


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

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Разработка и исследование системы стабилизации скорости вращения коллекторного двигателя

УДК: 621.313.36-045.75

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM88	Николаев Илья Вадимович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Качин Олег Сергеевич	к.т.н., доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения социально-гуманитарных наук	Спицына Любовь Юрьевна	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель отделения общетехнических дисциплин	Фех Алина Ильдаровна			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

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

Томск - 2020

Планируемые результаты обучения по ООП

Код	Результат обучения*	Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР, и/или заинтересованных сторон
Общие по направлению подготовки		
P1	Совершенствовать 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.	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1,6; ОПК-1, 2), Критерий 5 АИОР (п. 2.1, 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.011, «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам»)
P2	Свободно пользоваться русским и иностранным языками как средством делового общения, способностью к активной социальной мобильности.	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-4,5; ОПК-3), Критерий 5 АИОР (п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P3	Использовать 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.	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-2,3; ОПК-1; ПК-1, 2, 3), Критерий 5 АИОР (п. 2.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P4	Иметь представление о методологических основах научного познания и творчества, роли научной информации в развитии отрасли, навыки проведения работ с привлечением современных информационных технологий, синтезировать и критически резюмировать информацию.	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1,6; ОПК-1, 4), Критерий 5 АИОР (п. 1.6, 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.011, «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам»)
P5	Применять углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики и электротехники.	Требования ФГОС ВО (УК-5, ОПК-4; ПК- 4-6), Критерий 5 АИОР (п.1.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.011, «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам»)
По профилям подготовки		
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.	Требования ФГОС ВО (ПК-1, 7,8), Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (20.003, «Работник по эксплуатации оборудования релейной защиты и противоаварийной автоматики гидроэлектростанций/гидроаккумулирующих электростанций»)

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.	Требования ФГОС ВО (ПК-2, 9, 10, 11), Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EU-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.011, «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам»)
P8	Проводить инновационные инженерные исследования в области электроэнергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.	Требования ФГОС (ПК-3, 13, 14, 15, 24-26), Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (20.003, «Работник по эксплуатации оборудования релейной защиты и противоаварийной автоматике гидроэлектростанций/гидроаккумулирующих электростанций»)
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.	Требования ФГОС (ПК-11, 12, 13, 16-21, 24, 26), Критерий 5 АИОР (п. 1.5, 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P10	Проводить монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные работы электроэнергетического и электротехнического оборудования.	Требования ФГОС (ПК-22, 23, 25, 26), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P11	Осваивать новое электроэнергетическое и электротехническое оборудование; проверять техническое состояние и остаточный ресурс оборудования и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт.	Требования ФГОС (ПК-27, 28), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (20.003, «Работник по эксплуатации оборудования релейной защиты и противоаварийной автоматике гидроэлектростанций/гидроаккумулирующих электростанций»)
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.	Требования ФГОС (ПК-29, 30), Критерий 5 АИОР (п. 1.3, 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.011, «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам»)



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 Электроэнергетики и электротехника
Отделение электроэнергетики и электротехники

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

(Подпись) (Дата) Гарганеев А.Г.
(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
5AM88	Николаеву Илье Вадимовичу

Тема работы:

Разработка и исследование системы стабилизации скорости вращения коллекторного двигателя	
Утверждена приказом проректора-директора (директора) (дата, номер)	27.02.2020 № 58-29/с


Срок сдачи студентом выполненной работы:	08.06.2020 г.
--	---------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:


<p>Исходные данные к работе (наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</p>	<p>Система стабилизации и управления скорости вращения коллекторного двигателя постоянного тока Материалы производственной практики, техническая литература, техническая документация</p>
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов (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).</p>	<p>Титульный лист Задание Реферат Содержание Введение Раздел 1 Теоретическое описание разработки Раздел 2 Разработка регулятора основанного на искусственной нейронной сети Раздел 3 Моделирование системы управления коллекторным двигателем с ИНС Раздел 4 Описание результатов моделирования Раздел 5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение Раздел 6 Социальная ответственность Заключение Список литературы</p>
<p>Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)</p>	<p>- функциональная схема регулятора; -имитационная модель системы управления КДПТ ПМ основанная на ИНС; -графики, описывающие производительность регулятора.</p>
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы (с указанием разделов)</p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Основное исследование</p>	<p>Качин О.С.</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Спицына Л.Ю.</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Фех А.И.</p>
<p>Иностранный язык</p>	<p>Пташкин А.С.</p>
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:</p>	
<p>Раздел 1 Теоретическое описание разработки Раздел 2 Разработка регулятора основанного на искусственной нейронной сети Раздел 3 Моделирование системы управления коллекторным двигателем с ИНС</p>	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	10.02.2020 г.
--	---------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Качин О.С.	к.т.н., доцент		15.02.2020

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM88	Николаев И.В.		

Инженерная школа энергетики

Направление подготовки – 13.04.02 Электроэнергетики и электротехника

Отделение электроэнергетики и электротехники

Период выполнения осенний/ весенний семестр 2019/2020 учебного года

Форма представления работы:


Магистерская диссертация

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	08.06.2020
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
10.03.2020	Календарное планирование работ по теме	3
12.03.2020	Описание объекта исследования	3
20.03.2020	Подбор и изучение материалов по теме	3
22.03.2020	Составление и утверждение технического задания	3
28.03.2020	Расчет параметров коллекторного двигателя	3
11.04.2020	Исследование видов управления двигателями	6
15.04.2020	Анализ полученных данных	3
25.04.2020	Разработка системы управления	3
02.05.2020	Оценка эффективности проделанной работы	3
10.05.2020	Технико-экономические расчеты	3
12.05.2020	Вопросы экологической безопасности	3
15.05.2020	Составление пояснительной записки	4
22.05.2020	Итог	40

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Качин О.С.	к.т.н., доцент		17.02.2020

СОГЛАСОВАНО:

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

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5AM88	Николаеву Илье Вадимовичу

Школа	ИШЭ	Отделение школы (НОЦ)	
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	Электроэнергетика и Электротехника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Общая сумма всех затрат на выполнение проекта – не более 500 000 руб.; В т.ч. затраты на оплату труда – не более 200 000 руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	- в соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов» и ГОСТ Р 51541-99 «Энергосбережение. Энергетическая эффективность» В соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов» и ГОСТ Р 51541-99 «Энергосбережение. Энергетическая эффективность» - минимальный размер оплаты труда в 2020 году составляет 12130 руб. 45 % материальные расходы 30 % расходы на оплату труда 16% накладные расходы 30% районный коэффициент
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления на социальные нужды – 30%; норма амортизации – 0,33; расходы на командировки – 10 %; накладные расходы – 16 %; Социальное страхование – 30%

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	- Потенциальные потребители результатов проекта – Формирование решения проблем проекта с учетом нелинейности системы управления
2. Разработка устава научно-технического проекта	-Высокоуровневое требование к проекту - Создание нововведения, получение результата по завершении проекта
3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	- Планирование работ по проекту - Расчет бюджета затрат на проектирование
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	- Определение экономической эффективности исследования

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):


1. «Портрет» потребителя результатов НТИ
2. Сегментирование рынка
3. Оценка конкурентоспособности технических решений
4. Диаграмма FAST
5. Матрица SWOT
6. График проведения и бюджет НТИ
7. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ
8. Потенциальные риски

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения социально- гуманитарных наук	Спицына Любовь Юрьевна	к.э.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM88	Николаев Илья Вадимович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5AM88	Николаеву Илье Вадимовичу

Школа	Инженерная школа энергетики	Отделение школы (НОЦ)	ОЭЭ
Уровень образования	Магистратура	Направление	13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Тема ВКР:

Разработка и исследование системы стабилизации скорости вращения коллекторного двигателя.	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования.	Объектом исследования являются технические решения по разработке системы управления коллекторного двигателя, основанной на искусственных нейронных сетях.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.	Рассмотреть специальные правовые нормы трудового законодательства; организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. Социальное страхование работников. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018); ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования; ГОСТ Р ИСО 6385-2016. Эргономика. Применение эргономических принципов при проектировании производственных систем; СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.
2. Производственная безопасность 2.1. Анализ потенциально возможных вредных и опасных факторов проектируемой производственной среды. 2.2. Разработка мероприятий по снижению воздействия вредных и опасных факторов	Проанализировать потенциально возможные вредные и опасные факторы при разработке системы управления коллекторного двигателя: <ul style="list-style-type: none"> – Отклонение показателей микроклимата; – Превышение уровня шума; – Отсутствие или недостаток естественного света; – Недостаточная освещенность рабочей зоны – Электробезопасность;
3. Экологическая безопасность	<ul style="list-style-type: none"> – Анализ воздействия объекта на окружающую среду: атмосферу, литосферу, гидросферу; – Решение по обеспечению экологической безопасности.


4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	<ul style="list-style-type: none"> – Анализ возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; – Выбор наиболее типичной ЧС; – Разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – Пожаровзрывоопасность.
--	---

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	09.04.2020г
---	-------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель отделения общетехнических дисциплин	Фех Алина Ильдаровна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM88	Николаев Илья Вадимович		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит: 106 с., 47 рис., 18 табл., 26 источников, 1 приложение.

Ключевые слова: система стабилизации, электропривод, искусственные нейронные сети, коллекторный двигатель, постоянные магниты, системы автоматического управления, переходные процессы.

Объектом исследования является система стабилизации и управления коллекторным двигателем с постоянными магнитами.

Цель работы – разработка и исследование системы стабилизации скорости вращения коллекторного двигателя постоянного тока с постоянными магнитами.

В процессе разработки и исследования были рассмотрены различные варианты реализации системы управления, выбран наиболее перспективный вариант регулятора, была разработана схема регулятора, основанного на искусственной нейронной сети, разработан алгоритм обучения искусственной нейронной сети. В программной среде MATLAB смоделирована система управления коллекторным двигателем с искусственной нейронной сетью.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: надежность, энергосберегаемость, высокая эффективность, долговечность.

Основные обозначения и сокращения: ИНС – искусственная нейронная сеть, КДПТ – коллекторный двигатель постоянного тока, КДПТ ПМ – коллекторный двигатель постоянного тока с постоянными магнитами, ПИД регулятор – пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор, ПИ регулятор - пропорционально-интегральный регулятор.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	11
1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАЗРАБОТКИ	12
1.1 Коллекторный электродвигатель постоянного тока	13
1.1.1 Конструкция коллекторного электродвигателя постоянного тока...	13
1.1.2 Коллекторный двигатель с постоянными магнитами	14
1.1.3 Коллекторный двигатель с обмотками возбуждения.....	15
1.1.4 Характеристики коллекторного электродвигателя постоянного тока	17
1.2 Системы адаптивного управления	18
1.2.1 Адаптивные регуляторы с прямой связью	19
1.2.2 Адаптивные регуляторы с обратной связью	20
1.3 Цифровые сервоконтроллеры.....	21
1.3.1 ПИ регулятор.....	21
1.3.2 ПИД регулятор	22
1.4 Адаптивный контроллер с искусственными нейронными сетями	24
1.5 Уравнения движения системы коллекторного привода постоянного тока	25
1.6 Структура искусственной нейронной сети регулятора.....	28
1.6.1 Структура искусственной нейронной сети с прямой связью.....	28
1.6.2 Структура искусственных нейронных сетей для электродвигателя	30
2. РАЗРАБОТКА РЕГУЛЯТОРА ОСНОВАННОГО НА ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ.....	33
2.1 Структура искусственной нейронной сети для системы идентификации и контроля	33
2.2 Автономное обучение для начального набора весов и задержек искусственной нейронной сети	36
2.3 Структура онлайн обучения искусственной нейронной сети для вывода задержек и весов.....	37
3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОЛЛЕКТОРНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ.....	41
3.1 Сравнение систем управления коллекторным двигателем постоянного тока с постоянными магнитами	41

3.2 Моделирование системы управления коллекторного двигателя переменного тока на постоянных магнитах	45
4. ОПИСАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ	53
4.1. Проверка правильности модели двигателя с управлением искусственной нейронной сетью	53
4.1.1 Отклик систем на различные ступени эталонной скорости при полной нагрузке	55
4.1.2 Отклики на скоростную траекторию	57
4.1.3 Отслеживание производительности систем с добавленным шумов	59
4.1.4 Реакции с набросом нагрузки	62
5. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	65
5.1 Сегментирование рынка	67
5.2 FAST-анализ	68
5.3 Диаграмма Исикава.....	72
5.4 Матрица SWOT	73
5.5 Разработка графика проведения научного исследования.....	76
5.6 «Портрет» потребителя результатов НТИ.....	80
5.6.1 Смета затрат на проектирование	80
5.6.2 Материальные затраты	80
5.6.3 Затраты на амортизацию	80
5.6.4 Затраты на заработную плату	81
5.6.5 Затраты на социальные нужды.....	82
5.6.6 Прочие затраты	82
5.6.7 Накладные затраты	83
5.7 Оценка конкурентоспособности и ресурсоэффективности проекта	83
6. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	86
6.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	87
6.1.1. Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства.....	87
6.1.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны	87
6.2. Производственная безопасность	88
6.2.1. Анализ потенциально возможных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований	88

6.2.2. Разработка мероприятий по снижению воздействия вредных и опасных факторов	89
6.3. Экологическая безопасность.....	96
6.3.1. Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду	96
6.3.2. Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду....	97
6.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	97
6.4.1. Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований и обоснование мероприятий по предотвращению ЧС	97
6.4.2. Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть при проведении исследований и обоснование мероприятий по предотвращению ЧС	98
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	102
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	104
ПРИЛОЖЕНИЕ А	107

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что актуальной проблемой в машиностроении является повышение качества изготовления изделий: точность геометрических размеров, чистота обработанной поверхности, что достигается при обеспечении стабилизации параметров технологической системы.

В связи с этим особый интерес представляет стабилизация скорости вращения исполнительного электродвигателя.

Двигатели постоянного тока являются ключевыми элементами мобильных роботов и автономных систем в современном мире. Существует множество различных задач в робототехнике и системах управления движением исполнительных органов рабочих машин, где необходимо стабилизировать скорость вращения двигателя при изменяющемся моменте нагрузки. Известно, что скорость вращения двигателя постоянного тока можно регулировать путем изменения величины суммарного активного сопротивления якорной цепи, используя регулировочный реостат, последовательно подключенный к двигателю. Однако такой подход к проблеме управления приводит к большим потерям энергии с выделением тепла на регулировочном реостате.

В высокопроизводительных приводах, таких как роботы и устройства управления накопителями, управление двигателя постоянного тока требует особого внимания, потому что он должен соответствовать критериям быстрого реагирования, быстрого восстановления скорости после изменения нагрузки, точного отслеживания траектории и нечувствительности к изменениям параметров. Традиционные конструкции для надежного контроля, часто связанные с регуляторами постоянного усиления, такими как пропорционально-интегральный (ПИ) или пропорционально-интегрально-дифференцирующий (ПИД), могут стабилизировать линейные системы с

небольшим диапазоном изменений системных параметров. Более того, эти типы систем нуждаются в точных математических моделях для описания динамики системы с целью правильной настройки и разработки контроллера. Часто их довольно сложно получить на практике. Кроме того, большинство методов адаптивного управления для нелинейных систем часто связаны с линеаризацией модели и применением теорий линейного управления. Это приводит к значительным ошибкам из-за линеаризации нелинейной модели. В режиме реального времени внедрение таких систем часто бывает трудным, а иногда и неосуществимым в связи с использованием большого количества параметров в этих схемах.

В последнее время многослойные нейронные сети (МНС) показали, что они чрезвычайно полезны для распознавания образов, обработки изображений и распознавания речи. Также нейронные сети начали широко использоваться в системах управления. Когда искусственная нейронная сеть (ИНС) используется в качестве контроллера двигателя в реальном времени, она может самостоятельно настроить систему с помощью 'онлайн' обучения и проинструктировать систему моторного привода таким образом, чтобы у неё были необходимые характеристики. Таким образом, параллельная и распределенная архитектура, присущая искусственным нейронным сетям, может быть успешно использована для управления электродвигателем. Искусственная нейронная сеть может обеспечить нелинейные преобразования между входами и выходами электропривода. Поэтому использование искусственных нейронных сетей в высокопроизводительных моторных приводах может сделать систему надежной, эффективной, и невосприимчивой к нежелательным условиям эксплуатации.

В данной работе в качестве исследуемой установки был принят коллекторный двигатель постоянного тока с постоянными магнитами.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАЗРАБОТКИ

1.1 Коллекторный электродвигатель постоянного тока

Коллекторный электродвигатель постоянного тока - вращающаяся электрическая машина постоянного тока, преобразующая электрическую энергию постоянного тока в механическую энергию, у которой хотя бы одна из обмоток, участвующих в основном процессе преобразования энергии, соединена с коллектором.

1.1.1 Конструкция коллекторного электродвигателя постоянного тока

Типичная конструкция электродвигателя постоянного тока с постоянными магнитами приведена на рисунке 1.1.

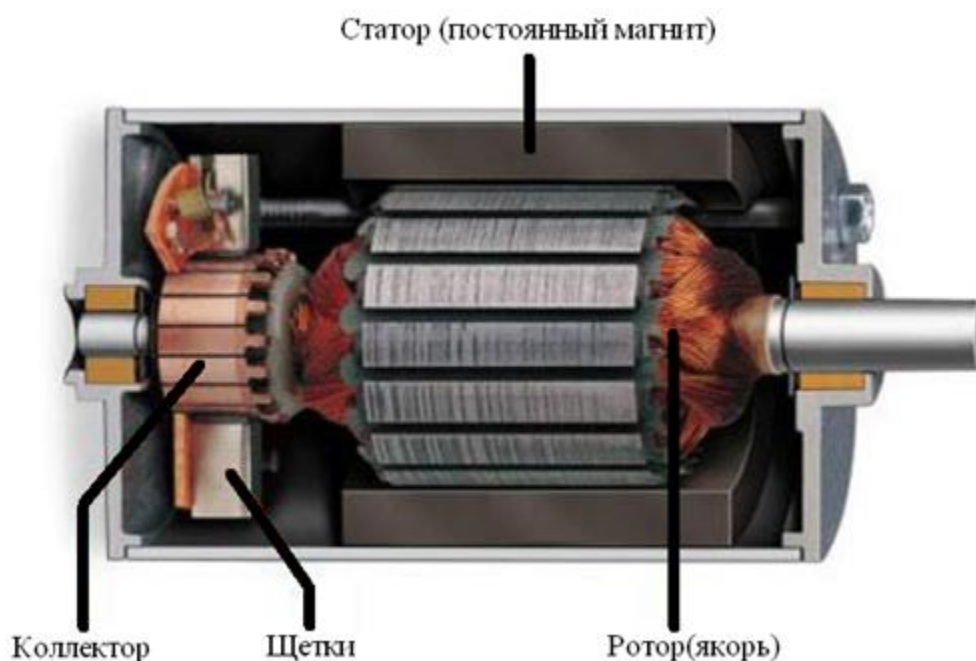


Рис. 1.1 - Электродвигатель постоянного тока с постоянными магнитами в разрезе

Индуктор (система возбуждения) — часть коллекторной машины постоянного тока или синхронной машины, создающая магнитный поток для

образования момента. Индуктор обязательно включает либо постоянные магниты, либо обмотку возбуждения. Индуктор может быть частью как ротора, так и статора. В двигателе, изображенном на рис. 1.1, система возбуждения состоит из двух постоянных магнитов и входит в состав статора.

Якорь — часть коллекторной машины постоянного тока или синхронной машины, в которой индуцируется электродвижущая сила и протекает ток нагрузки [23]. В качестве якоря может выступать как ротор, так и статор. В двигателе, показанном на рис. 1.1, ротор является якорем.

Щетки — часть электрической цепи, по которой от источника питания электрический ток передается к якорю. Щетки изготавливаются из графита или других материалов. Двигатель постоянного тока содержит одну пару щеток или более. Одна из двух щеток соединяется с положительным выводом источника питания, а другая — с отрицательным.

Коллектор — часть двигателя, контактирующая со щетками. С помощью щеток и коллектора электрический ток распределяется по катушкам обмотки якоря [24].

1.1.2 Коллекторный двигатель с постоянными магнитами

Коллекторный двигатель постоянного тока (КДПТ) с постоянными магнитами является наиболее распространенным среди КДПТ. Индуктор этого двигателя включает постоянные магниты, которые создают магнитное поле статора. Коллекторные двигатели постоянного тока с постоянными магнитами (КДПТ ПМ) обычно используются в задачах не требующих больших мощностей. КДПТ ПМ дешевле в производстве, чем коллекторные двигатели с обмотками возбуждения. При этом момент КДПТ ПМ ограничен полем постоянных магнитов статора. КДПТ ПМ очень быстро реагирует на изменение напряжения. Благодаря постоянному полю статора легко управлять

скоростью двигателя. Недостатком электродвигателя постоянного тока с постоянными магнитами является то, что со временем магниты теряют свои магнитные свойства, в результате чего уменьшается поле статора и снижаются характеристики двигателя. Схема коллекторного двигателя с постоянными магнитами приведена на рисунке 1.2.

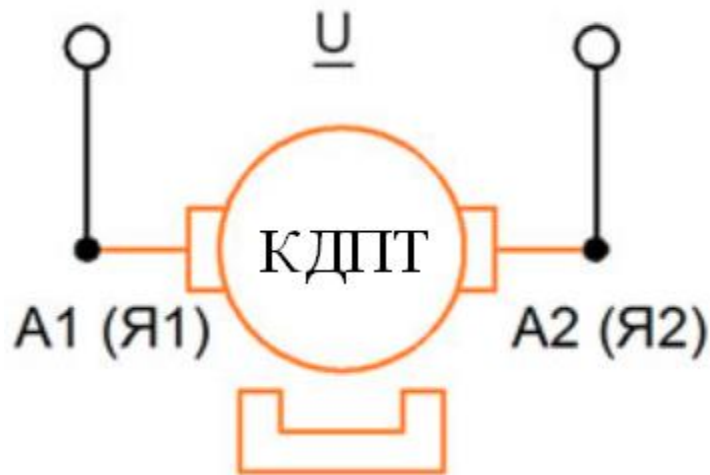


Рис. 1.2 - Схема коллекторного двигателя с постоянными магнитами

Преимущества КДПТ ПМ:

- лучшее соотношение цена/качество;
- высокий момент на низких оборотах;
- быстрый отклик на изменение напряжения.

Недостатки: КДПТ ПМ:

- постоянные магниты со временем, а также под воздействием высоких температур теряют свои магнитные свойства.

1.1.3 Коллекторный двигатель с обмотками возбуждения

По схеме подключения обмотки статора коллекторные электродвигатели с обмотками возбуждения разделяют на двигатели:

- независимого возбуждения;
- последовательного возбуждения;
- параллельного возбуждения;
- смешанного возбуждения.

Все схемы представлены на рисунке 1.3.

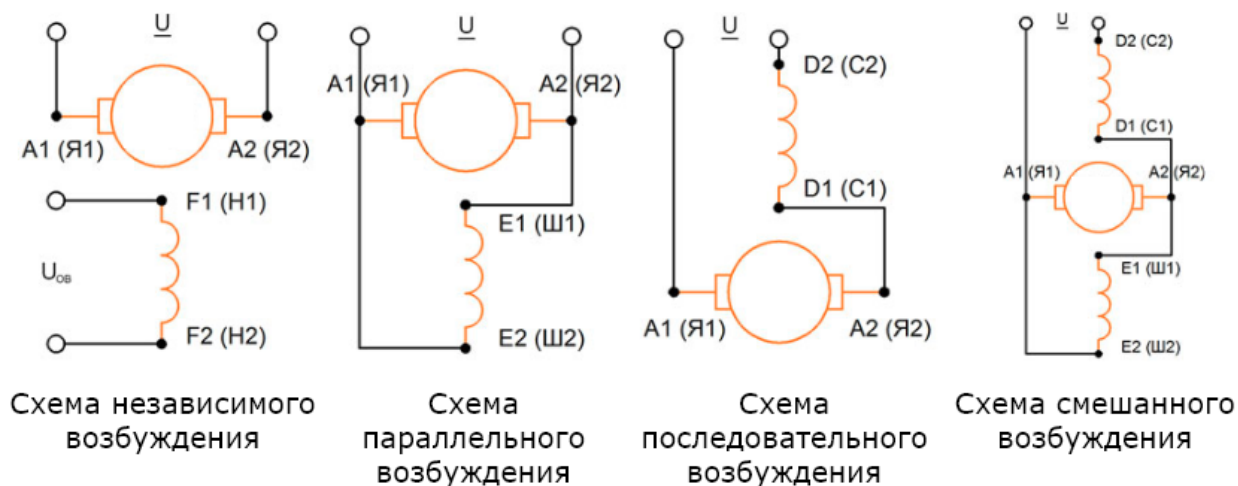


Рис. 1.3 - Схемы коллекторных двигателей с разными типами обмоток возбуждения

В электродвигателях независимого возбуждения обмотка возбуждения электрически не связана с обмоткой якоря. Обычно напряжение возбуждения $U_{ов}$ отличается от напряжения в цепи якоря U . Если же напряжения равны, то обмотку возбуждения подключают параллельно обмотке якоря. Применение в электроприводе двигателя независимого или параллельного возбуждения определяется схемой электропривода. Характеристики этих двигателей одинаковы [25].

В электродвигателях последовательного возбуждения обмотка возбуждения включена последовательно с обмоткой якоря, при этом ток возбуждения равен току якоря, что придает двигателям особые свойства. При

небольших нагрузках, когда ток якоря меньше номинального тока и магнитная система двигателя не насыщена, электромагнитный момент пропорционален квадрату тока в обмотке якоря. Способность двигателей последовательного возбуждения развивать большой электромагнитный момент обеспечивает им хорошие пусковые свойства.

Двигатель смешанного возбуждения имеет две обмотки возбуждения, одна из них включена параллельно обмотке якоря, а вторая последовательно. Соотношение между намагничивающими силами обмоток может быть различным, но обычно одна из обмоток создает большую намагничивающую силу, и эта обмотка называется основной, вторая обмотка называется вспомогательной. Если обмотки включены согласно, то характеристики скорости такого двигателя располагаются между характеристиками скорости двигателей параллельного и последовательного возбуждения. Встречное включение обмоток применяется, когда необходимо получить неизменную скорость вращения или увеличение скорости вращения с увеличением нагрузки. Таким образом, рабочие характеристики двигателя смешанного возбуждения приближаются к характеристикам двигателя параллельного или последовательного возбуждения, смотря по тому, какая из обмоток возбуждения играет главную роль [26].

1.1.4 Характеристики коллекторного электродвигателя постоянного тока

Эксплуатационные свойства двигателей постоянного тока определяются их рабочими, электромеханическими и механическими характеристиками, а также регулировочными свойствами. Механические характеристики для всех типов коллекторных двигателей представлены на рисунке 1.4.

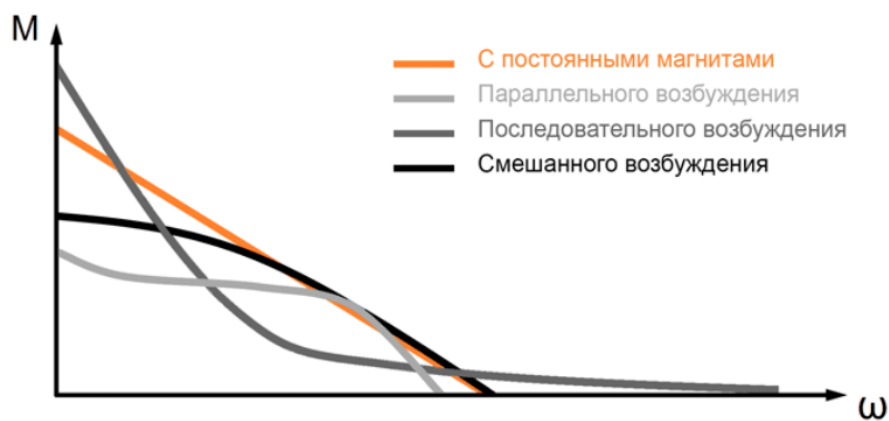


Рис. 1.4 - Механические характеристики коллекторных двигателей постоянного тока

1.2 Системы адаптивного управления

С самого начала проектирования систем автоматического управления была проблема поиска правильной структуры регулятора и его параметров для выбранного процесса. Основная трудность, с которой приходится сталкиваться, заключается в необходимости настройки контроллера таким образом, чтобы он был адаптирован для всего диапазона его рабочих точек, а не для одной конкретной рабочей точки. Для преодоления этих трудностей в начале 1940-х были разработаны адаптивные контроллеры. В промежутке между 1960 и 1990 годами были разработаны многие фундаментальные знания теории управления, такие как: теория устойчивости и пространство состояний, которые позже хорошо зарекомендовали себя.

