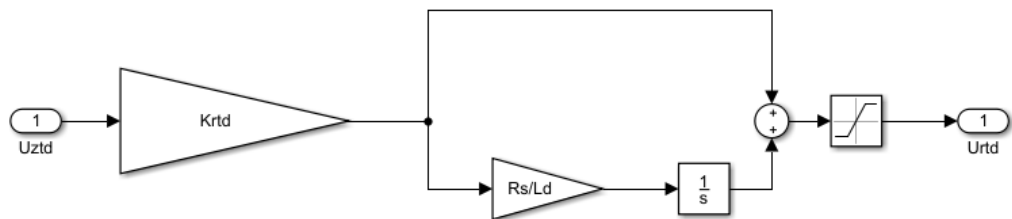


Рисунок 25 – Нелинейный ПИ-регулятор тока

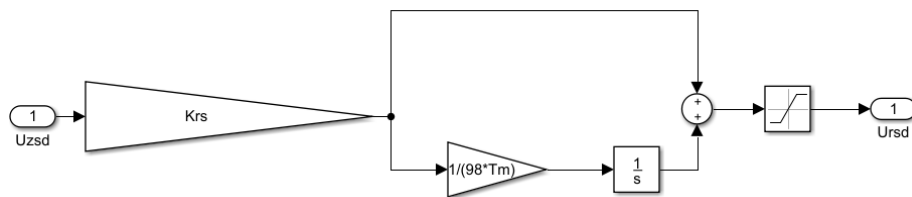


Рисунок 26 – Нелинейный ПИ-регулятор скорости



Рисунок 27– Нелинейный П-регулятор положения

Были построены модели регулируемого синхронного электропривода во вращающейся и неподвижной системе координат с целью сравнить

переходные процессы, протекающие при использовании данных моделей, друг относительно друга. Модель регулируемого синхронного электропривода во вращающейся и неподвижной системе координат показаны на рис 28, 29 соответственно.

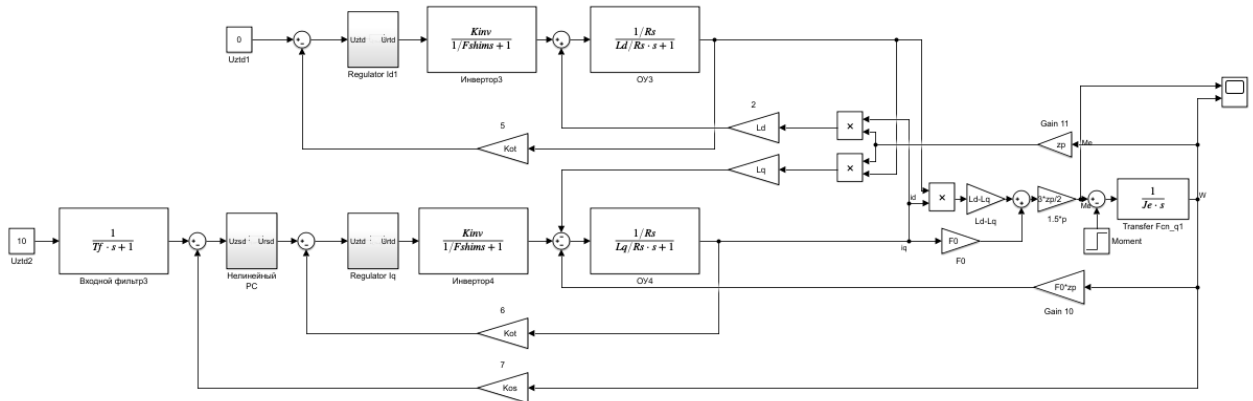


Рисунок 28 - Модель регулируемого синхронного электропривода во вращающейся системе координат

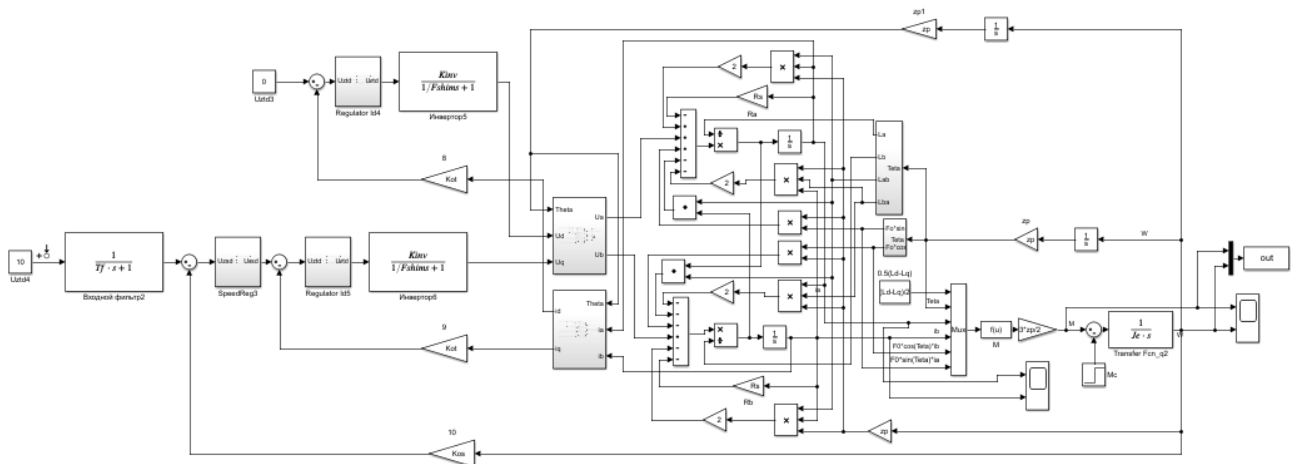


Рисунок 29 - Модель регулируемого синхронного электропривода во неподвижной системе координат

На рисунке 30 представлены графики переходных процессов момента и частоты вращения синхронного двигателя при использовании разных моделей. На рисунке можно заметить разницу мгновенных значений момента и частоты вращения одной модели относительно другой. Это обусловлено упрощением математического описания двигателя для вращающейся системе координат, однако различия невелики и использование модели во вращающейся системе координат для разработки нелинейной системы

автоматического управления следящим синхронным электроприводом можно считать адекватным.

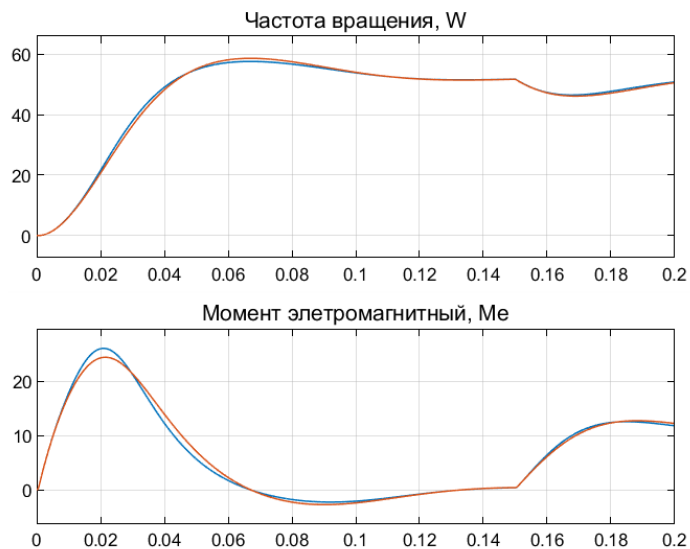


Рисунок 30 – Графики переходных процессов для двух моделей электропривода

Далее, на основе структурной схемы линеаризованной САУ следящего электропривода построили имитационную модель нелинейной непрерывной с ограничением выхода регуляторов величиной  $\pm 10 В$  САУ следящего синхронного электропривода (рис.31).

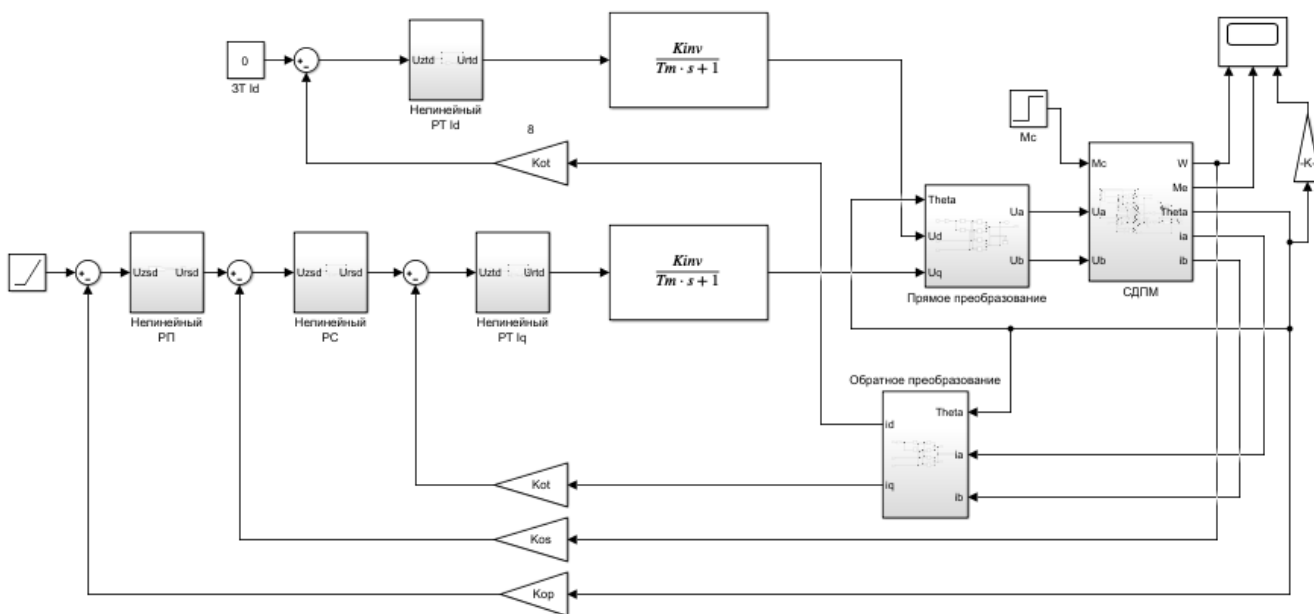


Рисунок 31 - Модель нелинейной непрерывной САУ следящего синхронного электропривода

## 4.2 Результаты моделирования

В результате моделирования были получены графики (рис. 32), описывающие работу электропривода в режиме поворота на месте с максимальной нагрузкой двигателя  $30 \text{ Н} \cdot \text{м}$ , что соответствует максимальному моменту сопротивления механизма рулевой рейки. При этом синхронный электропривод успевает отработать задание, соответствующее повороту колес из крайнего положения одного направления в другое за 2,85 секунды, что удовлетворяет поставленной цели совершить поворот колес на 3 секунды.

