

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

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки – 27.04.04 Управление в технических системах
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Информационное моделирование и разработка системы управления двигателем постоянного тока с помощью микроконтроллера

УДК 004.94:621.313.22:004.31

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8AM71	Ван Шии		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Скороспешкин М.В.	к.т.н.		

Нормоконтроль

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Суханов А.В.	к.х.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Скаковская Н.В.	к.ф.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООД ШБИП	Алексеев Н. А.	-		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ООП	Пушкарев М. И.	к.т.н.		
Руководитель ОАР ИШИТР	Леонов С.В.	к.т.н.		

Томск – 2019 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

по направлению 27.04.04 Управление в технических системах

Код результатов	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
	профессиональные
P1	Применять глубокие естественнонаучные и математические знания для решения научных и инженерных задач в области анализа, синтеза, проектирования, производства и эксплуатации средств автоматизации и систем управления техническими объектами.
P2	Уметь обрабатывать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в области теории, проектирования, производства и эксплуатации средств автоматизации и систем управления техническими объектами
P3	Ставить и решать инновационные задачи инженерного анализа, связанные с разработкой технических систем управления с использованием аналитических методов и сложных моделей.
P4	Выполнять инновационные инженерные проекты по разработке программно-аппаратных средств автоматизированных систем различного назначения с использованием современных методов проектирования, систем автоматизированного проектирования, передового опыта разработки конкурентно способных изделий.
P5	Планировать и проводить теоретические и экспериментальные исследования в области проектирования аппаратных и программных средств автоматизированных систем с использованием новейших достижений науки и техники, передового отечественного и зарубежного опыта. Критически оценивать полученные данные и делать выводы.
P6	Осуществлять авторское сопровождение процессов проектирования, внедрения и эксплуатации программно-аппаратных средств автоматизированных систем различного назначения.
P7	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной профессиональной среде с пониманием культурных, языковых и социально-экономических различий партнеров
P8	Осуществлять коммуникации в профессиональной среде и в обществе в целом, активно владеть иностранным языком, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инновационной инженерной деятельности, в том числе на иностранном языке.
P9	Эффективно работать индивидуально и в качестве члена и руководителя группы, в том числе междисциплинарной и международной, при решении инновационных инженерных задач.
P10	Демонстрировать личную ответственность и ответственность за работу возглавляемого коллектива, приверженность и готовность следовать профессиональной этике и нормам ведения инновационной инженерной деятельности. Демонстрировать глубокие знания правовых, социальных, экологических и культурных аспектов инновационной инженерной деятельности
P11	Демонстрировать способность к самостоятельному обучению, непрерывному самосовершенствованию в инженерной деятельности, способность к педагогической деятельности.

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

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки – 27.04.04 Управление в технических системах
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники
 Уровень образования – магистратура
 Период выполнения – осенний / весенний семестр 2018/2019 учебного года

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	30.05.2019 г.
--	---------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
29.05.2019	Основная часть	65
19.05.2019	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	20
17.05.2019	Социальная ответственность	15

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Скороспешкин М.В.	к.т.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Пушкарев М. И.	к.т.н.		

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

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки – 27.04.04 Управление в технических системах
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ Пушкарев М. И.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

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

Студенту:

Группа	ФИО
8AM71	Ван Шии

Тема работы:

Информационное моделирование и разработка системы управления двигателем постоянного тока с помощью микроконтроллера	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№1160/с от 14.02.2019 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:	30.05.2019 г.
--	---------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i>	1. Моделирование системы управления двигателем постоянного тока в Simulink; 2. Разработка модели на основе экспериментальных данных для линейной системы; 3. Разработка модели на основе экспериментальных данных для нелинейной системы.
--	---

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	1. Собрать физическую установку двигателя постоянного тока; 2. Создать модель двигателя в пакете Simulink; 3. Разработать модель с экспериментальными данными для линейной и нелинейной системы. 4. Определить показатели качества переходного процесса двигателя.
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	Презентация в формате *.pptx на 16 слайдах Слайд 1 – Тема ВКР; Слайд 2 – Актуальность исследования; Слайд 3 – Цели и задачи исследования; Слайд 4 – Макетная плата системы; Слайд 5,6 – Модель Simulink; Слайд 7,8 – Экспериментальных данных; Слайд 9 – Передаточные функции; Слайд 10-14 – Simulink модель; Слайд 15 – Результат работы; Слайд 16 – Заключение.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Основная часть	Доцент ОАР ИШИТР, к.т.н. Скороспешкин М.В.
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Доцент ОСГН ШБИП, к.ф.н. Скаковская Н.В.
Социальная ответственность	Ассистент ООД ШБИП, Алексеев Н. А.
Английский язык	Доцент ОИЯ ШБИП, к.п.н. Сидоренко Т.В.
Названия разделы, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Разработка нелинейной модели системы управления	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	26.02.2019 г.
--	----------------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Скороспешкин М.В.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8AM71	Ван Ши		

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

Студенту:

Группа		ФИО	
8AM71		Ван Шии	
Школа	ИШИТР	Отделение школы (НОЦ)	Автоматизации и робототехники
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	27.04.04 Управление в технических системах

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Должностной оклад научного руководителя – 26300 руб. Должностной оклад инженера – 17000 руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Норма амортизации – 20%
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Социальные отчисления – 30% от ФЗП

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала инженерных решений (ИР)	1. Анализ конкурентных технических решений
2. Формирование плана и графика разработки и внедрения ИР	2. Определение этапов работ; определение трудоемкости работ; разработка графика Ганта
3. Обоснование необходимых инвестиций для разработки и внедрения ИР	3. Определение затрат на проектирование
4. Составление бюджета инженерного проекта (ИП)	4. Определение капиталовложений в тепловую сеть
5. Оценка ресурсной, финансовой, социальной, бюджетной эффективности ИР и потенциальных рисков	5. Определение эксплуатационных затрат; расчет интегрального показателя ресурсоэффективности

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений
2. Календарный план-график проведения работ по проектированию тепловой сети
3. Капиталовложения в тепловую сеть
4. Бюджет затрат на проектирование тепловой сети
5. Эксплуатационные ежегодные издержки

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Скаковская Н.В.	к.ф.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8AM71	Ван Шии		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа		ФИО	
8AM71		Ван Шии	
Школа	ИШИТР	Отделение (НОЦ)	Автоматизации и робототехники
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	27.04.04 Управление в технических системах

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<i>Синтез регулятора нестационарной системы управления шахтным подъемником на основе желаемого интервального характеристического полинома</i>
--	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:	<i>Организация рабочего места осуществляется в соответствии с СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03</i>
2. Производственная безопасность:	<i>Выявленные вредные факторы: нарушение параметров микроклимата повышение шума недостаточное освещение электромагнитные излучения Анализ выявленных опасных факторов: опасность поражения электрическим током</i>
3. Экологическая безопасность:	<i>анализ воздействия объекта ВКР и области его использования на ОС; разработка решений по обеспечению экологической безопасности</i>
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	<i>Выбор и описание возможных ЧС; типичная ЧС – пожар. разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.</i>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООД ШБИП	Алексеев Н. А.	-		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8AM71	Ван Шии		

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 122 страницы пояснительной записки формата А4, включающие 1 приложение формата А4, 54 литературных источников, 60 рисунков, 21 таблица.

Ключевые слова: двигатель постоянного тока, моделирование, микроконтроллер, Simulink, передаточная функция, линейный анализ, нелинейный анализ.

Объектом исследования является модель двигателя постоянного тока.

Цель работы – разработка системы управления двигателем постоянного тока на основе информационного моделирования.

Выпускная квалификационная работа содержит три главы. В первой главе разработано подключение аппаратного обеспечения и получены экспериментальные данные. Во второй главе рассмотрены и проанализированы линейные модели системы управления двигателем постоянного тока, и на основании экспериментальных данных определены передаточные функции и оценены показатели качества систем управления. В третьей главе рассмотрены и проанализированы нелинейные модели системы управления ДПТ, получены переходные процессы с помощью PID-Tuner.

Полученные наработки и результаты будут использованы в дальнейших исследованиях в лаборатории научного студенческого творчества отделения автоматизации и робототехники.

Экономическая эффективность и значимость работы, себестоимость исследуемой системы представлена в главе финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.

Выявлены основные опасные и вредные факторы, которые могут возникнуть в процессе работы. Разработанные меры по снижению воздействий системы на экологию представлены в главе социальная ответственность.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2016.

Оглавление

Введение.....	11
1 Аппаратное обеспечение	12
1.1 Макетная плата системы	12
1.2 Двигатель постоянного тока с датчиком эффекта Холла	13
1.3 Драйвер L298N	15
1.4 Платы Arduino	19
2 Программное обеспечение	24
2.1 Simulink и Arduino	25
2.2 Simulink Arduino Support package.....	27
2.3 System Identification Toolbox.....	29
2.4 PID-Tuner	32
3 Разработка модели на основе экспериментальных данных.....	34
4 Разработка линейной модели системы управления.....	37
4.1 Передаточные функции двигателя постоянного тока.....	43
4.2 Разработка и моделирование регулятора с обратной связью.....	45
4.3 Сравнение показателей качества.....	48
5 Разработка нелинейной модели системы управления.....	50
5.1 Модель Nonlinear ARX.....	50
5.2 Модель Хаммерштейна-Виннера	54
5.3 Идентификация и моделирование нелинейной системы	58
5.4 Синтез регулятора.....	63
6 Финансовый менеджмент ресурсоэффективность и ресурсосбережение....	68
6.1 Анализ конкурентных технических решений.....	68
6.2 Планирование работ по проектированию тепловой сети	71
6.3 Определение трудоемкости выполнения работ.....	73
6.4 Разработка графика проведения проекта	73
6.5 Бюджет затрат на проектирование.....	80
6.6 Ресурсоэффективность	89
7 Социальная ответственность	91

7.1 Техногенная безопасность	92
7.2 Анализ опасных факторов производственной среды.....	97
7.3 Организационные мероприятия обеспечения безопасности.....	101
Заключение	105
The conclusion	106
Список публикаций.....	107
Список используемых источников.....	108
Приложение А Раздел ВКР выполненный на иностранном языке	113

Введение

Развитие компьютерной техники и аппаратных средств цифровой обработки сигнала привело к широкому применению цифровых микропроцессорных устройств в составе систем автоматического управления. Однако, несмотря на преимущества применения цифровых устройств в составе систем управления: невысокая стоимость, гибкость решаемых задач, возможность реализации корректирующих динамических звеньев, имеются сложности в анализе и моделировании таких систем [1]. Это связано с тем, что нужна точная и надежная модель не только двигателя постоянного тока (ДПТ), но и системы управления. В литературном источнике решается задача информационного моделирование ДПТ путём использования программного обеспечения Simulink и Control System Toolbox Matlab [2]. Но, широтно-импульсная модуляция и сам ДПТ вносят нелинейность в процесс управления и усложняют решение задачи информационного моделирования.