Адаптивные регуляторы характеризуются способностью собирать информацию о параметрах текущего процесса непосредственно во время управления системой, а также их способностью вносить изменения в законы управления на основе собранной информации. Большинство адаптивных контроллеров можно разделить на два основных класса: адаптивные контроллеры с прямой связью и адаптивные контроллеры с обратной связью.

1.2.1 Адаптивные регуляторы с прямой связью

Эти системы основаны на том факте, что изменение свойств органа управления могут улавливаться и влиять на процесс управления. Реализация адаптивной системы с прямой связью показана на рис. 1.5.

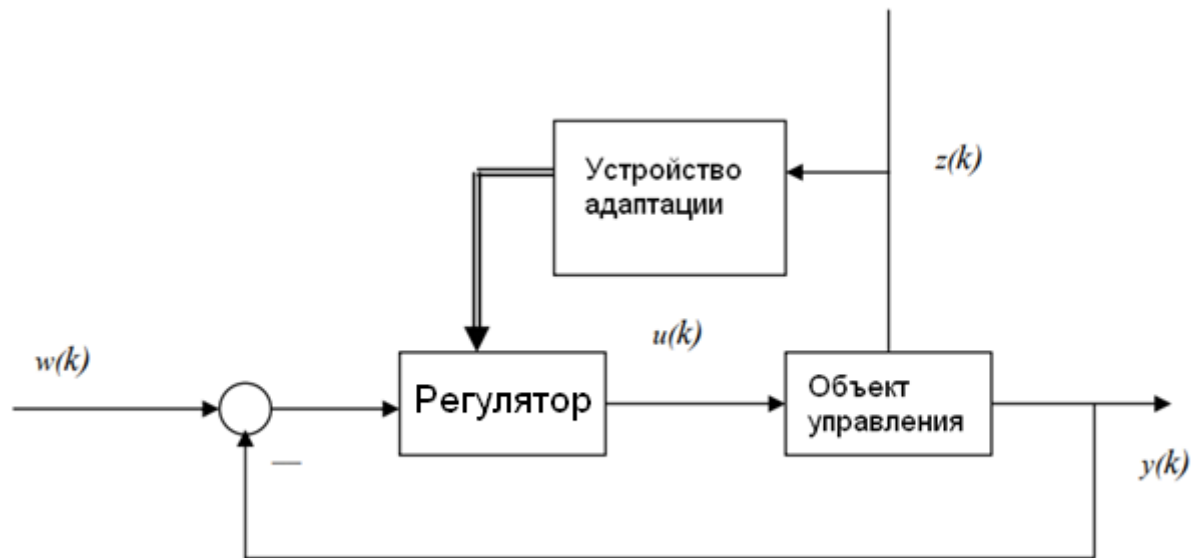


Рис. 1.5 - Адаптивный регулятор с прямой связью

Характерной чертой современного уровня автоматизации является управление тем или иным объектом в условиях априорной неопределенности. Особенности для прямого адаптивного управления можно указать их многомерность, многосвязность, нелинейность и не стационарность. Однако неопределенность часто оказывается основной трудностью, поскольку существенно усложняет задачу именно недостаток информации, необходимой для выработки управляющего воздействия.

Также особенностью этого регулятора является отсутствие обратной связи с "внутренними" замкнутыми сигналами для адаптации параметров контроллера. На рисунке 1.5. измеряется вход возмущающего воздействия $z(k)$ и адаптивный механизм изменяет параметры контроллера, в такой степени,

как это требуется для сохранения хорошей производительности. Одно из преимуществ адаптивных контроллеров с прямой связью - быстрая реакция на изменения в объекте управления, благодаря сигналам с входа возмущения и выходным сигналам объекта управления.

У этого типа управления также есть и недостатки, такие как: пренебрежение изменениями, основанными на неизмеримых сигналах или помехах, которые могут приводить к непредсказуемым изменениям в поведении объекта управления и замедлить процессы и изменения параметров.

1.2.2 Адаптивные регуляторы с обратной связью

Адаптивные регуляторы с обратной связью используются в тех случаях, когда изменение поведения процесса невозможно определить непосредственно путем измерения внешних сигналов. Основная структура адаптивного регулятора с обратной связью показана на рис. 1.6. Эти регуляторы характеризуется следующими тремя факторами. Во-первых, изменение свойств процесса или его сигналов можно наблюдать путем измерения различных сигналов внутреннего контура управления. Во-вторых, в дополнение к базовой обратной связи контура управления механизм адаптации приводит к дополнительному уровню обратной связи. В-третьих, замкнутый контур потока сигнала дает второй уровень нелинейной обратной связи.

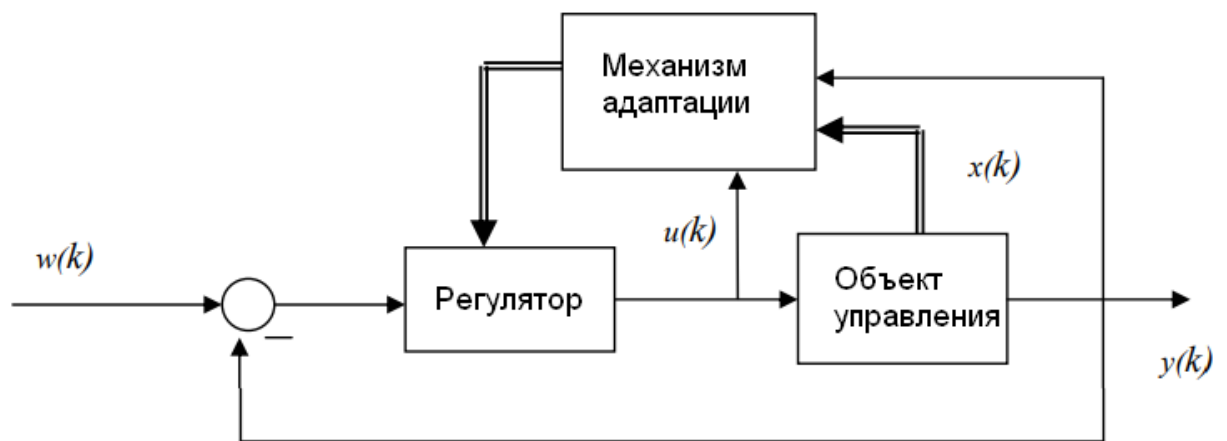


Рис. 1.6 - Адаптивный регулятор с обратной связью

1.3 Цифровые сервоконтроллеры

Помимо регулятора, основанного на искусственной нейронной сети, в настоящем исследовании используются два типа обычных контроллеров с обратной связью. Один из них – пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор, а другой – пропорционально-интегрально-дифференцирующий (ПИД) регулятор.

Оба этих регулятора используются для сравнения с контроллером на основе искусственной нейронной сети.

1.3.1 ПИ регулятор

Идеализированное уравнение пропорционально-интегрального контроллера

$$u(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \right] \quad (1.1)$$

где K - коэффициент усиления, T_i – время интегрирования, $e(t)$ - ошибка обратной связи; т.е. $e(t) = r(t) - y(t)$. Где $r(t)$ и $y(t)$ являются сигналом входа и выхода установки соответственно.

Эквивалентная передаточная функция в s-домене задается следующим образом:

$$U(s) = \left[K \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \right] E(s) \quad (1.2)$$

Для цифрового управления уравнение 1.2 преобразуется в дискретный временной эквивалент(z-домен), высчитывающийся как:

$$U(z) = \left[K_P + \frac{K_I}{1 - z^{-1}} \right] E(z) \quad (1.3)$$

или, в терминах скорости:

$$U(z) = -K_P Y(z) + K_I \frac{E(z)}{1 - z^{-1}} \quad (1.4)$$

где $K_P = K - \frac{KT_s}{2T_i},$ (1.5)

$$K_I = \frac{KT_s}{T_i}, \quad (1.6)$$

и T_s это интервал дискретизации.

1.3.2 ПИД регулятор

Идеализированное уравнение пропорционально-интегрально-дериwативного (ПИД) регулятора имеет вид

$$u(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1.7)$$

Эквивалентная передаточная функция в s-домене задается следующим образом:

$$U(s) = \left[K \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \right] E(s) \quad (1.8)$$

Для цифрового управления уравнение (1.8) преобразуется в его дискретно-временной (z-доменный) эквивалент, заданный как:

$$U(z) = \left[K_P + \frac{K_I}{1 - z^{-1}} + K_D(1 - z^{-1}) \right] E(z) \quad (1.9)$$

или, в терминах скорости:

$$U(z) = -K_P Y(z) + K_I \frac{E(z)}{1 - z^{-1}} - K_D(1 - z^{-1})Y(z) \quad (1.10)$$

$$\text{где,} \quad K_P = K - \frac{KT_s}{2T_i}, \quad (1.11)$$

$$K_I = \frac{KT_s}{T_i}, \quad (1.12)$$

$$K_D = \frac{KT_d}{T_i} \quad (1.13)$$

и T_s это интервал дискретизации.

Выбор типа регулятора или необходимого закона регулирования для конкретного объекта управления – важная задача. На этот выбор оказывает влияние несколько факторов: вид передаточной функции объекта; если объект с запаздыванием, то влияние оказывает отношение общего запаздывания объекта к T_0 – постоянной времени (статический объект с запаздыванием) или

к T (астатический объект с запаздыванием). Выбор типа регулятора также зависит от требований к качеству работы проектируемой САУ. Существует ряд диаграмм и эмпирических формул, позволяющих по передаточной функции объекта определить тип регулятора и оптимальные величины его параметров настройки.

Графики процессов регулирования для разных систем управления представлены на рисунке 1.7.

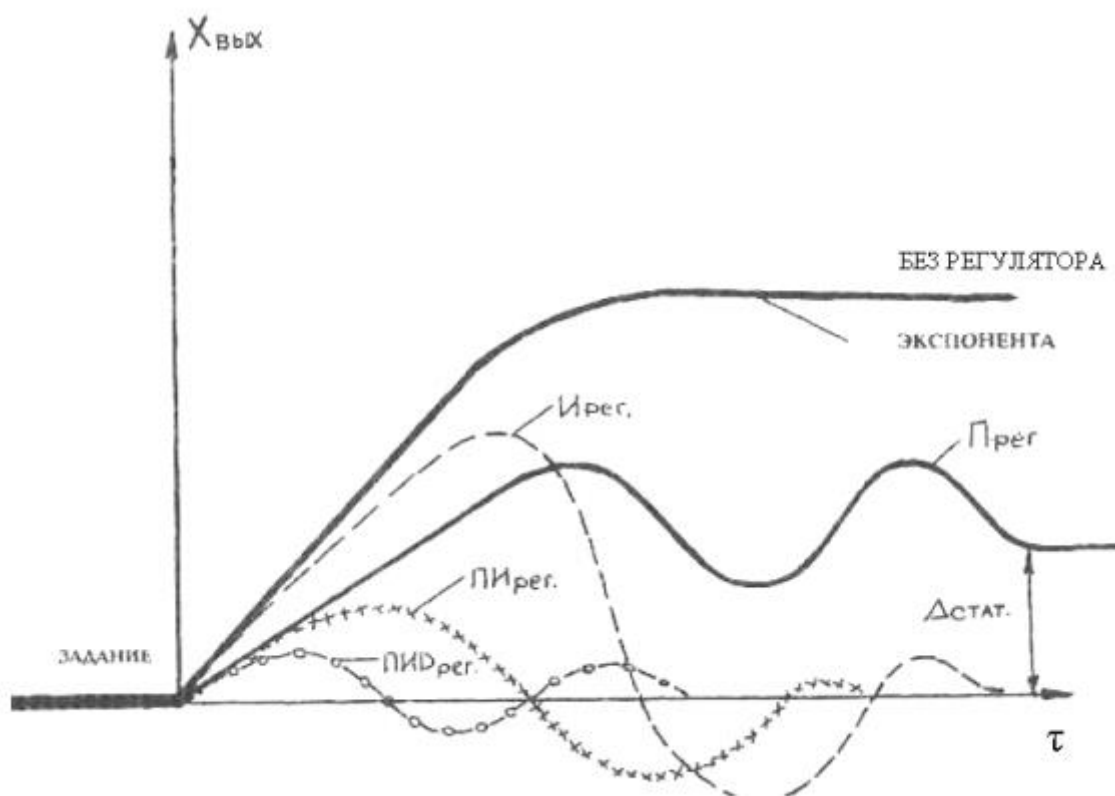


Рис. 1.7. - Графики процессов регулирования параметра статического объекта в системах с П-, И-, ПИ-, ПИД-регуляторами

1.4 Адаптивный контроллер с искусственными нейронными сетями

Человеческое мышление имеет как логические, так и интуитивные или субъективные стороны. Логическая сторона была разработана и использована, в результате чего появились современные передовые компьютеры. Однако

выяснилось, что жесткие вычисления сами по себе не могут дать решения для реальных, очень сложных и нелинейных систем. Для того чтобы справиться с этой трудностью, было использовано интуитивное и субъективное мышление человеческого разума, что привело к ‘мягким’ вычислениям, включающим нейронные сети.

Недавно разработанные приложения в различных областях доказали, что превосходные результаты можно получить с помощью искусственных нейронных сетей. Искусственная нейронная сеть обеспечивает нелинейное отображение между входами и выходами системы электропривода, без знания заранее заданной модели. Поэтому использование искусственной нейронной сети в адаптивном управлении может сделать системы надежными и эффективными.

В предлагаемой работе используется адаптивная стратегия управления скоростью для коллекторного двигателя с постоянными магнитами, включающая онлайн обновление весов и смещений контроллера искусственной нейронной сети. Архитектура искусственной нейронной сети основана на обратной динамической модели нелинейной приводной системы. Для повышения надежности, которая является важным критерием высокопроизводительного привода, также используется уникальная особенность адаптивной скорости обучения.

1.5 Уравнения движения системы коллекторного привода постоянного тока

Хотя в случае использования ИНС в схеме управления двигателем нет необходимости в получении модели двигателя, важно сделать это с аналитической точки зрения, чтобы заложить основу структуры искусственной нейронной сети для сравнения с идеальной линейной системой.

Уравнения движения коллекторного двигателя с постоянными магнитами описывается следующими формулами:

$$v_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_b(t) \quad (1.14)$$

$$e_b(t) = K_E \omega_r(t) \quad (1.15)$$

$$T_e(t) = K_T i_a(t) \quad (1.16)$$

$$T_e(t) = J \frac{d\omega_r(t)}{dt} + B\omega_r(t) + T_l(t) + T_F \quad (1.17)$$

где $v_a(t)$ - напряжение на клеммах двигателя, $e_b(t)$ - противо-ЭДС,

$i_a(t)$ - ток якоря, $\omega_r(t)$ - скорость вращения двигателя,

Крутящий момент $T_l(t)$, может быть выражен как:

$$T_l(t) = \Psi(\omega_r(t)) \quad (1.18)$$

где функция $\Psi(\omega_r(t))$ зависит от характера нагрузки. Предполагается, что точное функциональное выражение $\Psi(\omega_r(t))$ предполагается неизвестным.

Для получения обучающих данных для искусственной нейронной сети и применения алгоритмов управления требуется дискретная временная модель двигателя постоянного тока. Допустим, что нагружающий момент $T(t)$ уравнения (1.18) нелинейный и имеет форму:

$$T_l(t) = v\omega_r^2(t)[\text{sign}\{\omega_r(t)\}] \quad (1.19)$$

где v является константой, используемой для моделирования нелинейной механической нагрузки. Хотя нагрузка, выраженная в (1.19), предполагается как тип вентилятора или пропеллера для целей моделирования, в реальной жизни она неопределенна и обычно имеет неизвестные нелинейные механические характеристики. Для облегчения задачи управления система привода двигателя постоянного тока на постоянных магнитах может быть выражена как система с одним входом и одним выходом (1.14 - 1.17), что дает классифицировать регуляторы по реализуемому закону регулирования.

$$L_a J \frac{d^2 \omega_r(t)}{dt^2} + (R_a J + L_a B) \frac{d\omega_r(t)}{dt} + (R_a B + K_E K_T) \omega_r(t) + L_a \frac{dT_l(t)}{dt} + R_a \{T_l(t) + T_F\} - K_T v_a(t) = 0 \quad (1.20)$$

Дискретно-временная модель получается путем объединения уравнений (1.19) и (1.20), а затем замены всех непрерывных дифференциалов на конечные разности. Результирующее уравнение пространства состояний:

$$\omega_r(n+1) = K_1 \omega_r(n) + K_2 \omega_r(n-1) + K_3 [\text{sign}\{\omega_r(n)\}] \omega_r^2(n) + K_4 [\text{sign}\{\omega_r(n)\}] \omega_r^2(n-1) + K_5 v_a(n) + K_6 \quad (1.21)$$

где K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 и K_6 — это константы, которые могут быть выражены в терминах параметров двигателя. Уравнение (1.21) может быть дополнительно изменено для получения обратной динамической модели приводной системы и будет выглядеть как:

$$v_c(n) = f[\omega_r(n+1), \omega_r(n), \omega_r(n-1)] \quad (1.22)$$

где $v_c(n)$ управляющее напряжение силового преобразователя, которое линейно пропорционально напряжению на клеммах $v_a(n)$. Правая часть уравнения (1.22) – это нелинейная функция скорости ω_r , которая представлена как:

$$f[\omega_r(n+1), \omega_r(n), \omega_r(n-1)] =$$

$$[\omega_r(n+1) - K_1\omega_r(n) - K_2\omega_r(n-1) - K_3[\text{sign}\{\omega_r(n)\}]\omega_r^2(n) - K_4[\text{sign}\{\omega_r(n)\}]\omega_r^2(n-1) - K_6]/K_5 \quad (1.23)$$

Целью использования искусственной нейронной сети является отображение нелинейной связи между напряжением на клеммах $v_c(n)$ и скоростью $\omega_r(n)$ коллекторного двигателя в соответствии с (1.22). Производная (1.22) позволяет оценить структуру искусственной нейронной сети, необходимую для управления скоростью коллекторного двигателя постоянного тока на магнитах.

1.6 Структура искусственной нейронной сети регулятора

1.6.1 Структура искусственной нейронной сети с прямой связью

Общая архитектура искусственной нейронной сети с прямой связью показана на рис. 1.8. Сеть состоит из одного входного слоя и одного или нескольких скрытых слоев, за которыми следует выходной слой. Каждый слой состоит из нескольких нейронов, а каждый нейрон имеет две функции. Первая заключается в суммировании всех выходов из предыдущих слоев, умноженных на соответствующие веса. Вторая функция заключается в применении линейной или нелинейной (например, сигмоидальной) функции к этой сумме.

Фундаментальные уравнения, которые описывают входы и выходы сети, могут быть выражены следующим образом.

Сетевой вход j -ого нейрона скрытого слоя в момент времени n задается следующим образом:

$$S_j^h(n) = \sum_{i=1}^N W_{ij}^h(n) I_i(n) \quad (1.24)$$

где W_{ij}^h это связующий вес между i -ым нейроном входного слоя и j -ым

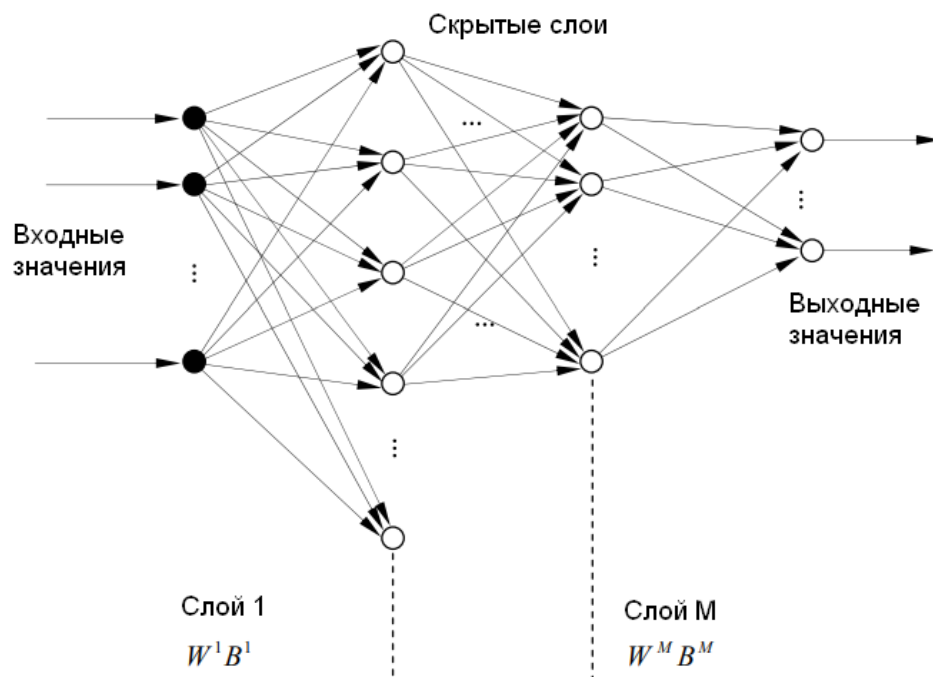


Рис. 1.8 - Общий график структуры FFNN

нейроном скрытого слоя, I_i это i -ый вход и N это количество входов.

Выходные данные с j -ого нейрона скрытого слоя в n -ом моменте, выражаются как:

$$O_j^h(n) = f^h[S_j^h(n) + B_j^h(n)] \quad (1.25)$$

где B_j^h – это смещение j-ого нейрона, а f^h – это нелинейная функция активации, выполняющаяся для каждого выхода нейрона скрытого слоя. В основном используются тангенс сигмоидальные или логарифмически сигмоидальные функции активации, которые выражаются как:

$$tansig(x) = \frac{1 - e^{-2x}}{1 + e^{2x}} \quad (1.26)$$

$$logsig(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (1.27)$$

Вход k-ого нейрона выходного слоя в конкретный момент времени n вычисляется по формуле:

$$S_k^o(n) = \sum_{j=1}^M W_{jk}^o(n) O_j^h(n) \quad (1.28)$$

где M – это количество нейронов скрытого слоя и $W_{jk}^o(n)$ – это связь веса между j-ым нейроном скрытого слоя и k-ым нейроном выходящего слоя.

Выходные данные с k-ого нейрона выходного слоя в момент времени n рассчитываются как:

$$O_k^o(n) = f^o[S_k^o(n) + B_k^o(n)] \quad (1.29)$$

где f^o – функция активации, а $B_k^o(n)$ – это смещение k-го нейрона выходного слоя.

1.6.2 Структура искусственных нейронных сетей для электродвигателя

Наиболее важной задачей при проектировании контроллера с использованием искусственной нейронной сети является определение

количества входов и выходов. В соответствии с уравнением движения (1.22) определяются входные и выходные значения для нейронной сети. Левая часть уравнения (1.23) определяет входы искусственной нейронной сети – три последовательных значения скорости, а соответствующее выходное значение – это управляющее напряжение $v_c(n)$.

Количество скрытых слоев и количество нейронов в скрытом слое выбирается методом проб и ошибок. При принятии решения о количестве нейронов отмечается, что чем меньше их количество, тем оно лучше с точки зрения как требуемого объема памяти, так и вычислительной нагрузки. С другой стороны, слишком малое количество может привести к тому, что искусственная нейронная сеть не сможет точно отобразить требуемую функцию. Структура искусственной нейронной сети, используемая для коллекторного двигателя на постоянных магнитах, показана на рисунок 1.9.

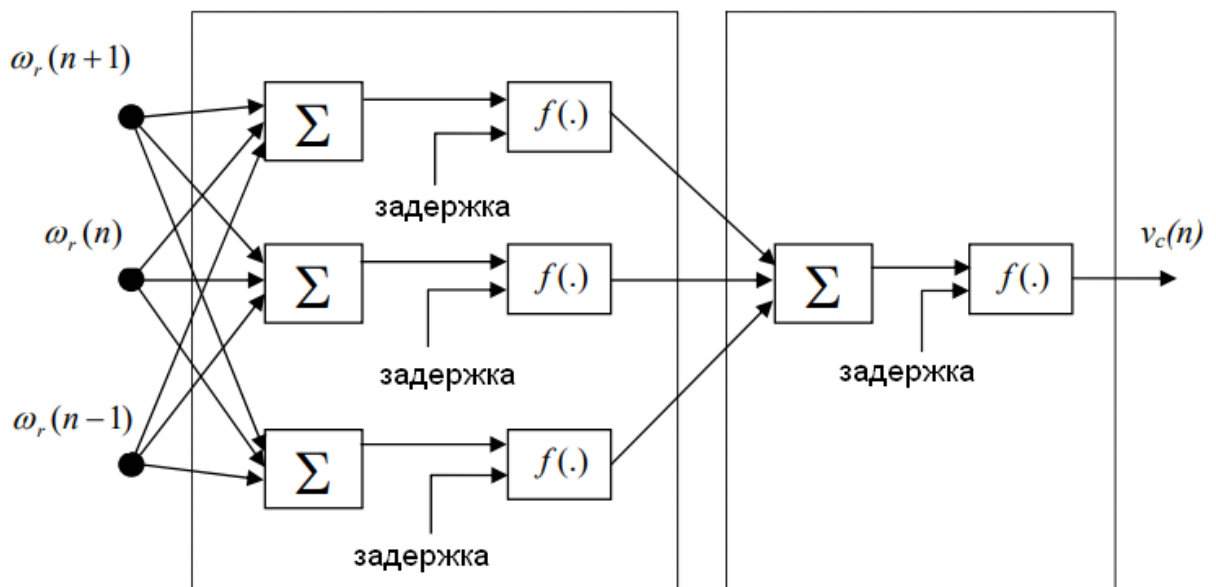


Рис. 1.9 - Структура ИНС для коллекторного двигателя постоянного тока на постоянных магнитах

Функции активации, используемые в скрытом и выходном слоях — это логарифмический и тангенциальный сигмoиды, соответственно. После того,

как будет выполнено базовое проектирование структуры искусственной нейронной сети, следующим шагом является установление весов и задержек, путем обучения для получения конкретной цели с заданными входными данными. Для этого используется алгоритм обратного распространения ошибки, основанный на принципе минимизации функции потерь между выходами и целевым значением искусственной нейронной сети с прямой связью.

Обучение работы искусственной нейронной сети может проводиться как в автономном режиме, так и в режиме онлайн, в зависимости от необходимых условий. Если веса и задержки искусственной нейронной сети определяются только посредством обучения в автономном режиме, то необходимо провести обширное обучение с учетом практически всех условий эксплуатации системы, что практически невозможно для управления коллекторным двигателем с постоянными магнитами. Поэтому в этой работе используется сочетание оффлайн и онлайн обучения.

2. РАЗРАБОТКА РЕГУЛЯТОРА ОСНОВАННОГО НА ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Как упоминалось в предыдущей главе, одной из отличительных особенностей искусственной нейронной сети является ее способность отображать любую нелинейную связь между входом и выходом через обучение и без необходимости знания какой-либо predetermined модели. Используя это свойство, здесь используется многослойная структура нейросети. Эта структура, которая имеет адаптивную способность, используется для управления скоростью коллекторного двигателя на постоянных магнитах (КДПТ) двигателя.

2.1 Структура искусственной нейронной сети для системы идентификации и контроля

Целью системы управления скоростью двигателя постоянного тока является получение соответствующего управляющего сигнала – напряжения на клеммах двигателя постоянного тока, так, чтобы двигатель мог отслеживать исходную скорость $\omega_{ref}(n)$. При каждой выборке мгновенно находится напряжение управления $v_c^*(n)$ для коллекторного двигателя постоянного тока двигателя, которое генерируется структурой искусственной нейронной сети, которая подается в цепь усилителя мощности, как показано на рис. 2.1. ИНС1 и ИНС2, показанные на рис. 2.1, имеют одинаковый набор весов и задержек, но два разных набора входных и выходных данных. В данной работе структура искусственной нейронной сети, состоящая из одного скрытого слоя, имеющего три нейрона с одним нейроном в выходном слое, дает удовлетворительные результаты.