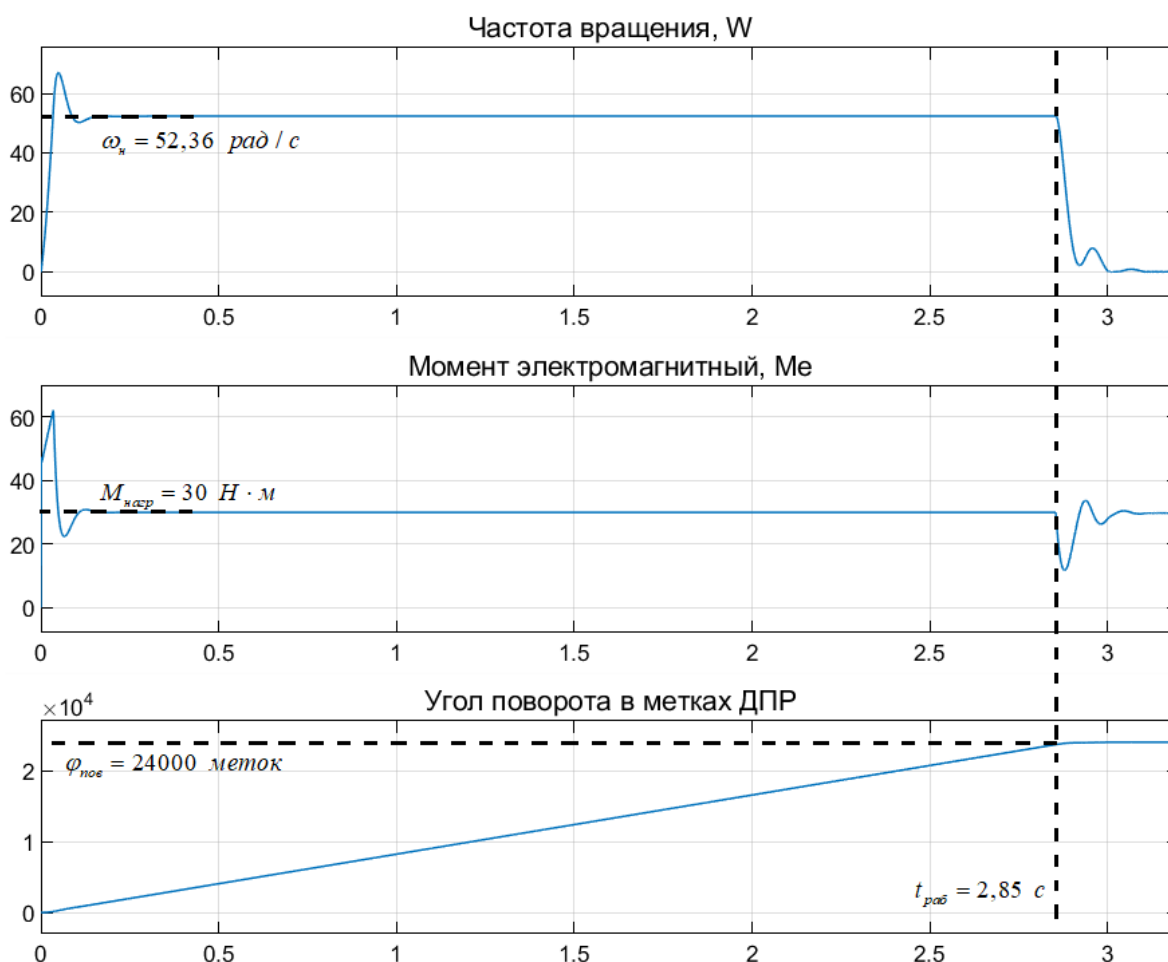


Рисунок 32 – Графики частоты вращения, момента, угла поворота при максимальном задании

С П-регулятором положение замкнутый контур регулирования имеет по управлению астатизм первого порядка, поэтому ступенчатое воздействие



будет обрабатываться без установившейся ошибки, а в режиме слежения будут иметь место ошибки, пропорциональные производным от сигнала задания. При линейно-нарастающем сигнале задания в этом случае будет только скоростная ошибка. Введением скоростной компенсации можно ее уменьшить. На рисунке 33 наглядно показаны графики линейного задания по положению и текущего значения положения вала, а также, величина скоростной ошибки (установившаяся и максимальная).

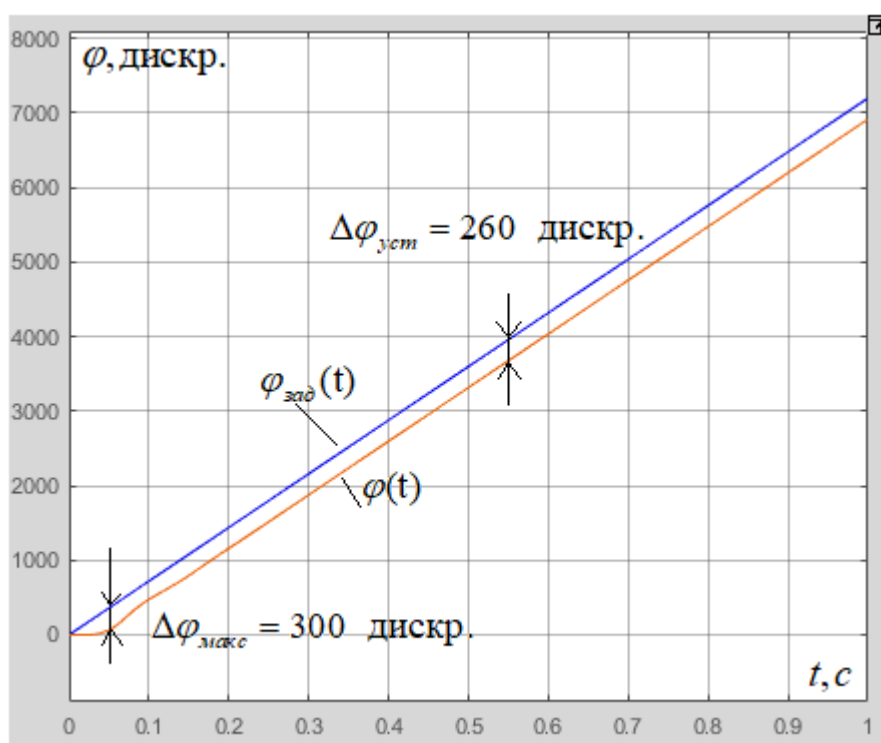


Рисунок 33 – Графики линейного задания и текущего положения вала ротора

## **5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

В современном автомобилестроении чётко прослеживаются тенденции постепенного перехода к интеллектуальным системам управления транспортными средствами без участия человека. Для безопасной и качественной работы беспилотного транспортного средства требуется решить множество задач, связанных с организацией управления исполнительными органами.

Многие из функций переходят от водителя к системам высокоточного электропривода и решение задач, связанных с разработками надёжного и компактного сервопривода рулевой рейки беспилотного транспортного средства выходит на приоритетный уровень.

Целью данного раздела является расчет экономических показателей проекта по разработке следящего электропривода рулевой рейки. Для этого необходимо выполнить следующие задачи:

- Анализ конкурентных технических решений
- Планирование НИ
- Формирование бюджета затрат на НИ
- Определение эффективности исследования

## **5.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

### **5.1.1 Анализ конкурентных технических решений**

Анализ конкурирующих разработок, которые существуют на рынке, проводится систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Данный анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, для успешного противостояния своим соперникам.

Применение следящих синхронных электроприводов позволяет модернизировать рулевое управление, повысить надежность, срок службы оборудования, снизить энергопотребление. Синхронные электроприводы становятся все более распространены, что позволит в случае необходимости провести оперативную замену.

Стоимость мощных электродвигателей постоянного тока соизмерима, а иногда и превышает стоимость синхронного трехфазного электродвигателя с частотным преобразователем и комплектом дополнительного оборудования, при этом сроки поставки сокращаются от 45–90 дней до 1–14 дней.

При этом синхронные электродвигатели более надежны, чем электродвигатели постоянного тока за счет отсутствия щеточного аппарата.

Также, данные двигатели имеют повышенный коэффициент полезного действия, при этом имея широкие возможности по управлению за счет использования векторного управления.

Данный анализ проводится с помощью оценочной карты (таблица 4), в которой рассматриваются ЭП постоянного тока и синхронный ЭП.

Таблица 4 – Оценочная карта конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		ЭП постоянного тока	Синхронный ЭП	ЭП постоянного тока	Синхронный ЭП
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>					
1. КПД	0,12	4	5	0,48	0,6
2. Диапазон регулирования скорости	0,2	5	5	1	1
3. Надежность	0,1	4	5	0,4	0,5
4. Завышение мощности	0,15	4	5	0,6	0,75
5. Простота управления	0,13	4	3	0,52	0,39
6. Габариты	0,12	4	5	0,48	0,6
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>					
1. Цена	0,08	3	4	0,24	0,32
2. Конкурентоспособность продукта	0,05	3	4	0,15	0,2
3. Уровень проникновения на рынок	0,05	5	4	0,25	0,2
<b>Итого</b>	<b>1</b>	<b>36</b>	<b>40</b>	<b>4,02</b>	<b>4,22</b>

В ходе анализа технических конкурентных решений было выявлено превосходство синхронного электропривода над его конкурентом – электроприводом постоянного тока. Основными преимуществами исследуемого электропривода являются: малые габариты, низкая цена и высокий КПД.

## 5.1.2 Планирование научно – исследовательских работ

### 5.1.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования, с распределением исполнителей по видам работ, представлен в таблице 5.

Таблица 5 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
	3	Выбор направления исследований	Руководитель
			Инженер
	4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Анализ технического задания	Инженер
	6	Расчет и выбор силового оборудования	
	7	Расчет статических характеристик	
	8	Разработка функциональной схемы системы регулируемого электропривода	
Обобщение и оценка результатов	9	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель
Оформление отчета по НИР (комплекта документации по ОКР)	10	Составление эксплуатационно – технической документации	Инженер

### 5.1.2.2 Разработка графика проведения научного исследования

Определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования является важным моментом так как трудовые затраты в большинстве случаев составляют основную часть стоимости разработки.

Наиболее удобным и наглядным является построение ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

Для построения диаграммы Ганта, необходимо перевести длительность каждого из этапов работ из рабочих дней в календарные. Для этого рассчитываем коэффициент календарности по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 118} = 1,478$$

Так как исполнители работали одновременно, то минимально и максимально возможную, а также ожидаемую трудоёмкость учитываем общими для исполнителей.

$$t_{\text{ож1}} = \frac{3t_{\text{min1}} + 2t_{\text{max1}}}{5} = \frac{3 \cdot 2 + 2 \cdot 4}{5} = 2,8 \text{ чел. - дн.}$$

Продолжительность каждой работы в рабочих днях вычисляется как:

$$T_{p1} = \frac{t_{\text{ож1}}}{\text{ч}_1} = \frac{2,8}{1} = 2,8.$$

Длительность каждого этапа работ переведем из рабочих дней в календарные дни по формуле:

$$T_{k1} = T_{p1} \cdot k_{\text{кал}} = 2,8 \cdot 1,478 \approx 4.$$

Все рассчитанные значения сведены в таблицу 6.