Тема ВКР является актуальной. В настоящее время существует два подхода использования моделирования. Один из них основывается при моделировании на основе данных, полученных при использовании математиках или физиках процессов, протекающих в готовом изделии. Но во многих ситуациях либо завод слишком сложный, либо инженер просто не имеет времени или навыков для разработки детальной модели. В таких ситуациях мы можем использовать входные и выходные данные, измеренные на эксперименте, чтобы построить математическую модель.

Для этого необходимо решить следующие задачи:

1. моделирование системы управления двигателем постоянного тока в Simulink;
2. разработка модели на основе экспериментальных данных для линейной системы;
3. разработка модели на основе экспериментальных данных для нелинейной системы.

1 Аппаратное обеспечение

Настройка оборудования для этого примера очень проста. У нас есть этот двигатель постоянного тока, мы подключили двигатель к плате Arduino Uno через интегральную схему привода двигателя, IC драйвера в основном используется для увеличения возможностей тока, чтобы иметь возможность управлять двигателем, цель в этом примере заключается в разработке регулятор с обратной связью для этого двигателя, чтобы отслеживать положение опорного двигателя. Мы отправляем ссылку на положение двигателя на плату, основываясь на этом, контроллер генерирует соответствующую команду напряжения и отправляет ее на аналоговые выходные выводы на плате в качестве сигналов широтно-импульсной модуляции (ШИМ), затем эти сигналы поступают на IC драйвера, которая обеспечивает двигатель соответствующей приводные токи, когда он подается на двигатель, он генерирует запас, который вращает вал двигателя, потенциометр используется для измерения угла поворота вала двигателя, и этот угол возвращается на компьютер.

Подвести итог: у нас есть компьютер, который взаимодействует с Arduino Uno, который подключен к двигателю постоянного тока через драйвер, мы посылаем команду напряжения на Arduino, которая подает на двигатель соответствующее дневное напряжение, а затем компьютер собирает угол двигателя через Arduino. Чтобы поговорить с Arduino Uno, мы будем использовать протокол последовательной связи, чтобы запрограммировать плату Arduino Uno с компьютера и использовать функцию запуска на целевом оборудовании, представленную на нашем 2017a в Simulink.

1.1 Макетная плата системы

На физическом уровне макетная плата системы (рисунок 1) состоит из ДПТ, подключенного к плате Arduino Uno через драйвер L298N. Драйвер обеспечивает нужный ток в обмотках и дает возможность управлять двигателем в обоих направлениях. Данные о положении вала двигателя с потенциометра

подаются на аналоговый вход платы Arduino. Имея эти данные, мы можем вычислить ошибку между фактическим положением вала и требуемым.

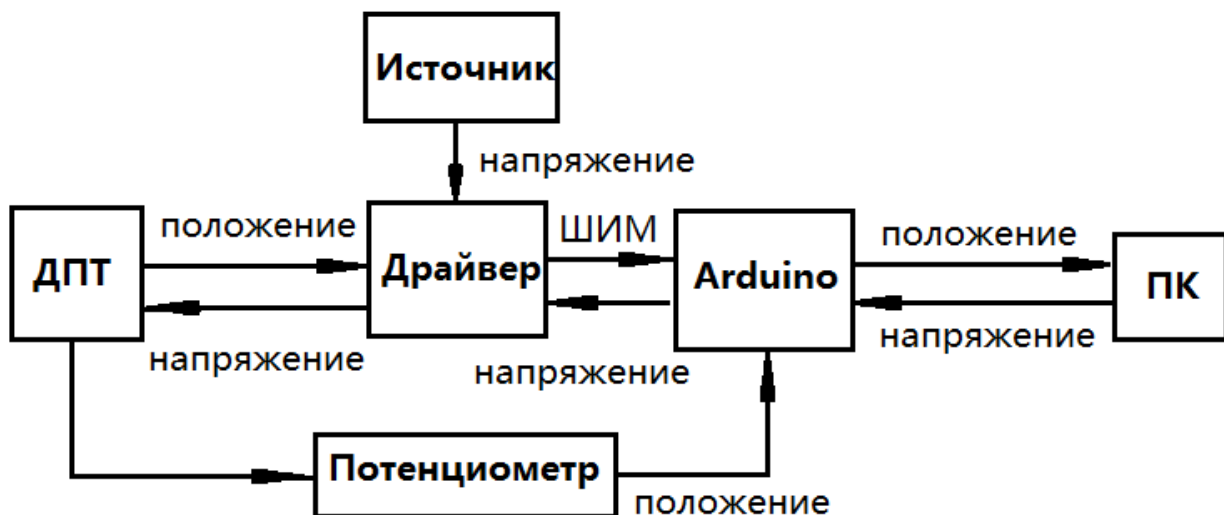


Рисунок 1 – Плата Arduino соединена с ДПТ

1.2 Двигатель постоянного тока с двухканальным датчиком эффекта Холла

Двигатель постоянного тока (ДПТ) — электрическая машина постоянного тока, преобразующая электрическую энергию постоянного тока в механическую энергию [3]. Этот двигатель также может называться синхронной машиной постоянного тока с самосинхронизацией. Самый простой двигатель - это двигатель постоянного тока, состоящий из постоянного магнита на индукторе (статоре), электромагнита с отчетливым магнитным полюсом на якоре, с двумя пластинами (лист) щеточный коллектор в сборе и две щетки.

Эффект Холла — явление возникновения поперечной разности потенциалов (называемой также холловским напряжением) при помещении проводника с постоянным током в магнитное поле [4].

Самое простое соображение состоит в том, что эффект Холла заключается в следующем. Под действием интенсивности E ток проводимости j течет через проводящую полосу в слабом магнитном поле. Магнитное поле отклоняет носители заряда от их движения вдоль или против электрического поля к полосе.

В этом случае малым критерием будет условие, при котором носитель заряда не начнет двигаться вдоль циклоиды.

На рисунке 2 представлена двигатель постоянного тока с двухканальным датчиком эффекта Холла, в таблице 1 подключение двигателя, в таблице 2 – электрические характеристики двигателя. На рисунке 3 изображены выходная схема и выходной сигнал двигателя.



Рисунок 2 – Двигатель постоянного тока с двухканальным датчиком эффекта Холла

Таблица 1 – Таблица подключения

	Два канала подключения энкодера
	1. Black: -Motor
	2. Red: +Motor
	3. Green: Hall Sensor VCC
	4. Blue: Hall Sensor GND
	5. Yellow: Hall Sensor A OUT
	6. White: Hall Sensor B OUT

Таблица 2 – Таблица электрических характеристики

Характеристики	Условное обозначение	Условия испытаний	мин	max	Единицы
Напряжение питания	V_{cc}	-	3.5	20	B
Напряжение на выходе	$V_{cc}(sat)$	$V_{cc} = 14 \text{ B};$ $I_C = 20 \text{ mA}$	-	700	mB
Выходной ток утечки	I_{cex}	$V_{cc} = 14 \text{ B};$ $V_{cc} = 14 \text{ B}$	-	10	μA
Ток питания	I_{ce}	$V_{cc} = 20 \text{ B}$ Output open	-	10	mA
Время нарастания выхода	T_r	$V_{cc} = 14 \text{ B};$ $R_l = 820 \text{ Ом};$ $C_l = 20 \text{ pF}$	-	1.5	μS
Время падения выхода	t_r	$V_{cc} = 14 \text{ B};$ $R_l = 820 \text{ Ом};$ $C_l = 20 \text{ pF}$	-	1.5	μS

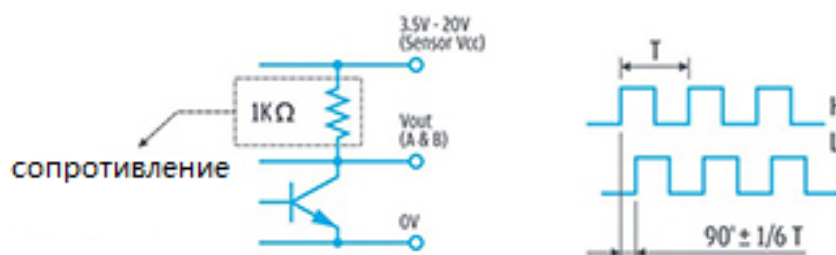


Рисунок 3 – Выходная схема и выходной сигнал

1.3 Драйвер L298N

Микроконтроллер, установленный на плате Arduino, не способен отдавать большой ток через свои пины. Что же делать, если необходимо управлять относительно мощными двигателями, например, для перемещения робота. В таких случаях вместе с Arduino используют драйвер – силовую часть, управляемую платой и способную коммутировать большой ток. Самый

известный такой драйвер для коллекторных двигателей – L298N, представлен на рисунке 4.

L298N – драйвер коллекторных двигателей на 2 канала, который может также применяться для управления одним шаговым мотором [5]. Управление драйвером мостовой схемы, позволяет использовать его без необходимости в дополнительных транзисторах, лишенных плеч. Максимальное напряжение питания двигателя составляет 46 В, а ток на канал составляет 2 А.

Привод позволяет легко и четко контролировать скорость вращения двигателя в обоих направлениях с помощью ШИМ (каждый двигатель отдельно).

Модули на базе L298N можно запускать без внешних компонентов. Вам понадобится всего дюжина проводов, которые соединяют сигналы питания и управления.