Траектория задания скорости выбирается с использованием эталонной модели второго порядка, что делает систему асимптотически стабильной. Эталонная модель описывается по следующему уравнению:

$$\omega_{ref}(n+1) = a_1 \omega_{ref}(n) + a_2 \omega_{ref}(n-1) + r(n) \quad (2.1)$$

где a_1 и a_2 – константы, выбранные для эталонной траектории с заданным динамическим откликом, а $r(n)$ – это ограниченный входной сигнал эталонной модели. Если предполагается, что ошибка отслеживания мала, а выбранная эталонная модель асимптотически устойчива, то скорость двигателя в $(n+1)$ момент времени может быть выражена из (2.1)

$$\omega_{ref}^*(n+1) = a_1 \omega_r(n) + a_2 \omega_r(n-1) + r(n) \quad (2.2)$$

Следовательно, с одной выборкой прогнозируемой скорости и двумя выборками фактической скорости, входная последовательность:

$$\{ \omega_{ref}^*(n+1), \omega_r(n), \omega_r(n-1) \}$$

формируется и используется в качестве входа в ИНС 2, как показано на рис. 2.1.

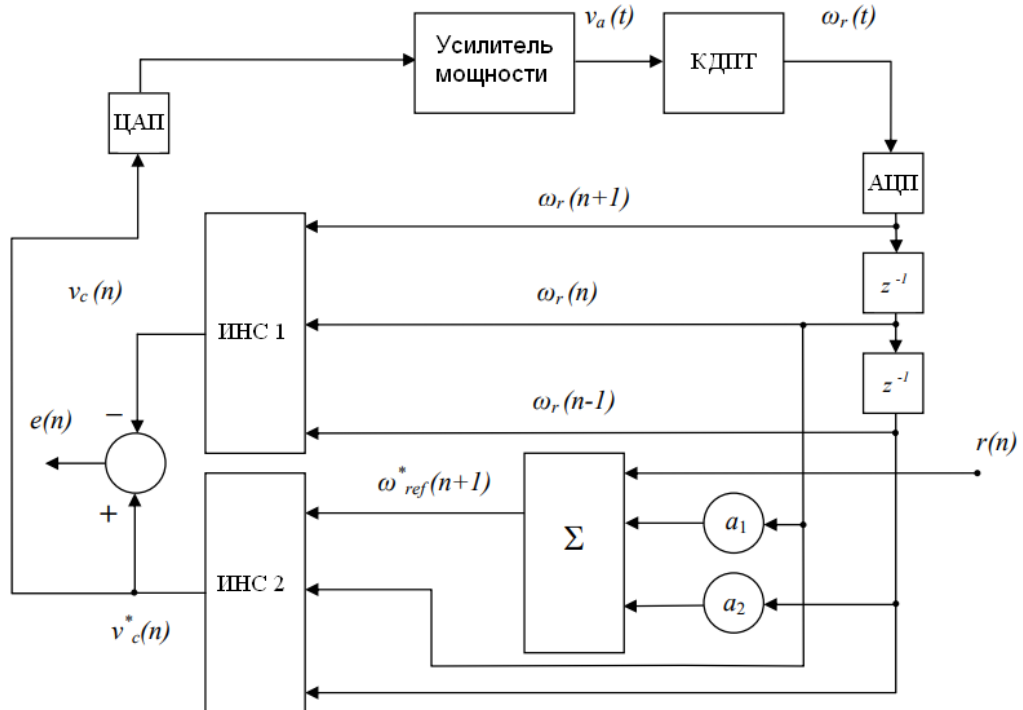


Рис. 2.1. Блок-схема адаптивного контроллера на основе ИНС

Работа системы управления, показанной на рис. 2.1, заключается в следующем. Во время каждого экземпляра выборки выполняются следующие шаги:

1. Набор входных данных $\{\omega_r(n+1), \omega_r(n), \omega_r(n-1)\}$ применяется к контроллеру ИНС 2 для генерации управляющего выходного напряжения $v_c^*(n)$.
2. $v_c^*(n)$ затем применяется к системе двигателя / привода через цифро-аналоговый преобразователь.
3. Система управления ждёт прерывание цикла контроллера, что означает начало следующего периода выборки.
4. Измеряется новая скорость для конкретной выборки.
5. Набор входных данных $\{\omega_r(n+1), \omega_r(n), \omega_r(n-1)\}$ применяется к контроллеру ИНС 1 для получения выходного напряжения $v_c^*(n)$.
6. Высчитывается ошибка $e(n) = v_c^*(n) - v_c(n)$, где $v_c^*(n)$ – результат ИНС2, а $v_c(n)$ – результат ИНС 1.
7. Выполняется обратное распространение ошибки через ИНС2, веса которой были обновлены (или натренированы).
8. Те же корректировки веса передаются и для ИНС1.
9. Процедура повторяется с первого шага с новым набором входных данных.

Как обсуждалось ранее, модель нагрузки задается формулой (1.19), но это не всегда правдиво в практических обстоятельствах. Это вызывает необходимость оперативного (адаптивного) обновления весов и смещений искусственной нейронной сети. Тем не менее, задача обучения в режиме онлайн может быть выполнена без особых трудностей, и система может быть сделана более стабильно, если начальный набор весов и смещений генерируется посредством автономных тренировок. В данном исследовании использовалась комбинация офлайн и онлайн обучения. Первоначальный

набор весов и задержек были получены с помощью автономного обучения. Весовые коэффициенты и задержки обновляются только тогда, когда предел ошибки между фактическим выходным сигналом и целевым значением искусственной нейронной сети превышает предварительно установленное значение.

2.2 Автономное обучение для начального набора весов и задержек искусственной нейронной сети

Данные для обучения в автономном режиме могут быть получены с помощью моделирования или эксперимента. Если параметры двигателя доступны, то по уравнению (1.23) может быть получена случайная генерация входных данных модели $\{\omega_r(n+1), \omega_r(n), \omega_r(n-1)\}$. Соответствующие целевые значения могут быть сгенерированы с использованием этих значений скорости и констант $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$ с правой части уравнения (1.23). Поэтому данные автономной тренировки могут быть получены путем моделирования с использованием SIMULINK или любого другого подобного программного обеспечения в схеме управления двигателем постоянного тока с учетом нагрузки, как описано в (1.19).

В настоящей работе использовался метод моделирования. Используя метод моделирования, мы можем получить лучшие результаты, потому что в этом случае в идеальной системе будет отсутствовать нелинейность в усилителе мощности.

В эксперименте коллекторный двигатель постоянного тока работал в разомкнутом контуре по заданной произвольной траектории. Траектория, которая была сгенерирована в MATLAB показана на рис. 2.2. Скорость двигателя постоянного тока и напряжение питания U_c для усилителя измерялись с частотой 1мс. Для записи данных была сделана настройка в

Simulink. С записи данных были получены идеальные скорости и напряжения питания для них для тренировки искусственной нейронной сети.

2.3 Структура онлайн обучения искусственной нейронной сети для вывода задержек и весов

Веса и задержки двух искусственных нейронных сетей обновляются в каждый момент с использованием алгоритма обратного распространения ошибки. Функция ошибки, которая минимизируется, определяется как:

$$E(n) = \frac{1}{2} e^2(n) \quad (2.3)$$

$$e(n) = error = v_c^*(n) - v_c(n) \quad (2.4)$$

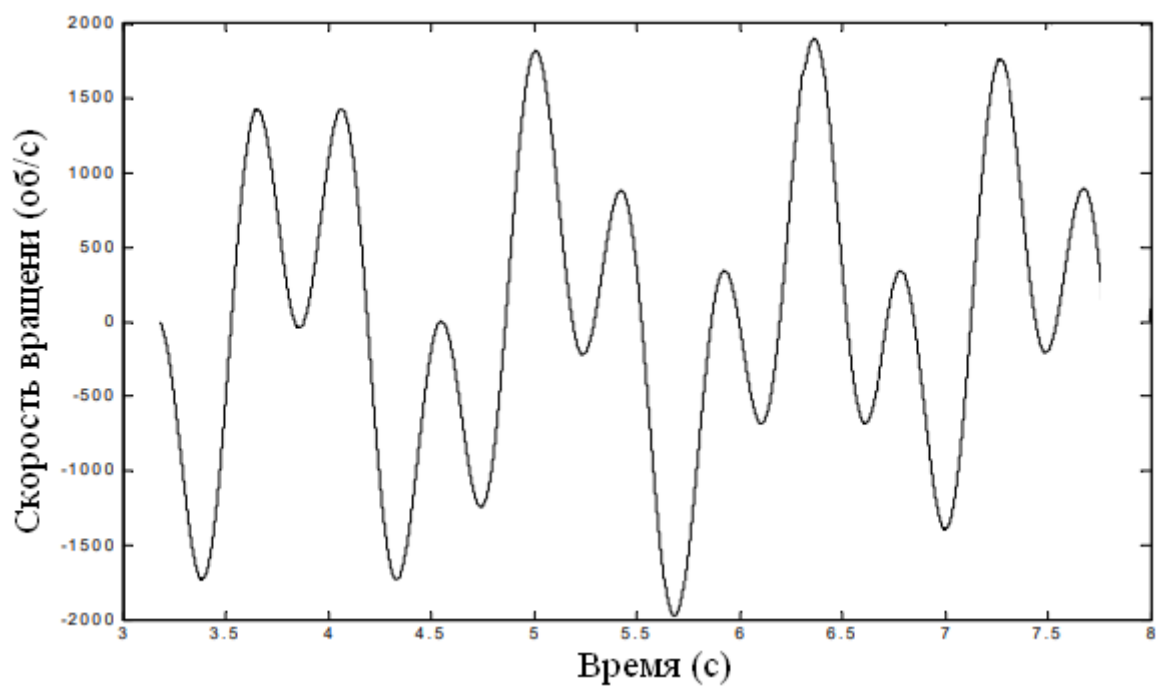


Рисунок 2.2 Траектория, сгенерированная для двигателя постоянного тока для обучения искусственной нейронной сети

Данная траектория была получена с помощью блоков: Chirp Signal, Signal Generator и сумматора.

Веса и смещения выходного слоя обновляются в соответствии со следующими выражениями:

$$W_{jk}^o(n+1) = W_{jk}^o(n) + \eta \delta_k^o(n) O_j^h(n) \quad (2.5)$$

$$B_k^o(n+1) = B_k^o(n) + \eta \delta_k^o(n) \quad (2.6)$$

где η – скорость обучения, $\delta_k^o(n)$ – локальный градиент на выходном слое, который может быть выражен как:

$$\delta_k^o(n) = e(n) \frac{\partial e(n)}{\partial O_k^o(n)} S_k^o(n) (1 - S_k^o(n)) O_j^h(n) \quad (2.7)$$

Веса и задержки скрытого слоя обновляются в соответствии со следующим выражением:

$$W_{ij}^h(n+1) = W_{ij}^h(n) + \eta \delta_j^h(n) I_i(n) \quad (2.8)$$

$$B_j^h(n+1) = B_j^h(n) + \eta \delta_j^h(n) \quad (2.9)$$

где $\delta_j^h(n)$ – локальный градиент скрытого слоя, который может быть выражен как:

$$\delta_j^h(n) = \delta_k^o(n) W_{jk}^o(n) [1 - S_j^h(n)]^2 \quad (2.10)$$

При внедрении этой установки в режиме реального времени ошибка рассчитывается в каждый момент с определенной частотой дискретизации, и, когда она превышает предварительно определенный уровень, весовые коэффициенты и задержки обновляются. Если ошибка находится в пределах

заданного уровня, предыдущий набор весов и смещений сохраняется для вычисления управляющего напряжения $U_c(n)$

Некоторые из основных проблем, с которыми сталкиваются высокопроизводительные моторные приводы, — это превышение скорости и время отклика. Наблюдалось, что скорость обучения искусственной нейронной сети является ключевым фактором, влияющим на превышение скорости и время отклика. Более высокая скорость обучения приводит к превышению скорости, а медленная скорость обучения делает время отклика слишком медленным.

Поэтому для оперативного обновления весов и задержек искусственной нейронной сети в нашем контроллере применяется адаптивная скорость обучения. Начальная скорость обучения 0,0003 была получена для реализации контроллера с использованием искусственной нейронной сети в режиме реального времени на основе окончательного значения скорости обучения, используемого при обучении в автономном режиме.

В данной работе были учтены следующие факты при выводе адаптивной скорости обучения η . Если разница между заданной скоростью и фактической скоростью велика, скорость обучения увеличивается до тех пор, пока фактическая скорость не достигнет выбранной скорости. Из-за более высокой скорости обучения фактическая скорость может превышать расчётную скорость, что приводит к перерегулированию. Если происходит превышение скорости двигателя – скорость обучения снижается. Когда скорость двигателя начинает уменьшаться от перерегулирования, скорость обучения вновь увеличивается, так, что фактическая скорость быстро достигает значений расчётной скорости. Детали адаптивной скорости обучения показаны на блок-схеме рисунка 2.3.

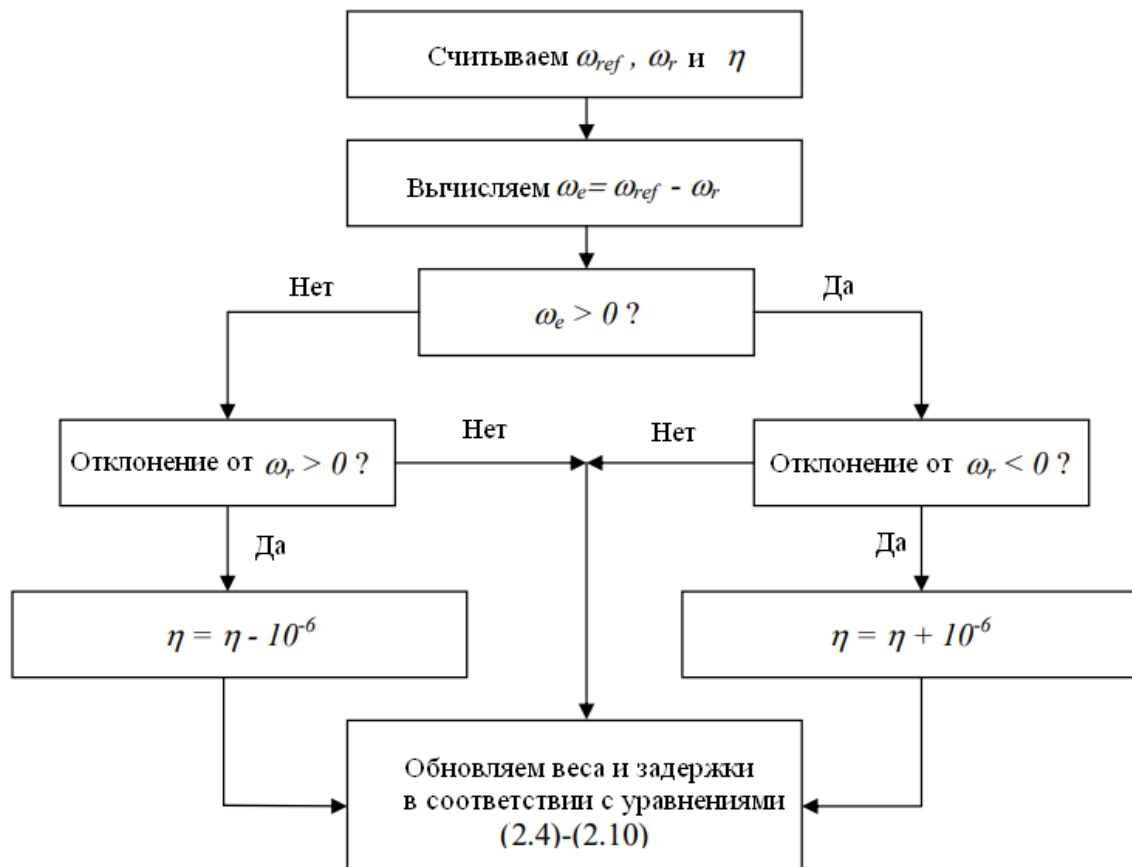


Рисунок 2.3 Блок-схема для адаптивной скорости обучения η

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОЛЛЕКТОРНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

В этой главе описывается фактическая аппаратная и программная реализация адаптивного регулятора для двигателя постоянного тока на постоянных магнитах, которая была разработана в предыдущей главе.

3.1 Сравнение систем управления коллекторным двигателем постоянного тока с постоянными магнитами

Сопротивление обмотки возбуждения и ее индуктивность, использованного в этом исследовании, представлены R_f и L_f , соответственно. Сопротивление якоря и его индуктивность показаны R_a и L_a соответственно в динамической модели. Эффекты реакции якоря игнорируются при описании двигателя. Эта неточность оправдана, чтобы свести к минимуму последствия реакции якоря, так как используемый двигатель имеет обмотки или взаимную компенсацию. Фиксированное напряжение U_f подается на поле, а ток поля устанавливается на постоянное значение. Линейная модель простого двигателя постоянного тока состоит из механического уравнения и электрического уравнения, которые определены в следующих уравнениях:

$$J_m \frac{d\omega}{dt} = K_m \cdot \phi \cdot I_a - b \cdot \omega - M_{load} \quad (3.1)$$

$$L_a \frac{dI}{dt} = V_a - R_a \cdot I_a - K_b \cdot \phi \cdot \omega \quad (3.2)$$

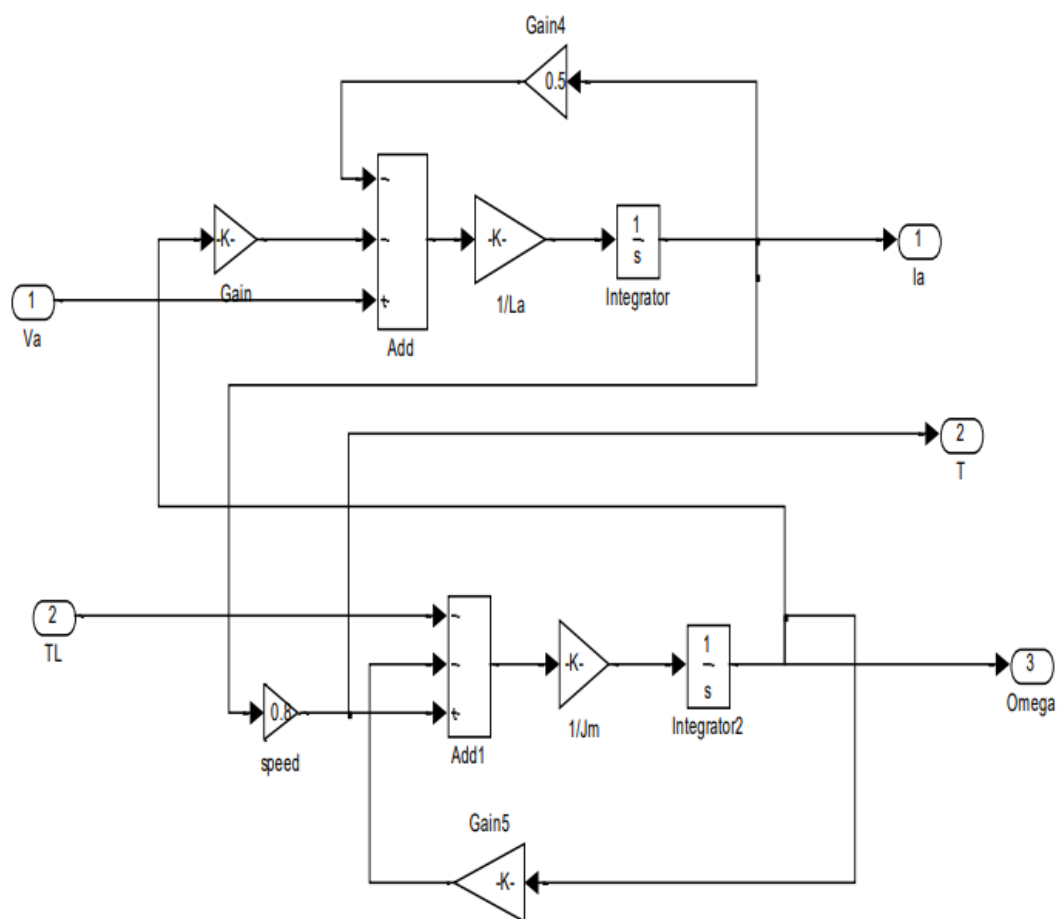


Рис. 3.1. Модель MATLAB Simulink коллекторного двигателя постоянного тока

Скорость отклика двигателя постоянного тока без какого-либо контроллера показана ниже:

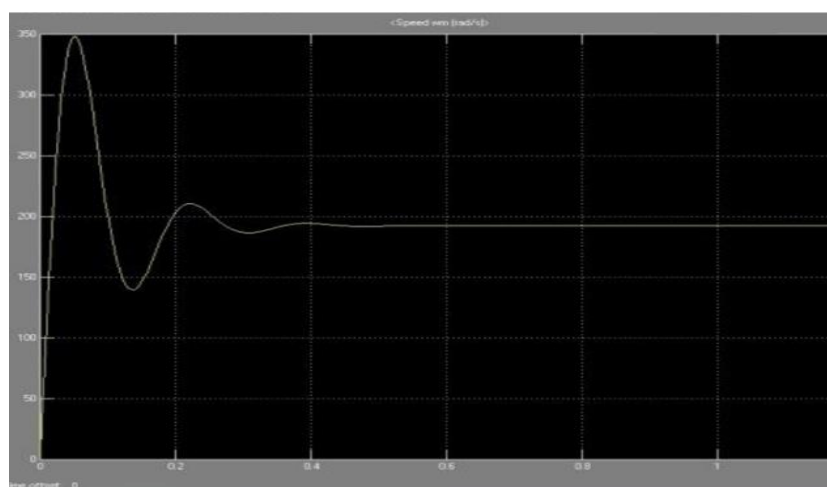


Рис. 3.2. Скорость двигателя постоянного тока без контроллера

Пик перегрузки и число колебаний, полученных на приведенной выше кривой, намного больше и, следовательно, нежелательны. Эти параметры контролируются с помощью различного рода контроллеров.

На рисунке 3.3 показана модель ПИ-регулятора для двигателя постоянного тока.

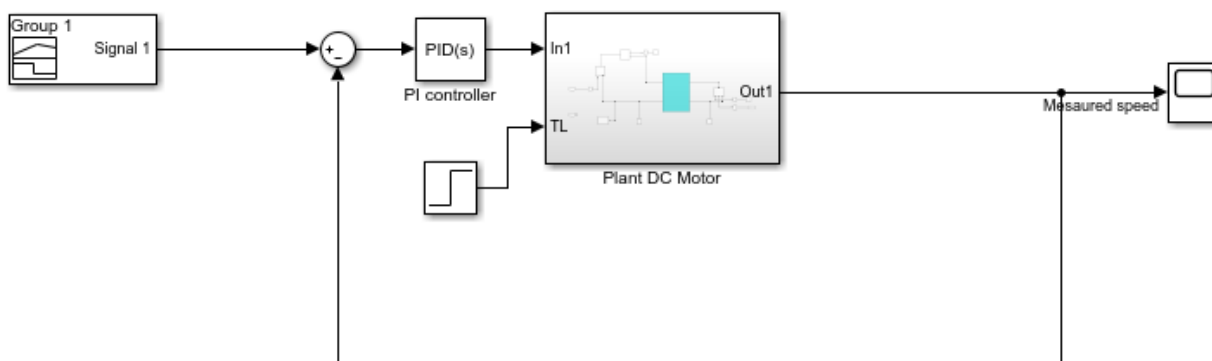


Рис. 3.3. Модель двигателя Matlab Simulink с ПИ регулятором

На рисунке 3.4 показана модель MatLab Simulink для управления скоростью двигателя постоянного тока с использованием ПИД-регулятора.

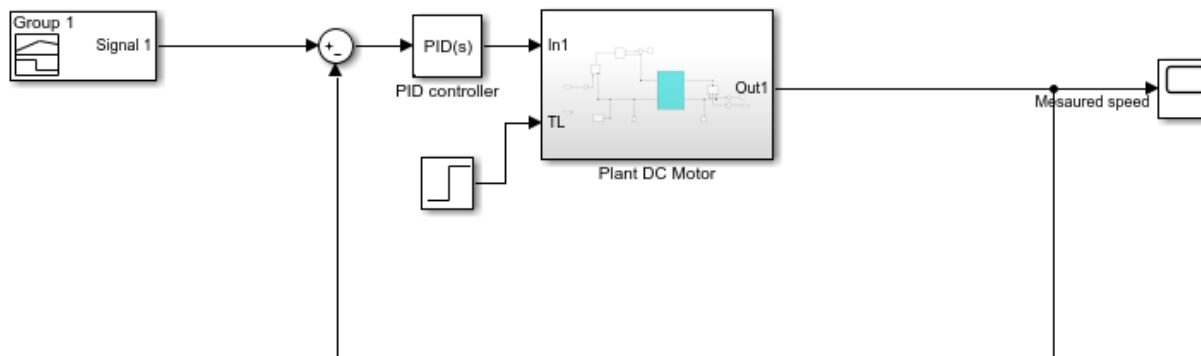


Рис. 3.4. Модель двигателя Matlab Simulink с ПИД регулятором

На рисунке 3.5 показана модель регулятора с использованием искусственной нейронной сети для двигателя постоянного тока. Модель используется с выбранной скоростью, постоянной нагрузкой и при набросе нагрузки.

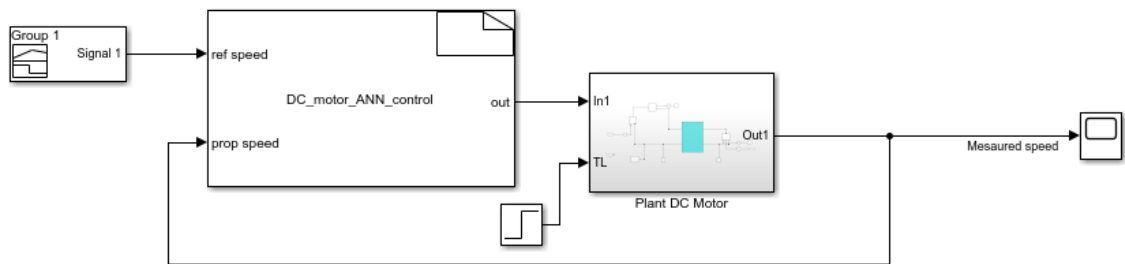


Рис. 3.5. Simulink модель контроллера искусственной нейронной сети

Результат моделирования двигателя постоянного тока без использования контроллера показан на рисунке 3.1. Этот рисунок можно сравнить с рисунком 3.6.

На рисунке 3.6 приведены осциллограммы скорости двигателя для всех видов использованных контроллеров.

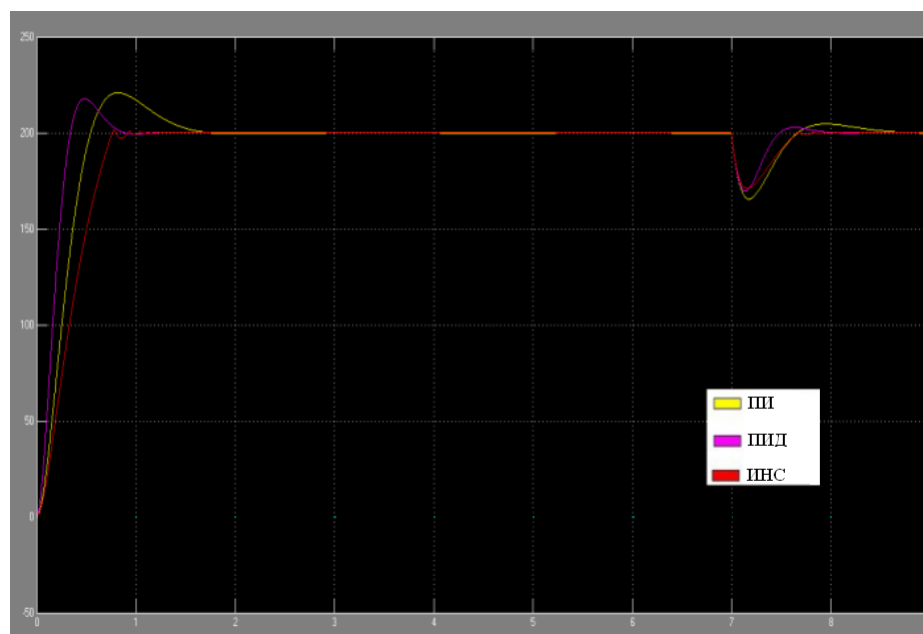


Рис. 3.6. Результат моделирования для двигателя постоянного тока с использованием ПИ, ПИД и ИНС контроллера

Как видно из графика, результаты моделирования с помощью искусственной нейронной сети значительно лучше, чем результаты регулирования с помощью ПИ и ПИД регуляторов:

- ИНС имеют лучшую производительность благодаря уменьшению: статистической ошибки, максимального перерегулирования, времени нарастания и времени успокоения
- ИНС имеют более чувствительные отклики на нарушения нагрузки для классического ПИ и ПИД-регулятора

3.2 Моделирование системы управления коллекторного двигателя переменного тока на постоянных магнитах

В качестве исследуемого объекта была разработана и собрана простейшая модель коллекторного двигателя постоянного тока на постоянных магнитах в среде MATLAB Simscape. Блоки в библиотеке Simscape представляют реальные физические компоненты. Следовательно, сложные много доменные модели могут быть построены без необходимости выводить математические уравнения из физических принципов.