Таблица 6 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях $T_{pi}$		Длительность работ в календарных днях $T_{ki}$	
	$t_{min}$ , чел-дни		$t_{max}$ , чел-дни		$t_{ож}$ , чел-дни		Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер
	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер				
Составление и утверждение технического задания	1	0	2	0	1,4	0	1,4	0	2	0
Подбор и изучение материалов по теме	0	4	0	7	0	5,2	0	5,2	0	8
Выбор направления исследований	1	1	2	2	1,4	1,4	0,7	0,7	1	1
Календарное планирование работ по теме	1	0	2	0	1,4	0	1,4	0	2	0
Анализ ТЗ	0	2	0	7	0	4	0	4	0	6
Расчет и выбор силового оборудования	0	3	0	6	0	4,2	0	4,2	0	6
Расчет статических характеристик	0	3	0	8	0	5	0	5	0	7
Разработка функциональной схемы системы регулируемого электропривода	0	3	0	10	0	5,8	0	5,8	0	9
Оценка эффективности полученных результатов	1	0	3	0	1,8	0	1,8	0	3	0
Составление эксплуатационно – технической документации	0	5	0	10	0	7	0	7	0	10

Таблица 7 – Диаграмма Ганта

№ раб.	Вид работ	Исполнители	$T_{ki}$ , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ														
				февраль		март			апрель			май						
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3				
1	Составление и утверждение ТЗ	Р	2	█														
2	Подбор и изучение материалов по теме	И	8	█														
3	Выбор направления исследований	Р, И	1		█													
4	Календарное планирование работ	Р	2		█													
5	Анализ ТЗ	И	6			█												
6	Расчет и выбор силового оборудования	И	6				█											
7	Расчет статических характеристик	И	7					█										
8	Разработка функциональной схемы системы регулируемого электропривода	И	9						█									
9	Оценка эффективности полученных результатов	Р	3							█								
10	Составление эксплуатационно – технической документации	И	10								█							



 - инженер, 
  - руководитель.



Таблица 8 – Итоги планирования работ

	Название	Кол-во дней
<b>Итого</b>	Общее количество календарных дней для выполнения выпускной работы	54
	Общее количество календарных дней, в течение которых работал инженер (студент)	47
	Общее количество календарных дней, в течение которых работал руководитель	8

Выполнение проекта займет 54 календарных дней. Занятость инженера больше, чем руководителя, так как он основной исполнитель. Руководитель осуществляет контроль и оценку выполнения поставленных задач.

## 5.2 Бюджет научно – технического исследования (НТИ)

### 5.2.1 Расчет затрат на оборудование проекта

Таблица 9 – Материальные затраты

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, руб.	Общая стоимость оборудования, руб.
1	Комплект канцелярских принадлежностей	1	300	300
2	Бумага для принтера	1	300	300
3	Краска для принтера	1	600	600
<b>Итого</b>				1200

### 5.2.1.2 Расчет затрат на оборудование и программное обеспечение

Таблица 10 – Затраты на оборудование

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, руб.	Общая стоимость оборудования, руб.
1	Персональный компьютер	1	58 761,64	58 761,64
<b>Итого</b>				58 761,64

Стоимость персонального компьютера включена с учетом амортизации:

$$A = \frac{\text{стоимость} \cdot N_{\text{дней.использования}}}{\text{срок.службы} * 365}$$
$$A_{\text{комп}} = \frac{56000 * 54}{3 * 365} = 2761,64 \text{ руб.}$$

### 5.2.1.3 Основная заработная плата исполнителей темы

В данной статье производится расчет основной заработной платы научных и инженерно-технических работников непосредственно участвующих в выполнении работ. Основная заработная плата обычно является наибольшей составляющей всей стоимости разработки.

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{мс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}}$$

- Руководитель

$$Z_{\text{м}} = 19500 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 38025 \text{ руб.}$$

- Инженер

$$Z_{\text{м}} = 17000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 33150 \text{ руб.}$$

где  $Z_{\text{мс}}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб.;  $k_{\text{пр}}$  – премиальный коэффициент, равный 0,3;  $k_{\text{д}}$  – коэффициент доплат и надбавок составляет 0,2;  $k_{\text{р}}$  – районный коэффициент, равный 1,3 (для города Томска);

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}$$

- Руководитель

$$Z_{\text{дн}} = \frac{38025 \cdot 11,2}{223} = 1909,76 \text{ руб.},$$

- Инженер

$$Z_{\text{дн}} = \frac{33150 \cdot 11,2}{223} = 1664,93 \text{ руб.},$$

где  $Z_{\text{м}}$  – месячный должностной оклад работника, руб.:

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 24 раб. дня  $M = 11,2$  месяца, 5-дневная неделя;

$F_{\text{д}}$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Таблица 11 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней: выходные дни и праздничные дни	118	118
Потери рабочего времени: отпуск и невыходы по болезни	24	24
Действительный годовой фонд рабочего времени	223	223

Основная заработная плата ( $Z_{\text{осн}}$ ) от предприятия рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{р}}$$

- Руководитель

$$Z_{\text{осн}} = 1909,76 \cdot 5 = 9548,8 \text{ руб}$$

- Инженер

$$Z_{\text{осн}} = 1664,93 \cdot 32 = 53277,76 \text{ руб}$$

где  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата одного работника;

$T_p$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.

$Z_{дн}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Таблица 12 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$Z_{мс}$ , руб.	$k_{пр}$	$k_{д}$	$k_{р}$	$Z_{м}$ , руб	$Z_{дн}$ , руб.	$T_p$ , раб. дн.	$Z_{осн}$ , руб.
Руководитель	19500	0,3	0,2	1,3	38025	1909,76	5	9548,8
Инженер	17 000	0,3	0,2	1,3	33150	1664,93	32	53277,76
Итого:								62826,56

#### 5.2.1.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Трудовым кодексом РФ предусмотрены доплаты за отклонение от нормальных условий труда, а также выплаты, связанные с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении общественных и государственных обязанностей, при совмещении работы с обучением и т.д.).

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн}$$

- Руководитель

$$Z_{доп} = 0,15 \cdot 9548,8 = 1432,32 \text{ руб.};$$

- Инженер

$$Z_{доп} = 0,15 \cdot 53277,76 = 7991,66 \text{ руб.};$$

где  $k_{доп}$  – коэффициент дополнительной заработной платы 0,15

#### 5.2.1.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов рассматриваются обязательные отчисления по установленным законодательством РФ нормам органам государственного

социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}),$$

где  $k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

Согласно федеральному закону № 212 пункта 6 части 1 статьи 58 от 2019 года, для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность введена пониженная ставка на размер страховых взносов, которая составляет 28 %.

Величина отчислений во внебюджетные фонды:

- Руководитель

$$Z_{\text{внеб}} = 0,28 \cdot (9548,8 + 1432,32) = 3074,71 \text{ руб.};$$

- Инженер

$$Z_{\text{внеб}} = 0,28 \cdot (53277,76 + 7991,66) = 17155,44 \text{ руб.}$$

Таблица 13 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.
Руководитель темы	9548,8	1432,32
Инженер-студент	53277,76	7991,66
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,28	
Отчисления во внебюджетные фонды		
Руководитель темы	3074,71	
Инженер-дипломник	17155,44	
<b>Итого</b>	<b>20230,15</b>	

### 5.2.1.6 Накладные расходы

В данной статье рассматриваются накладные расходы, учитывающие прочие затраты организации, которые не попали в предыдущие статьи расходов: оплата электроэнергии и услуг связи, почтовые и телеграфные расходы и т.д.

Величина накладных расходов определяется по следующей формуле:

$$Z_{накл} = (\text{сумма статей } 1 \div 5) \cdot k_{нр} = (Z_{мат} + Z_{арм} + Z_{осн} + Z_{доп} + Z_{внеб}) \cdot 0,16$$
$$Z_{накл} = (1200 + 2761,64 + 62826,56 + 9423,98 + 20230,14) \cdot 0,16 =$$
$$= 96442,33 \cdot 0,16 = 15430,77 \text{ руб.},$$

где  $k_{нр}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы (16%).

### 5.2.1.7 Формирование бюджета затрат научно-технического исследования

При составлении договора с заказчиком, нижнем пределом затрат на разработку является бюджет затрат проекта, в основе которого лежит рассчитанная величина затрат научно-технического исследования.

Таблица 14 – Бюджет затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.	%
Материальные затраты	1 200	1,07
Затраты на амортизацию	2 761,64	2,47
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	62 826,56	56,16
Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	9 423,98	8,42
Отчисления во внебюджетные фонды	20 230,15	18,08
Накладные расходы	15 430,77	13,79
Бюджет затрат проекта	111873,10	100

### **5.3 Определение эффективности исследования**

В данном разделе была проведена оценка конкурентоспособности синхронного электропривода рулевой рейки, в результате которой было выявлено превосходство синхронного электропривода над его конкурентом – электроприводом постоянного тока.

Было произведено планирование научно-исследовательских работ. Всего для выполнения выпускной работы понадобится 54 календарных дней. Для реализации данного проекта были задействованы 2 исполнителя (руководитель и инженер). Причём занятость инженера (47 календарных дней) гораздо выше, чем занятость руководителя (8 календарных дней). Так как инженер является основным исполнителем.

Так же был составлен бюджет научно-технического исследования – 111873,1 рублей. Где основные затраты – это основная заработная плата исполнителей (55,33%).

Таким образом, данный проект является актуальным на рынке современного автомобилестроения, так как данная разработка имеет высокую эффективность и функциональную мощность. Основными преимуществами исследуемого электропривода являются: высокий КПД, повышенные возможности управления, низкая стоимость, малые габариты.

## **6 Социальная ответственность**

В последнее время этические проблемы техники все больше выходят на первый план в связи с повышением социальной ответственности ученого, инженера, проектировщика в современном обществе, потому что конечная цель техники – это служение людям, но без нанесения ущерба другим людям и природе. Техника не может более рассматриваться как ценностно нейтральная и должна отвечать не только технической функциональности, но и критериям экономичности, улучшения жизненного уровня, безопасности, здоровья людей, качества окружающей природной и социальной среды и т.п.

В данном разделе ВКР рассматриваются вопросы безопасности жизнедеятельности, а также, с точки зрения социальной ответственности за моральные, общественные, экономические, экологические возможные негативные последствия, связанные с разработкой сервопривода рулевой рейки беспилотного транспортного средства.