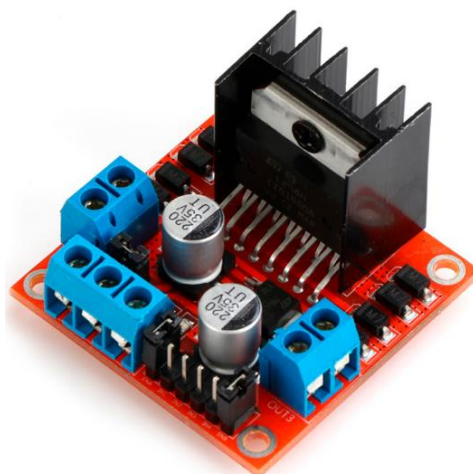


Рисунок 4 – Модуль L298N

Модуль драйвера двигателей L298N позволяет управлять двумя моторами постоянного тока, рисунок 5, либо шаговым двигателем с потребляемым током до 2 Ампер. Мы видим те же управляющие выводы. Чередование разноименных сигналов (высокий логический уровень или низкий) на парах выводов IN1, IN2 и IN3, IN4 задают направление вращения моторов.

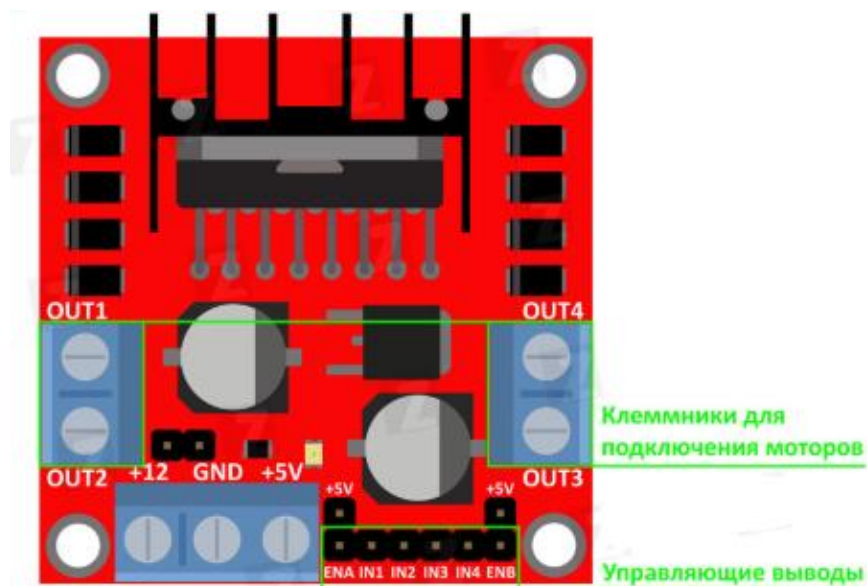


Рисунок 5 – Модуль L298N

Выводы ENABLE A, B (ENA привязан к IN1, IN2. ENB к IN3, IN4) отвечают за раздельное управление каналами. Могут использоваться в двух режимах:

Условно «активном» режиме (рисунок 6), когда ими будет управлять контроллер – высокий логический уровень разрешает вращение моторов, низкий запрещает вне зависимости от состояния выводов «IN». Для регулировки скорости моторов, на «EN» выводы подается ШИМ (PWM) сигнал.



Рисунок 6 – «Активном» режиме

Условно «пассивном» режиме (рисунок 7), притянув выводы «EN» к высокому уровню (5 В). Для этого на плате, рядом с выводами ENA и ENB находятся штырьки соединенные с 5 В. Замыкаем выводы с помощью джамперов. В данном режиме мы не сможем регулировать скорость двигателей, они будут всегда вращаться на полную скорость (за то для управления экономится 2 вывода контроллера). Направление вращения будет задаваться по-прежнему, а вот для

остановки в данном варианте, состояние выводов будет уже играть роль. Для остановки нужно будет подавать одноименные сигналы на выводы «IN» [5].

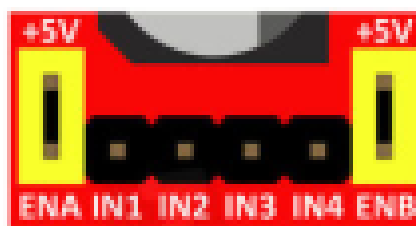


Рисунок 7 – «Пассивном» режиме

На рисунке 8 представлен клеммник подачи питания и работа стабилизатора.

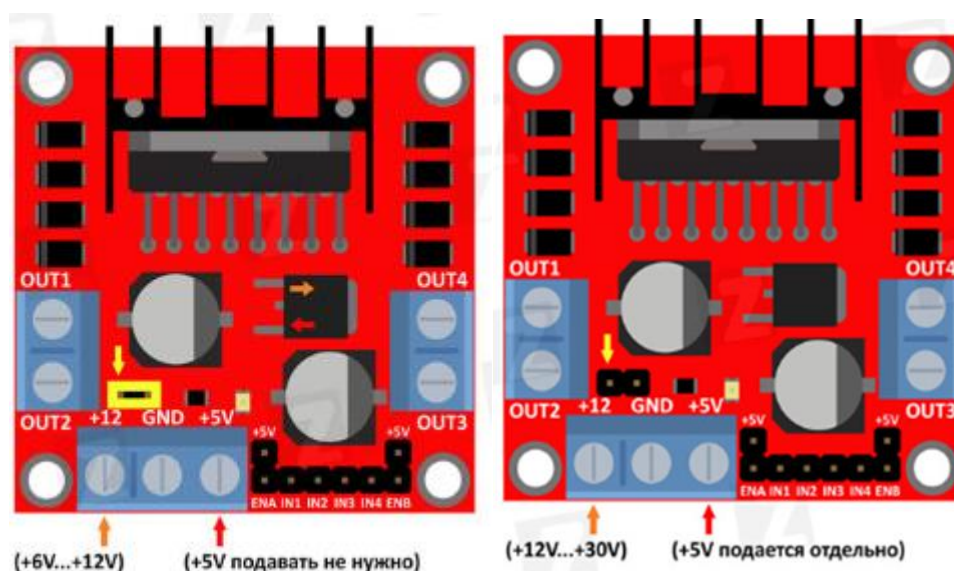


Рисунок 8 – Клеммник подачи питания

Разъем «12 В», предназначен для подачи питания на моторы и одновременно, при одетом джампере, подает питание на стабилизатор, который выдает 5 В для питания логики драйвера.

Выходит, при таком варианте, не нужно тянуть лишний провод на разъем 5 В.

Маркировка именно «12 В» связана с тем, что напряжение питания моторов может лежать в диапазоне от 5 до 30 В, в то время как максимальное входное напряжение стабилизатора 12 В. То есть при одетом джампере, подача более 12 В может спалить стабилизатор.

Как мы уже поняли, маркировка «12 В» носит предупредительно-информационный характер. При напряжении питания моторов свыше 12 В, без опаски подаем нужное напряжение на данный вывод.

Теперь напряжение не поступает на стабилизатор и не сможет повредить его, но теперь необходимо подать внешние 5 В для работы логики L289N.

1.4 Платы Arduino

Arduino – торговая марка аппаратно-программных средств для построения простых систем автоматики и робототехники, ориентированная на непрофессиональных пользователей [6]. Программная часть состоит из бесплатной программной оболочки (IDE) для написания программ, их компиляции и программирования аппаратуры. Аппаратная часть представляет собой набор смонтированных печатных плат, продающихся как официальным производителем, так и сторонними производителями. Полностью открытая архитектура системы позволяет свободно копировать или дополнять линейку продукции Arduino.

Название платформы происходит от названия одноимённой рюмочной в Ивреи, к которому часто обращается основатель проекта, и это имя, в свою очередь, ознаменовывает итальянского короля Ардуина Иврейского [7].

Arduino (рисунок 9) может использоваться для создания автоматизированных объектов, а также программного обеспечения, которое может быть подключено к компьютеру через стандартные проводные и беспроводные интерфейсы.

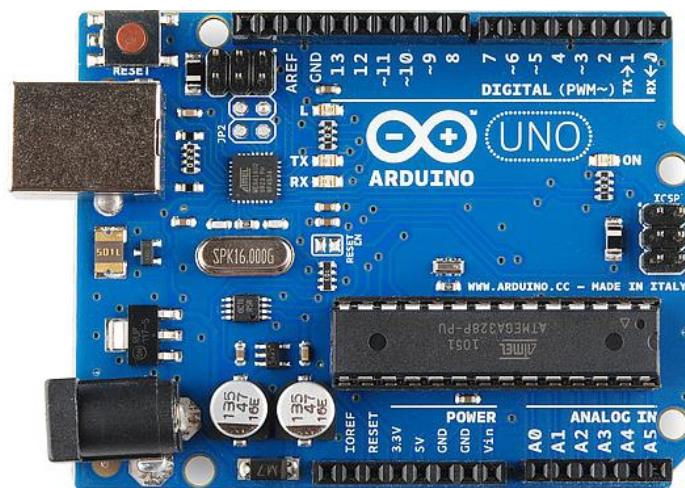


Рисунок 9 – Платы Arduino UNO

Uno – одна из самых популярных линеек в семье Arduino и отличный выбор для начинающих. Arduino Uno, рисунок 10, контроллер построен на ATmega328. Платформа имеет 14 цифровых вход/выходов (6 из которых могут использоваться как выходы ШИМ), 6 аналоговых входов, кварцевый генератор 16 МГц, разъем USB, силовой разъем, разъем ICSP и кнопку перезагрузки. Для работы необходимо подключить платформу к компьютеру посредством кабеля USB, либо подать питание при помощи адаптера AC/DC или батареи.