Простейшая электрическая схема коллекторного двигателя постоянного тока на постоянных магнитах представлена на рисунке 3.7.

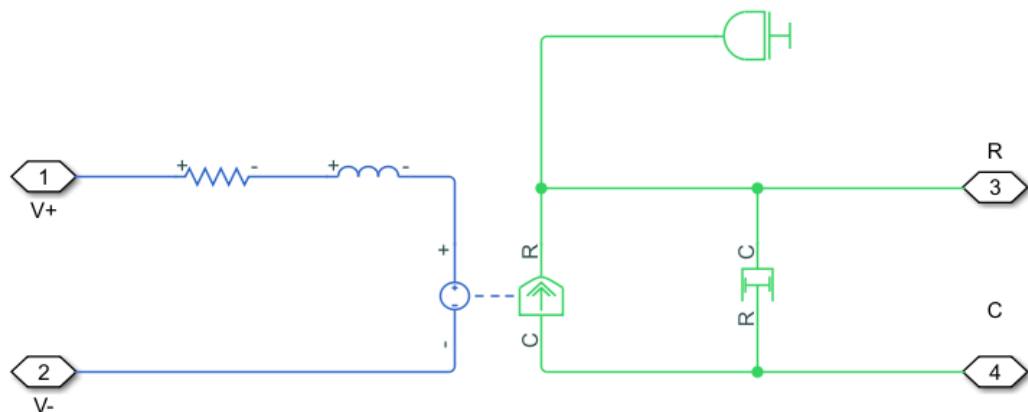


Рис. 3.7 - Электрическая схема КДПТ на постоянных магнитах

Для данной модели подставляем рассчитанные ранее значения инерции, активного и индуктивного сопротивлений, коэффициента пропорциональности, а также коэффициента успокоения.

Для добавления нелинейности в систему в схему был добавлен нелинейный гаситель колебаний.

Для того чтобы смоделировать реакцию этой системы, необходимо дополнительно добавить сенсорные блоки в модель для имитации измерения различных физических параметров и источник напряжения для обеспечения возбуждения двигателя. Кроме того, необходимы специальные блоки для взаимодействия блоков Simscape с традиционными блоками Simulink, поскольку сигналы Simscape представляют физические величины с единицами измерения, а сигналы Simulink являются безразмерными числами.

Схема двигателя с датчиками и элементами питания представлена на рисунке 3.8.

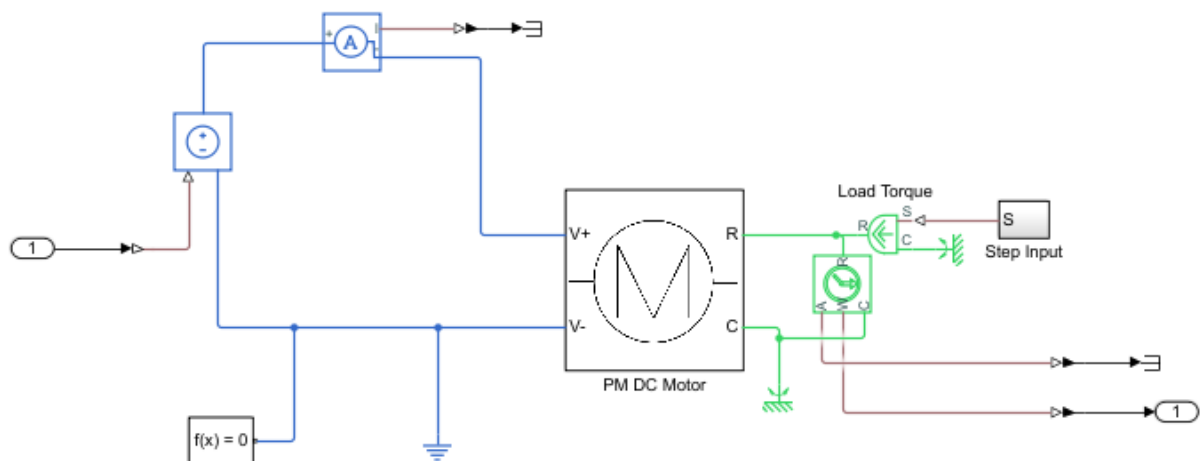


Рис 3.8. Полная электрическая схема КДПТ на постоянных магнитах

Блок идеального датчика скорости вращения представляет собой устройство, которое измеряет разницу в угловом положении и угловой скорости между двумя узлами.

Блоки PS-Simulink преобразуют физические сигналы в выходные сигналы Simulink, в то время как блок Simulink-PS, наоборот, преобразует входной сигнал Simulink в физический сигнал. Эти блоки могут использоваться для преобразования сигналов Simscape, которые представляют физические величины с единицами измерения, в сигналы Simulink, к которым явно не привязаны единицы измерения. Эти блоки, по сути, могут выполнять преобразование единиц измерения между физическими сигналами и сигналами Simulink. В нашем случае мы можем оставить единицы не определенными, поскольку вход и выход каждого из блоков преобразования имеют одинаковые единицы. В общем, набор блоков Simscape используется для моделирования физической установки, в то время как набор блоков Simulink используется для моделирования контроллера.

Далее в схему был добавлен блок генерации сигнала, который можно настроить таким образом, чтобы можно было настроить произвольную траекторию подачи напряжения, блок задания наброса нагрузки и блок с ‘белым шумом’ – для того, чтобы сделать систему более нелинейной. Данная модель представлена на рисунке 3.9.

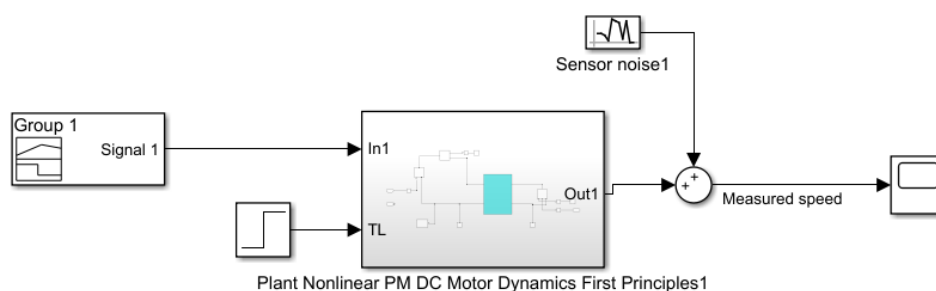


Рис 3.9. Модель КДПТ на постоянных магнитах с блоками задания сигналов

С целью обучения искусственной нейронной сети необходимо вывести линейную модель двигателя. В данной работе это было сделано двумя разными способами для получения более достоверных данных с помощью программных средств MATLAB.

Для получения первой передаточной функции модели был использован инструмент “идентификация системы”. В схему было добавлено два вывода в программную среду для напряжения и скорости вращения соответственно, а также убраны все нелинейные элементы. Схема изображена на рисунке 3.10.

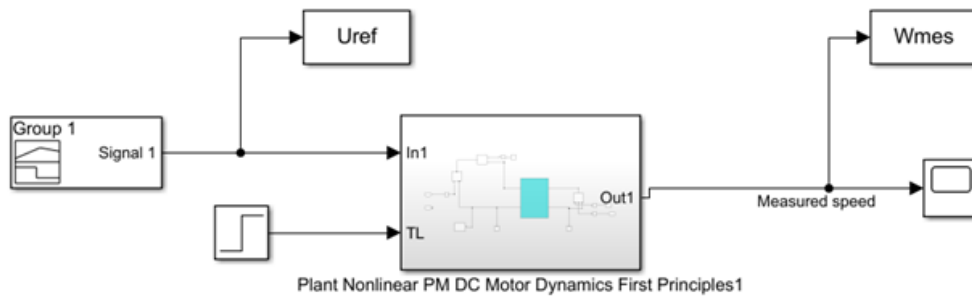


Рис 3.10. Схема управления КДПТ на постоянных магнитах с выводами двумя выводами в программную среду

После чего с помощью инструмента “идентификация системы” были получены данные для построения передаточной функции. Графические результаты идентификации системы показаны на рисунке 3.11.

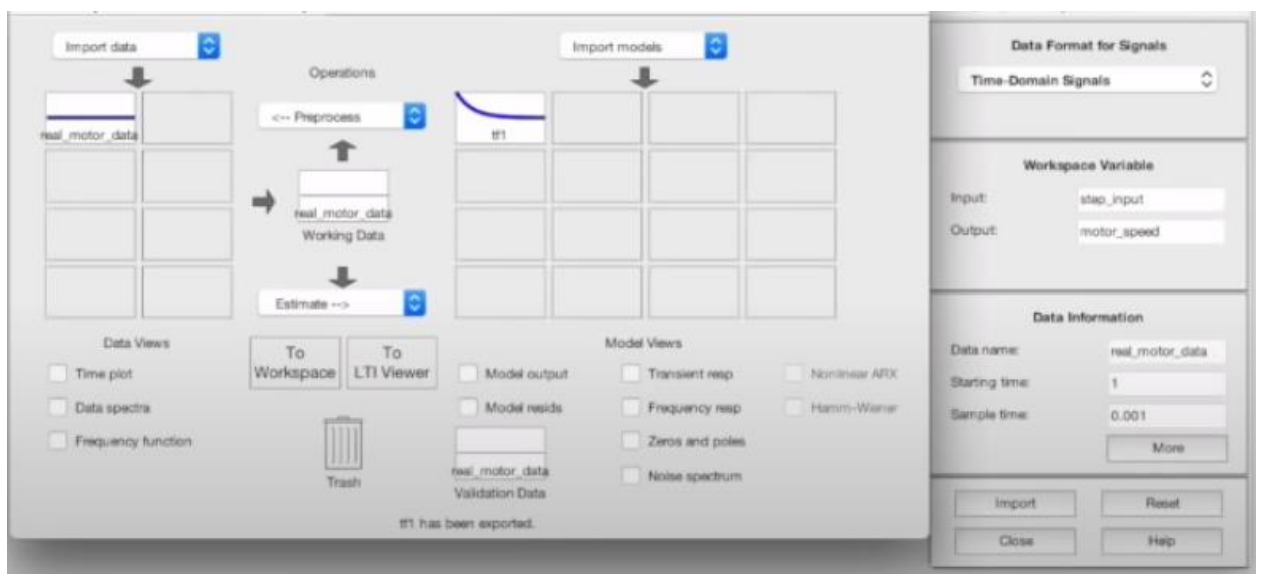


Рис 3.11. Графические результаты идентификации системы

Передаточная функция была получена посредством вывода в консоль MATLAB команды tf1, которая отображает данные, записанные в файл tf1, которые отображены на рисунке 3.12.

```
tf1 =  
  
From input "u1" to output "y1":  
    6.649 s + 2.415  
-----  
s^2 + 0.8994 s + 0.2043
```

Рис. 3.12. Результат работы инструмента “идентификация системы”

Второй способ заключается в непосредственной линеаризации модели посредством добавления входа и выхода открытого контура с помощью точек линейного анализа и дальнейшего анализа системы. Результаты такой линеаризации представлены на рисунке 3.13.

```
Linearization Result:  
  
From input "u1" to output "y1":  
    1280  
-----  
s^2 + 190.4 s + 106.7
```

Рис. 3.13. Результат работы инструмента “линейный анализ”

Т.к. данные для передаточных функций были вычислены двумя различными способами и дали не идентичные результаты – необходимо проверить правильность линейных передаточных функций. Для этого необходимо сравнить выходную скорость для двух линейных моделей и скорость для построенной ранее нелинейной модели при одинаковом входном сигнале, без наброса нагрузки. Схема для снятия этих данных приведена на рисунке 3.14.

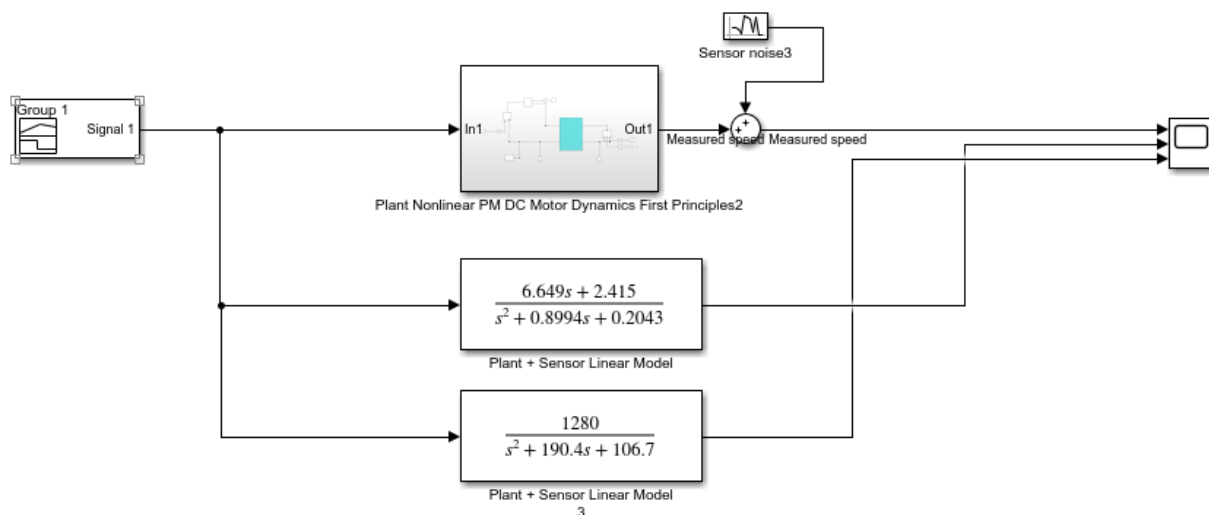


Рис. 3.14. Схема с двумя линейризованными передаточными функциями и разработанной нелинейной моделью двигателя

Данные, полученные с осциллограммы приведены на рисунке 3.15.

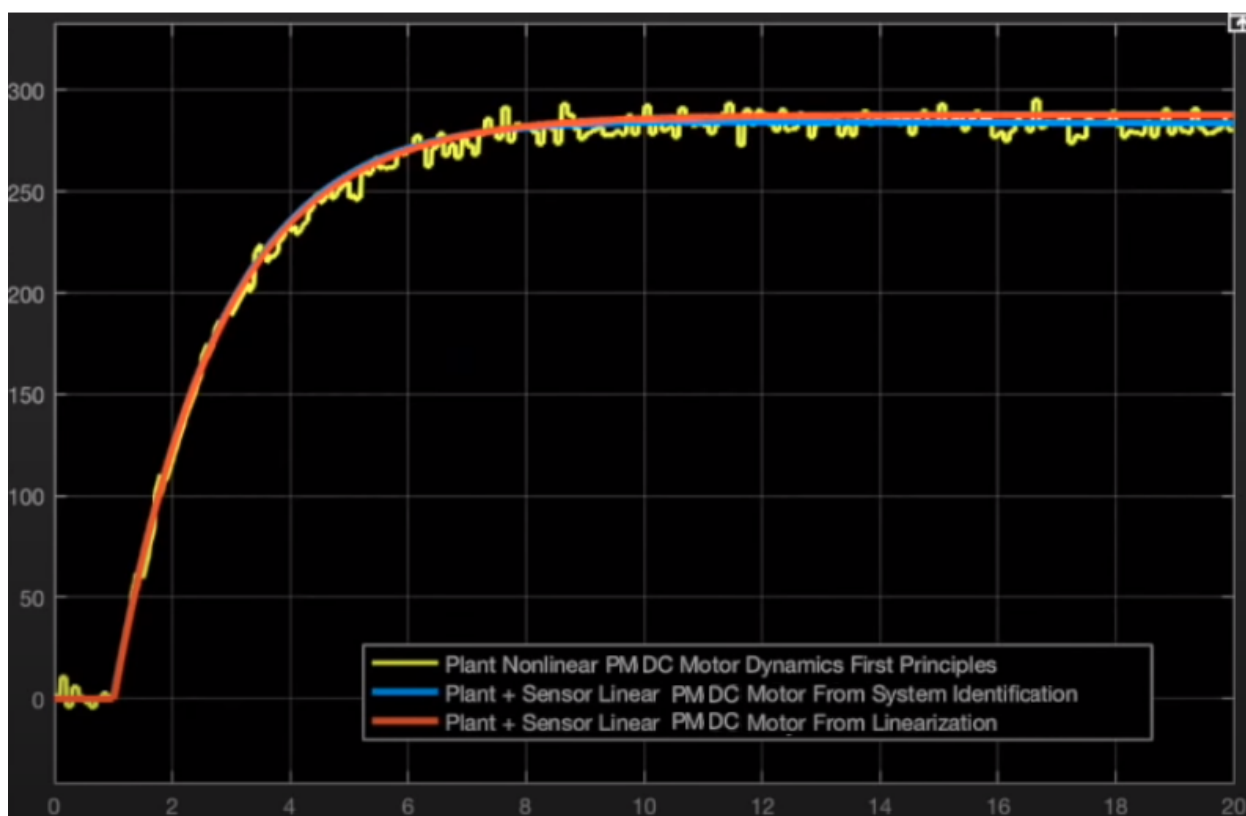


Рис. 3.15. Осциллограмма выходных скоростей

По данным с рисунка 3.15 видно, что обе линеаризованные модели достаточно точно описывают траекторию нелинейной модели, а значит обе могут использоваться для обучения искусственной нейронной сети.

Для выбранной ранее траектории исследуемого объекта управления с помощью консоли рабочего пространства MATLAB были получены начальные данные с первой линеаризованной передаточной функции, так как она показала наименьшую ошибку от нелинейной траектории.

Модель ранее разработанного регулятора с использованием искусственной нейронной сети (рис 2.1) показана на рисунке 3.16.

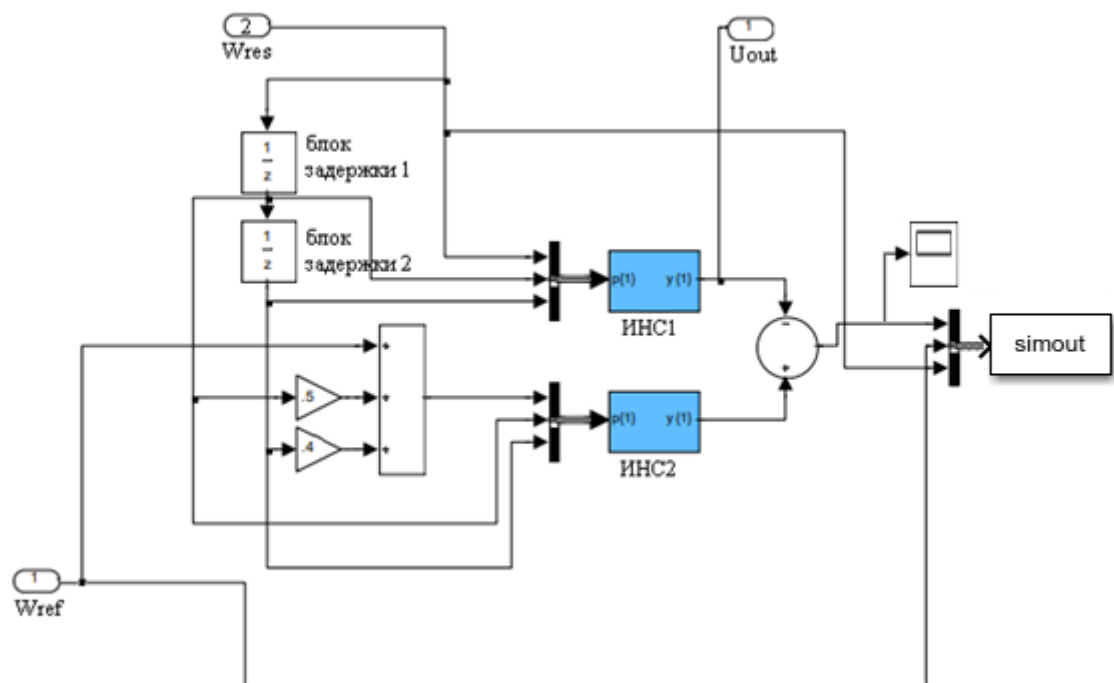


Рис. 3.16. Модель регулятора на ИНС

Блоки ИНС1 и ИНС2 представлены в виде двух s-функций

Финальная схема управления коллекторного двигателя постоянного тока с постоянными магнитами и объявленной ранее траекторией (рис 2.2) представлена на рисунке 3.17.

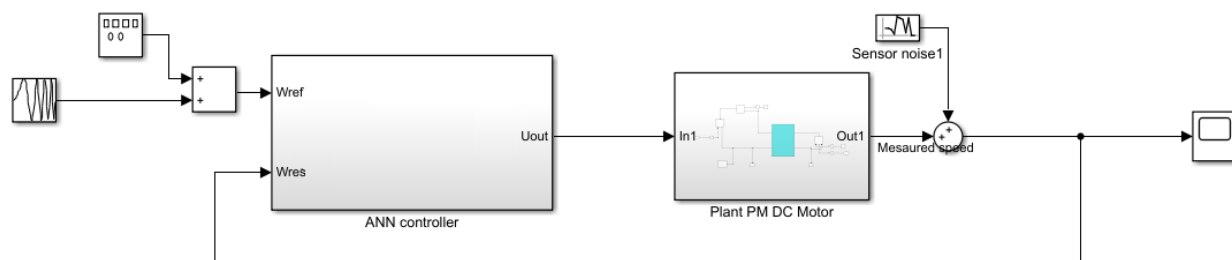


Рис. 3.17. Схема управления КДПТ с постоянными магнитами

Подробный анализ и разбор снятых данных с схемы управления представлен в следующей главе.

4. ОПИСАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В этой главе представлены результаты экспериментального исследования адаптивного контроллера на основе искусственной нейронной сети для коллекторного двигателя постоянного тока на постоянных магнитах, который был разработан в предыдущих главах. А также были проанализированы результаты типичных экспериментальных случаев, полученных из адаптивного управления двигателем постоянного тока. Для сравнения, результаты с адаптивного регулятора с использованием искусственной нейронной сети сравнивались с обычными ПИ и ПИД регуляторами. Все графики в данной главе были построены с помощью браузера рабочего пространства MATLAB и инструментов работы с графиками PLOTS.

4.1. Проверка правильности модели двигателя с управлением искусственной нейронной сетью

После проведения автономной подготовки данных для модели с искусственной нейронной сетью с заданной траекторией скорости, показанной на рисунке 2.2, были проведены некоторые испытания для проверки достоверности модели двигателя с искусственной нейронной сетью. Чтобы проверить правильность системы управления и стабилизации, в Simulink была изменена и настроена приведенная выше схема. В этой схеме двигатель и модель искусственной нейронной сети одновременно работали в разомкнутом контуре, следуя известной произвольной траектории. Эта траектория отличается от траектории, используемой для обучения структуры искусственной нейронной сети. Как реакция двигателя, так и реакция искусственной нейронной сети показаны на рисунке 4.1. Ошибка между двумя траекториями показана на рисунке 4.2.

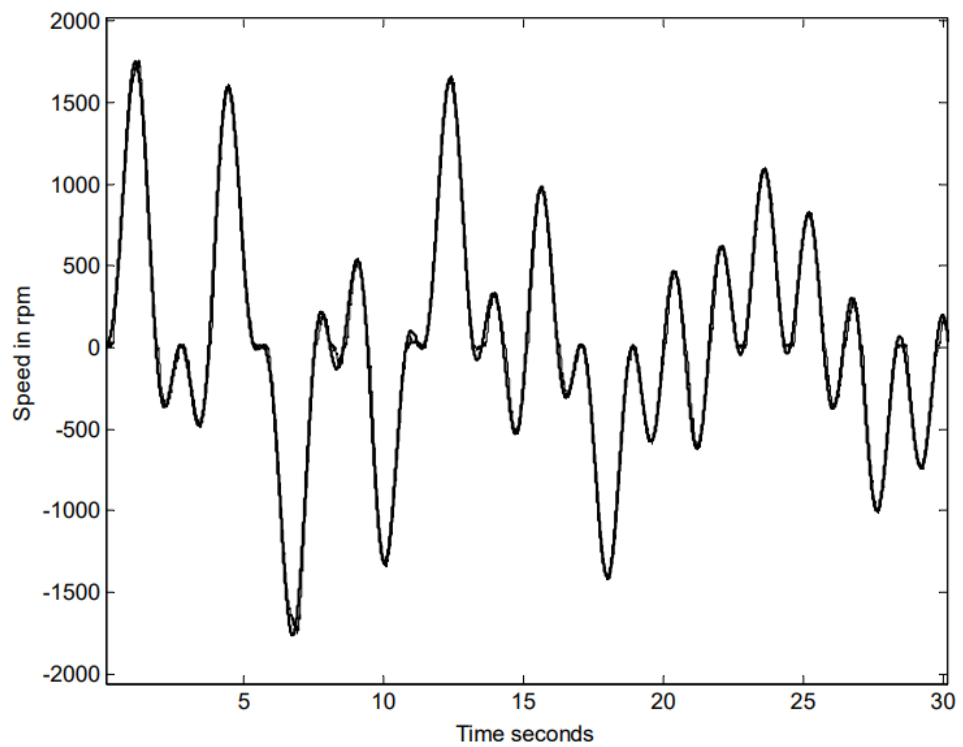


Рис 4.1 Выходная траектория скорости двигателя и модели ИНС

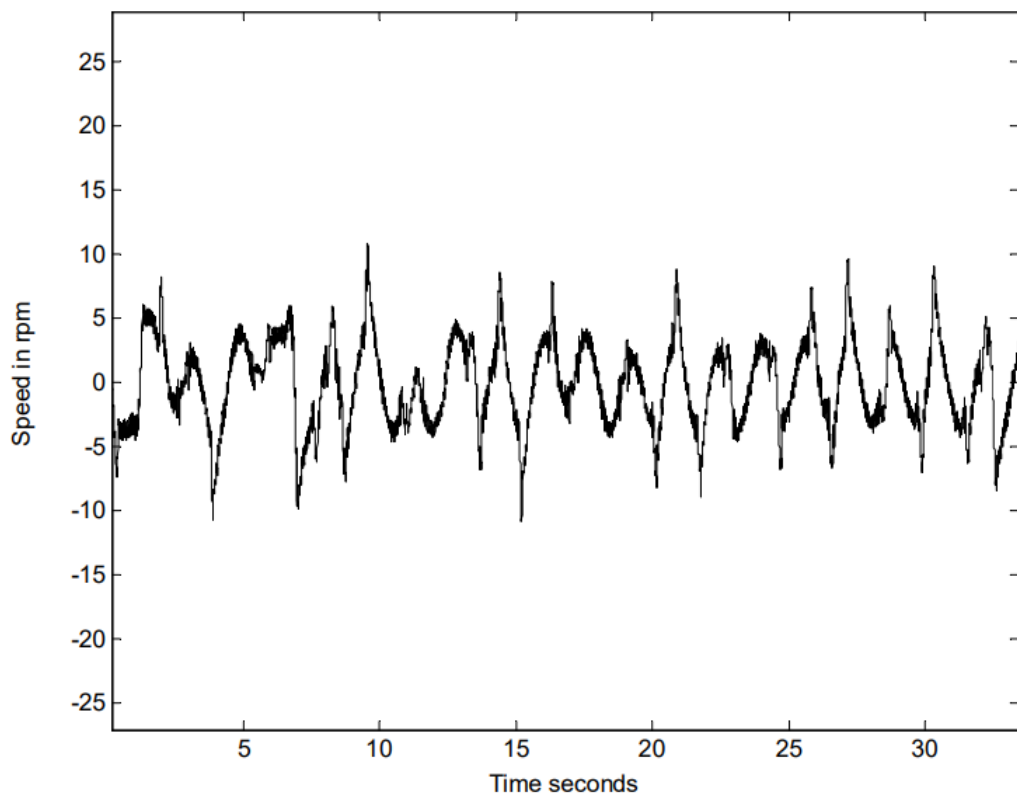


Рис. 4.2 Ошибка между двумя выходными траекториями

При сравнении двух траекторий, траектории выходной скорости двигателя и траектории выходной скорости модели привода двигателя ИНС, как показано на рисунке 4.1, видно, что две траектории очень близки друг к другу. Это указывает на то, что модель привода двигателя искусственной нейронной сети, которая была создана для имитации модели двигателя, достаточно точно описывает реальный двигатель. Более того, это можно проверить, наблюдая ошибку между двумя траекториями. Эта ошибка представлена на рис. 4.2. В то время как двигатель работал на скорости более 1500 об / мин, ошибка в скорости составляет менее 10 об / мин, что является очень хорошим результатом для регулирования.