В выпускной квалификационной работе разрабатывается следящий электропривод рулевой рейки беспилотного транспортного средства. Производится расчет и подбор оборудования, составляющего данный электропривод.

Целью разработки настоящего раздела является принятие проектных решений, исключающих несчастные случаи и профессиональные заболевания в производстве, обеспечивающих снижение вредных воздействий на окружающую среду, безопасность в чрезвычайных ситуациях, экономное расходование ресурсов.



## **6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

Рабочий персонал имеет следующие права:

– На работах с опасными условиями труда, а также на работах, выполняемых в особых температурных условиях или связанных с загрязнением, работникам бесплатно выдаются прошедшие обязательную сертификацию или декларирование соответствия специальная одежда, специальная обувь и другие средства индивидуальной защиты, а также смывающие и (или) обезвреживающие средства в соответствии с типовыми нормами, которые устанавливаются в порядке, определяемом Правительством Российской Федерации (в ред. Федерального закона от 30.06.2006 N 90-ФЗ);

– Работники имеют право на обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний, которое осуществляется в Российской Федерации с января 2000 года в соответствии с Федеральным законом от 24.07.1998 г. № 125-ФЗ «Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний». Если происходят несчастные случаи (травмы, смерть), то семье или самому работнику выплачивается компенсация в размере, зависящем от тяжести последствий [18];

– Также предоставляются права на проведение в установленном порядке за счет средств организации обязательных предварительных (при поступлении на работу) и периодических в течение трудовой деятельности в данной организации медицинских осмотров (обследований), а также внеочередных медицинских осмотров работников в соответствии с медицинскими рекомендациями согласно законодательству Российской Федерации [19].

Рабочее место в цеху полностью соответствует эргономическим требованиям:

- произведены необходимые отключения и приняты меры, препятствующие подаче напряжения на место работы вследствие ошибочного или самопроизвольного включения коммутационных аппаратов;
- на приводах ручного и на ключах дистанционного управления коммутационных аппаратов должны быть вывешены запрещающие плакаты;
- проверено отсутствие напряжения на токоведущих частях, которые должны быть заземлены для защиты людей от поражения электрическим током;
- наложено заземление (включены заземляющие ножи, а там, где они отсутствуют, установлены переносные заземления);
- вывешены указательные плакаты «Заземлено», ограждены при необходимости рабочие места и оставшиеся под напряжением токоведущие части, вывешены предупреждающие и предписывающие плакаты.

## 6.2 Анализ вредных и опасных производственных факторов

Согласно ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы». Классификация основные вредные и опасные факторы представлены в таблице 15 [1].

Таблица 15 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
1.Шум		+	+	ГОСТ12.1.003-2014 ССБТ «Общие требования безопасности». СанПиН 2.2.4/2.1.8.562 – 96. СанПиН 2.2.4/2.1.8.566 – 96. ГОСТ 12.1.012.2004 «Вибрационная безопасность». СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение». Сан ПиН 2.2.4.548 – 96. ГОСТ Р 50571.3-2009, ГОСТ 12.1.038-82
2.Механические повреждения	+	+	+	
3.Недостаток естественного света		+	+	
4.Микроклимат		+	+	
5.Электропоражение		+	+	

## 6.2.1 Шум

Шум — один из наиболее распространенных неблагоприятных факторов производственной среды. Источником является мощный электродвигатель. Говоря о действии шума на организм, следует иметь в виду, что он оказывает как местное, так и общее воздействие. Неблагоприятно отражается шум на нервной системе, вызывая головные боли, бессонницу, ослабление внимания, замедление психических реакций, что в конечном счете приводит к понижению работоспособности.

Предельно допустимые уровни шума представлены в таблице 16. [3]

Таблица 16 - Предельно допустимые уровни шума

Рабочее место	Уровни звукового давления, дБ									По шкале
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Цех	107	95	87	82	78	75	73	71	69	80
Щит управления	96	83	74	68	63	60	57	55	54	65

Для защиты от шума и вибрации при изготовлении и эксплуатации предусматриваются:

- обеспечение персонала индивидуальными средствами защиты;
- установка звукоизолирующих кабин;
- звукоизолирующие кожухи и экраны;
- виброизолирующие материалы под оборудование (пружины, резины и другие прокладочные материалы).

**Средства индивидуальной защиты (СИЗ)** применяются в том случае, если другими способами обеспечить допустимый уровень шума на рабочем месте не удастся. Принцип действия СИЗ – защитить наиболее чувствительный канал воздействия шума на организм человека – ухо. СИЗ включают в себя противошумные вкладыши (беруши), наушники, шлемы и каски, специальные костюмы.

## 6.2.2 Механические повреждения

При ведении работ в сборочном цеху персонал при несоблюдении требований безопасности труда зачастую может получить различные механические травмы. К травмам такого типа относятся: ушибы, переломы, вывихи и ранения.

Обычно ушибы происходят при неосторожном обращении с инструментом, при использовании непригодного инструмента, при падении инструмента и т.д. Исключать получение ушибов тела при движении по неровной или скользкой поверхности не приходится.

Переломы пальцев рук и ног имеют место при падении тяжелых предметов с высоты. Переломы костей возникают в основном при падении сотрудника с высоты, при авариях на транспорте.

По большей части, получение ранения происходит при использовании режущих инструментов, при зачистке изоляции проводов и кабелей и т.д.

Согласно ГОСТ 12.2.003-91 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Оборудование производственное. Общие требования безопасности»

для минимизации травм персонал должен быть подготовлен соответствующими инструктажами. Инструктажи делятся на [12]:

- Вводный – предусматривает изложение всех функций специалиста, возложенных на него по охране труда, а также изложение утвержденной программы;
- Первичный – знакомит работников с имеющимися вредными и опасными производственными факторами, а также при данном инструктаже проходит устная проверка знаний охраны труда;
- Повторный – повторяет первичный инструктаж на рабочем месте;
- Внеплановый – производится по приказу или распоряжению;
- Целевой – оформляется приказом о проведении работ с оформлением наряда-допуска.

Инструктажи проводятся не только для минимизации механических травм, но и для предотвращения других повреждений.

### 6.2.3 Недостаток естественного света

Согласно научным исследованиям, отсутствие или недостаток естественного освещения на рабочем месте может вызвать ухудшение самочувствия, привести к потере сна и ослаблению здоровья [1]. Специалисты полагают, что причина отрицательного воздействия может заключаться в изменении циркадных ритмов из-за недостатка естественного света. Поэтому следует уделять большее внимание достаточному дневному освещению для укрепления здоровья и морального состояния работников. [21]

На рабочих местах, где трудовая деятельность ведется в условиях отсутствия естественного освещения, необходимо проводить мероприятия, направленные на уменьшение уровня вредности условий труда. В их число входят следующие:

- улучшение условий путем использования искусственного освещения;
- защита временем, то есть сокращение продолжительности пребывания работников в помещении без естественного освещения;
- профилактическое ультрафиолетовое облучение работников. В этом случае источники ультрафиолетового излучения устанавливают рядом с обычными осветительными лампами, за счет чего достигается обогащение обычного искусственного освещения ультрафиолетовым излучением.

При недостатке естественного освещения в помещениях также возможно принятие следующих мер:

- анализ степени загрязненности стекол в светопроемах, их очистка и дальнейшие контрольные измерения коэффициента естественной освещенности, который показывает, какая часть наружного освещения попадает на рабочие места производственного помещения;
- при наличии в помещении зон с недостаточным и достаточным уровнем естественного освещения изменение размещения рабочих мест с их переносом в зону с достаточным уровнем естественного освещения;

- косметический ремонт помещения с применением светлых отделочных материалов.

Основным источником света, как для общего, так и для комбинированного освещения, являются люминесцентные лампы: АД4, ЛД, ЛХБ, ЛБ, ЛТБ. Из них наиболее экономичными являются лампы типа ЛБ.

### **6.2.3.1 Выбор системы освещения**

Применение на рабочих местах одного местного освещения не допускается. Общее же равномерное освещение применяется для тех помещений, где работа производится по всей площади, и нет необходимости в лучшем освещении отдельных участков [11].

Система общего локализованного освещения применяется тогда, когда в производственном помещении есть участки, на которых проводятся работы с высоким зрительным напряжением.

Система комбинированного освещения применяется в помещении, где выполняются точные зрительные работы; в случае необходимости определённого, изменяемого в процессе работы направления света, а также в помещениях с не высокой плотностью распределения рабочих мест.

### **6.2.3.2 Выбор осветительных приборов**

В цеху механической обработки для общего локализованного освещения используются люминесцентные лампы.

Люминесцентные лампы - открытые двухламповые светильники типа ОД, ОЛОП, ОДО, ШОТ, ООД - для нормальных помещений с хорошим отражением стен и потолка; их применение допускается при умеренной влажности и запыленности.

Светильники ПВЛ - являются пылевлагозащищёнными, пригодны для некоторых пожароопасных помещений. Мощность лампы 2x40 Вт

Плафоны потолочные для общего освещения закрытых, сухих помещений:

Л71ВОЗ - мощность лампы 10х30 Вт

Л71В84-мощность лампы 8х40 Вт

### 6.2.3.3 Выбор коэффициента запаса

Полученная величина освещенности корректируется с учетом коэффициента запаса, так как со временем за счет загрязнения светильников и уменьшения светового потока ламп освещённость снижается

Значение коэффициента запаса представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Значения коэффициента запаса

Характеристика объекта	Люминесцентные лампы	Лампы накаливания
Помещения с большим выделением пыли	2.0	1.7
Помещения со средним выделением пыли	1.8	1.5
Помещения с малым выделением пыли	1.5	1.3

### 6.2.4 Микроклимат

Помещение цеха характеризуется:

- наличием большого количества металлического оборудования;
- повышенной температурой.

Оптимальные и допустимые нормы микроклимата в рабочей зоне производственных помещений представлены в таблице 17.

Таблица 17 - Оптимальные и допустимые нормы микроклимата в рабочей зоне производственных помещений

Сезон года	Категория работ	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
		По ГОСТ 12.1.005 – 88	По ГОСТ 12.1.005 – 88	По ГОСТ 12.1.005 – 88
Холодный	Средней тяжести	17 – 19	40 – 60	0,3
Тёплый со значительным избытком тепла	Средней тяжести	20 – 22	40 – 60	0,2 – 0,5

Для обеспечения нормального микроклимата предусматривается, следующее:

вентиляция приточно-вытяжная, установка центробежных вентиляторов. Кратность воздухообмена 1;

установка систем воздушного отопления, совмещённых с вентиляцией;

Предусмотренные мероприятия обеспечивают параметры микроклимата в соответствии с нормами, представленными в таблице 1.