Существует множество разновидностей плат Arduino, которые можно использовать для разных целей. Некоторые платы немного отличаются от представленных ниже, но большинство Arduinos имеют большинство общих компонентов:

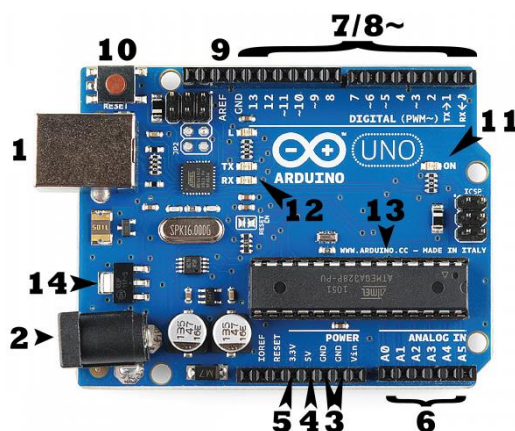


Рисунок 10 – Pins Arduino

Питание (USB / Баррель)

Каждая плата Arduino должна быть подключена к источнику питания. Arduino UNO может получать питание от USB-кабеля, идущего от вашего компьютера, или от настенного блока питания (например, такого), который подключен к разъему. На рисунке выше USB-соединение обозначено (1), а цилиндрический разъем (2).

Pins (5 V, 3.3 V, GND, Analog, Digital, PWM, AREF)

Контакты (5 V, 3,3 V, GND, аналоговый, цифровой, ШИМ, AREF)

Контакты на Arduino — это то место, где провода соединены для построения схемы (возможно, в сочетании с компоновкой и некоторыми проводами [8]. Они обычно имеют черный пластиковый «разъем», который позволяет просто подключать провода непосредственно к плате. Arduino имеет Несколько разных типов выводов, каждый из которых отмечен на доске для разных функций:

- GND (3): сокращение от «Ground». На Arduino есть несколько выводов GND, каждый из которых может использоваться для заземления вашей цепи;
- 5 V (4) и 3,3 V (5). Как вы можете догадаться, 5-вольтный вывод подает 5 вольт питания, а 3,3-вольтный вывод 3,3 вольт. Большинство простых компонентов, используемых с Arduino, работают от напряжения 5 или 3,3 Вольт;
- аналоговый (6): площадь выводов под меткой «Аналоговый вход» (от A0 до A5 в UNO) — это выводы аналогового входа. Эти контакты могут считывать сигнал с аналогового датчика (например, датчика температуры) и преобразовывать его в цифровое значение, которое мы можем прочесть;
- цифровой (7): напротив аналоговых выводов расположены цифровые выводы (от 0 до 13 в UNO). Эти контакты могут использоваться как для цифрового входа (например, для сообщения о нажатии кнопки), так и для цифрового выхода (например, для питания светодиода);
- ШИМ (8): возможно, вы заметили тильду (~) рядом с некоторыми цифровыми контактами (3, 5, 6, 9, 10 и 11 в UNO). Эти контакты действуют как

обычные цифровые контакты, но также могут использоваться для так называемой широтно-импульсной модуляции (ШИМ). У нас есть учебное пособие по ШИМ, но пока мы думаем, что эти контакты способны имитировать аналоговый выход (например, затухание и включение светодиода);

- AREF (9): обозначает аналоговый эталон. Большую часть времени можем оставить эту булавку в покое. Это иногда используется для установки внешнего опорного напряжения (от 0 до 5 вольт) в качестве верхнего предела для аналоговых входных выводов.

Кнопка сброса

Как и в оригинальном Nintendo, в Arduino есть кнопка сброса (10). Нажатие на него временно подключит контакт сброса к земле и перезапустит любой код, который загружен на Arduino. Это может быть очень полезно, если код не повторяется, но протестировать его несколько раз. Однако, в отличие от оригинального Nintendo, удары по Arduino обычно не решают никаких проблем.

Индикатор питания

Прямо под и справа от слова «UNO» на печатной плате, рядом со словом «ON» (11) находится маленький светодиод. Этот светодиод должен загораться всякий раз, когда вы подключаете Arduino к источнику питания.

Светодиоды TX RX

TX коротка для передачи, RX коротка для приема. Эти маркировки появляются в электронике, чтобы показать контакты, отвечающие за последовательную связь. В нашем случае в Arduino UNO есть два места, где появляются TX и RX - один раз с помощью цифровых выводов 0 и 1, а второй раз рядом с индикаторами TX и RX (12). Эти светодиоды дадут нам приятную визуальную индикацию всякий раз, когда наше Arduino получает или передает данные (например, когда мы загружаем новую программу на плату).

Главный IC

Черная вещь со всеми металлическими ножками — это интегральная схема или интегральная схема (13). Думайте об этом как о мозгах нашего Arduino. Основная микросхема на Arduino немного отличается от типа платы к типу платы,

но обычно от линии микросхем ATmega от компании ATMEL. Это может быть важно, так как вам может потребоваться узнать тип микросхемы (вместе с типом вашей платы) перед загрузкой новой программы из программного обеспечения Arduino. Эту информацию обычно можно найти в письменном виде на верхней стороне ИС. Если вы хотите узнать больше о разнице между различными микросхемами, почитать таблицы часто бывает хорошей идеей.

Регулятор напряжения

Регулятор напряжения (14) — это не то, с чем вы можете (или должны) взаимодействовать на Arduino. Но потенциально полезно знать, что он там есть и для чего он нужен. Регулятор напряжения делает именно то, что говорит - он контролирует величину напряжения, которое подается на плату Arduino. Думайте об этом как о привратнике; это отключит дополнительное напряжение, которое может повредить цепь. Конечно, у него есть свои пределы, поэтому не подключайте Arduino к значениям выше 20 вольт.

2 Программное обеспечение

Simulink, дополнительный продукт для MATLAB, предоставляет интерактивную, графическую среду для моделирования, симуляции и анализа динамических систем. Это позволяет быстрое создание виртуальных прототипов для изучения концепций дизайна на любом уровне детализации с минимальными усилиями. Для моделирования Simulink предоставляет графический интерфейс пользователя (GUI) для построения моделей в виде блок-схем. Включает в себя обширную библиотеку предопределенных блоков, которые будут использоваться для построения графических моделей систем с использованием перетаскивания операций с помощью мышки. Пользователь может создать «работающую» модель, но для этого потребуются часы для сборки в лабораторной среде. Программный продукт поддерживает линейные и нелинейные системы, позволяет изменять параметры «на лету». Simulink интегрирован с MATLAB, и данные могут быть легко переданы между программами, [9].

В Simulink есть две основные категории элементов:

- блоки;
- линии.

Блоки используются для генерации, изменения, объединения, вывода и отображения сигналов.

Линии используются для передачи сигналов из одного блока в другой.

Существует несколько общих классов блоков:

- источники: используются для генерации различных сигналов. У блоков источников есть выходы, но нет входов;

Генератор импульсов, или Унифицированное случайное число для имитации шума.

Часы могут быть использованы для создания индекса времени для построения графиков.

- стандартные блоки используются для вывода или отображения сигналов. Блоки имеют входы, но нет выходов. Примерами являются Scope, Display, To Workspace, Floating Scope, XY Graph ит. д;
- дискретный: дискретный фильтр, дискретное пространство состояний, дискретный перенос Fcn, дискретный нулевой полюс. Задержка устройства и т. д;
- непрерывный: Интегратор, State-Space, Transfer Fcn, Zero-Pole ит. д;
- маршрутизация сигналов: Mux, Demux, Switch и т. д;
- математические операции: Abs, Gain, Product, Slider Gain, Sign, Sum ит. д.

2.1 Simulink и Arduino

Программирование на Arduino может отнимать много времени для таких задач, как построение сенсорных данных или внедрение сложной математики, обработки сигналов или процедур управления в проекты [10].

MATLAB и Simulink решают несколько проблем с традиционным программированием Arduino. Продукты поддерживают два основных рабочих процесса:

- чтение, запись и анализ данных с датчиков Arduino;
- разработка алгоритмов, которые работают автономно на устройстве Arduino.

Чтение, запись и анализ данных с датчиков Arduino

Пакет поддержки MATLAB для Arduino позволяет писать программы MATLAB, которые читают и записывают данные на Arduino и подключенные устройства. Поскольку MATLAB является интерпретируемым языком высокого уровня, программирование с ним проще, чем с C / C ++ и другими скомпилированными языками [11]. MATLAB включает в себя тысячи встроенных математических, инженерных и графических функций, которые позволяют использовать для быстрого анализа и визуализации данных,

собранных с Arduino. На рисунке 11 приведено подключение Arduino к компьютеру, на котором работает MATLAB.



Рисунок 11 – Arduino подключается к компьютеру, на котором работает MATLAB

Simulink support package for Arduino позволяет разрабатывать алгоритмы в Simulink, в среде блок-схем для моделирования динамических систем и разработки алгоритмов, и запускать их автономно на Arduino. Пакет поддержки расширяет Simulink блоками для настройки датчиков Arduino для считывания и записи данных с них. После создания модели Simulink возможно смоделировать ее, настроить параметры алгоритма до тех пор, пока не получится нужный результат. С помощью функционального блока MATLAB мы можем включить код MATLAB в модель Simulink (рисунок 12).

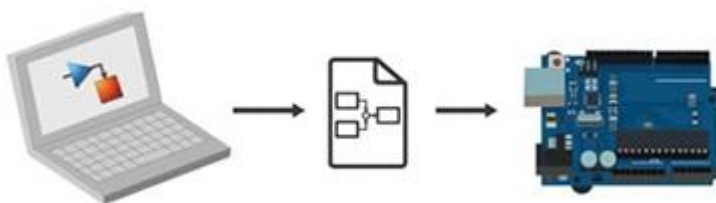


Рисунок 12 – Поддержка Simulink для Arduino

Преимущества использования Simulink для программирования Arduino:

- разработка и симулирование алгоритмов в Simulink с использованием автоматической генерации кода для запуска их на устройстве;
- использование обработки сигналов, проектирования управления, логики состояния и других сложные математических и инженерных процедур в аппаратные проекты;

- интерактивная настройка и оптимизация параметров при запуске алгоритма на устройстве;
- легкое модифицирование алгоритмов для работы на других аппаратных платформах.

2.2 Simulink Arduino Support package

Пакет поддержки Simulink для оборудования Arduino позволяет создавать и запускать модели Simulink на плате Arduino. Пакет включает в себя библиотеку блоков Simulink для настройки и доступа к датчикам, исполнительным механизмам и интерфейсам связи Arduino. Кроме того, пакет позволяет нам отслеживать и настраивать алгоритмы, работающие на плате Arduino из тех же моделей Simulink, из которых были разработаны алгоритмы.