4.1.1 Отклик систем на различные ступени эталонной скорости при полной нагрузке

Для получения данных графиков была использована модель с рисунка 3.17 с выводами в рабочее пространство MATLAB. Графики 4.3 – 4.5 показывают скоростные характеристики адаптивного контроллера на основе искусственной нейронной сети, а также ПИД и ПИ регуляторов соответственно. На этих рисунках пунктирные кривые представляют исходные данные $\omega_{ref}^*(n)$, сплошные кривые представляют реакцию систем автоматического управления.

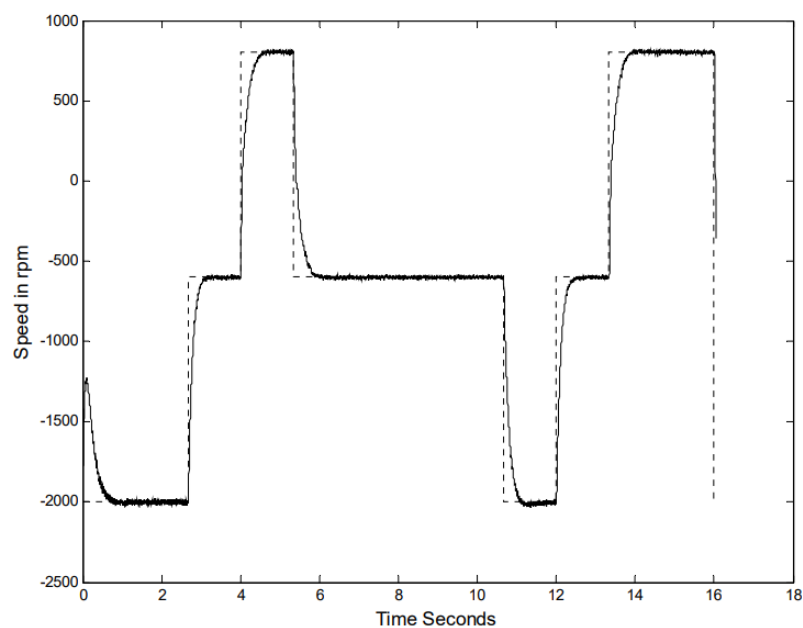


Рис. 4.3 Экспериментальный результат контроллера на основе ИНС с изменениями эталонной скорости

Из рисунков видно, что адаптивный контроллер на основе искусственной нейронной сети работал намного лучше, чем два других контроллера. И у ПИД и у ПИ регуляторов возникла проблема перерегулирования при изменении эталонной скорости.

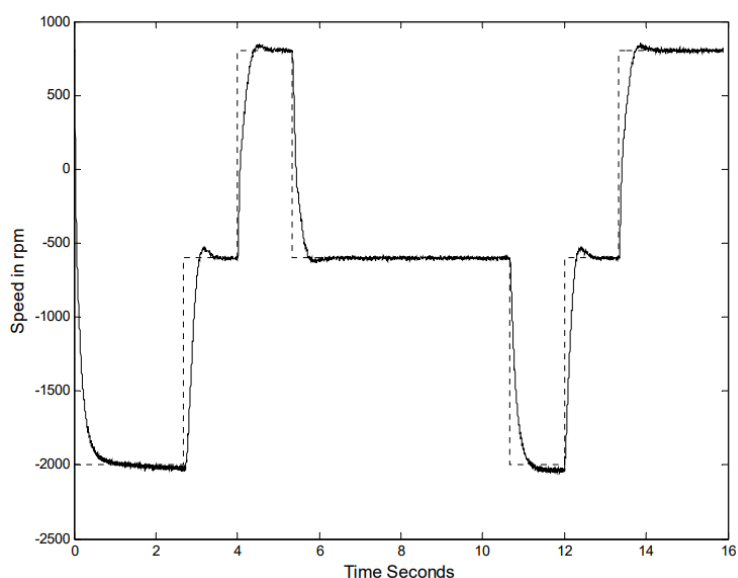


Рис. 4.4 Экспериментальный результат ПИД-регулятора с изменениями эталонной скорости

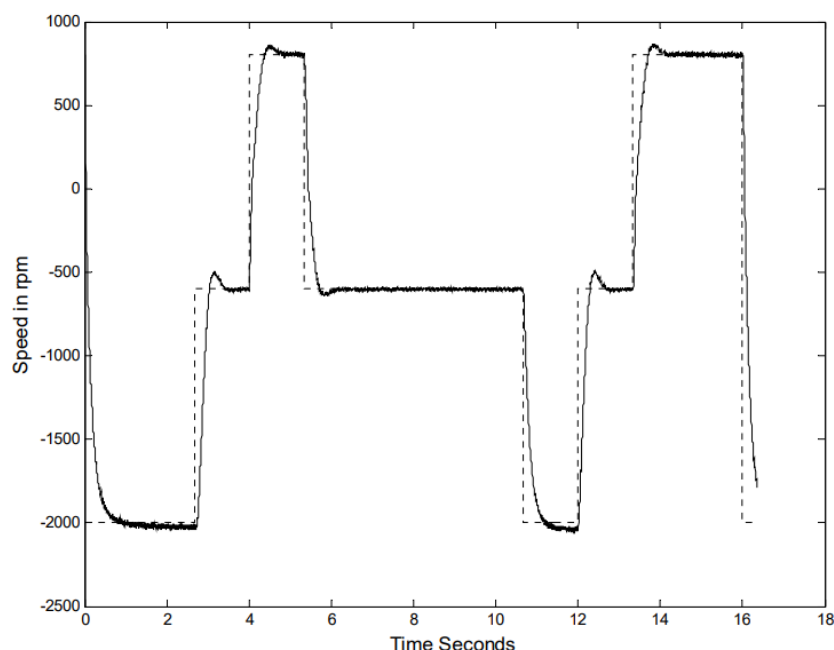


Рис. 4.5 Экспериментальный результат ПИ-регулятора с изменениями эталонной скорости

Контроллеры ПИД и ПИ могут быть перепроектированы для более перегруженного состояния, чтобы уменьшить перерегулирование, но в таких случаях было замечено, что время нарастания становилось более медленным. Можно также заметить, что показатели стационарных ошибок искусственной нейронной сети также были значительно лучше, чем для ПИ и ПИД регуляторов. Реакция скорости адаптивного контроллера на основе искусственной нейронной сети была более устойчивой к изменению рабочих условий пошаговых изменений эталонной скорости из-за оперативной настройки весов и смещений в модели искусственной нейронной сети.

4.1.2 Отклики на скоростную траекторию

Были проведены некоторые тесты для получения фактических и заданных скоростных траекторий для входа синусоидального типа. На рисунках 4.6 – 4.8 показаны фактическая и заданная траектории скорости адаптивного контроллера на основе искусственной нейронной сети, ПИД-регулятора и ПИ-регулятора соответственно.

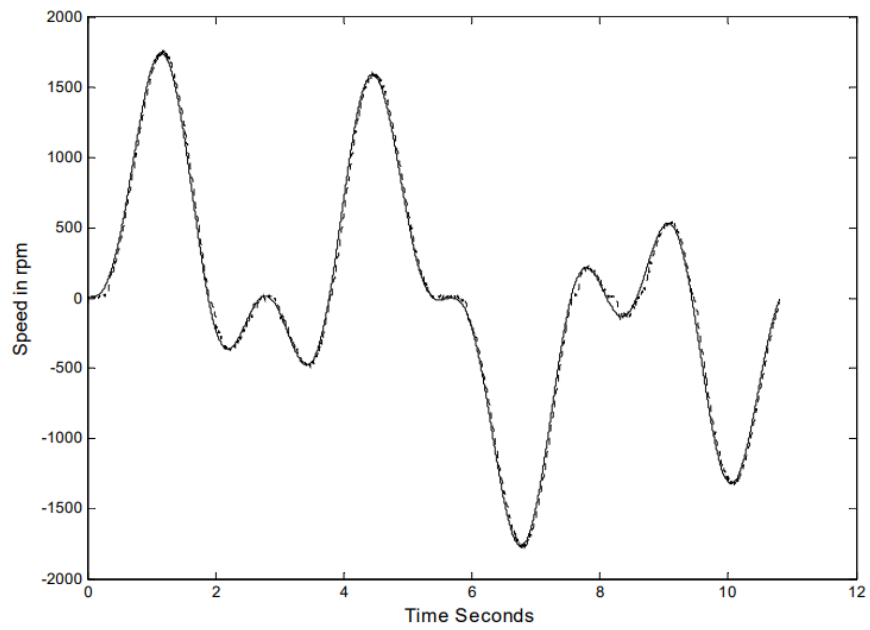


Рис. 4.6 Реакция контроллера на основе ИНС с изменениями в эталонной дорожке скорости синусоидального типа

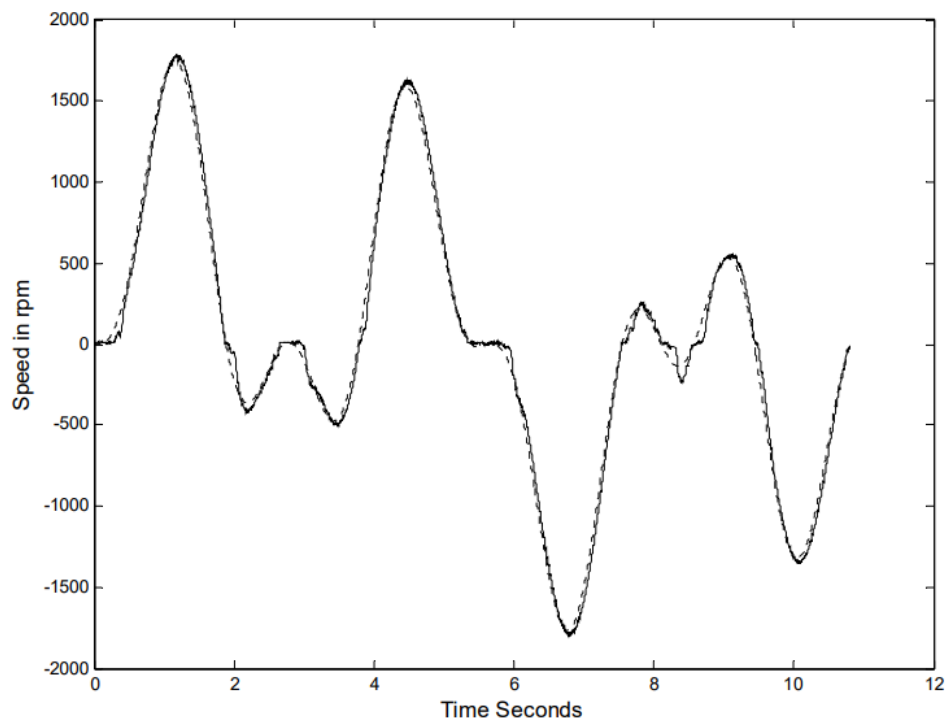


Рис. 4.7 Реакция ПИД-регулятора на изменения в синусоидальной эталонной скорости

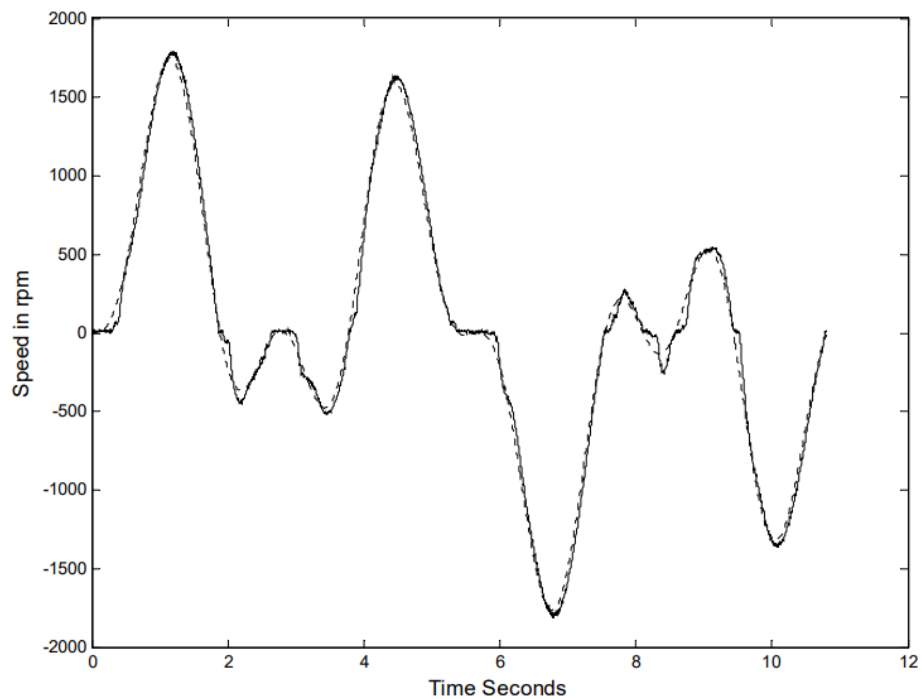


Рис. 4.8 Реакция ПИ-регулятора с изменениями в синусоидальной опорной скорости трека

4.1.3 Отслеживание производительности систем с добавленным шумов

Другой набор испытаний был выполнен для изучения влияния шума измерения на производительность систем. Белый шум вводили в систему, добавляя его к значениям $\omega(n+1)$, которые были измерены с помощью аналого-цифрового преобразователя. На следующих рисунках 4.9, 4.10 и 4.11 показаны соответственно фактическая и заданная траектории скорости адаптивного контроллера на основе искусственной нейронной сети, ПИД-регулятора и ПИ-регулятора после введения шума в системы.

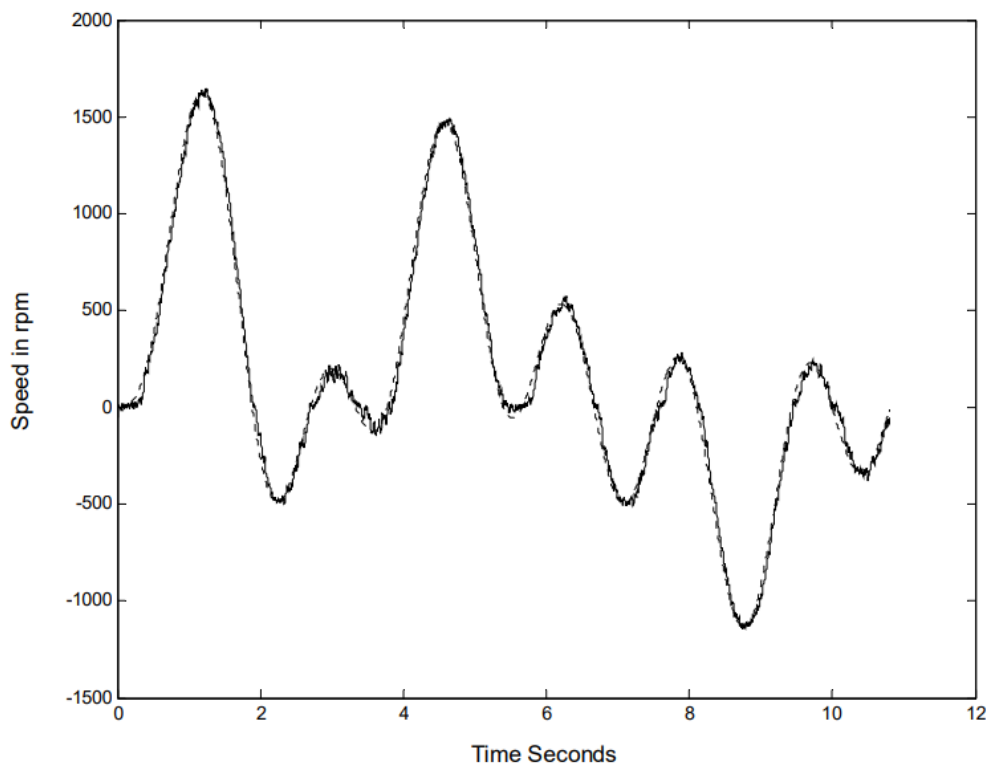


Рис. 4.9 Отслеживание производительности регулятора на основе ИНС с шумом

Как видно из рисунков, контроллер на основе искусственной нейронной сети показывает высокую точность отслеживания на всех скоростях по сравнению с контроллерами ПИД и ПИ, когда в системы вводился шум. Максимальная ошибка трассировки составляет 40 об / мин или 2,5% от максимальной скорости траектории для системы под управлением ИНС. Они сравниваются с 95 об / мин (6%) и 130 об / мин (8%) для ПИД и ПИ контроля соответственно. Это отображает возможность подавления шума регулятора на основе искусственной нейронной сети.

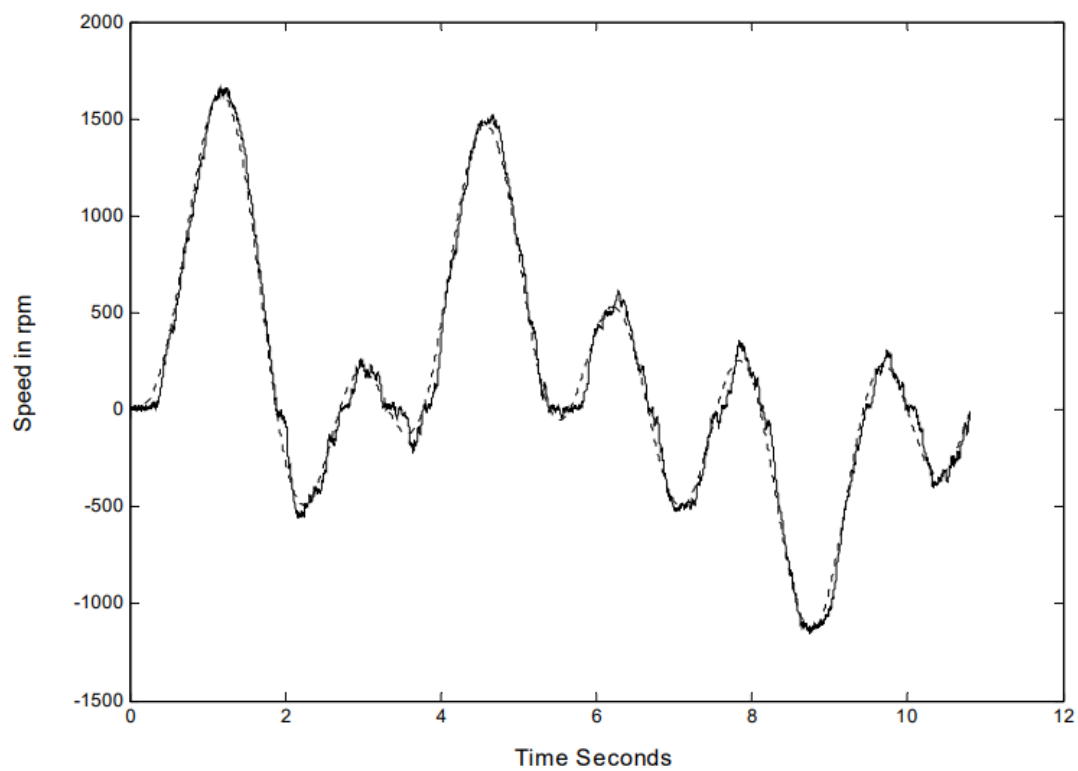


Рисунок 4.10 Отслеживание производительности ПИД-регулятора с шумом

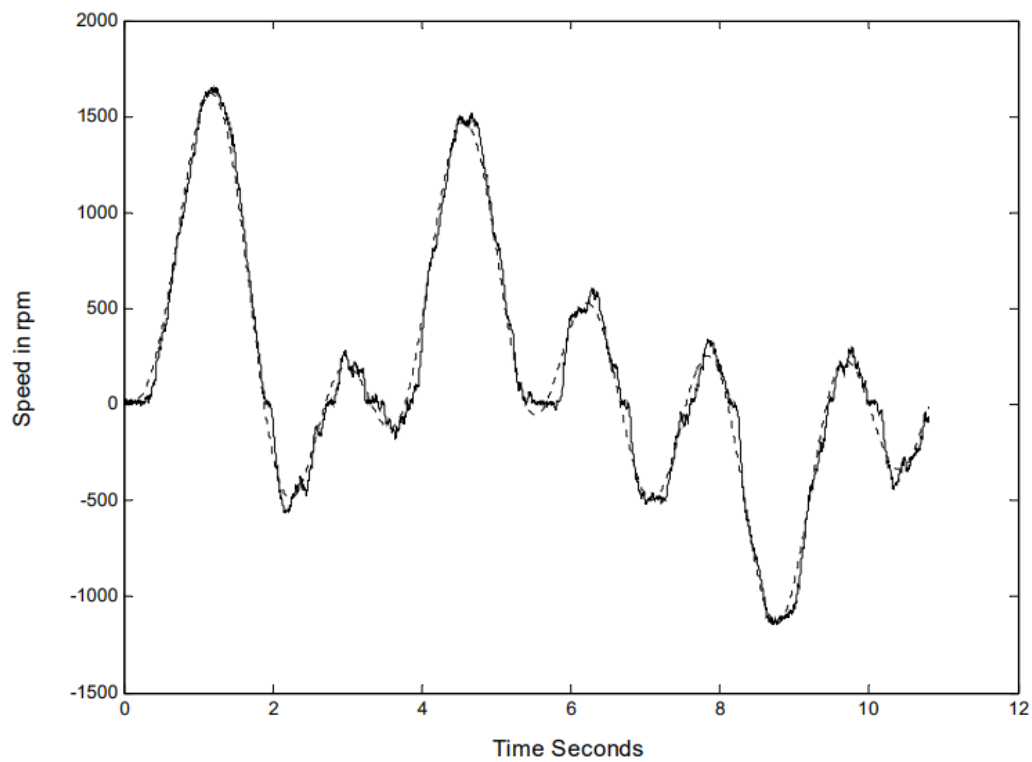


Рис. 4.11. Отслеживание производительности ПИ-контроллера с шумом

4.1.4 Реакции с набросом нагрузки

Эти тесты были выполнены для изучения эффекта наброса нагрузки системы. На рисунках 4.12, 4.13 и 4.14 показаны скоростные характеристики адаптивного контроллера на основе искусственной нейронной сети, ПИД-регулятора и ПИ-регулятора соответственно, когда двигатель работал в режиме холостого хода, и через некоторое время номинальная нагрузка (одинаковая нагрузка применяется к каждому регулятору) набрасывается.

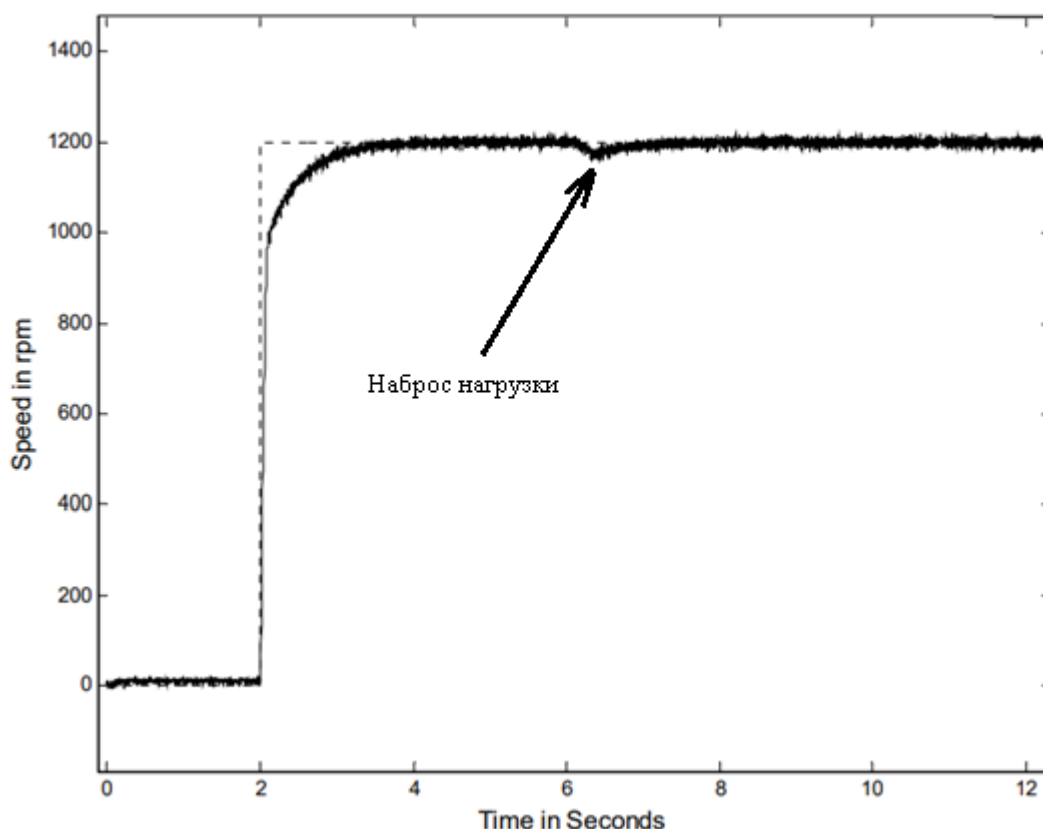


Рис. 4.12 Скорость регулятора на основе ИНС с набросом нагрузки

Из рисунков видно, что отклик системы контроллера на основе искусственной нейронной сети превосходит по качеству два других контроллера. Искусственная нейронная сеть корректирует свои веса и задержки на это изменяющееся условие наброса нагрузки и обеспечивает соответствующее управляющее напряжение, чтобы приводная система реагировала в соответствии с заданной скоростью.