Значения температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха устанавливаются, для рабочей зоны производственных помещений, в зависимости от категории тяжести выполняемой работы, величины явного избытка тепла, выделяемого в помещении и периода года.

### 6.2.5 Электропоражение

Электропоражение персонала, работающего с электроустановками, является опасным для жизни человека и наступает при соприкосновении его с сетью не менее чем в двух точках. При разработке коллективных и индивидуальных средств защиты от электропоражения необходимо, согласно правилам устройства электроустановок (ПУЭ), рассмотреть следующие вопросы:

- обоснование категории помещения по степени опасности поражения электрическим током;



- требования к электрооборудованию;
- анализ соответствия реального положения на производстве перечисленным требованиям;
- мероприятия по устранению обнаруженных несоответствий;
- обоснование мероприятий и средств защиты, работающих от поражения электрическим током.

Рассматриваемая лаборатория не имеет характеристик, свойственных особо опасным помещениям в части поражения электрическим током. Необходимо применение основных коллективных способов и средств электробезопасности: изоляция проводов и её непрерывный контроль; предупредительная сигнализация и блокировка; использование знаков безопасности и предупреждающих плакатов; защитное заземление и защитное отключение.

Также, используются индивидуальные электробезопасные средства. В установках до 1000 В используются диэлектрические перчатки, указатели напряжения, диэлектрические коврики и боты, изолирующие подставки, а также инструмент с изолированными рукоятками.

### **6.3 Экологическая безопасность**

Работа в лаборатории сопряжена с образованием и выделением газообразных, жидких и твердых отходов. ГОСТ Р ИСО 1410-2010 «Экологический менеджмент».

Газообразные отходы, загрязняющие воздух помещения: естественные выделения - углекислый газ, пары воды, летучие органические соединения - ЛОС (альдегиды, кетоны), азотистые соединения; бытовая пыль; ЛОС, выделяющиеся в процессе эксплуатации отделочных материалов, лакокрасочных покрытий мебели и др. Перед выбросом воздух помещений подвергается обязательной очистке в фильтровентиляционных системах, что предотвращает атмосферу от загрязнения. Жидкие отходы - бытовые отходы, образующиеся в процессах влажной уборки помещений, при пользовании

водопроводом, туалетом и т.п., сбрасываются в городскую канализацию и далее поступают в системы централизованной очистки на городских очистных сооружениях.

При обращении с твердыми отходами: бытовой мусор (отходы бумаги, отработанные специальные ткани для протирки офисного оборудования и экранов мониторов, пищевые отходы); отработанные люминесцентные лампы; офисная техника, комплектующие и запчасти, утратившие в результате износа потребительские свойства, бытовой мусор после предварительной сортировки складывают в специальные контейнеры для бытового мусора (затем специализированные службы вывозят мусор на городскую свалку); утратившее потребительские свойства офисное оборудование передают специальным службам (предприятиям) для сортировки, вторичного использования или складирования на городских мусорных полигонах.

Отработанные люминесцентные лампы утилизируются. Люминесцентные лампы, применяемые для искусственного освещения, являются ртутьсодержащими и относятся к 1 классу опасности. Ртуть люминесцентных ламп способна к активной воздушной и водной миграции. Интоксикация возможна только в случае разгерметизации колбы, поэтому основным требованием экологической безопасности является сохранность целостности отработанных ртутьсодержащих ламп. Отработанные газоразрядные лампы помещают в защитную упаковку, предотвращающую повреждение стеклянной колбы, и передают специализированной организации для обезвреживания и переработки. В случае боя ртутьсодержащих ламп осколки собирают щеткой или скребком в герметичный металлический контейнер с плотно закрывающейся крышкой, заполненный раствором марганцевокислого калия.

Поверхности, загрязненные боем лампы, необходимо обработать раствором марганцевокислого калия и смыть водой. Контейнер и его внутренняя поверхность должны быть изготовлены из не адсорбирующего ртуть материала (винипласта).

## 6.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Основными причинами пожаров от электрического тока является короткое замыкание, перегрузки электрических установок, переходные сопротивления и искрения.

Причинами короткого замыкания могут быть неправильный выбор сечения и марки кабелей приводов, износ и различные механические повреждения изоляции. Перегрузка электрических цепей вызывает нагрев электрических установок, снижение диэлектрических свойств изоляции и ее воспламенение. Большие переходные сопротивления вызывают нарушения диэлектрических свойств изоляции и ее возгорание. Они, как правило, возникают, когда проводники состоят из проводов разного сечения и разнородного материала, а также плохого контакта между собой и коммуникационными аппаратами. Искрение происходит в момент разъединения находящихся под напряжением проводов выключателей, предохранителей и т.п.

Во избежание пожаров от электрического тока необходимо, чтобы электрические сети и электрооборудование отвечали требованиям правил технической эксплуатации электроустановок потребителей и межотраслевых правил по охране труда при эксплуатации электроустановок ПОТ Р М-016-2001.

Пожарная безопасность обеспечивается следующими мероприятиями пожарной профилактики:

- организационные – противопожарный инструктаж, создание добровольных пожарных дружин и комиссий, разработка планов эвакуации; технические – соблюдение норм и правил при проектировании и строительстве зданий, соблюдение норм при выборе оборудования, устройство вентиляции и отопления, оснащение средствами пожаротушения и т.д.;

- режимные – запрещение курения в неустановленных местах;
- эксплуатационные – своевременный ремонт оборудования.

Система пожарной защиты предусматривает следующие меры:

- предотвращение распространения пожара за пределы очага;
- применение средств пожаротушения;
- эвакуация людей в случае пожара;
- применение средств пожарной сигнализации и средств извещения.

Надёжная и безопасная работа электрооборудования обеспечивается в результате правильного его выбора, качества изготовления и регулярного проведения осмотров, профилактических испытаний и ремонтов. Поэтому имеет особое значение выполнения требований ПУЭ и ГОСТ при выборе электрооборудования.

В помещении площадью 50 м<sup>2</sup> согласно документу «Правила противопожарного режима РФ» от 25.04.2012г. необходимо иметь [6]:

- 1 огнетушителя типа ОП-5;
- не менее 1 огнетушителей типа ОВП-10;
- план эвакуации людей;
- средства пожарной сигнализации и средств извещения о пожаре.

Каждый, обнаруживший пожар или загорание, обязан немедленно вызвать пожарную охрану по телефону 01, а также при необходимости вызвать газоспасательную, медицинскую и другие службы. Информацию об очаге возгорания необходимо сообщить лицу ответственному за эвакуацию людей из здания. Если в помещении, где произошло загорание, находятся предметы, потеря которых может привести к серьезным финансовым затруднениям предприятия или к потере ценной информации, то нужно приступить к тушению очага пожара.

В помещении назначен ответственный за эксплуатацию электрохозяйства, а обеспечение пожароопасной электроустановок и электросетей. В его обязанности входит:

- своевременное проведение профилактических осмотров и ППР;
- следить за правильностью выбора и применения оборудования;
- систематически контролировать состояние аппаратов, предохраняющих от отклонений в режимах работы;
- следить за наличием средств пожаротушения;
- организовать систему обучения и инструктаж по вопросам, обеспечения пожароопасности.

Меры пожарной безопасности:

- наличие необходимого количества выходов;
- пожарная сигнализация;
- организационно-технические мероприятия.

Система пожарной защиты предусматривает следующие меры:

- предотвращение распространения пожара за пределы очага;
- применение средств пожаротушения;
- эвакуация людей в случае пожара;
- применение средств пожарной сигнализации и средств извещения;
- средства индивидуальной защиты органов дыхания (респираторы, тканевые повязки).

## **Заключение**

В процессе работы была разработана и исследована имитационная модель микропроцессорной системы управления синхронным двигателем с постоянными магнитами. В результате проведенных теоретических исследований электропривода рулевой рейки беспилотного транспортного средства, можно сказать что использование электропривода рулевой колонки от ЭУР для легковых автомобилей семейства ВАЗ в качестве следящего привода автобусов массой около 2.5 т, является возможным. В силу серийности производства и дешевизны рассматриваемого усилителя рулевого управления дальнейшие исследования являются перспективными.

Были рассчитаны основные параметры для построения имитационной модели управления. На основе разработанной математической модели, была построена имитационная модель синхронного электропривода в программе Matlab2018a. Графики полученные в результате моделирования говорят об достаточном быстродействии электропривода в рассматриваемой системе.

## Список использованных источников

1. Авто сайт для автолюбителей // Устройство гидроусилителя и электроусилителя руля. Режим доступа: [http://amastercar.ru/articles/steering\\_mechanism\\_2.shtml](http://amastercar.ru/articles/steering_mechanism_2.shtml) (дата обращения 04.12.2019).
2. Стуканов В.А., Леонтьев К.А. Устройство автомобилей. – М.: Форум, 2010. 496 с.
3. Исследование синхронного следящего электропривода на базе сервопривода «MINAS A4» и контроллера движения «PCI-Servo-4». – Томск: Изд. ТПУ, 2009. – 44 с.
4. Пузанков А.Г. Автомобили. Устройство и техническое обслуживание. – М.: Академия, 2007. 640 с.
5. Иванов А.М., Солнцев А.Н., Гаевский В.В. Основы конструкции автомобиля. – М.: За рулем, 2007. 336 с.
6. Дентон Т. Автомобильная электроника. Самое полное описание электрических и электронных систем. – М.: НТ Пресс, 2008. 576 с.
7. Королев В.В. Перспективы применения электроусилителей рулевого управления / Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии: труды II Всероссийской научно-технической конференции с международным участием / 2007. С. 51-59.
8. Любимов И.И. Рулевое управление автомобиля – Саратов: Изд-во Саратовского государственного технического университета. 28 с.
9. Авто сайт для автолюбителей // Системы современного автомобиля. Режим доступа: [http://systemsauto.ru/wheel/electro\\_steering\\_gear.htm](http://systemsauto.ru/wheel/electro_steering_gear.htm) (дата обращения 04.05.2019).
10. Скворцов Ю.В. Организационно-экономические вопросы в дипломном проектировании: Учебное пособие. – М.: Высшая школа, 2006. – 399 с.
11. Раицкий К.А. Экономика предприятия: учебник для вузов. – М.: Дашков и К, 2002. – 1012 с.