Библиотеки блоков Arduino

Пакет поддержки Simulink для оборудования Arduino предоставляет простой способ создания алгоритмов, использующих датчики и исполнительные механизмы Arduino, с помощью блоков, которые можно добавить в модель Simulink [12]. Блоки используются для настройки соответствующих датчиков и исполнительных механизмов, а также для считывания и записи данных в них. Для этого вводим Library Browser в MATLAB. Откроется браузер Simulink Library. В браузере библиотек Simulink выбираем пакет поддержки Simulink для оборудования Arduino Common (рисунок 13).

Arduino Common Blocks

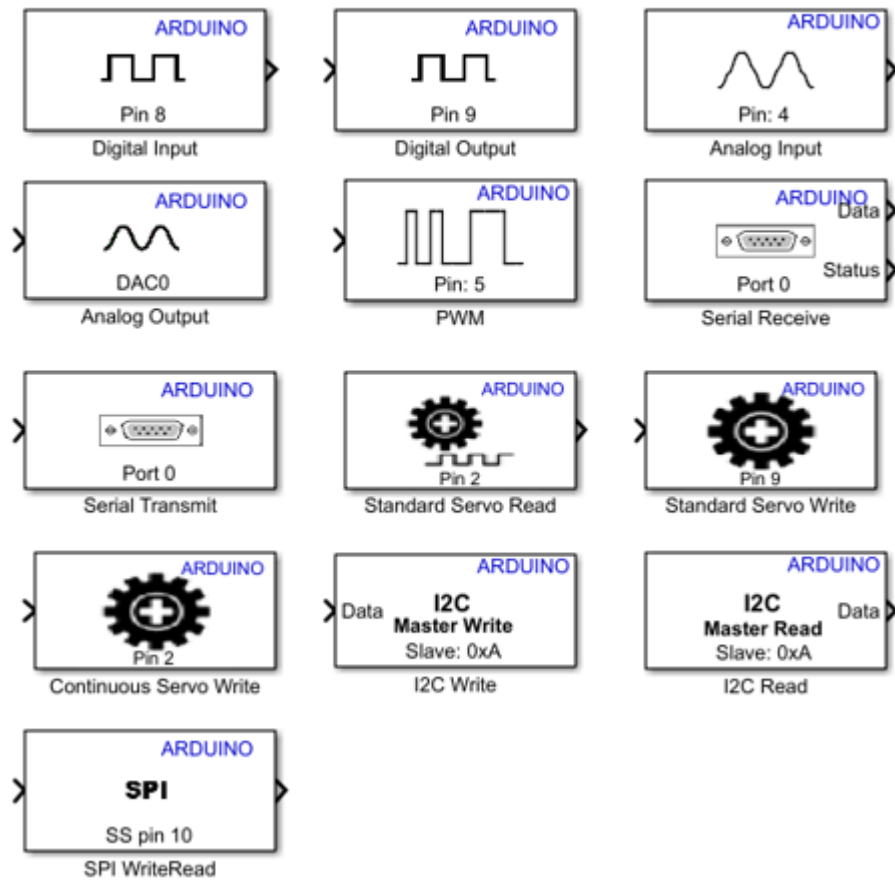


Рисунок 13 – Библиотека блоков Simulink для использования с Arduino

Из библиотеки блоков Arduino, выбираем блок Аналоговый вход (AnalogInput), блок аналоговый выход (AnalogOutput), блок серийный прием (SerialReceive), блок ШИМ(PWM). Их действия приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Действия блоков в библиотеке блоков Arduino [13]

Блок аналоговый вход	Измерить напряжение на аналоговом входе.
Блок аналоговый выход	Генерация напряжения на указанном выводе ЦАП в вольтах (В).
Блок серийный прием	Получить массив данных [Nx1] на указанном последовательном порту и записать его на выход блока данных. Если данные недоступны, запишите 0 в вывод блока данных.
Блок ШИМ	Генерация прямоугольной формы на указанном выводе аналогового выхода.

2.3 System Identification Toolbox

System Identification Toolbox (рисунок 14) представляет функции MATLAB, блоки Simulink и приложение для построения математических моделей динамических систем из измеренных данных ввода-вывода. Это позволяет нам создавать и использовать модели динамических систем, которые сложно смоделировать на основе первых принципов или спецификаций. Мы можем использовать данные ввода-вывода во временной и частотной областях для определения функций передачи в непрерывном и дискретном времени, моделей процессов и моделей в пространстве состояний. Инструментарий также представляет алгоритмы для встроенной онлайн-оценки параметров.

Инструментарий представляет методы идентификации, такие как максимальное правдоподобие, минимизация ошибок предсказания (РЕМ) и идентификация подпространственной системы. Чтобы представить динамику нелинейной системы, мы можем оценить модели Хаммерштейна-Винера и нелинейные модели ARX с нелинейностью вейвлет-сети, разбиения дерева и сигмоидальной сети. Панель инструментов выполняет идентификацию системы «серого ящика» для оценки параметров определенной пользователем модели. Мы можем использовать идентифицированную модель для прогнозирования реакции системы и моделирования проектирования в Simulink. Инструментарий

также поддерживает моделирование и прогнозирование данных временных рядов.

При помощи System Identification Toolbox можно использовать следующие методы идентификации [14]:

- максимального правдоподобия;
- минимизации ошибки прогноза (PEM - prediction-error minimization);
- системной идентификации подмножества.

Для нелинейной динамики системы вейвлет-сеть может быть использована для оценки модели Хаммерштейна-Вейнера и нелинейной модели ARX (модель авторегрессии с внешним входом), модели с разделением деревьев и модели с нелинейной S-образной сетью.

Используя инструмент System Identification Toolbox, мы можем идентифицировать систему как черный ящик для оценки параметров определенной пользователем модели. Мы можем использовать идентифицированные модели для прогнозирования реакции системы и моделирования в Simulink.

Панель инструментов идентификации системы также позволяет пользователям моделировать и прогнозировать временные данные.

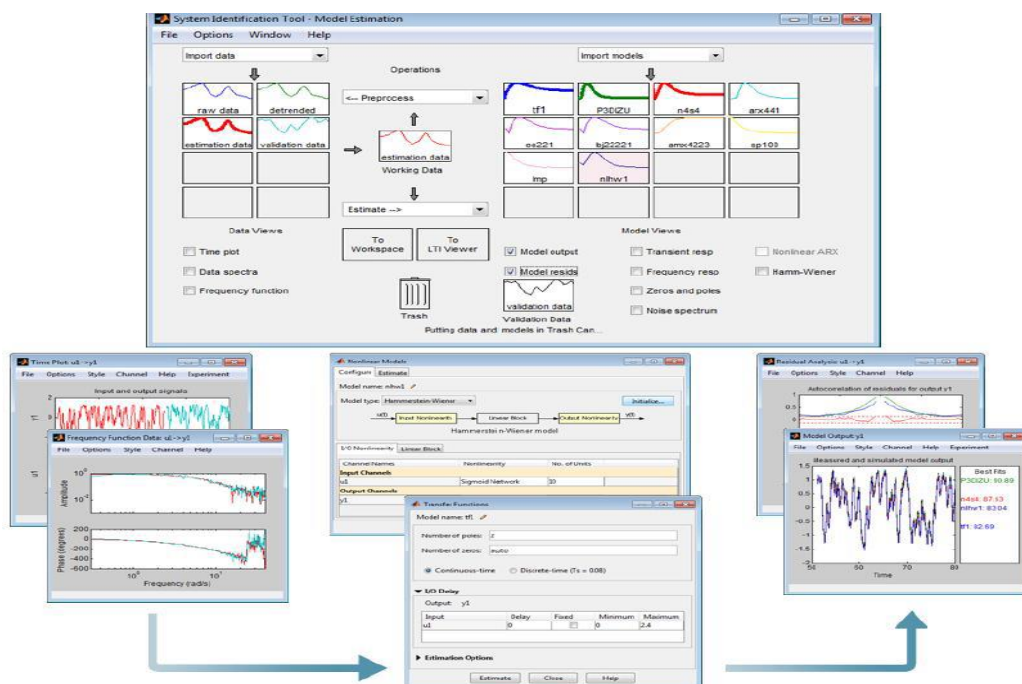


Рисунок 14 – System Identification Toolbox

Идентификация моделей по данным

System Identification Toolbox позволяет пользователю создавать модели по измеренным данным на входе и выходе. С его помощью можно [14]:

- анализировать и обрабатывать данные;
- определять подходящую структуру, порядок модели и выполнять оценку параметров модели;
- проверять достоверность полученной модели.

Идентифицированная линейная модель может быть использована для анализа и проектирования системы управления с использованием панели инструментов системы управления. Мы можем добавить идентифицированные модели в Simulink, используя блоки, предоставляемые инструментарием. Также возможно делать прогнозы, используя идентифицированные модели.

Основные особенности

1. определение передаточной функции, модели процесса и возможности оценки модели в пространстве состояний на основе данных отклика в частотной и временной областях.
2. возможность использовать методы идентификации типов для оценки моделей авторегрессии (ARX, ARMAX), моделей Бокса-Дженкинса (Box-Jenkins) и моделей ошибок вывода (error output): максимальная вероятность, минимизация ошибок прогнозирования (PEM - прогнозирование - подпространственная система).
3. имитация временных рядов (AR, ARMA, ARIMA) и прогнозов.
4. определить входные и выходные нелинейные модели ARX и модели Хаммерштейна-Винера с нелинейностями, такими как насыщенность и мертвые зоны.
5. определить линейные и нелинейные системы как черные ящики для оценки пользовательских моделей.
6. оценить задержку, устранение трендов, фильтрацию, повторную выборку и восстановление потерянных данных.

2.4 PID-Tuner

Приложение PID Tuner (рисунок 15), автоматически настраивает усиление ПИД-регулятора для установки SISO для достижения баланса между производительностью и надежностью. Есть возможность указать тип контроллера, например, PI, PID с производным фильтром или PID-контроллеры с двумя степенями свободы (2-DOF). Графики анализа позволяют исследовать производительность контроллера во временной и частотной областях. Есть возможность в интерактивном режиме улучшить производительность контроллера, чтобы отрегулировать ширину полосы контура и запас по фазе или обеспечить отслеживание заданного значения или отклонение помех.