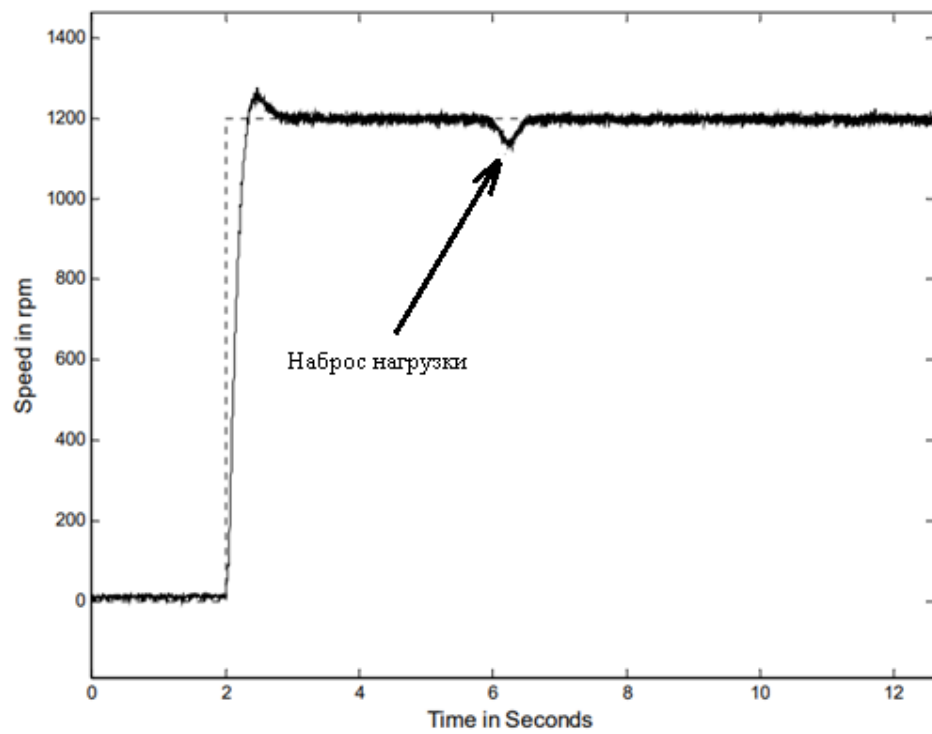


Рис. 4.13 Скорость ПИД-регулятора с пошаговым изменением нагрузки

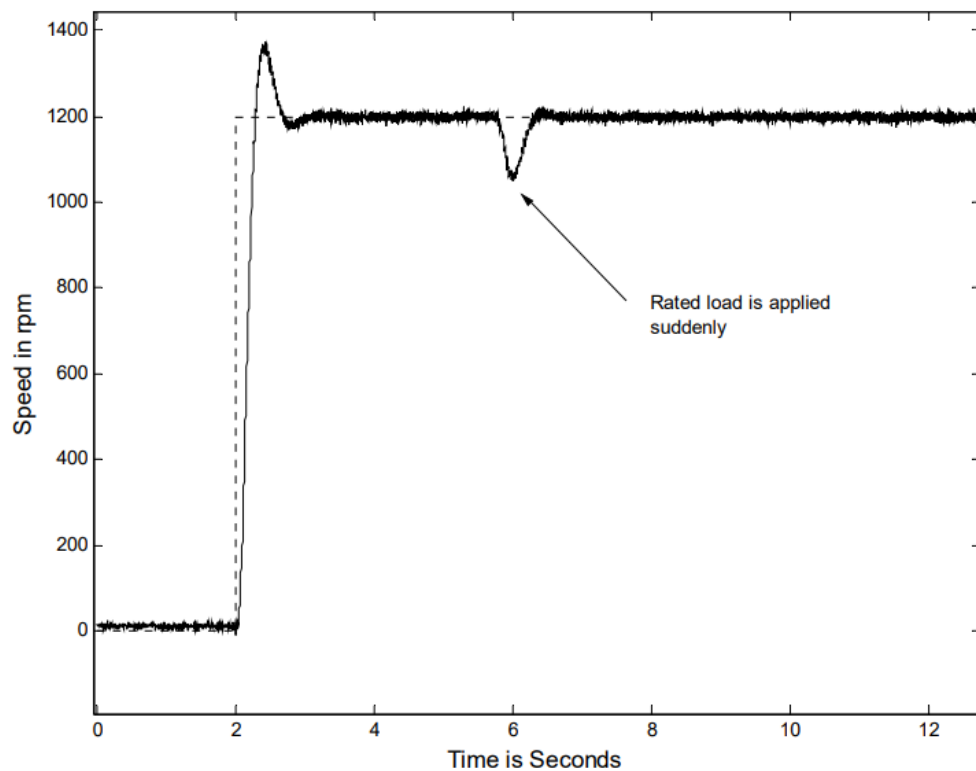


Рис. 4.14 Скорость ПИ-регулятора с пошаговым изменением нагрузки

В настоящей работе была осуществлена практическая разработка, реализация и эксперименты для адаптивного контроллера на основе искусственной нейронной сети. Из всех проведенных испытаний видно, что контроллер на основе искусственной нейронной сети превосходит ПИД и ПИ регуляторы. Как и ожидалось, благодаря оперативному обновлению весов и смещений, и адаптивной скорости обучения, предлагаемый контроллер становится нечувствительным к шуму и внезапным изменениям нагрузки и, таким образом, довольно точно отслеживает необходимую скорость. Также можно заметить, что перерегулирование скорости контроллера на основе искусственной нейронной сети значительно ниже, чем у других регуляторов. Поскольку искусственная нейронная сеть может эффективно представлять нелинейные аспекты, адаптивный контроллер на основе искусственной нейронной сети также обладает потенциалом лучшей компенсации нелинейности двигателя, которой нет у двух других регуляторов.

Также было проведено несколько серий экспериментов и исследований для оценки контроллера на основе искусственной нейронной сети с двумя другими контроллерами ПИД и ПИ. Сначала двигатель постоянного тока работал в разомкнутом контуре, чтобы получить некоторые фактические данные для обучения модели двигателя искусственной нейронной сети. После этого скорость двигателя контролировалась с использованием трех контроллеров в аналогичных условиях, и результаты работы в таких режимах были проанализированы.

5. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Целью данного раздела является обоснование целесообразного использования научно-исследовательского проекта, выполняемого в рамках магистерской диссертации, при этом рассматриваются планово-временные и материальные показатели процесса проектирования.

Объектом исследования, данного научно-исследовательского проекта, является автоматическая система регулирования скорости вращения коллекторного двигателя.

В настоящее время в быту и на производстве широко используются коллекторные двигатели. Их преимущество обусловлено, в первую очередь, простотой схемы управления, так как здесь нет необходимости использовать дорогостоящие частотные преобразователи, но в современном мире простые системы управления не идеальны для управления, так как существует множество различных задач в робототехнике и системах управления движением исполнительных органов рабочих машин, где необходимо идеально стабилизировать скорость вращения двигателя при изменяющемся моменте нагрузки.

В данной работе используется система управления двигателя на базе искусственной нейронной сети. Система специально разработана для управления коллекторным двигателем постоянного тока с постоянными магнитами. Нейронная сеть состоит из одного входного слоя и двух скрытых слоев, за которыми следует выходной слой. Каждый слой состоит из нескольких нейронов, у которых, в свою очередь, имеют две основные функции. Первая заключается в суммировании всех выходов из предыдущих слоев, умноженных на соответствующие веса, а вторая заключается в применении сигмоидальной функции к этой сумме.

Анализ преимуществ и недостатков системы управления двигателя с использованием искусственной нейронной сети.

Преимущества:

- Быстрая реакция на изменения в объекте управления;
- Минимальная статистическая ошибка, перерегулирование и время нарастания и успокоения;
- Возможность работы при наличии большого числа неинформативных, шумовых входных сигналов.

Недостатки:

- Нейронные сети позволяют найти только около идеальное решение, и соответственно неприменимы для задач, в которых требуется высокая точность;
- Функционируя по принципу черного ящика, они также неприменимы в случае, когда необходимо объяснить причину принятия решения;
- Относительно высокая вычислительная стоимость процесса обучения нейронной сети как по времени, так и по объему занимаемой памяти.

Внедрение такой системы позволит увеличить производительность системы и уменьшению перерегулирования и статистической ошибки, что в свою очередь улучшит систему стабилизации двигателя и уменьшит потребление электрической энергии. Поэтому использование искусственной нейронной сети в высокопроизводительных моторных приводах может сделать систему надежной, эффективной, и невосприимчивы к нежелательным условиям эксплуатации.

Таким образом, потенциальными потребителями результатов этого исследования являются предприятия, которые занимаются управлением

сложных нелинейных устройств, таких как различного рода роботы на производствах.

5.1 Сегментирование рынка

Сегментируем рынок по следующим критериям: размер компании заказчика, вид регулятора для системы управления двигателем, результаты сегментирования представлены в таблице 5.1

Таблица 5.1 – Карта сегментирования производственного рынка по использованию типа регуляторов для двигателей.

	Вид регулятора			
	ПИ регуляторы	ПИД регуляторы	Нечёткие регуляторы	Искусственные нейронные сети
Крупные	Фирма А			Фирма Г
Средние	Фирма А	Фирма Б		
Мелкие		Фирма Б	Фирма В	Фирма В

Описание участников рынка:

Фирма А: АО «АЛРОСА» российская группа алмазодобывающих компаний, занимающая лидирующую позицию в мире по объёму добычи алмазов. Корпорация занимается разведкой месторождений, добычей, обработкой и продажей алмазного сырья.

Фирма Б: ПАО «Иркутскэнерго» — российская энергетическая компания, одна из четырёх энергокомпаний, независимых от РАО «ЕЭС России». Управляет работой ГЭС и ТЭС, производит электрическую и тепловую энергию, которую поставляет потребителям и на оптовый рынок электроэнергии.

Фирма В: ПАО «ЧЗПСН» — это небольшая компания, которая занимается производством строительных конструкций и материалов. Компания производит гофрированную сталь, сэндвич-панели, металлические и сборные конструкции.

Фирма Г: ОАО «ТГК-2» компания поставляет клиентам тепловую и электрическую энергию в Северо-Западном и Центральном федеральном округах, является одной из самых крупных теплоэнергетических компаний.

Результат сегментирования: в главных секторах рынка достаточно равномерно распределено использование любого рода регуляторов. Как видно из таблицы 5.1 наиболее предпочтительной считается рекомендация регуляторов, основанных на искусственных нейронных сетях, средним фирмам. В перспективе наиболее привлекательным сегментом для регуляторов с нейронными сетями являются небольшие, прогрессивные, активно развивающиеся фирмы.

5.2 FAST-анализ

Выбор объекта FAST-анализа: объектом FAST-анализа является система управления КДПТПМ (коллекторный двигатель постоянного тока с постоянными магнитами)

Описание главной, основных и вспомогательных функций, выполняемых объектом:

Главная функция: управление двигателем.

Основные функции объекта исследования: стабилизация скорости вращения при набросах нагрузки, приведение в работу управляющего объекта.

Вспомогательные функции: обучение управляющей нейронной сети для управления двигателем, анализ обучаемых данных.

Таблица 5.2 – Классификация функций, выполняемых объектом исследования

Наименование детали (узла, процесса)	Количество деталей на узел	Выполняемая функция	Ранг функции		
			Главная	Основная	Вспомогательная
Обучающая искусственная нейронная сеть	-	Обучение управляющей нейронной сети для управления двигателем			*
Коллекторный двигатель	1	Приведение в работу объекта управления		*	
Управляющая искусственная нейронная сеть	-	1) Непосредственное управление двигателем 2) Стабилизация скорости вращения	*	*	
Портативный компьютер	1	Анализ полученных данных с искусственных нейронных сетей			*

Определение значимости выполняемых функций объектом

Строим матрицу смежности и сразу же преобразуем матрицу смежности в матрицу количественных соотношений функций.

Таблица 5.3 – Матрица количественных соотношений

	1	2	3	4	5	Итог	Значимость функции
Функция 1	1	0,5	0,5	0,5	1	3,5	0,14
Функция 2	1,5	1	0,5	1	1,5	5,5	0,22

Функция 3	1,5	1,5	1	1,5	1,5	7	0,28
Функция 4	1,5	1	0,5	1	1,5	5,5	0,22
Функция 5	1	0,5	0,5	0,5	1	3,5	0,14
						25	1

Анализ стоимости функций, выполняемых объектом исследования

Расчет стоимости функций приведен в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Определение стоимости функций, выполняемых объектом исследования

Наименование детали (узла, процесса)	Количество деталей на узел	Функция	Себестоимость, руб. за шт.
Обучающая искусственная нейронная сеть	-	Обучение управляющей нейронной сети для управления двигателем	-
Коллекторный двигатель	1	Приведение в работу объекта управления	16000
Управляющая искусственная нейронная сеть	-	1) Непосредственное управление двигателем 2) Стабилизация скорости вращения	-
Портативный компьютер	1	Анализ полученных данных с искусственных нейронных сетей	64000
			80000

Построение функционально-стоимостной диаграммы объекта и ее анализ.

Информация об объекте исследования, собранная в рамках предыдущих стадий, на данном этапе обобщается в виде функционально-стоимостной диаграммы (ФСД) рисунке 5.1.

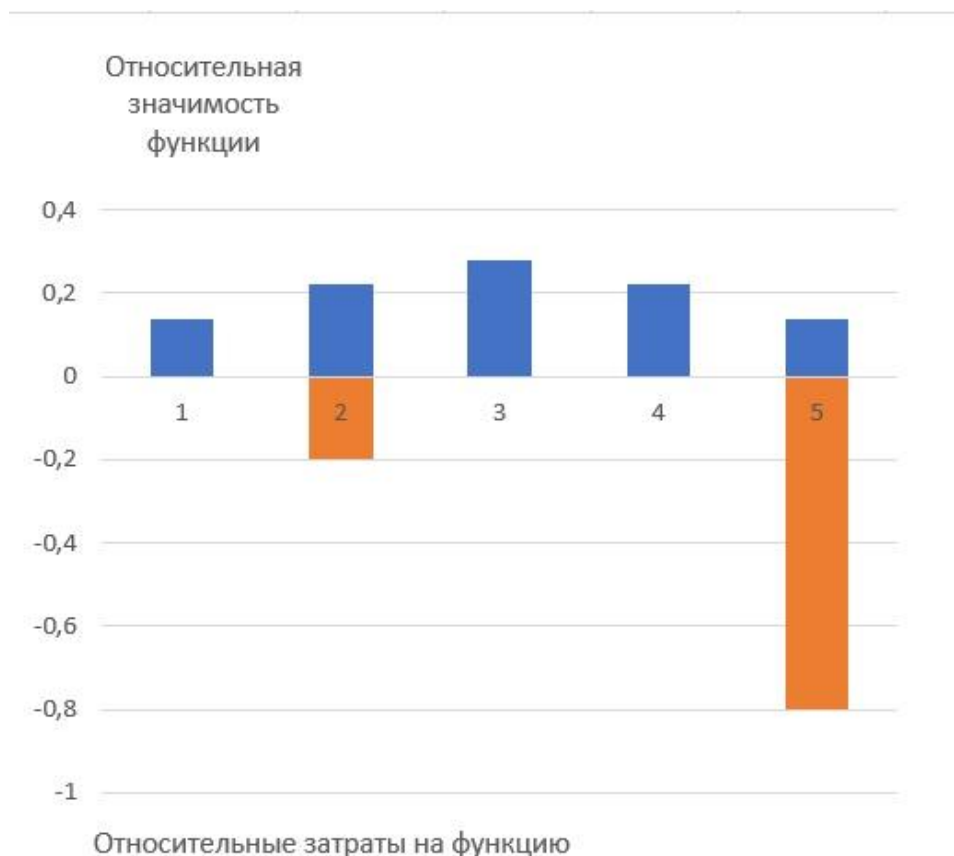


Рис. 5.1. Функционально-стоимостная диаграмма

Анализ приведенной выше ФСД показывает наличие рассогласования по функции 5. Стоит заметить, что портативный компьютер также участвует в выполнении 3, 4 и 1 функций. Необходимо провести работы по ликвидации данной диспропорции.

Оптимизация функций, выполняемых объектом

Экономия будет осуществляться за счет применения принципиально новых конструкторских решений, нового вида микроконтроллеров вместо портативного компьютера.

В результате проведения FAST-анализа выявлено, что снижение затрат на единицу полезного эффекта, достигнуто путем повышения качества при сохранении уровня затрат, а также уменьшения затрат при сохранении уровня качества, сокращения затрат при обоснованном снижении технических параметров до их функционально необходимого уровня. Повышения качества при некотором, экономически оправданном увеличении затрат.

5.3 Диаграмма Исикава

Диаграмма причины-следствия Исикавы (Cause-and-Effect-Diagram) — это графический метод анализа и формирования причинно-следственных связей, инструментальное средство для систематического определения причин проблемы и последующего графического представления [12].

Причинно-следственная диаграмма представлена на рисунке 5.2.

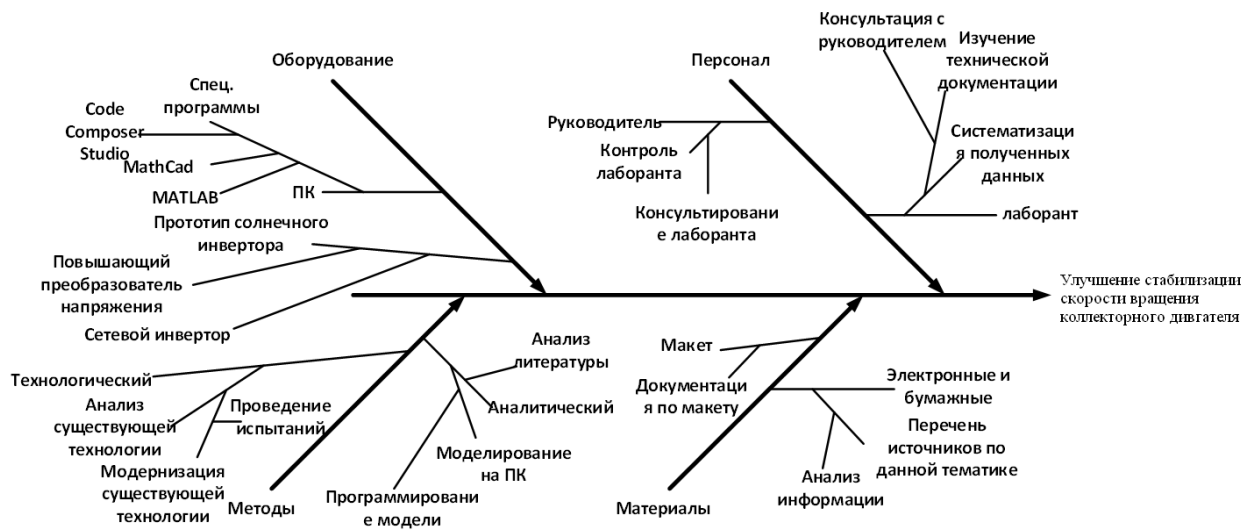


Рис 5.2. Причинно-следственная диаграмма

5.4 Матрица SWOT

SWOT-анализ SWOT - Strengths (сильные стороны), Weakness (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – анализ является инструментом стратегического менеджмента. Представляет собой комплексное исследование технического проекта.

SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта. Для проведения SWOT-анализа составляется матрица SWOT, в которую записываются слабые и сильные стороны проекта, а также возможности и угрозы.

Сильные стороны. Сильные стороны – это факторы, характеризующие конкурентоспособную сторону проекта

1. Энергоэффективность;
2. Текущая доля на рынке;
3. Более высокая производительность.

Слабые стороны. Слабость – это недостаток, упущение или ограниченность научно-исследовательского проекта, которые препятствуют достижению его целей.

1. Сложность проектирования;
2. Чувствительность к ошибкам в начальных данных;
3. Необходимость в больших вычислительных мощностях.

Возможности. Возможности включают в себя любую предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды проекта.

Угроза представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды проекта, которые имеют разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем.

При составлении матрицы SWOT удобно использовать следующие обозначения:

С – сильные стороны проекта;

Сл – слабые стороны проекта;

В – возможности;

У – угрозы;

Таблица 5.5 Матрица SWOT

	Сильные стороны проекта: С1. Высокая энергоэффективность. С2. Текущая доля на рынке С3. Высокая производительность	Слабые стороны проекта: Сл1. Сложность проектирования Сл2. Чувствительность к ошибкам в начальных данных Сл3. Необходимость в больших вычислительных мощностях
Возможности: В1. Появление дополнительной автоматизированной системы управления В2. Снижение стоимости на электроэнергию и материалы, используемые при научных исследований В3. Развитие технологий в данной отрасли В4. Повышение стоимости	В1С1С2С3; В2С1С3; В3С3; В4С1С2С3;	В1Сл2; В2Сл1Сл2; В3Сл2; В4Сл2;
Угрозы: У1. Отсутствие спроса на технологию	У1С1С3;	У1Сл2;

У2. Развитая конкуренция технологий производства		У2С2;	У2Сл1Сл2;
У3. Угрозы выхода из строя оборудования		У3С2;	У3Сл2;
У4. Введения дополнительных государственных требований к стандартизации и сертификации продукции		У4С3	У4Сл1Сл2Сл3;

На основании матрицы SWOT строятся интерактивные матрицы возможностей и угроз, позволяющие оценить эффективность проекта, а также надежность его реализации.

При построении интерактивных матриц используются следующие обозначения:

С – сильные стороны проекта;

Сл – слабые стороны проекта;

В – возможности;

У – угрозы;

«+» – сильное соответствие

«-» – слабое соответствие;

Таблица 5.6 – Интерактивная матрица возможностей.

Возможности	Сильные стороны проекта			
		С1	С2	С3
	В1	+	+	+
	В2	+	-	+
	В3	-	+	+
	В4	+	+	+
	Слабые стороны проекта			
		Сл1	Сл2	Сл3
	В1	-	+	-
	В2	+	+	-

	B3	-	+	-
	B4	-	+	-

Таблица 5.7 – Интерактивная матрица угроз

Возможности	Сильные стороны проекта			
		C1	C2	C3
	Y1	+	-	+
	Y2	-	-	-
	Y3	-	-	-
	Y4	-	-	+
	Слабые стороны проекта			
		Сл1	Сл2	Сл3
	Y1	-	+	-
	Y2	+	+	-
	Y3	-	+	-
	Y4	+	+	+

В результате проведения SWOT-анализа были выявлены как сильные, так и слабые стороны технического проекта. Данный технический проект имеет несколько важных преимуществ, таких как внедрение продукта на мировой уровень, в различные технологические процессы, которые обеспечат повышение производительности, безопасности и надежности. Так же установлен недостаток - отсутствие спроса на технологии производства, который может повлиять на дальнейшее использование продукта.

5.5 Разработка графика проведения научного исследования

Построим график проведения научного исследования в виде графика Ганта, который представляет собой график зависимости работ от времени их выполнения.

Для удобства построения графика длительность каждого из этапов работ из рабочих дней переведем в календарные дни. Для этого нужно воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{кал}$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -ой работы в календарных днях;

$k_{кал}$ – коэффициент календарности.

T_{ki} необходимо округлить до целого числа.

Пример расчета для работы №1 из таблицы 4:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{кал} = 1,48 \cdot 2 = 2,96 = 3 \text{ дн}$$

Коэффициент календарности определяют по следующей формуле:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}}$$

где $T_{кал}$ – количество календарных дней в году;

$T_{вых}$ – количество выходных дней в году;

$T_{пр}$ – количество праздничных дней в году.

Расчет коэффициента календарности:

$$k_{кал} = \frac{365}{365 - 118} = 1,48$$

В таблице 5.8 представлены все расчетные значения.

Таблица 5.8 – Временные показатели проведения НИ

Номер работ ы из табл. 5	Трудоемкость работ						Испол- нители		Длительнос ть работ в рабочих днях T_{pi}		Длительност ь работ в календарны х днях T_{ki}	
	t_{\min} , чел-дни		t_{\max} , чел- дни		$t_{ож}$, чел- дни							
	Исп. 1	Исп. 2	Исп.1	Исп. 2	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 1	Исп. 2	Исп.1	Исп. 2	Исп. 1	Исп. 2

1	–	1	–	2	–	1,4	–	+	–	2	–	3
2	–	1	–	2	–	1,4	–	+	–	2	–	3
3	2	–	4	–	2,8	–	+	–	3	–	5	–
4	1		2		1,4		+	+	1	1	2	2
5	6	–	10	–	7,6	–	+	–	8	–	12	–
6	4	–	7	–	5,2	–	+	–	6	–	9	–
7	8	–	11	–	9,2	–	+	–	10	–	15	–
8	3	–	5	–	3,8	–	+	–	4	–	6	–
9	4	–	7	–	5,2	–	+	–	6	–	9	–
10	8	–	9	–	8,4	–	+	–	9	–	14	–
11	7	–	8	–	7,4	–	+	–	8	–	12	–
12	3	–	5	–	3,8	–	+	–	4	–	6	–

Примечание: исп. 1 – инженер–разработчик (Автор ВКР); исп. 2 – старший инженер

В таблице 5.8 отражено количество дней, выраженных в рабочих и календарных днях, отводимых на выполнение различных частей научного исследования. На основе этого составлена таблица 5.9 «Календарный план-график проведения НИ по теме», в которой отражен календарный план работ в виде графика Ганта.

Инженер–разработчик – проводит разработку управляющего механизма.

Ранее было произведено планирование научно-исследовательской работы, а именно: определена структура работы в рамках научного исследования, трудоемкость выполнения работы, разработан график проведения научного исследования. Все это позволило правильно распределить время, необходимое для проведения различных работ в рамках научного исследования.

Таблица 5.9 – Календарный план – график проведения НИ по теме

№ ра бо т	Вид работ	Исполнители	T_{ki} , кал.д н.	Продолжительность выполнения работ											
				февраль				март			апрель			май	
				10- 12	13- 15	16- 20	21- 22	23-6	7-15	16- 30	31-5	6-14	15- 28	29- 10	11- 16
1	Назначение и утверждение темы диссертации	Ст. инженер	3												
2	Выбор необходимой литературы	Ст. инженер	3												
3	Изучение литературы и статьи	Инженер-разработчик	5												
4	Составление календарного плана работ	Ст. инженер,	2												
5	Расчет параметров коллекторного двигателя	Инженер-разработчик	12												
6	Исследование видов управления двигателями	Инженер-разработчик	9												
7	Разработка системы управления	Инженер-разработчик	15												
8	Разработка средств энергетических показателей	Инженер-разработчик	6												
9	Анализ полученных результатов	Инженер-разработчик	9												
10	Анализ конкурентных технических решений	Инженер-разработчик	14												
11	Анализ воздействия вредных факторов при работе с электроприводом	Инженер-разработчик	12												
12	Оформление графических материалов исследовательской работы	Инженер-разработчик	6												

5.6 «Портрет» потребителя результатов НТИ

5.6.1 Смета затрат на проектирование

Смета затрат на проект ($K_{\text{тп}}$) включает в себя материальные затраты, амортизацию, затраты на заработную плату, на социальные нужды, прочие и накладные затраты.

$$K_{\text{тп}} = K_{\text{мат}} + K_{\text{ам}} + K_{\text{з/пл}} + K_{\text{с.о}} + K_{\text{пр}} + K_{\text{накл}},$$

Где, $K_{\text{мат}}$ – материальные затраты;

$K_{\text{ам}}$ – амортизация компьютерной техники;

$K_{\text{з/пл}}$ – затраты на заработную плату;

$K_{\text{с.о.}}$ – затраты на социальные нужды;

$K_{\text{пр}}$ – прочие затраты;

$K_{\text{накл}}$ – накладные затраты.

5.6.2 Материальные затраты

В данной работе материальные затраты принимаем в размере 2000 рублей на канцелярские товары.

5.6.3 Затраты на амортизацию

Так как для работы над магистерской диссертацией используется компьютерная техника, посчитаем ее амортизацию.

$$K_{\text{ам}} = \frac{T_{\text{исп.кт}}}{T_{\text{кал}}} \cdot C_{\text{кт}} \cdot \frac{1}{T_{\text{сл}}}, \text{ где}$$

Где, $T_{\text{исп.кт}}$ – время использования компьютерной техники (80 дней);

$T_{\text{кал}}$ – календарное время (365 дней);

$C_{\text{кт}}$ – цена компьютерной техники (35000 руб);

$T_{\text{сл}}$ – срок службы компьютерной техники (5 лет).

$$K_{\text{ам}} = \frac{80}{365} \cdot 35000 \cdot \frac{1}{5} = 3836 \text{ руб.}$$

5.6.4 Затраты на заработную плату

Вознаграждение за труд в зависимости от квалификации работника, сложности, количества, качества и условий выполняемой работы, а также компенсационные и стимулирующие выплаты, затраты на заработную плату (для инженера и НР).

$$Kз / пл = ЗП_{инж} + ЗП_{нр}$$

$$ЗП_{мес} = ЗПо \cdot K1 \cdot K2, \text{ где}$$

Где, K1 – коэффициент, учитывающий отпуск (1,1 = 10%);

K2 – районный коэффициент (1,3 = 30%);

ЗПо – месячный оклад (для доцента 26300 р., для инженера 17000р.).

Для научного руководителя:

$$ЗП_{мес} = 26300 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 37609 \text{ руб.}$$

Для инженера:

$$ЗП_{мес} = 17000 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 24310 \text{ руб.}$$

$$ЗП_{ор} = \frac{ЗП_{мес}}{21} \cdot n, \text{ где}$$

21 – число рабочих дней в месяц;

n – фактическое число дней в проекте.

Для научного руководителя:

$$ЗП_{ор} = \frac{37609}{21} \cdot 9 = 16118 \text{ руб.}$$

Для инженера:

$$ЗПор = \frac{24310}{21} \cdot 100 = 115762 \text{ руб.}$$

$$Кз / пл = 16118 + 115762 = 131880 \text{ руб.}$$

5.6.5 Затраты на социальные нужды

Затраты организации по обязательным и добровольным взносам в органы государственного страхования, пенсионного фонда, фонда медицинского страхования от затрат на оплату труда работников, занятых в производстве продукции, работ, услуг в непроизводственной сфере в соответствии с порядком, установленным законодательством.

$$Кс.о. = \frac{Кз / пл \cdot 30\%}{100\%}$$

Затраты на социальные нужды берем в размере 30% от Кз/пл

$$Кс.о. = \frac{131880 \cdot 0,3}{1} = 39564 \text{ руб}$$

5.6.6 Прочие затраты

Прочие затраты принимаются в размере 10% от (Кмат + Кам + Кз/пл)

$$Кс.о. = \frac{Кз / пл \cdot 30\%}{100\%}$$

$$Кпр = \frac{(2000 + 1673 + 131880 + 39564) \cdot 0,1}{1} = 17512 \text{ руб.}$$

5.6.7 Накладные затраты

Затраты, не связанные прямо с производством отдельного изделия или вида работы и относимые на весь выпуск продукции. К ним относятся: расходы на содержание, эксплуатацию и текущий ремонт зданий, сооружений оборудования; отчисления на социальное страхование и другие обязательные платежи; содержание и заработную плату административно-управленческого персонала; расходы, связанные с потерями от брака и простоев и др.