12. Видяев И.Г., Серикова Г.Н., Гаврикова Н.А. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 36 с.
13. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов: (Вторая редакция) / М-во экон. РФ, М-во фин. РФ, ГК по стр-ву, архит. и жил. политике; рук. авт. кол.: Коссов В.В., Лившиц В.Н., Шахназаров А.Г. - М.: ОАО "НПО "Изд-во "Экономика", 2000.
14. ГОСТ 12.0.003-2015 (ССБТ). «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация»
15. ГОСТ 12.1.005-88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны»
16. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ «Шум. Общие требования безопасности»
17. Правила устройства электроустановок, ПУЭ, утвержденные Министерством энергетики России от 08.07.2002, №204, Глава 1.7.
18. ГОСТ 12.1.004-91, ССБТ «Пожарная безопасность. Общие требования»
19. СП 9.13130.2009 «Техника пожарная. Огнетушители. Требования к эксплуатации»
20. Долин П.А. Справочник по технике безопасности. – 6е изд., переработанное и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 824 с.
21. СП 51.13330.2011 «Защита от шума»
22. СП 60.13330.2016 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха»
23. ГОСТ 12.1.019 -2017 (с изм. №1) ССБТ. «Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты»
24. ГОСТ 12.0.004–2015 ССБТ. «Организация обучения безопасности труда. Общие положения»
25. ГОСТ 12.2.003-91 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Оборудование производственное. Общие требования безопасности»
26. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. «Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов»



27. ГОСТ 12.1.012-2004 ССБТ. «Вибрационная безопасность. Общие требования»
28. ГОСТ Р 50571.3-2009 «Электроустановки зданий. Часть 4. Требования для обеспечения безопасности. Защита от поражения электрическим током».
29. ТК РФ, Статья 221. Обеспечение работников средствами индивидуальной защиты.
30. ТК РФ. Глава 15. Рабочее время. Общие положения.
31. Федеральным законом от 24.07.1998 г. № 125-ФЗ «Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний».
32. ТК РФ, Статья 213. Медицинские осмотры некоторых категорий работников.
33. Правила устройства электроустановок – 7-е изд. М.: Энергоатомиздат, 2011.
34. СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение»

## Приложение А

### Раздел 2

### Steering-Rack Servo-Drive of Unmanned Vehicle

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ71	Чичманов Константин Николаевич		

Консультант школы ИШЭ отделения (НОЦ) ОЭЭ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ланграф Сергей Владимирович	К.Т.Н.		

Консультант – лингвист отделения (НОЦ) ОИЯ школы ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Обсков Александр Владимирович	К.П.Н.		

## **Introduction**

In the modern automotive industry, there is an obvious trend towards a gradual transition to intelligent vehicle control systems without human participation. It is necessary to solve many problems related to the organization of control of executive bodies to provide the safe and efficient operation of an unmanned vehicle. Solutions associated with a compact and reliable steering-rack electric drive of unmanned vehicle development goes to priority level because many functions devolve from drivers to high precision control systems. The research direction of controlled electric drive development for wheels turning of unmanned vehicle is very promising and relevant. The purpose of this work is steering-rack servo-drive development of the unmanned vehicle, which intended to passenger transportation within the city with the full load of 2.5 tons. The following tasks will be completed upon reaching desired results: development of a block diagram, functional diagram, motor selection, selection of a method and control system, selection of the element base, mathematical and simulation modeling for various types of loads.

The research object of this work is the servo-drive steering-rack with defined parameters development with the conditions of optimal technical and economic characteristics. The research subject of this work is the control system of the servo-drive steering-rack of the unmanned vehicle. The practical utility of this work is an improvement of control precision of unmanned vehicle, thereby increasing the reliability of its work and durability of autonomous mode.

## **General information**

An Unmanned vehicle is a vehicle, which is equipped with an automatic control system that can move without human participation. An automatic control system makes decisions based on data from different information links for example transducers and sensors, which are mounted on the board of a vehicle.

The most often mounted sensors:

- LIDAR — (Light Identification Detection and Ranging) a tool that can provide a surveying method that measures a distance to a target by illuminating the target with pulsed laser light and measuring the reflected pulses with a sensor;
- Stereo Vision systems – systems that can provide the vehicle to be oriented in space autonomously;
- GPS (Global Position Systems, Glonass);
- Gyrostabilizer – a device that intended to measure angle deviation of the subject, which contains it.

In addition, the software can include operating with neural networks and machine learning. Some systems are based on infrastructure systems (as an example, those integrated inside the road or near with it), but the most advanced technologies can imitate human presence to make self-decisions about the current deviation of steering wheel position and velocity, due to different video cameras, sensors, radars, satellite navigation systems. In modern unmanned vehicles are used algorithms, which are based on SLAM (Simultaneous Localization and Mapping). The operation principle of these algorithms is combining information from onboard sensors (real-time data flow) and information from maps (offline information source). SLAM and DATMO methodic (Detection and Tracking of Moving Objects) are developed and used by the vehicles of Google Waymo Company.

Society of Automotive Engineers has developed a classification of car automation, wherein six levels:

**Level 0:** lack of control over the machine;

**Level 1:** the driver must be ready to take control at any time. The following automated systems may be present: cruise control (ACC, Adaptive Cruise Control), automatic parking system and lane Keeping Assistance warning system (LKA, L2);

**Level 2:** the driver must respond if the system could not cope on its own. The system controls acceleration, braking, taxiing. The system may be disabled.

**Level 3:** the driver may not control the car on roads with “predictable” traffic (for example, autobahns), but must be ready to take control;

**Level 4:** similar to the third level, but does not require the attention of the driver;

**Level 5:** on the part of the person, no action is required except starting the system and specifying the destination point. An automated system can reach any destination unless otherwise prohibited by law. With a high level of vehicle automation, the issue of its precise control, and, consequently, the choice of design components, which are responsible for this accuracy, is very significant. To date, maximum controllability ensures the use of the steering rack with high-precision servo-drive. In addition to control accuracy, the use of a steering rack servo has several other advantages:

- ease of adjusting steering characteristics;
- Highly informative steering;
- High reliability due to the lack of a hydraulic system;
- Fuel economy, due to the economical expenditure of energy (reduction of fuel consumption to 0.5 liters per 100 km). This drive is used in the electric power steering, in other words, is a structural element of the steering of the car, in which the additional force when turning the steering wheel is created using an electric drive.

## Electromechanical power steering. Types and principles of work

There are two basic layouts of electric power steering:

1. Motor force is transmitted to the steering wheel shaft;
2. The force of the electric motor is transmitted to the steering rack.

The most in-demand electric power steering rack.

Known designs of such an electric assist are a power steering with two gears and a power steering with a parallel drive.

The main components of such an amplifier are shown in Fig.1.

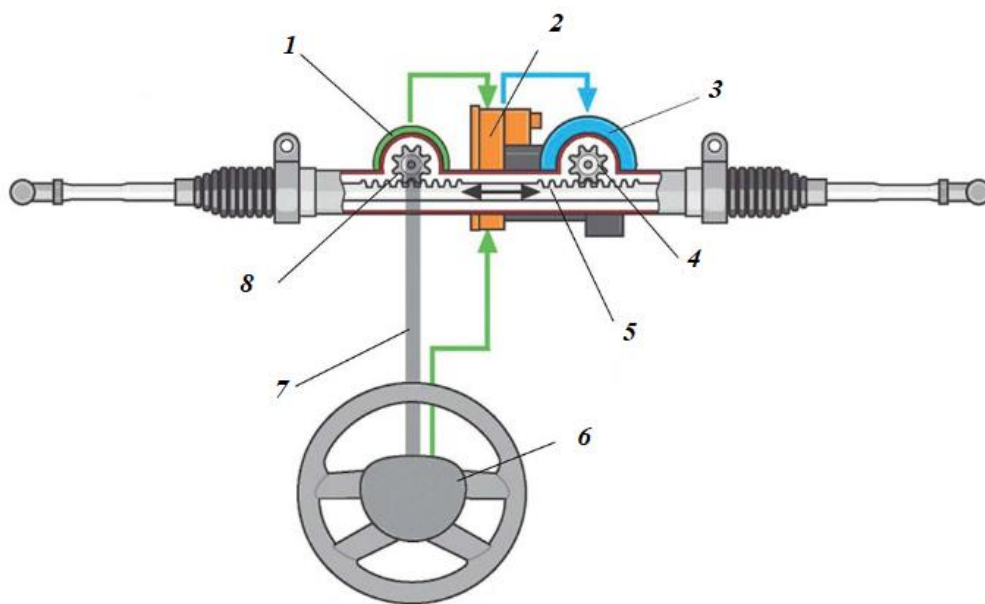


Fig. 1. Components of power steering with two gears

- |  |                            |
|--|----------------------------|
| 1 – Torque sensor on the steering wheel; | 5 – Rack;                  |
| 2 – Control block;                       | 6 - Steering angle sensor; |
| 3 – Motor;                               | 7 – Steering wheel shaft;  |
| 4 – Gear of an amplifier;                | 8 – Steering shaft gear.   |

The mechanical transmission provides the transmission of torque from the electric motor to the steering rack. In an electric assist with two gears, one gear transmits torque to the steering rack from the steering wheel, and the other from the electric motor of the amplifier. To do this, the rail has two sections of teeth, one of which serves as an amplifier drive.

In a parallel-drive electric assist, the force from the electric motor is transmitted to the steering rack using a belt drive and a special ball screw mechanism. The composition of such a steering mechanism is presented in Figure 2.

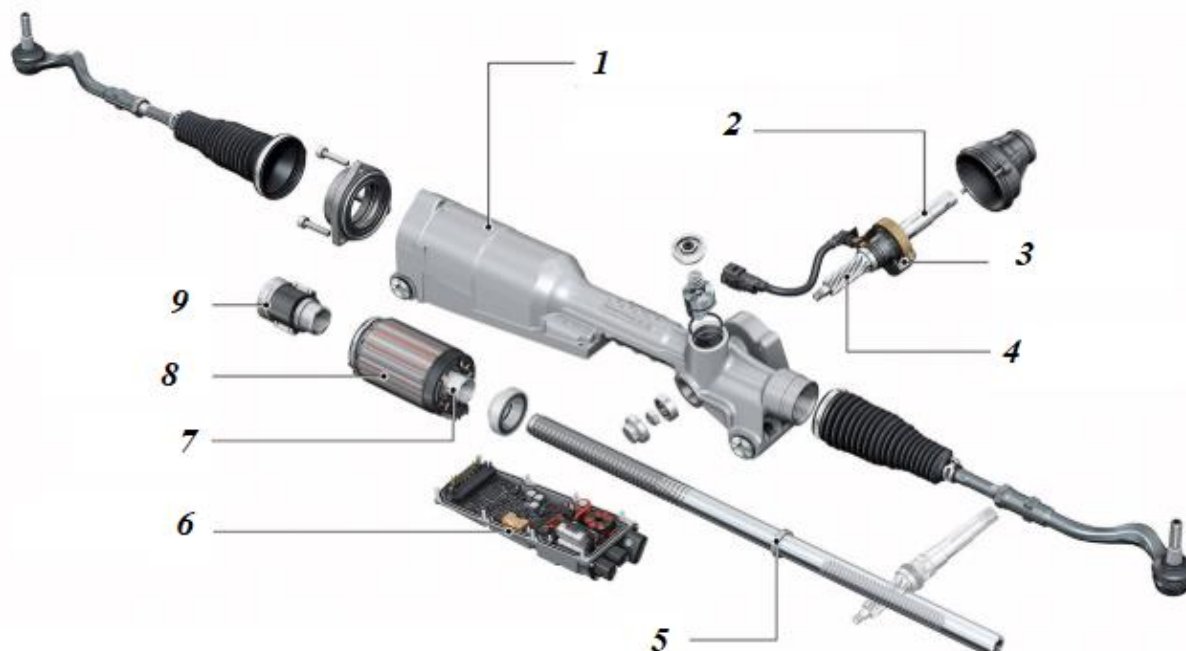


Fig. 2. Components of power steering ball screw

- |  |                    |
|--|--------------------|
| 1 – Crankcase;                           | 6 - Control block; |
| 2 – Steering wheel shaft;                | 7 – Hollow rotor;  |
| 3 – Torque sensor on the steering wheel; | 8 – Motor;         |
| 4 – Pinion gear;                         | 9 – Ball screw.    |
| 5 – Rack;                                |                    |

The control system of such electric power steering includes input sensors, an electronic control unit and an actuator. Input sensors include a steering angle sensor and a steering wheel torque sensor. The electric power steering control system also uses information from the ABS control unit (vehicle speed sensor) and the motor control unit (motor crankshaft frequency sensor). The electronic control unit processes the sensor signals. In accordance with the program, a corresponding control action applies to the electric motor. The electric power steering ensures the steering operation of the vehicle in the following modes:

- Turning the car in normal conditions;

- Turning the car at low speed;
- Turning the car at high speed;
- Active return of wheels to the middle position;
- Holding the average position of the wheels.