Есть возможность использовать ПИД-тюнер с установкой, представленной числовой моделью LTI, такой как модель передаточной функции (tf) или пространства состояний (ss). При наличии программного обеспечения Simulink Control Design, можно использовать PID Tuner для настройки блока ПИД-контроллера или ПИД-контроллера (2DOF) в модели Simulink [15]. При наличии программного обеспечения System Identification Toolbox можно смоделировать данные и разработать контроллер для предполагаемой установки.

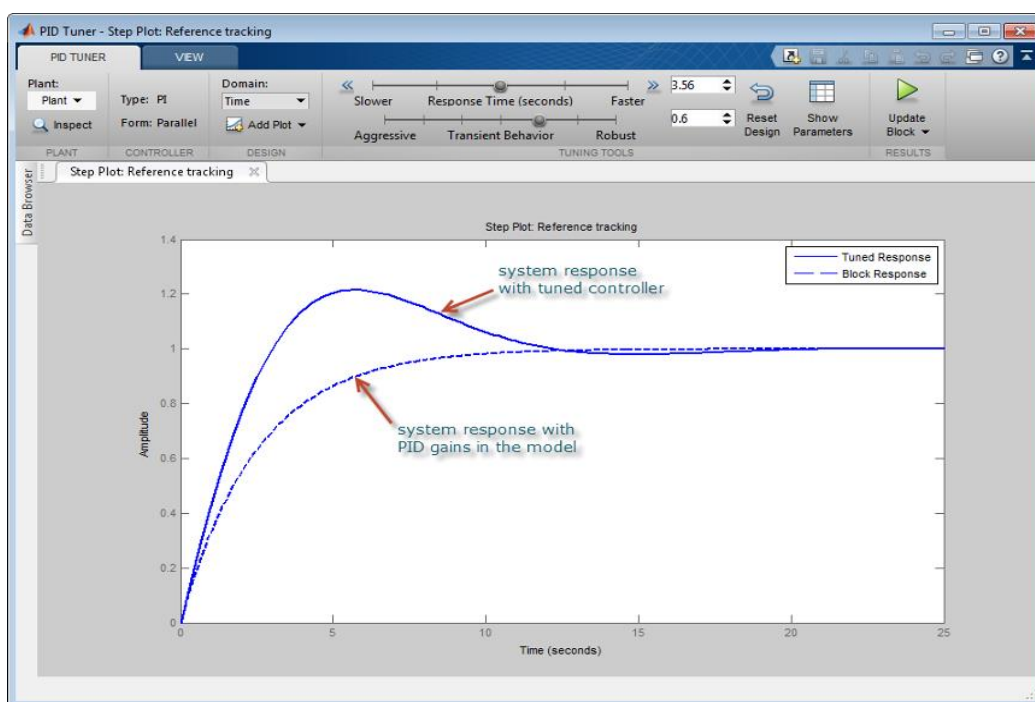


Рисунок 15 – PID Tuner

Автоматическая настройка усиления ПИД-регулятора

Настройка ПИД-регулятора – это процесс нахождения значений пропорционального, интегрального и производного коэффициентов усиления ПИД-регулятора для достижения желаемой производительности и соответствия проектным требованиям.

Настройка ПИД-регулятора кажется простой, но поиск набора коэффициентов усиления, обеспечивающих наилучшую производительность вашей системы управления, является сложной задачей. Традиционно ПИД-регуляторы настраиваются либо вручную, либо с использованием методов, основанных на правилах. Методы ручной настройки являются многократными и требуют много времени, и при использовании на оборудовании они могут привести к повреждению. Методы, основанные на правилах, также имеют серьезные ограничения: они не поддерживают определенные типы моделей растений, такие как нестабильные растения, растения высокого порядка или растения с небольшой или нулевой временной задержкой.

Мы можем автоматически настраивать ПИД-регуляторы для достижения оптимального проектирования системы и удовлетворения требований проектирования, даже для моделей, для которых традиционные методы, основанные на правилах, не могут хорошо обрабатывать данные. Для получения дополнительной информации см. Control System Toolbox для использования с MATLAB и Simulink. [16].

Процесс автоматической настройки PID включает в себя:

- идентификация модели установки по данным испытаний ввода-вывода;
- моделирование ПИД-контроллеров в MATLAB с использованием объектов ПИД или в Simulink с использованием блоков ПИД-контроллера;
- автоматическая настройка усиления ПИД-регулятора и интерактивная настройка вашего дизайна;
- настройка нескольких контроллеров в пакетном режиме.

3 Разработка модели на основе экспериментальных данных

Установка регулятора на физическом прототипе или целевом устройстве может быть очень опасной и даже может привести к повреждению устройства. Более надежным подходом является построение модели целевой системы и моделирование ее работы. Такой подход позволяет регулятору работать в широком диапазоне условий эксплуатации в течение длительного времени, прежде чем начинать использовать реальное оборудование без лишнего риска. Если модель целевой системы не может быть изначально создана – альтернативой является создание модели на основе экспериментальных данных, полученных в ходе эксперимента с устройством-прототипом. Упрощенная линейная модель системы может быть достаточной для разработки на начальном этапе. Однако детальный анализ и разработка высокоточных регуляторов предъявляет высокие требования к точности целевой модели, которая обычно является нелинейной. В литературе [1], на примере простой системы управления для двигателя постоянного тока, будет описан процесс идентификации модели целевой системы на основе базовой модели и экспериментальных данных и создания регулятора для полученной системы.

Чтобы разработать контроллер обратной связи, который позиционирует ротор двигателя в нужном положении. Задача регулятора состоит в том, чтобы генерировать соответствующее напряжение на выходе в зависимости от текущего положения ротора двигателя. В зависимости от напряжения на клеммах крутящий момент на валу двигателя изменяется, вызывая изменение скорости. Для измерения угла поворота вала двигателя будет использоваться потенциометр, и мы будем подавать данные на вход микропроцессора с помощью регулятора. Плата привода двигателя необходима для обеспечения необходимого тока в обмотках, и двигателем можно управлять в обоих направлениях. Информация о положении вала двигателя, снимаемая с потенциометра, отправляется на аналоговый вход платы Arduino. С помощью этих данных мы можем легко рассчитать погрешность между фактическим положением вала и желаемой осью. Управляющее напряжение устанавливается

с использованием двух широтно-импульсных выходов (ШИМ). ШИМ подается на вход привода, который контролирует величину тока в обмотках двигателя. Задача регулятора состоит в том, чтобы поддерживать стабильность системы и обеспечивать быструю реакцию на управляющие сигналы, сохраняя при этом минимальную стационарную ошибку и выбросы.

В исследовании будут задействованы две модели. Первая модель (рисунок 16), расположенная на плате Arduino, предназначена для связи с двигателем соответствующим образом. К плате Arduino подключается персональный компьютер (ПК) и встроенная поддержка Arduino в Simulink. Блок "Voltage Command To Pins", получив команду напряжения от ПК через последовательный порт, читает приходящие команды и управляет подачей ШИМ на соответствующие контакты макетной платы [1]. Для связи ПК с платой Arduino используется COM порт. В подсистеме "CreateMessage" информация о позиции вала двигателя, полученная от одного из аналоговых входных контактов на плате, преобразуется в пакет данных для передачи через последовательный порт на компьютер.

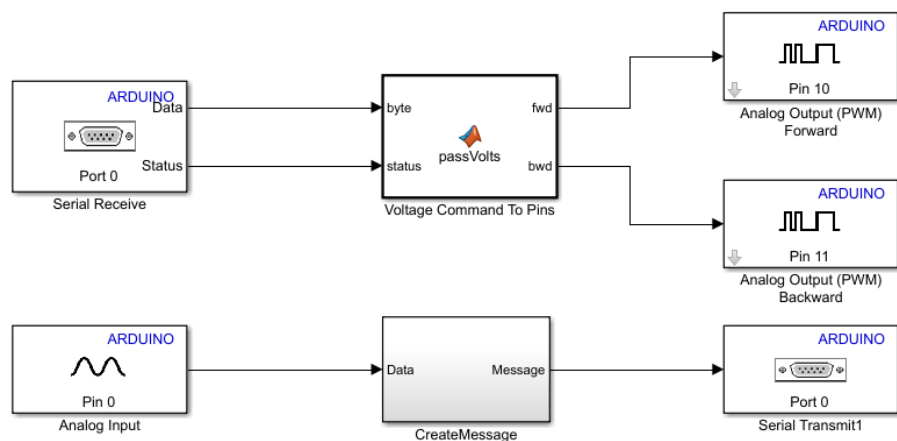


Рисунок 16 – Модель Simulink, которая работает на Arduino

Вторая модель (рисунок 17), позволяет управлять двигателем. Блок напряжения Reference Voltage — построитель сигналов создает различные командные сигналы напряжения, которые предназначены для возбуждения динамики системы [17]. Последовательный интерфейс, реализованный на блоке

Matlab-function, обеспечивает связи с двигателем, и предназначен для отправки и приема данных.

Блок Voltage to uint8, обрабатывает нужные нам данные перед их отправкой через последовательный порт. После запуска приложения данные об отклике системы с помощью модели поступают на компьютер [17].

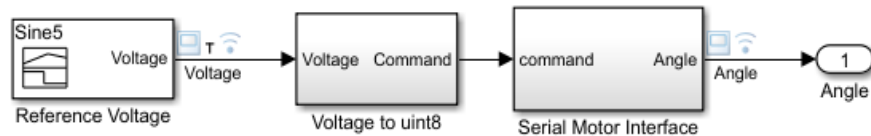


Рисунок 17 – Модель, которая работает на ПК

Используя следующий скрипт, преобразуем полученные данные в объект `iddata` для импорта в System Identification Tool из System Identification Toolbox:

```

>> Logout
logout =
Simulink.SimulationData.Dataset
Package: Simulink.SimulationData
Characteristics:
Name: 'logout'
Total Elements: 2
Elements:
1: 'Voltage'
2: 'Angle'
-Use getElement to access elements by index or name.
-Use addElement or setElement to add or modify elements.
Methods, Superclasses
>> u = logout.getElement(1).Values.Data;
>> y = logout.getElement(2).Values.Data;
>> bounds1 = iddata(y,u,0.01,'InputName','Voltage','OutputName','Angle',...
...'InputUnit','V','OutputUnit','deg') [17].
  