Накладные расходы принимаются в размере 200% от Кз/пл.

$$K_{\text{накл}} = \frac{K_{\text{з}} / \text{пл} \cdot 200\%}{100\%}$$

$$K_{\text{накл}} = \frac{131880 \cdot 2}{1} = 263760 \text{ руб.}$$

Таблица 5.10. – Смета затрат на проект

№	Элементы затрат	Стоимость, руб.
1	Материальные затраты	2 000
2	Амортизация компьютерной техники	3 836
3	Затраты на заработную плату	131 880
4	Затраты на социальные нужды	39 564
5	Прочие затраты	17 512
6	Накладные расходы	263 760
	Итого:	458 552

Смета затрат на проект:

$$K_{\text{пл}} = 2000 + 3836 + 131880 + 39564 + 17512 + 263760 = 458552 \text{ руб.}$$

5.7 Оценка конкурентоспособности и ресурсоэффективности проекта

С этой целью может быть использована вся имеющаяся информация о конкурентных разработках:

- технические характеристики проекта;
- конкурентоспособность проекта;
- уровень завершенности научного исследования (наличие макета, прототипа, модели и т.п.);

- бюджет разработки и т.д

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научного проекта и определить направления для его будущего повышения и реализации.

Для оценки ресурсоэффективности проекта были подобраны критерии эффективности такие как: экономичность, безопасность, обеспечение надлежащего качества и надежности прибора, сфера применения и удобство использования.

1. Экономичность - оптимизация затрат на электрическую часть предприятия на стадии проектирования приводит к их уменьшению на доли процентов, в абсолютном же измерении речь идет об экономии значительных средств.

2. Под обеспечением надлежащего качества и надежности прибора понимается поставка потребителю нового, неизношенного прибора с допустимыми показателями его качества и исключения ситуаций, опасных для людей и окружающей среды.

3. Безопасность — это свойство прибора сохранять с некоторой вероятностью безопасное состояние при выполнении заданных функций в условиях, установленных нормативно-технической документацией.

Критерии ресурсоэффективности и их количественные характеристики приведены в таблице 5.11.

Таблица 5.11 - Сравнительная оценка характеристик проекта

Критерии	Весовой коэффициент	Балльная оценка разработки	Конкурентоспособность
1. Качество и надежность исполнение	0,25	4	1
2. Сфера применения и	0,25	3	0.75

удобство использования			
3. Безопасность	0,3	5	1,5
4. Экономичность	0,2	4	0,8
Итого:	1,00		4,05

Позиция оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Значения показателей, определяемые экспертным путем, в сумме составляют Анализ конкурентоспособности проекта определяется согласно выражению:

$$K = \sum B_j \cdot B_j$$

где К – конкурентоспособность научной разработки; Вj– вес показателя (в долях единицы); Bj– балл j-го показателя.

$$K_{k\Sigma} = 0.25 \cdot 4 + 0.25 \cdot 3 + 0.3 \cdot 5 + 0.2 \cdot 4 = 4.05$$

Показатель ресурсоэффективности проекта имеет достаточно высокое значение (по 5-балльной шкале), что говорит об эффективности использования технического проекта. Высокие баллы качества, надежности и безопасности позволяют судить о надежности системы. В результате проделанной работы, на выходе проекта достигаем необходимый результат, тем самым можно сделать вывод, что проект реализован и выполнен, верно.

Произведено описание математической модели регулятора скорости вращения, а также смоделирована система управления двигателем на основе искусственных нейронных сетей. Спроектирована модель силовой схемы управления в среде MATLAB Simulink. Получены переходные характеристики при различных моментах нагрузки, из которых видно, что система обеспечивает стабильную отработку заданной скорости вращения.

6. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Социальная ответственность и охрана представляют собой систему законодательных актов и соответствующих им социально - экономических, технических, гигиенических, организационных мероприятий, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда.

Социальная ответственность — это сознательное отношение субъекта социальной деятельности к требованиям социальной необходимости, гражданского долга, социальных задач и, норм и ценностей, понимание осуществляемой деятельности для определенных социальных групп и личностей, для социального прогресса общества.

Охрана труда – совокупность нормативных, технических и правовых актов, мероприятий и правил, целью которых является сохранение здоровья и жизни работника в процессе трудовой деятельности. Данные мероприятия могут быть организационно-технического, санитарно-гигиенического, социально–экономического, лечебно-профилактического, реабилитационного характера [1].

Задачи техники безопасности — на основе изучения производственных процессов и трудовых приемов установить и устранить причины, которые могут вызвать несчастный случай на производстве.

Научно-исследовательская работа направлена на разработку и моделирование системы управления коллекторного двигателя постоянного тока на постоянных магнитах, а также на оценку конкурентоспособности и планирования проектных работ; исследования рабочего места инженера с целью выявления вредных и опасных производственных и экологических факторов, и средств защиты от них.

Для выполнения работы были использованы такие программные среды, как: Matlab, Mathcad, Visual Studio Code, а также пакет Microsoft Office.

6.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

6.1.1. Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны)

правовые нормы трудового законодательства

Согласно ТК РФ, N 197 - ФЗ работник аудитории 042, 8 корпуса ТПУ имеет право на:

- рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда;
- внеочередной медицинский осмотр в соответствии с медицинскими рекомендациями с сохранением за ним места работы (должности) и среднего заработка во время прохождения указанного медицинского осмотра;
- отказ от выполнения работ в случае возникновения опасности для его жизни и здоровья вследствие нарушения требований охраны труда, за исключением случаев, предусмотренных федеральными законами, до устранения такой опасности;
- обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний в соответствии с федеральным законом;
- обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя;

6.1.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны

В процессе разработки инженер-проектировщик подвергается воздействию целого комплекса различных факторов среды, которые влияют на его здоровье. Совокупность всех факторов, влияющих на здоровье человека, называется условиями труда.

Рабочее место в аудитории 042, 8 корпуса ТПУ должно соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.032-78. Оно должно занимать площадь не менее 4,5 м², высота помещения должна быть не менее 4 м, а объем - не менее 20 м³ на

одного человека. Высота над уровнем пола рабочей поверхности, за которой работает оператор, должна составлять минимум 720 мм. Оптимальные размеры поверхности стола 1600 x 1000 кв. мм. Под столом должно иметься пространство для ног с размерами по глубине 650 мм. Удаленность клавиатуры от края стола должна быть не более 300 мм, что обеспечит удобную опору для предплечий. Расстояние между глазами оператора и экраном видеодисплея должно составлять 40 - 80 см.

Рассматриваемое рабочее место инженера-проектировщика, имеет площадь 54,2 м², одну дверь, 2 окна, 4 рабочих места, в помещении имеется кондиционер для поддержания оптимальных климатических условий. Разработка системы стабилизации происходит с помощью использования осциллографа, компактного коллекторного двигателя и персонального компьютера.

Рабочее место сотрудника аудитории 042, 8 корпуса ТПУ соответствует требованиям ГОСТ 12.2.032-78.

6.2. Производственная безопасность

Разработка и моделирование подразумевает использование персонального компьютера - ПК, целесообразно рассмотреть вредные и опасные факторы, которые могут возникать при работе с оборудованием.

6.2.1. Анализ потенциально возможных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований

Для выбора факторов использовался ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» [3]. Перечень опасных и вредных факторов представлен в виде таблицы:

Таблица 6.1. Опасные и вредные факторы при выполнении работ по разработке программного модуля и дальнейшей его реализации

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разра- ботка	Изгото вление	Эксплу атация	
1.Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 СанПиН 2.2.2.542-96
2. Превышение уровня шума		+	+	СанПиН
3.Отсутствие или недостаток естественного света	+	+	+	2.2.2/2.4.1340-03
4.Недостаточная освещенность рабочей зоны		+	+	СанПиН 2.2.4.1191-03 СП 52.13330.2011
5.Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	+	+	+	СанПиН 2.2.4.548-96 СН 2.2.4/2.1.8.562-96 СНиП 23-05-95*

6.2.2. Разработка мероприятий по снижению воздействия вредных и опасных факторов

При использовании оборудования в аудитории 042 8 корпуса ТПУ, основным источником потенциально опасных факторов является ПК и возможность поражения электрическим током. Использование данного оборудования может привести к наличию таких вредных факторов, как повышенный уровень статического электричества, повышенный уровень электромагнитных полей, повышенная напряженность электрического поля.

К основной документации, которая регламентирует вышеперечисленные вредные факторы относится СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 "Гигиенические требования к электронно-вычислительным машинам и организации работы":

ПК должны соответствовать требованиям настоящих санитарных правил и каждый их тип подлежит санитарно-эпидемиологической экспертизе с оценкой в испытательных лабораториях, аккредитованных в установленном порядке [4].

Допустимые уровни электромагнитных полей (ЭМП) в аудитории 042, 8 корпуса ТПУ, создаваемых ПК, не должны превышать значений [5], представленных в таблице 6.2:

Таблица 6.2: Допустимые уровни ЭМП, создаваемых ПК

Наименование параметров	Диапазон	ДУ ЭМП
Напряженность электрического поля	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	25 В/м
	в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	250 нТл
	в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	25нТл
Напряженность электростатического поля		15кВ/м

Уровни ЭМП, ЭСП в аудитории 042, 8 корпуса ТПУ, перечисленные в таблице 8.2. соответствуют нормам.[17]

Электробезопасность:

Электрический ток представляет значительную опасность для здоровья человека непосредственно при контакте человека с токопроводящей поверхностью. Электробезопасность - система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного действия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества [22].

Для предотвращения поражения электрическим током, где размещаются рабочее место с ПК в аудитории 042, 8 корпуса ТПУ, оборудование оснащено защитным заземлением, занулением в соответствии с техническими требованиями по эксплуатации. Напряжение для питания ПК 220 В, для серверного оборудования 380 В. По опасности поражения электрическим током помещение 042, 8 корпуса ТПУ относится к первому классу – помещения без повышенной опасности.[16].

Основными непосредственными причинами электротравматизма, являются:

- 1) прикосновение к токоведущим частям электроустановки, находящейся под напряжением в случае пробоя изоляции;
- 2) прикосновение к металлическим конструкциям электроустановок, находящимся под напряжением;
- 3) ошибочное включение электроустановки или несогласованных действий обслуживающего персонала;
- 4) поражение шаговым напряжением [21].

Основными техническими средствами защиты, согласно ПУЭ [2], являются защитное заземление, автоматическое отключение питания, устройства защитного отключения, изолирующие электрозащитные средства, знаки и плакаты безопасности. Указанные средства защиты обеспечивают защиты от поражения электрическим током в аудитории 042, 8 корпуса ТПУ.

Рассчитано защитное заземление для шкафов релейной защиты и серверного оборудования, которое находится в аудитории 042, 8 корпуса ТПУ [18]:

1. В качестве заземляющего устройства (вертикальные электроды) используем стальные трубы диаметром $d = 50$ мм, в качестве соединяющего элемента – стальная полоса шириной $b = 45$ мм.

2. Сопротивлению грунта в районе размещения установки или устройства.

Таблица 6.3. Исходные данные для расчета

Вид заземления	контурное
Длина заземлителя l , м	2,7
Глубина заземлителя в грунте h , м	0,65
Сезонный коэффициент K_c	2,0
Удельное сопротивление земли ρ , Ом·м	70
Диаметр d , мм	50
Ширина соединительной полосы b , мм	45
Допустимое сопротивление системы заземления по ПУЭ $R_{з.у.}$, Ом	4
Уровень напряжения, В	220-380

3. Величина электрического сопротивления растекания тока в грунт с одиночного заземлителя:

$$R_3 = 0,366 \frac{\rho \cdot K_c}{l} \left(\lg \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4t + l}{4t - l} \right) =$$

$$= 0,366 \frac{70 \cdot 2}{2,7} \left(\lg \frac{2 \cdot 2,7}{0,050} + \frac{1}{2} \lg \frac{4 \cdot 2 + 2,7}{4 \cdot 2 - 2,7} \right) = 38,81 \text{ Ом},$$

где $\rho = 70 \text{ Ом}$ – удельное сопротивление грунта,

$K_c = 2$ – коэффициент сезонности,

$l = 2,7 \text{ м}$ – длина заземлителя,

$d = 0,050 \text{ м}$ – диаметр заземлителя,

$t = h + 0,5l = 0,65 + 0,5 \cdot 2,7 = 2 \text{ м}$ – длина от поверхности земли до середины заземлителя [8].

4. Число заземлителей без взаимных помех, получаемых друг от друга, без так называемого явления «экранирования»:

$$n' = \frac{R_3}{R_{3,y.}} = \frac{38,81}{4} = 9,82 \approx 10$$

5. Число заземлителей с коэффициентом экранирования:

$$n = \frac{n'}{\eta_3} = \frac{10}{0,58} = 17,24 \approx 18$$

где $\eta_3 = 0,58$ – коэффициент экранирования [18].

Принимаем расстояние между заземлителями $a = l = 2,7 \text{ м}$.

6. Длина соединительной полосы:

$$l_n = 1,05 \cdot n \cdot a = 1,05 \cdot 18 \cdot 2,7 = 51 \text{ м}$$

7. Значение сопротивления растекания тока с соединительной полосы:

$$R_{II} = 0,366 \frac{\rho K_c}{l_n} \lg \frac{2l_n^2}{b \cdot h} = 0,366 \frac{70 \cdot 2}{51} \lg \frac{2 \cdot 51^2}{0,05 \cdot 0,65} = 5,1 \text{ Ом}$$

8. Полное сопротивление системы заземления:

$$R_{3y} = \frac{R_3 \cdot R_{II}}{R_3 \cdot \eta_n + R_{II} \cdot \eta_3 \cdot n} = \frac{38,81 \cdot 5,1}{38,81 \cdot 0,51 + 5,1 \cdot 0,58 \cdot 18} = 2,63 \text{ Ом},$$

где $\eta_n = 0,51$ – коэффициент экранирования полосы.

Таким образом, сопротивление $R_{\Sigma} = 2,63$ Ом не превышает 4 Ом. Следовательно, диаметр заземлителя $d = 50$ мм при числе заземлителей $n = 18$ является достаточным для обеспечения защиты при контурной схеме расположения заземлителей.

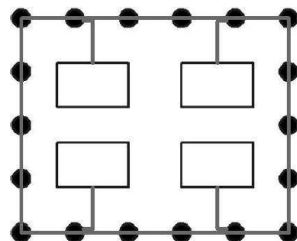


Рис. 6.1 – Схема полученного контурного заземления

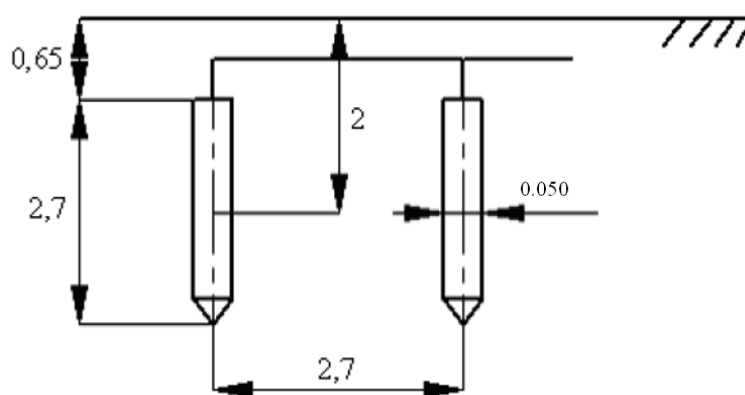


Рис. 6.2 – Схема расположения заземлителей

Разработанные мероприятия и расчеты обеспечивают безопасную эксплуатацию электроустановок в аудитории 042, 8 корпуса ТПУ.

Освещение:

В аудитории 042, 8 корпуса ТПУ имеется естественное (боковое двухстороннее) и искусственное освещение. Рабочие столы размещены таким образом, чтобы естественный свет падал преимущественно слева.

Освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 300 - 500 лк. Освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана. Освещенность поверхности экрана не должна быть более 300 лк.[9]

В качестве источников света применяются светодиодные светильники или металл галогенные лампы (используются в качестве местного освещения) [6].

Таблица 6.4. Нормируемые показатели естественного, искусственного и совмещенного освещения помещений жилых зданий

Помещение	Рабочая поверхность и плоскость плоскость нормирования КЕО и освещенности и высота плоскости и над полом, м	Естественное освещение		Совмещенное освещение		Искусственное освещение		
		КЕО e_n , %		КЕО e_n , %		Освещенность рабочих поверхностей, лк	Показатель дисконтности, не более	Коэффициент пульсации K_p , %, не более
		При верхнем или комбинированном освещении	При боковом освещении	При верхнем или комбинированном освещении	При боковом освещении			
Кабинеты	Г-0,0	3,0	1,0	1,8	0,6	300	-	$\leq 5\%$ (раб ота с ПК) $\leq 20\%$

Согласно [17] освещение в аудитории 042 8 корпуса ТПУ соответствует допустимым нормам.

Шум

При работе с ПК в аудитории 042, 8 корпуса ТПУ характер шума – широкополосный с непрерывным спектром более 1 октавы.

Таблица 6.5. Предельно допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука [18]

N пп.	Вид трудовой деятельности, рабочее место	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивалентные уровни звука (дБА)
		31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	Научная деятельность, конструирование и проектирование, программирование, преподавание и обучение. Рабочие места в помещениях дирекции, проектно-конструкторских бюро, расчетчиков, программистов вычислительных машин, в лабораториях для теоретических работ и обработки данных.	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Согласно [17] уровень шума в аудитории 042, 8 корпуса ТПУ не более 80 дБА и соответствует нормам.

Микроклимат

Для создания и автоматического поддержания в аудитории 042, 8 корпуса ТПУ оптимальных значений температуры, влажности, чистоты и скорости движения воздуха, в холодное время года используется водяное отопление, в теплое время года применяется кондиционирование воздуха.

Аудитория 042, 8 корпуса ТПУ является помещением I б категории. [7]
Таблица 6.6. Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года	Катег. работ по уровню энер- гозатрат	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относ. влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
----------------	--	----------------------------	------------------------------------	-----------------------------------	---

Холодный	Iб	21-23	20-24	40-60	0,1
Теплый	Iб	22-24	21-25	40-60	0,1

Таблица 6.7. Допустимые величины интенсивности теплового облучения

Облучаемая поверхность тела, %	Интенсивность теплового облучения, Вт/м ² , не более
50 и более	35
25-50	70
не более 25	100

В аудитории проводится ежедневная влажная уборка и систематическое проветривание после каждого часа работы на ПК.

Согласно [17] микроклимат аудитории 042, 8 корпуса ТПУ соответствует допустимым нормам.

6.3. Экологическая безопасность

В данном подразделе рассматривается характер воздействия проектируемого решения на окружающую среду. Выявляются предполагаемые источники загрязнения окружающей среды, возникающие в результате реализации предлагаемых в ВКР решений.[10]

Источником загрязнения окружающей среды может являться исключительно неправильная утилизация коллекторного двигателя после выхода из строя.

6.3.1. Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду

Конструкция оборудования должна соответствовать требованиям ГОСТ 12.2003-91, «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности (в ред. Федерального закона от 10.07.2012 N117-ФЗ)», а также Федеральным нормам и правилам в области промышленной безопасности, утвержденным Приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 12.03.2013 № 1012.[11]

Необходимая информация по нанесению поясняющих надписей и знаков безопасности на оборудовании должна быть выполнена в соответствии с ГОСТ Р 12.4-026-2001.

6.3.2. Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду

Процесс исследования представляет из себя работу с информацией, такой как технологическая литература, статьи, ГОСТы и нормативно-техническая документация, а также разработка математической модели с помощью различных программных комплексов. Таким образом процесс исследования имеет влияние негативных факторов на окружающую среду. Таких как отходы – использованная бумага, использованные шариковые ручки. Использованная бумага и пластиковые шариковые ручки утилизируется, как вторичное сырье – изготовление картона, пластиковой тары и т.д. Процесс утилизации негативно влияет на атмосферу, выделяя в нее углекислый газ. Существующая система фильтрации не может на 100% избавить от выделения вредных веществ в атмосферу [12]. А также электромагнитное излучение от ПК.

6.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

6.4.1. Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований и обоснование мероприятий по предотвращению ЧС

Согласно ГОСТ Р 22.0.02-94 ЧС - это нарушение нормальных условий жизни и деятельности людей на объекте или определенной территории (акватории), вызванное аварией, катастрофой, стихийным или экологическим бедствием, эпидемией, применением возможным противником современных средств поражения и приведшее или могущее привести к людским или материальным потерям.[13]

Наиболее типичной чрезвычайной ситуацией, которая может произойти на объекте эксплуатации двигателей является пожар, возникающий

вследствие неисправности или замыкания в обмотках двигателя. Категория помещений по пожаровзрывоопасности по СП 12.13130.2009.

В качестве мер по предупреждению пожаров и взрывов на объекте будут использованы следующие меры: проведение противопожарных инструктажей со всеми работниками, с периодичностью не менее одного раза в полугодие; обучение персонала правилам противопожарной безопасности; внедрение инструктивных материалов наглядной агитации, регламентов и норм ведения технологического процесса; периодическая организация противоаварийных работ и установление порядка ведения работ в аварийных условиях [16].

В помещениях для оповещения рабочего персонала о наличии ЧС предусмотрено звуковое оповещение, происходящее при срабатывании датчиков на задымление в помещениях. На дверях помещений устанавливаются планы по эвакуации людей из здания и памятка в случае пожара.[14]

В случае возникновения пожара в зданиях необходимо срочно покинуть их, используя основной и запасные пожарные выходы. Необходимо позвонить в пожарную охрану, сообщить свои Ф.И.О., адрес и о месте пожара, оповестить руководство. В случае если пожар находится в начальной стадии, можно попытаться потушить его, используя первичные средства пожаротушения (огнетушители, пожарные рукава, песок, воду и др.). При тушении электроприборов, изначально необходимо их обесточить. Для их тушения предпочтительно использовать огнетушители углекислотного или порошкового типа [17]. Кроме устранения самого очага пожара нужно, своевременно, организовать эвакуацию людей.

6.4.2. Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть при проведении исследований и обоснование мероприятий по предотвращению ЧС

При проведении исследований наиболее вероятной ЧС является возникновение пожара в помещении 042, 8 корпуса ТПУ. Пожарная

безопасность должна обеспечиваться системами предотвращения пожара и противопожарной защиты, в том числе организационно-техническими мероприятиями.

Основные источники возникновения пожара:

- 1) Неработоспособное электрооборудование, неисправности в проводке, розетках и выключателях. Для исключения возникновения пожара по этим причинам необходимо вовремя выявлять и устранять неполадки, а также проводить плановый осмотр электрооборудования.
- 2) Электрические приборы с дефектами. Профилактика пожара включает в себя своевременный и качественный ремонт электроприборов.
- 3) Перегрузка в электроэнергетической системе (ЭЭС) и короткое замыкание в электроустановке.

Под пожарной профилактикой понимается обучение пожарной технике безопасности и комплекс мероприятий, направленных на предупреждение пожаров [15].

Пожарная безопасность обеспечивается комплексом мероприятий:

- обучение, в т.ч. распространение знаний о пожаробезопасном поведении (о необходимости установки домашних индикаторов задымленности и хранения зажигалок и спичек в местах, недоступных детям);
- пожарный надзор, предусматривающий разработку государственных норм пожарной безопасности и строительных норм, а также проверку их выполнения;
- обеспечение оборудованием и технические разработки (установка переносных огнетушителей и изготовление зажигалок безопасного пользования) [20].

В соответствии с ТР «О требованиях пожарной безопасности» для административного жилого здания требуется устройство внутреннего противопожарного водопровода.

Согласно ФЗ-123, НПБ 104-03 «Проектирование систем оповещения людей о пожаре в зданиях и сооружениях» для оповещения о возникновении пожара в каждом помещении должны быть установлены дымовые оптико-электронные автономные пожарные извещатели, а оповещение о пожаре должно осуществляться подачей звуковых и световых сигналов во все помещения с постоянным или временным пребыванием людей[19].

Аудитория 042, 8 корпуса ТПУ оснащена первичными средствами пожаротушения: огнетушителями ОУ-3 1шт., ОП-3, 1шт.

Таблица 6.7 – Типы используемых огнетушителей при пожаре в электроустановках

Напряжение, кВ	Тип огнетушителя (марка)
До 1,0	порошковый (серии ОП)
До 10,0	углекислотный (серии ОУ)

Согласно НПБ 105-03 помещение, предназначенное для проектирования и использования результатов проекта, относится к типу П-2а.

Таблица 6.8 Категории помещений по пожарной опасности

Категория помещения	Характеристика веществ и материалов, находящихся (обращающихся) в помещении
П-2а	Зоны, расположенные в помещениях, в которых обращаются твердые горючие вещества в количестве, при котором удельная пожарная нагрузка составляет не менее 1 мегаджоуля на квадратный метр.

В корпусе 8 ТПУ имеется пожарная автоматика, сигнализация. В случае возникновения загорания необходимо обесточить электрооборудование, отключить систему вентиляции, принять меры тушения (на начальной стадии)

и обеспечить срочную эвакуацию студентов и сотрудников в соответствии с планом эвакуации.



Рис. 6.3 План эвакуации людей на случай пожара

Вывод:

В результате выполнения задания раздела «Социальная ответственность и ресурсосбережение» ВКР были выявлены и проанализированы вредные факторы при разработке программного модуля.

Были установлены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности, характерные для рабочей зоны. Проработаны организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. Разработаны мероприятия по снижению воздействия вредных и опасных факторов. Был рассмотрен характер воздействия проектируемого решения на окружающую среду

Можно сделать вывод, что создание магистерская диссертация является экологически безвредным действием. Так как процесс не сопровождается созданием отходов от проектной деятельности.

А также процесс написания магистерской диссертации не является абсолютно безвредным для человека. Так как в процессе написания магистерской диссертации человека сопровождают такие вредные факторы, как электромагнитное излучение от ПК и плохая освещенность рабочей зоны.

Были проанализированы вероятные ЧС, которые может инициировать объект исследований и обоснованы мероприятия по предотвращению ЧС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения выпускной квалификационной работы была исследована, разработана и смоделирована система стабилизации и управления на искусственных нейронных сетях для коллекторного двигателя постоянного тока с постоянными магнитами. Искусственная нейронная сеть использовалась в качестве обучаемой нелинейной управляющей системы. Скорость двигателя постоянного тока с постоянными магнитами контролировалась с помощью предложенного адаптивного контроллера. Были представлены детали разработки предлагаемого контроллера, включая все аналитические выводы. Результаты, полученные в режиме реального времени с использованием предложенного адаптивного контроллера на основе искусственных нейронных сетей, были использованы для оценки производительности контроллера. Затем были представлены результаты сравнения предлагаемого контроллера с традиционными ПИД и ПИ регуляторами.

Совершенно очевидно, что большинство объектов управления в реальном мире являются нелинейными и большинство простых регуляторов, таких как простые ПИД и ПИ, не могут достичь высокой точности из-за высокой нелинейности. В ходе экспериментов и после наблюдения результатов было доказано, что предлагаемый контроллер на основе искусственной нейронной сети обладает хорошей способностью стабилизации и управления скоростью коллекторного двигателя постоянного тока с присутствующей нелинейностью. Экспериментальные результаты также подтверждают, что этот адаптивный контроллер на основе искусственной нейронной сети работал намного лучше, чем ПИД и ПИ регуляторы, так как смог уменьшить ошибку слежения до менее чем 3%.