Turn the car by turning the steering wheel. Torsion transmits torque from the steering wheel to the steering mechanism. A torque sensor measures torque on the torsion shaft and a steering angle sensor controls a steering angle. Information from the sensors, as well as information about the speed of the car, the motor speed, goes to the electronic control unit. The control unit calculates the required amount of torque of the electric motor of the amplifier and by changing the magnitude of the current provides it to the electric motor. The torque from the electric motor is transmitted to the steering gear rail and further, through the steering rods, to the drive wheels. Thus, the rotation of the wheels of the car is carried out by combining the efforts transmitted from the steering wheel and the electric motor of the amplifier. When parking, the car usually turns at low speed. This mode is characterized by large angles of rotation of the steering wheel. In this case, the electronic control system provides the maximum torque of the electric motor, corresponding to a significant increase in steering control (the so-called "light steering"). When turning at high speed, the electronic control system provides the least torque and minimum steering gain (the so-called "heavy steering"). The control system can increase the reactive force that occurs when turning the wheels. This is the mode of active return of wheels to the middle position. During the operation of the car, there is often appears a need to keep the average position of the wheels (driving with side winds, different tire pressures). In this case, the control system provides correction of the average position of the steered wheels. The electric power steering control program provides compensation for the removal of a front wheel drive vehicle caused by different lengths of drive shafts. In a number of active safety systems, the electric amplifier functions without the participation of the driver. In the system of exchange



rate stability, it provides reverse steering wheels, and in parking autopilot - automatic parallel and perpendicular parking.

### Considered layout

On some domestic vehicles, usually, install direct drive electric power steering. It means that the shaft of the electric motor is a part of the steering shaft. Of course, the motor must be much more powerful with high precision shaft positioning by the angle of rotation. But the design of the mechanical system is extremely simple (Fig.3).



Fig. 3. Design of the mechanical system

Car Steering Lada Priora:

- 1 - Steering wheel;
- 2 - Electric power steering;
- 3 - Steering rack.

At the moment, this arrangement is the cheapest and most common variant of electric power steering for domestic cars. Given these factors, it was decided to consider this particular layout option for the development of a Steering-rack servo-drive.

As part of this power steering is used a synchronous motor with permanent magnets. The synchronous motor provides the desired level of positioning and size at an increased power level. Note all the advantages and disadvantages of using electric drives in the steering.

#### Advantages

- Energy savings (work only "on request");
- Simple layout and less weight;
- Ideal compatibility with all modern systems, ranging from car parking to the strip holding system;
- The system is completely maintenance-free, which reduces maintenance costs;
- System repair is extremely simple - modular replacement.

#### Disadvantages

- Force on the steering wheel seems too artificial that dislikes sophisticated drivers;
- There are schemes where the electric power steering is installed at the bottom of the steering mechanism and exposed to salt and dirty water from our roads;
- The complex circuit of electric control of the power steering reduces the node reliability.

### **Steering Kinematics**

In progress of designing the steering control of the car, it is necessary to substantiate the selected type of steering mechanism, steering gear and make the necessary calculations. The steering scheme of a vehicle with a dependent front suspension is shown in Fig. 4.

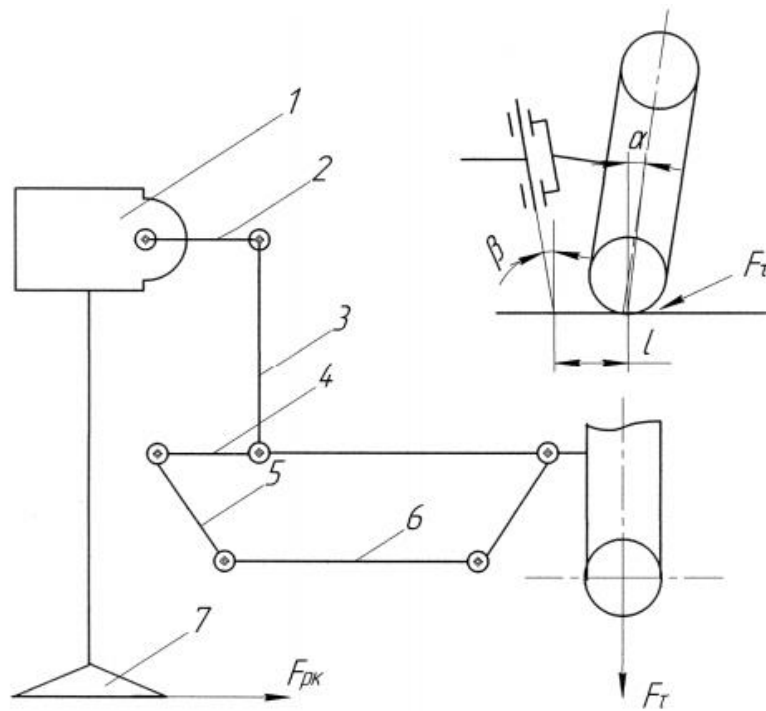


Fig. 4. Steering design

- |                                    |   |
|------------------------------------|---|
| 1 - Steering gear;                 | 7 - Steering wheel;                             |
| 2 - Bipod;                         | $\alpha, \beta$ - Camber angles and cross-pivot |
| 3 - Longitudinal thrust;           | pin;  |
| 4,5 - Upper and lower side levers; | $l$ - Round shoulder.                           |
| 6 - Transverse thrust;             |   |

It should be noted that design changes are allowed with the further design of the electric drive, and specifically, the layout of the steering gear with the bipod and crossbar will be replaced by the layout with the planetary gear rigidly connected to the motor shaft. This kinematic calculation is carried out in order to determine the gear ratios of the steering drive, reduced to the shaft of the electric motor the equivalent inertia moment of the mechanism, as well as the magnitude of the load of the electric drive. Steering design schemes are shown in Fig.5.

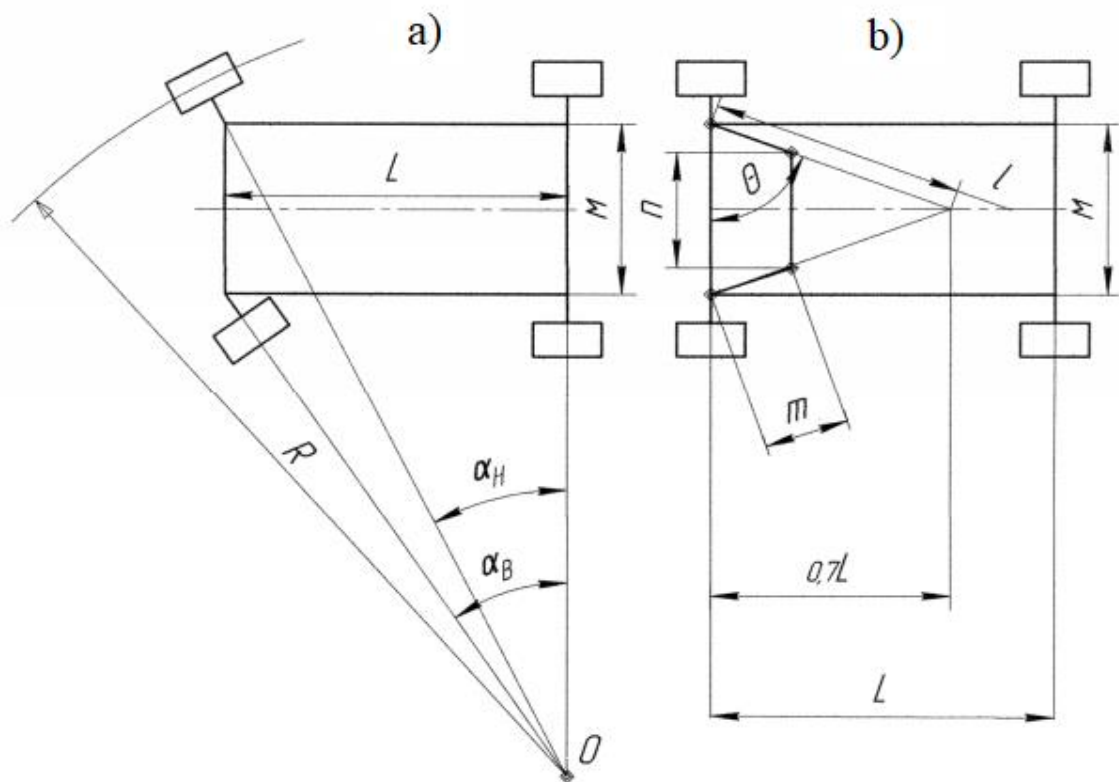


Fig. 5. Steering design

Design schemes:

a) Turning the vehicle, b) the steering linkage

The purpose of the electric power steering is very significant for load moment calculation. This electric drive is designed for unmanned vehicles, therefore, the force that applied to the steering wheel by the driver are not taken into account. This means that the resulting torque transmitted by the drive must be higher than for a conventional electric power steering.

## Functional electric drive diagram

Functional electric drive diagram is presented on the figure. 6.