```

4 Разработка линейной модели системы управления

Определение линейных моделей с помощью приложения System Identification. Оценим и проверим линейные модели на основе данных с одним входом / одним выходом (single-input/single-output (SISO)), чтобы найти модель, которая лучше всего описывает динамику системы. Мы сможем выполнять следующие задачи с помощью приложения System Identification:

- импортируем массивы данных из рабочей области MATLAB в приложение;
- график данных;
- обработка данных, удалив смещения входных и выходных сигналов;
- оценка и проверка результатов линейной модели;
- экспорт моделей в рабочую область MATLAB.

Объект `iddata` включает в себя несколько наборов данных для создания разностороннего воздействия на систему и для проверки работоспособности модели после её создания. Типичный процесс системной идентификации начинается с пробы применения упрощенной линейной модели. Линейная модель может быть вполне применима для большинства случаев управления, но учёт нелинейности позволяет разрабатывать регулятор для работы в широком диапазоне рабочих точек. Импортируем данные с одним входом / одним выходом (SISO) из файла с данными в приложение из рабочей области MATLAB.

Чтобы импортировать массивы данных в приложение System Identification:

Выберем «Импорт данных» > «Объект данных». Это действие открывает диалоговое окно «Импорт данных» (рисунок 18) [18].

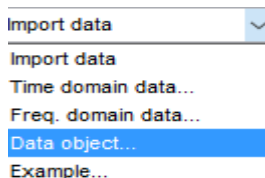


Рисунок 18 – Окно «Импорт данных»

В диалоговом окне «Импорт данных» необходимо указать следующие параметры:

- имя данных - измените имя по умолчанию на данные. Это имя помечает данные в приложении System Identification после завершения операции импорта;
- время начала - введите 0 в качестве времени начала. Это значение обозначает начальное значение временной оси на временных графиках;
- время выборки - введите 0,08 как время между последовательными выборками в секундах. Это значение является фактическим временем выборки в эксперименте.

Диалоговое окно «Импорт данных» теперь напоминает рисунок 19.

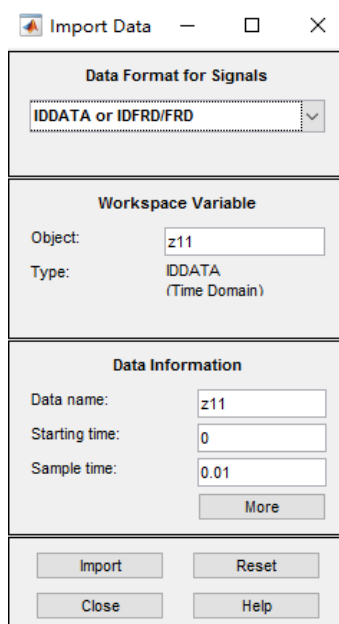


Рисунок 19 – Окно «Импорт данных»

Нажмем «Импорт», чтобы добавить данные в приложение «Идентификация системы». Приложение отображает значок для представления данных (рисунок 20).

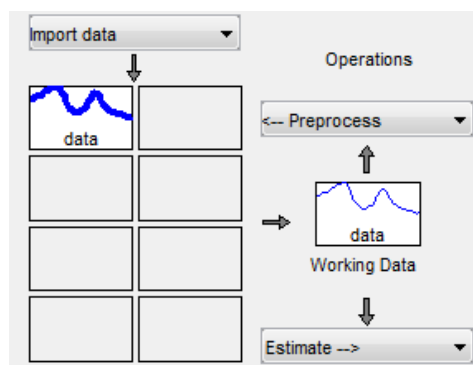


Рисунок 20 – Окно «Идентификация системы»

На рисунках 21 – 25 представлены импульсные сигналы выборок экспериментальных данных (ЭД) № 1 – № 5, полученных с помощью команды `iddata plot`.