Мы можем прийти к выводу, что предложенный адаптивный контроллер явно превосходит обычные регуляторы, особенно в случае нелинейностей объекта управления, изменений параметров и нарушений нагрузки. Функция

оперативного обновления весов и смещений искусственной нейронной сети может компенсировать как изменения параметров, так и помехи во время работы. Использование адаптивной скорости обучения в предлагаемом контроллере снижает вероятность перерегулирования. Обеспечение обратной связи в модифицированной структуре двигателя на основе искусственной нейронной сети также повышает стабильность системы. Также было установлено, что предлагаемый регулятор скорости вращения двигателя постоянного тока на основе искусственных нейронных сетей является надежным, эффективным и простым в применении.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Методические указания по разработке раздела «Социальная ответственность» выпускной квалификационной работы магистра, специалиста и бакалавра всех направлений (специальностей) и форм обучения ТПУ, Томск 2019
2. ГОСТ 12.0.003-2015 Опасные и вредные производственные факторы. Классификация, 2015
3. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий, 2003
4. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы, 2003
5. СанПиН 2.2.4.1191-03 Электромагнитные поля в производственных условиях, 2003
6. СП 52.13330.2011 Естественное и искусственное освещение, 2011
7. СанПиН 2.2.4.548–96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений, 1996
8. СН 2.2.4/2.1.8.562–96, Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки, 1996
9. ГОСТ 30494-2011, Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях, 2011
10. ГОСТ 12.4.124-83 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства защиты от статического электричества. Общие технические требования, 1984
11. Пожарная безопасность серверной комнаты [Электронный ресурс]URL: <https://avtoritet.net/library/press/245/15479/articles/15515>, Дата обращения: 10.03.2020
12. Системы противопожарной защиты установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические, 2009

13. НПБ 105-03, Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности, 2003
14. Трудовой кодекс Российской Федерации" от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 05.02.2018)
15. ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя, 2017
16. ПРАВИЛА УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК. Седьмое издание, 2002
17. Специальная оценка условий труда в ТПУ. 2018.
18. Дашковский А.Г. Расчет устройства защитного заземления. Методические указания к выполнению самостоятельной работы по дисциплине «Электробезопасность» для студентов всех специальностей ЭЛТИ. Томск, изд. ТПУ, 2010. – 8 с.
19. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов.
20. СТО 70238424.29.240.10.003-2011 Стандарт организации НП «ИНВЭЛ». Подстанции напряжением 35 кВ и выше. Условия создания. Нормы и требования.
21. СТО 70238424.29.240.10.009-2011 Распределительные электрические сети. Подстанции 6-20/0,4 кВ. Условия создания. Нормы и требования
22. СНиП 41-03-2003 Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов
23. ГОСТ 27471-87 Машины электрические вращающиеся. Термины и определения.
24. Т.Кенио, С.Нагамори. Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами: Пер. с англ.-М.: Энергоатомиздат, 2008. – 571 с
25. М.М.Кацман. Электрические машины и электропривод автоматических устройств: Учебник для электротехнических специальностей техникумов. - М.: Высш. шк., 1987. – 385 с.

26. Л.М.Пиотровский. Электрические машины. Учебник для учащихся электромашиностроительных, энергетических и электротехнических техникумов.-Л.: Энергия, 1972. – 257 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Design and research rate-stabilization system of D.C. commutator motor

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM88	Николаев Илья Вадимович		

Консультант школы отделения электроэнергетики и электротехники ИШЭ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Качин Олег Сергеевич	к.т.н.		

Консультант – лингвист отделения иностранных языков ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Пташкин А.С.	к.ф.н		

1 Introduction

The evolution of living organisms exhibits the key characteristic of adaptation to their environment. They attempt to keep their physiological equilibrium to face the changes in the environmental surroundings. In day-to-day usage, adaption means to adjust to conform to new circumstances. The history of adaptive control dates back to the early 1950s, when extensive research was conducted into the development of autopilots for high-performance aircraft. A dynamic controller of this type, as opposed to a linear feedback controller, is required to sustain the dynamic performance of the aircraft for the entire range of its operating conditions. The adaptation feature gives the robustness to the controller in highly nonlinear, time varying systems. If an artificial neural network is used to mimic the adaptive feature of the controller, which roughly resembles the biological brain structure, using the knowledge of mathematical models acquired through learning, we would be able to enhance the adaptability of the controller.

Recent expansions in captivating supplies, semiconductor technologies, microprocessors and mechatronics provide a wide range of submissions. In high-performance, electrically driven mechatronics-related requests such as robotics machine tools, progressing grinders, accurate control of speed and / or position is perilous. Despite the fact that DC motors are relatively expensive, they are still commonly used in claims like that because of their dependability and affluence of control due to the disparate nature of the field and the strength of the magnetic field of the armature.

In high-performance drives, such as robots and disk drives, control of a DC motor requires unusual attention, since it must meet the criteria for quick response, quick recovery of speed from the load, accurate tracking of the trajectory and insensitivity to parameter changes. Conservative designs for reliable control are often related with constant-gain controllers, like proportional integral derivatives (PID), proportional (P) or proportional integral (PI) which steady the class of linear

systems in a minor variety of system parameters. In addition, these sorts of structures require precise mathematical models to define the dynamics of the system for the correct design of the controller. They are often quite difficult to obtain in practical situations.

Newly, neural networks of direct coupled multilayer have established to be enormously valuable for image processing, design recognition, and language recognition. These networks also receive widespread consideration in management claims. When an artificial neural network (ANN) is used as a real-time motor regulator, it can be configured using online training and instructed the motor system to operate in accordance with the desired method. Thus, the internal parallel and distributed ANN architecture can be successfully used to control the motor. Therefore, in motors drivers with high-performance usage of ANN can make the system reliable, efficient and immune to undesirable operating conditions.

2 Theoretical development

From the earliest starting point of deliberate programmed controller plan there has been the issue of finding an appropriate controller structure and the controller parameters for a given procedure. The main difficulty that comes into sight is the need of the controller to be very well tuned for the whole range of its operating points rather than for one particular operating point. To overcome these circumstances, adaptive controllers were developed in the nineteen forties. Between nineteen sixties and nineteen seventies many fundamental areas in control theory were developed. These areas later proved to be significant for the design of adaptive control systems, e.g. state space and stability theory.

2.1 Commutator motors

The operating principle of a DC motor is based on the interaction between the magnetic field of a rotating armature and the magnetic field of a fixed stator. As the north pole of the armature is attracted to the south pole of the stator (and vice-versa), a force is produced on the armature, causing it to turn. Commutation is the process of switching the field in the armature windings to produce constant torque in one direction, and the commutator is a device connected to the armature, which enables this switching of current.

The basic purpose of commutation is to ensure that the torque acting on the armature is always in the same direction. The voltage generated in the armature is alternating in nature, and the commutator converts it to direct current. Being simply put, the commutator turns the coils on and off to control which direction the electromagnetic fields are pointing. On one side of the coil, the electricity should always flow “away”, and, on the other side, electricity should always flow “towards”. This ensures that the torque is always produced in the same direction. Otherwise, the coil would rotate 180 degrees one way, and then switch direction [1].

2.2 Adaptive control

Adaptive controllers are characterized by their ability to gather information about the parameters of a process during actual control and by their ability to make changes to their control laws accordingly based on the information gathered. Most adaptive controllers can be divided into two main classes: feedforward adaptive controllers and feedback adaptive controllers [2].

2.2.1 Feedforward adaptive controllers

These systems are based on the fact that the changing properties of the plant can be grasped by measurement of signals acting on the process. It is know-how that the controller must be changed depending on these signals. The feedforward adaptation system can be realized as shown in Fig. A.1.

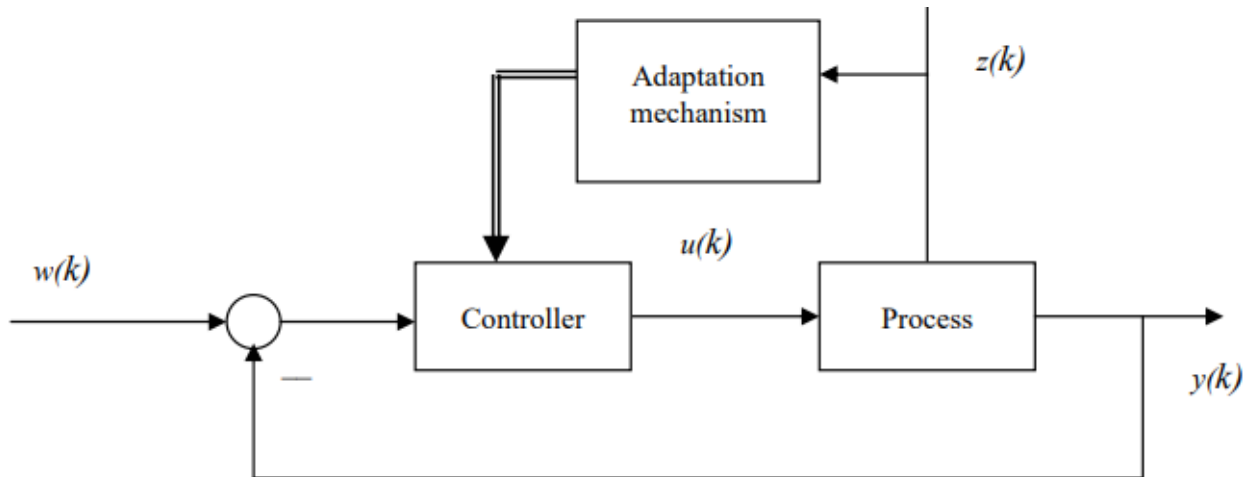


Figure A.1. - Feedforward adaptive control (open-loop adaptation)

A special feature of this controller is that there is no feedback of ‘inner’ closed-loop signals to adapt the controller parameters. In Fig. A.1, the disturbance input $z(k)$ is measured and the adaptive mechanism changes the parameters of the controller in such a way as to maintain good control performance. One advantage of feedforward adaptive control is that fast reaction to process changes can be achieved because the process behavior could be anticipated and need not be identified with measurable process input and output signals. There are some disadvantages in this system. They are neglect of effects based on unmeasured signals or disturbances, unpredictable changes of the process behavior and the amount of parameter storage that may be necessary to accommodate many operating conditions and the limitations to slow processes and parameter changes [2].

2.2.2 Feedback adaptive controllers

Feedback adaptive controllers are used when the process behavior changes cannot be determined directly by measurement of external process signals. The basic structure of the feedback adaptive controller is shown in Fig. A.2. These controllers are characterized by the following three factors. Firstly, the changing properties of the process or its signals can be observed by the measurement of different internal control loop signals. Secondly, in addition to the basic control loop feedback, the adaptation mechanism results in an additional feedback level. Thirdly, the closed-loop signal flow path yields a nonlinear second feedback level.

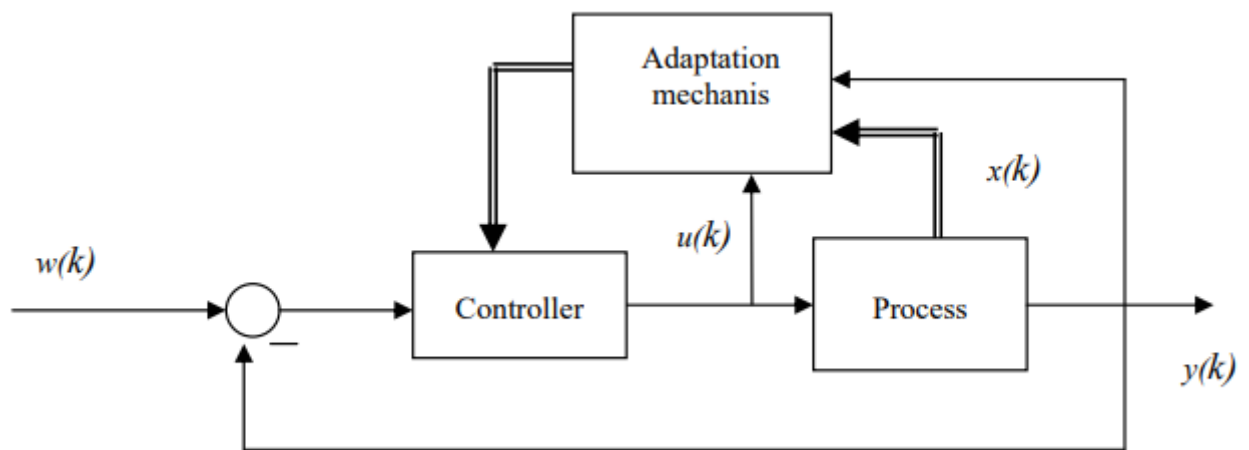


Figure A.2 - Feedback adaptive control (closed-loop adaptation)

A special feature of this controller is that there is no feedback of ‘inner’ closed-loop signals to adapt the controller parameters. In Fig. A.2, the disturbance input $z(k)$ is measured and the adaptive mechanism changes the parameters of the controller in such a way as to maintain good control performance. One advantage of feedforward adaptive control is that fast reaction to process changes can be achieved because the process behavior could be anticipated and need not be identified with measurable process input and output signals. There are some disadvantages in this system. They are neglect of effects based on unmeasured signals or disturbances, unpredictable changes of the process behavior and the amount of parameter storage

that may be necessary to accommodate many operating conditions and the limitations to slow processes and parameter changes.

3 Adaptive control using ANN

Anthropological intelligent has both logical and intuitive or individual aspects. The logical side was developed and used, as a result of which modern computers, such as von Neumann, and expert systems, which make up the field of hard computing, appeared. Though, it was found that rigorous calculations cannot provide explanations for actual, extremely compound, and non-linear systems. To cope with this difficulty, intuitive and subjective thinking of the human mind was used, which led to soft computing approaches that include neural networks and fuzzy logical reasoning [3].

Recent applications in various fields have proven that superior results can be obtained using artificial neural networks. ANN provides non-linear mapping between inputs and outputs of an electric drive system without knowing any predefined model. Consequently, the use of ANN in adaptive management can make systems reliable and efficient. In this paper, we use the adaptive speed control strategy for a DC motor with a direct current, which includes the online update of the weights and offsets of the ANN controller. The ANN construction is grounded on the opposite dynamic model of a nonlinear drive system. To increase reliability, which is an important criterion for a high-performance drive, a unique adaptive learning speed feature is also used.

4 ANN based adaptive controller

One of the native characteristics of the ANN is its capability to map any non-linear relation between input and output through training and without the need for knowledge of any predetermined model. Exploiting this property, a multi-layer feed

forward neural network structure is used here. This structure, which has an adaptive capability, is used to control the speed of a PM DC motor.

4.1 ANN Structure for system identification and control

The objective of a speed control system for a DC motor is to produce the appropriate control signal, in this case, the terminal voltage for the DC motor, so that the motor can track the reference speed. At each sampling instant a control voltage for the PM DC motor is generated by the ANN structure, which is fed to a power amplifier circuit. ANN1 and ANN2 have the identical set of weights and biases but two different sets of inputs and outputs. In the present study, the ANN structure comprising one hidden layer having three neurons with one neuron in the output layer gives satisfactory results. The output of the power amplifier is applied to the terminal of the motor [4].

The direction of the speed setting is chosen utilizing the second-request reference model, which makes the framework asymptotically stable [5]. The reference model is portrayed by the accompanying condition:

$$\omega_{ref}(n+1) = a_1\omega_{ref}(n) + a_2\omega_{ref}(n-1) + r(n) \quad (A.1)$$

where a_1 and a_2 are constants picked for a reference direction with indicated dynamic reaction and $r(n)$ is the limited contribution to the reference model. On the off chance that the following mistake is thought to be little and the chose reference $(n+1)^{th}$ model is asymptotically steady, the engine speed in the example can be gauge from (A.1).

$$\omega_{ref}^*(n+1) = a_1\omega_r(n) + a_2\omega_r(n-1) + r(n) \quad (A.2)$$

Thus, with one example of anticipated speed and two examples of genuine speed, an info grouping is framed and utilized as the contribution to the ANN 2, as appeared in Fig. A.3.

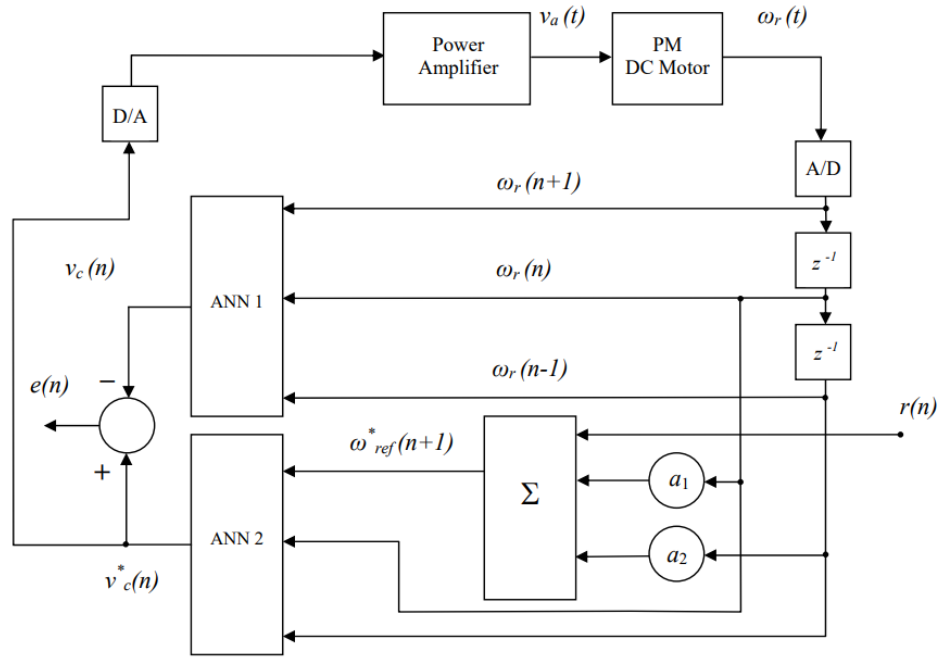


Figure A.3 Block diagram for the ANN based adaptive controller

The operation of the control system shown in Fig. 3.1 is as follows. During each sampling instance, the following steps are performed:

1. The set of inputs is applied to the controller to the controller ANN 2 to generate the control output voltage.
2. Control output voltage is then applied to the motor / driver system through the D/A converter.
3. The system waits until computer is interrupted, signifying the start of the next sampling period, say $(n + 1)^{th}$ instance.
4. The new speed at the $(n + 1)^{th}$ instance, $\omega_r(n + 1)$ is measured.
5. The input set is applied to ANN 1 to obtain the output real voltage.
6. The error $e(n)$ is computed. Control voltage is the result from step 1 above while real voltage is the result from step 5.
7. The error $e(n)$ is back-propagated through ANN 2, the weights of which are thus updated (or trained).
8. The same weight adjustments made to ANN 2 are also applied to ANN 1
9. The procedure repeats from step 1 with a new set of inputs and so on.

This makes it necessary to quickly (adaptively) update the weights and offsets of the ANN. Though, the mission of learning online can be completed without much difficulty, and the structure can be made steadier if the original set of weights and displacements is produced through offline training. This study used a grouping of offline and online learning. The initial set of weights and slopes were achieved through offline training. These weights and offsets are only updated when the error limit between the actual output signal and the ANN target exceeds a preset value.

4.2 Off-Line training for initial set of weights and biases of the ANN

Information for offline learning can be gained through simulation or experiment. If the engine parameters are accessible, then they can be used by randomly generating the input circuits $\omega(n+1)$, $\omega(n)$, $\omega(n-1)$. A corresponding target can be generated using these values of speed and constants, which can be expressed in terms of engine parameters. Consequently, autonomous training data can be obtained by simulation using SIMULINK or any similar software in a DC motor control circuit with direct current taking into account the load.

In the present work the experimental method was used. By using the experimental method, we can get better results because in this case if there is any nonlinearity in the power amplifier, this also can be absorbed in to the ANN Structure for a better controller.

In the experiment, the PM DC motor was run in an open loop to follow a known arbitrary trajectory. Trajectory of motor speed was generated in MATLAB. The speed of the DC motor and the supply voltage U_c to the amplifier was sampled at a rate of 1ms and recorded in the computer, which is interfaced to the DC motor. To record data the setup was done in Simulink. From the recorded data and U_c were extracted to train the ANN. The ANN structure was built in MATLAB and trained to obtain the initial weights and the biases. These initial weights and biases of the ANN and the training curve of the ANN give good results.

4.3 Online training for weights and biases and adaptive learning of the ANN

A portion of the principle issues looked by superior engine drives are speed and reaction time. It was noticed that ANN learning speed is a key factor in speed and reaction time. Higher learning speeds bring about higher velocities, and more slow learning speeds make reaction times excessively moderate. Accordingly, to rapidly refresh the ANN loads and counterbalances, our ANN controller presents a versatile learning speed. An underlying learning pace of 0.0003 was gotten for constant usage of the ANN controller base dependent on the last estimation of the learning speed utilized in disconnected learning.

We have considered the accompanying realities when determining the versatile inclining rate η . The distinction between the reference speed and the genuine speed is enormous, the learning rate is expanded until the real speed arrives at the reference speed. Because of the quicker learning rate, the genuine speed may surpass the reference speed, bringing about overshooting. On the off chance that an overshooting happens, the learning rate is diminished [4]. At the point when the speed begins diminishing from the overshooting, the learning rate is again expanded, with the goal that the genuine speed rapidly arrives at the reference speed. The detail of the versatile learning rate is appeared in the flowchart of Fig. A.3.

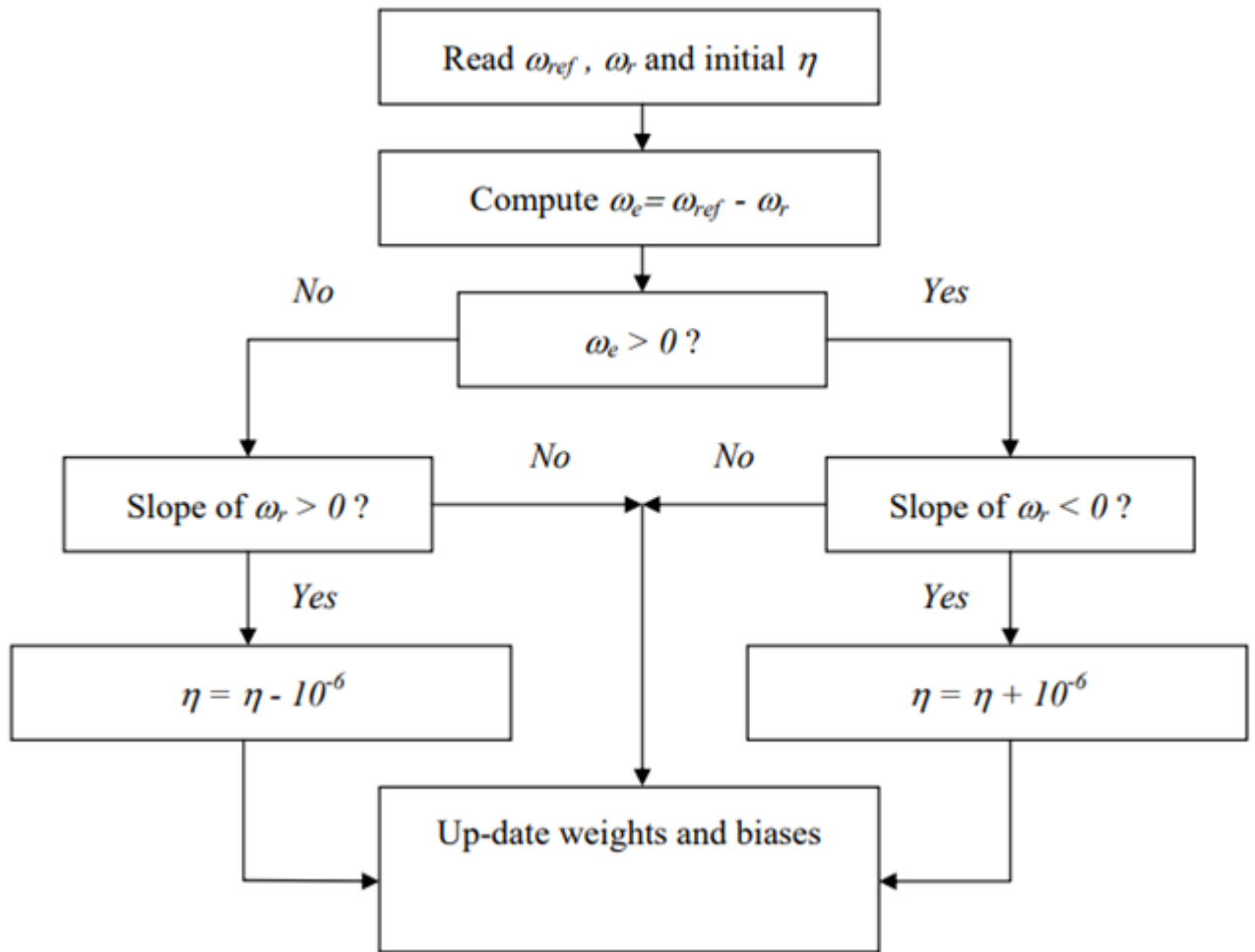


Figure A.4 Flowchart for adaptive learning rate η

5.1 Verify the validity of ANN motor model

After off-line training has been done to the ANN model for the motor drive using the previously developed speed trajectory some testing was carried out to verify the validity of the ANN motor model. To verify the validity, a new setup was built in the Simulink. In this setup the motor and the ANN model both were run at the same time in an open loop to follow a known single arbitrary trajectory. This trajectory is different from the trajectory used to train the ANN structure. Both the response of the motor and that of the ANN and the error between the two trajectories were measured and disassembled.

Further experimental studies of the ANN based adaptive controller for the PM DC motor would be carried out. The results of representative experimental cases

obtained from the adaptive control of the DC motor are presented and analyzed. For comparison purpose some results were taken by using PI and PID controllers. The results from the PI and PID controllers were compared with an ANN based adaptive controller. This paper is concluded with a discussion of the robustness, efficiency and reliability of the ANN based DC motor controller. And after this stage the advantages of the adaptive controller can be identified. From all the tests conducted it can be seen that the ANN based controller is superior to both the PID and PI controllers. As expected, due to the on-line weights and biases updating of the ANNs in the ANN based controller with adaptive learning rates, the proposed controller becomes insensitive to noise and sudden load variations and thus, tracks the reference speed quite accurately. Also, it can be observed that the speed overshooting of the ANN based controller is significantly lower than the other controllers. This critically damped speed response has been achieved using the adaptive leaning rate feature in the ANN based controller.

6 Summary

This paper investigated the effectiveness of enhancing adaptive control using them in practical systems. Artificial Neural Network was used as a trainable non-linear mapping system. The speed of a permanent magnet direct current motor was controlled using the proposed ANN based adaptive controller. The details of development of the proposed controller were presented, including all analytical derivations. Programming and implementation details were given as well.

The results obtained in real-time using the proposed ANN based adaptive controller were used to evaluate the performance of the controller. Then the results of the comparison of the proposed controller with the traditional PID and PI controllers were also presented in this study. It is obvious in the real world that most of the plants show non-linearity and it is a fact that most of the controllers such as simple PID and PI are unable to achieve high accuracy due to this phenomenon.

During the experimentation and after observing the results it has been proved that the proposed ANN based controller has a good ability to control the speed of the PM DC motor, which shows the non-linearity behavior.

Test results confirm that this ANN based versatile controller performed far superior to both the PID and PI controllers and had the option to decrease the following blunder to under 3%. We can arrive at a resolution that the proposed fake neural system based versatile controller is obviously prevalent, especially on account of non-linearities, parameter varieties and burden unsettling influences. The on-line loads and inclinations refreshing element of the ANN can make up for both parameter changes and unsettling influences during activity. The employments of the versatile learning rate in the proposed controller diminish the chance of overshooting especially during the transient conditions. The criticism arrangement in the altered ANN engine structure additionally upgrades the strength of the framework. The proposed ANN based speed controller of the PM DC engine was seen as powerful, effective and simple to try.

References

1. Williams, T. DC brushed motors overview. Boston: IBM Corp, 2017. – 112 p.
2. Lavretsky, E. Robust and Adaptive Control: With Aerospace Applications. Portland: Springer Science & Business Media, 2012. – 454 p.
3. Chen, L. Nonlinear adaptive control using neural networks and multiple models. Budapest: Delta Airsoft, 2009. – 211 p.
4. Vasile, D. Fuzzy and neuro-fuzzy designs of boost converter supplying DC motors. Jounieh, Lebanon: 2000. – 15 p.
5. Kadam, D. Neural Network Based Intelligent Process Control System. Kerala, India: 2010. – 27 p.