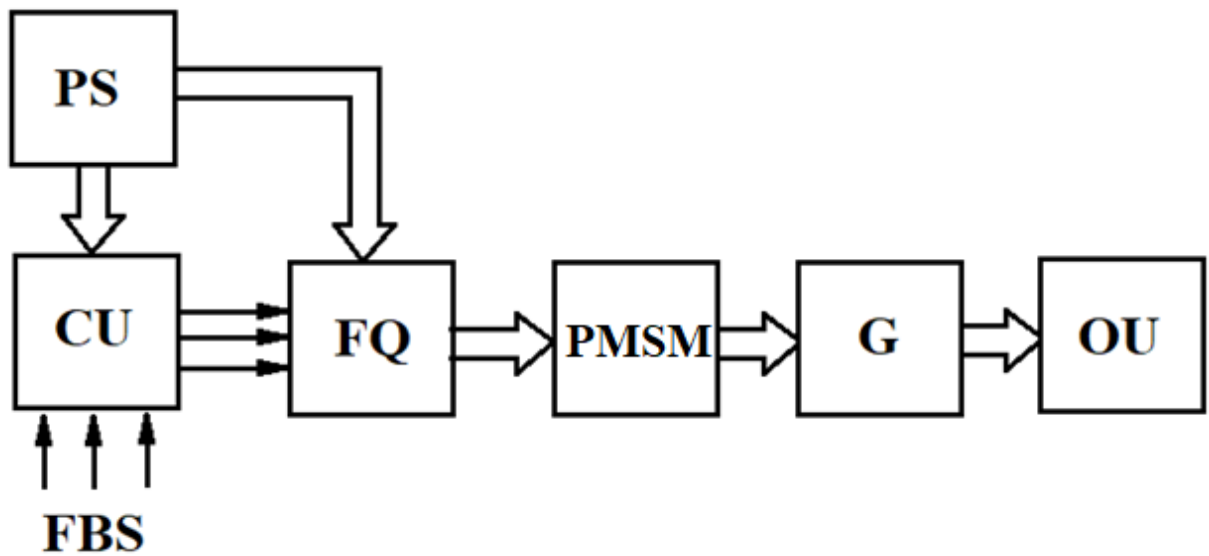


Fig. 6. Functional electric drive diagram

There are the following blocks:

PS – Power supply;

CU – Control unit;

FQ – Frequency converter;

PMSM –Permanent magnet  
synchronous motor;

G – Gear;

OU – Operation unit;

FBS – Feedback sensors.

## Mathematical Description of permanent magnet synchronous motor model

Consider a description of the motor in a stationary coordinate system ABC - the mathematical description of a three-phase synchronous motor. The equilibrium equations of voltage on the phases of the PMSM usually have the form presented in (1):

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_1}{dt} + I_1 \cdot R &= U \cdot \sin(\vartheta + \vartheta_0); \\ \frac{d\Psi_2}{dt} + I_2 \cdot R &= U \cdot \sin\left(\vartheta + \vartheta_0 - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right); \\ \frac{d\Psi_3}{dt} + I_3 \cdot R &= U \cdot \sin\left(\vartheta + \vartheta_0 + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right), \end{aligned} \quad (1)$$

Here  $\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3$  – flux links of A, B, C phases of motor winding;

$\vartheta$  – Rotor rotation angle.

Motor phase flux linkage equals:

$$\begin{aligned} \Psi_1 &= L_1 \cdot I_1 + m_{12} \cdot I_2 + m_{13} \cdot I_3 - \Phi \cdot w_{1e} \cdot \cos(\vartheta + \vartheta_0); \\ \Psi_2 &= L_2 \cdot I_2 + m_{21} \cdot I_1 + m_{23} \cdot I_3 - \Phi \cdot w_{1e} \cdot \cos\left(\vartheta + \vartheta_0 - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right); \\ \Psi_3 &= L_3 \cdot I_3 + m_{31} \cdot I_1 + m_{32} \cdot I_2 - \Phi \cdot w_{1e} \cdot \cos\left(\vartheta + \vartheta_0 + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right), \end{aligned} \quad (2)$$

here  $\Phi$  – the maximum of pole pair magnet flux, which is coupled to the motor phase;

$w_{1e} = k_{01} \cdot w_1$  – an effective coil count of motor phase;

$m_{12}, m_{13}, m_{21}, m_{23}, m_{31}, m_{32}$  – mutual induction coefficients between motor phases. The motor with permanent magnets on the rotor, which has a magnetic permeability close to vacuum permeability, can be considered as a synchronous

machine with a wound rotor. That motor has the coefficients of phase mutual induction, which are equals to:

$$m_{12} = m_{13} = m_{21} = m_{23} = m_{31} = m_{32} = m = -\frac{L}{2}. \quad (3)$$

The same applies to internal inductances:

$$L_1 = L_2 = L_3 = L. \quad (4)$$

With the Y connection type of stator phase windings (a system with an isolated common point), in accordance with the Kirchhoff law, here is the following equality:

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0. \quad (5)$$

Perform the transformation of equations for flux linkages. We set the value of the coefficient of mutual induction into all equations for flow linkages  $m = -\frac{L}{2}$ , and phase inductions L. Also, on the basis of the first Kirchhoff law, in the first, second and third equality we replace the current values, respectively:

$$\begin{aligned} I_2 + I_3 &= -I_1; \\ I_1 + I_3 &= -I_2; \\ I_1 + I_2 &= -I_3. \end{aligned} \quad (6)$$

Making the substitution, we obtain the following expressions for flux links:

$$\begin{aligned} \Psi_1 &= \frac{3}{2} \cdot L \cdot I_1 - \Phi \cdot w_{1e} \cdot \cos(\vartheta + \vartheta_0); \\ \Psi_2 &= \frac{3}{2} \cdot L \cdot I_2 - \Phi \cdot w_{1e} \cdot \cos\left(\vartheta + \vartheta_0 - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right); \\ \Psi_3 &= \frac{3}{2} \cdot L \cdot I_3 - \Phi \cdot w_{1e} \cdot \cos\left(\vartheta + \vartheta_0 + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right). \end{aligned} \quad (7)$$

Substituting the obtained equations into the original system of equations, and performing time differentiation, we obtain the following system of equilibrium stress equations for the phases:

$$\begin{aligned} \frac{3}{2} \cdot L \cdot \frac{dI_1}{dt} + I_1 \cdot R + C_e \cdot \Omega \cdot \sin(\vartheta + \vartheta_0) &= U \sin(\vartheta + \vartheta_0); \\ \frac{3}{2} \cdot L \cdot \frac{dI_2}{dt} + I_2 \cdot R + C_e \cdot \Omega \cdot \sin\left(\vartheta + \vartheta_0 - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) &= U \sin\left(\vartheta + \vartheta_0 - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right); \quad (8) \\ \frac{3}{2} \cdot L \cdot \frac{dI_3}{dt} + I_3 \cdot R + C_e \cdot \Omega \cdot \sin\left(\vartheta + \vartheta_0 + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) &= U \sin\left(\vartheta + \vartheta_0 + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right), \end{aligned}$$

Here,  $C_e = (3/2) \cdot z_p \cdot k_{01} \cdot w_1 \cdot \Phi$  – motor electric motive force (EMF) coefficient;

$$\Omega = \frac{1}{z_p} \cdot \frac{d\vartheta}{dt} \text{ – rotation speed.}$$

The following expression determines an electromagnetic torque of the motor:

$$M_{\text{ЭМ}} = C_M \cdot \left( I_1 \cdot \sin(\vartheta + \vartheta_0) + I_2 \cdot \sin\left(\vartheta + \vartheta_0 - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + I_3 \cdot \sin\left(\vartheta + \vartheta_0 + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \right), \quad (9)$$

here  $C_M = C_e$  – the motor torque coefficient.

Thus, the complete system of equations, which describes the SMPM in dynamic and static modes of operation will have the form:



$$\left\{ \begin{array}{l}
\frac{3}{2} \cdot L \cdot \frac{dI_1}{dt} + I_1 \cdot R + C_e \cdot \Omega \cdot \sin(\vartheta + \vartheta_0) = U \sin(\vartheta + \vartheta_0 + \vartheta) \\
\frac{3}{2} \cdot L \cdot \frac{dI_2}{dt} + I_2 \cdot R + C_e \cdot \Omega \cdot \sin\left(\vartheta + \vartheta_0 - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) = U \sin\left(\vartheta + \vartheta_0 - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \\
\frac{3}{2} \cdot L \cdot \frac{dI_3}{dt} + I_3 \cdot R + C_e \cdot \Omega \cdot \sin\left(\vartheta + \vartheta_0 + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) = U \sin\left(\vartheta + \vartheta_0 + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \\
M_{\vartheta M} = C_M \cdot \left( I_1 \cdot \sin(\vartheta + \vartheta_0) + I_2 \cdot \sin\left(\vartheta + \vartheta_0 - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + I_3 \cdot \sin\left(\vartheta + \vartheta_0 + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \right) \\
M_{\vartheta M} - M_c = J \cdot \frac{d\Omega}{dt} \\
\vartheta = z_p \cdot \int_0^t \Omega dt
\end{array} \right. \quad (10)$$

To build a mathematical model, we transform the resulting system of equations. Applying the Laplace transform to the equilibrium equations of voltages and solving them with respect to the currents  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ , we obtain the desired system of equations.

$$\left\{ \begin{array}{l}
I_1(p) = \frac{1/R}{T_e \cdot p + 1} \cdot (U \sin(\vartheta + \vartheta_0) - C_e \cdot \Omega \cdot \sin(\vartheta + \vartheta_0)) \\
I_2(p) = \frac{1/R}{T_e \cdot p + 1} \cdot \left( U \sin\left(\vartheta + \vartheta_0 - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) - C_e \cdot \Omega \cdot \sin\left(\vartheta + \vartheta_0 - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \right) \\
I_3(p) = \frac{1/R}{T_e \cdot p + 1} \cdot \left( U \sin\left(\vartheta + \vartheta_0 + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) - C_e \cdot \Omega \cdot \sin\left(\vartheta + \vartheta_0 + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \right) \\
M_{\vartheta M} = C_M \cdot \left( I_1 \cdot \sin(\vartheta + \vartheta_0) + I_2 \cdot \sin\left(\vartheta + \vartheta_0 - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + I_3 \cdot \sin\left(\vartheta + \vartheta_0 + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \right) \\
M_{\vartheta M} - M_c = J \cdot \frac{d\Omega}{dt} \\
\vartheta = z_p \cdot \int_0^t \Omega dt
\end{array} \right. \quad (11)$$

Here  $T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{L}{R}$  – motor electromagnetic time-constant

Using the obtained system of equations, we construct the structural scheme of the motor. To form a control action at the system input, it is necessary to install a Park converter.

### **Conclusion**

This section describes the basic concepts related to the steering of cars and electric power steering. In addition, the main existing layouts of electromechanical power steering are considered. The result of this section is an introduction to the current solutions in the field of steering the unmanned vehicle, the rationale for the choice of the steering booster layout, the choice of engine type and its mathematical description.