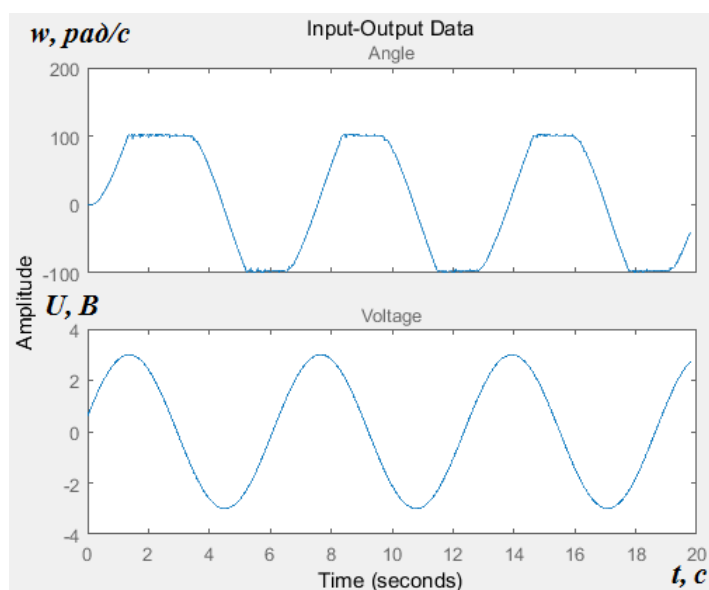


Рисунок 21 – ЭД № 1

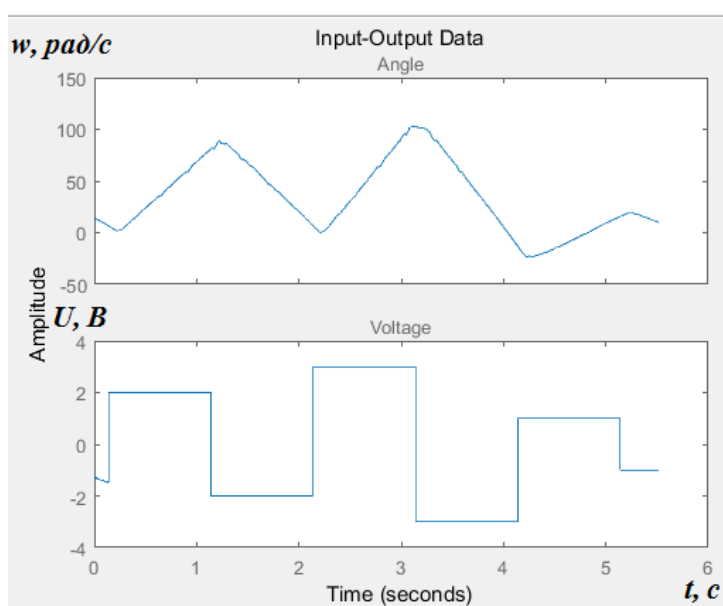


Рисунок 22 – ЭД № 2

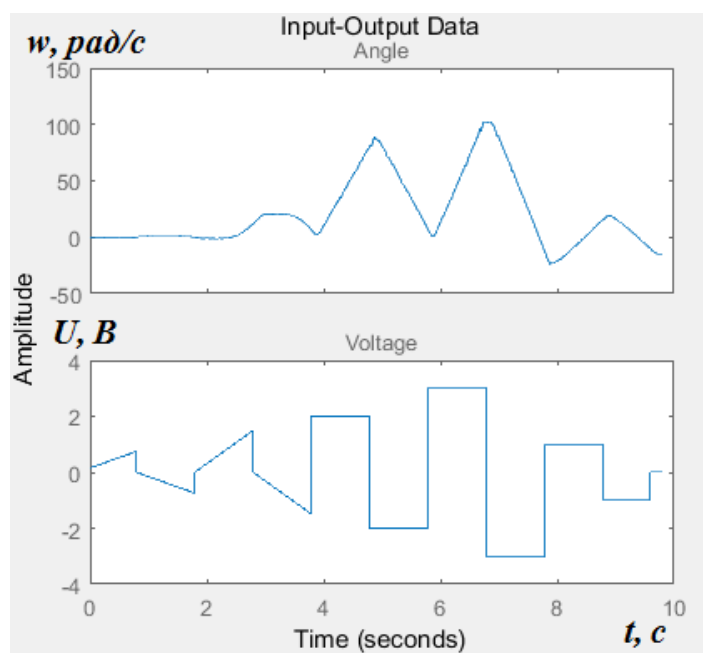


Рисунок 23 – ЭД № 3

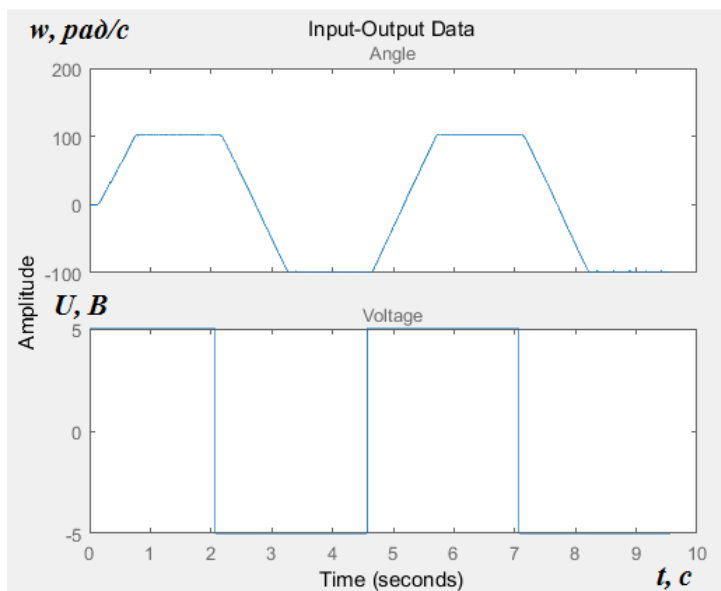


Рисунок 24 – ЭД № 4

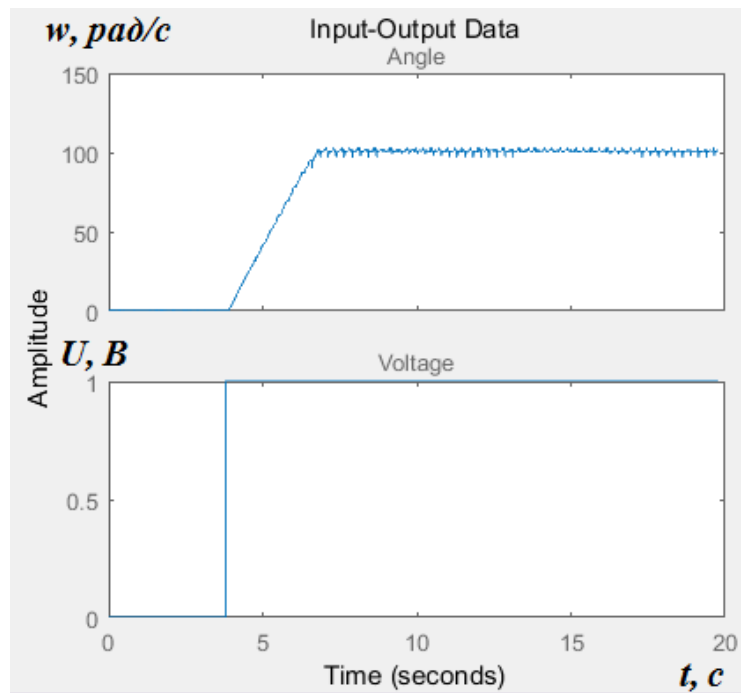


Рисунок 25 – ЭД № 5

На рисунках 26 – 30 приведено сравнение отклика расчетной модели и экспериментальных данных. Для рассматриваемого примера совпадение отклика расчетной линейной модели и (ЭД) составляет 87,81 %, 86,84 %, 76,53 %, 93,28 %, 95,38 %.

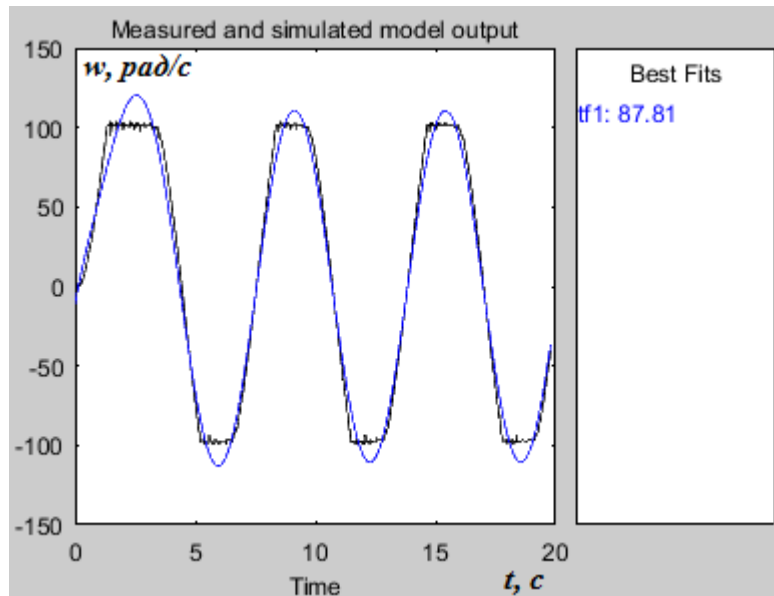


Рисунок 26 – Сравнение отклика расчетной модели и ЭД № 1

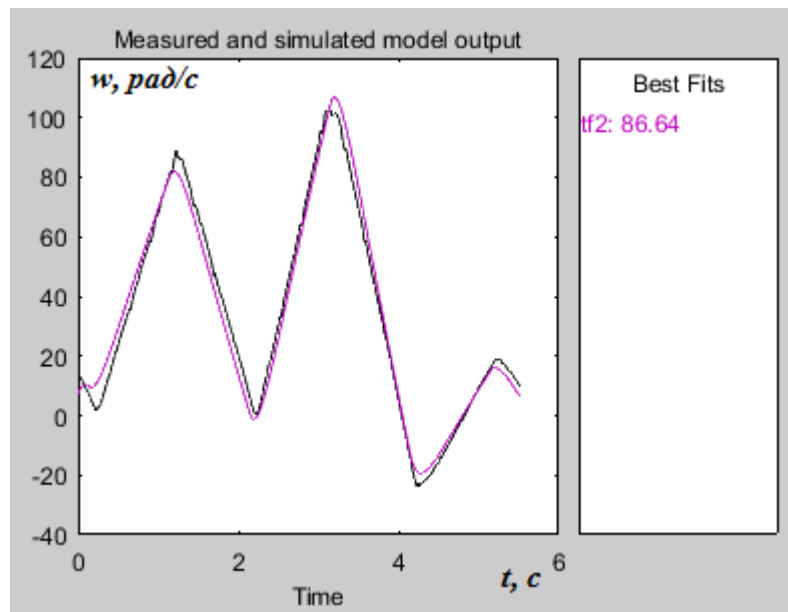


Рисунок 27 – Сравнение отклика расчетной модели и ЭД № 2

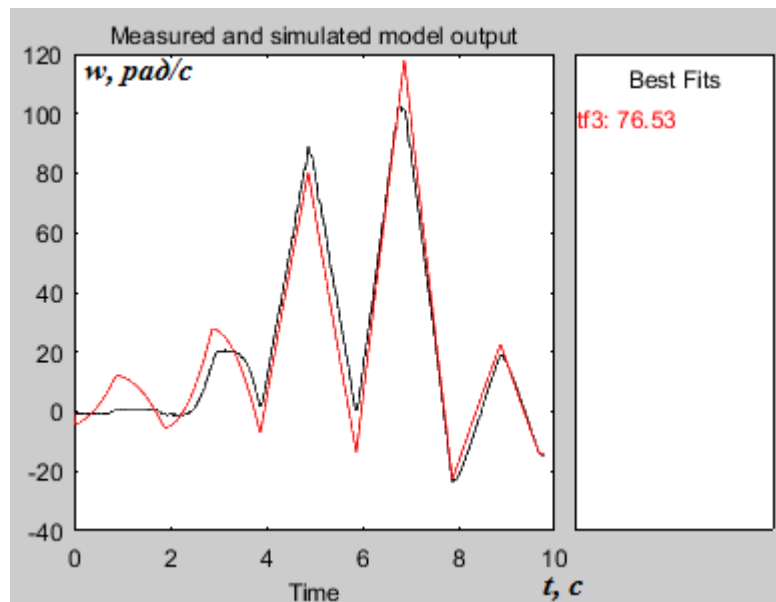


Рисунок 28 – Сравнение отклика расчетной модели и ЭД № 3

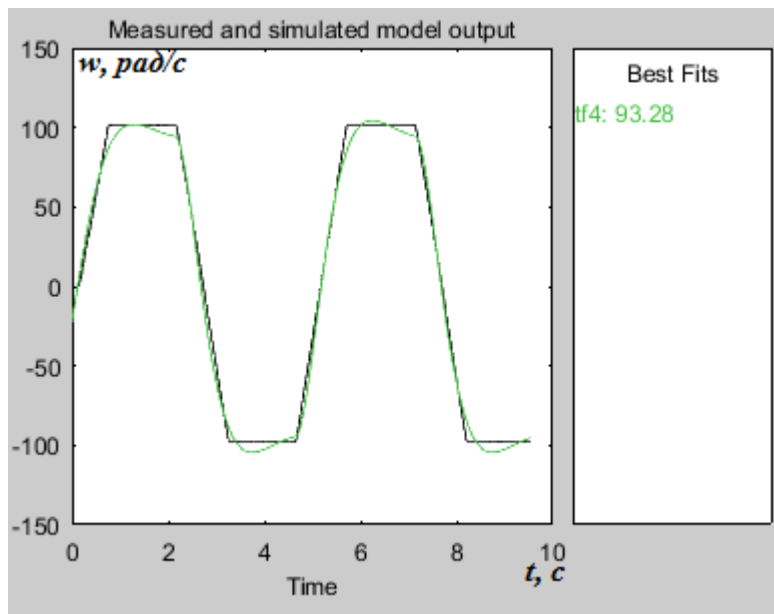


Рисунок 29 – Сравнение отклика расчетной модели и ЭД № 4

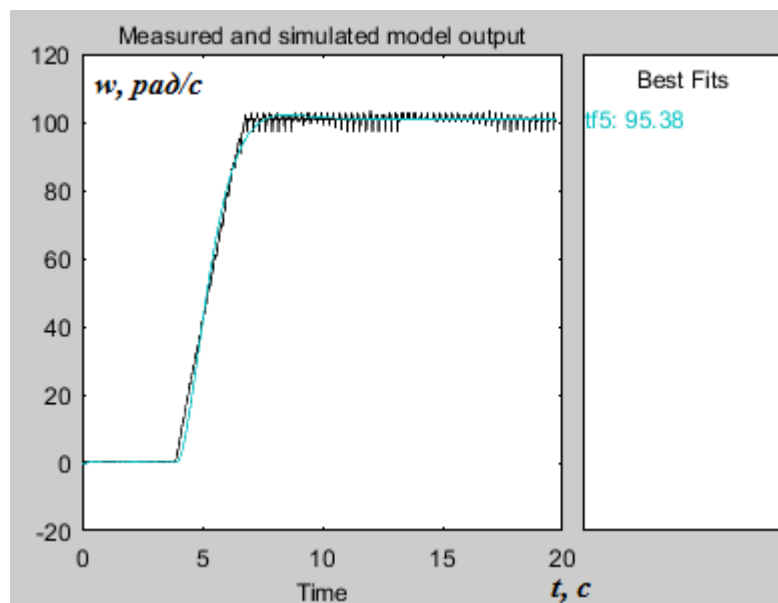


Рисунок 30 – Сравнение отклика расчетной модели и ЭД № 5

4.1 Передаточные функции двигателя постоянного тока

Используя объекты `iddata` System Identification Toolbox, определим передаточные функции (ПФ) в непрерывном времени, как шаблон линейной динамической модели системы [19]. Для этого зададим передаточные функции с 2 полюсами и отсутствием нулей. Результаты определения ПФ ДПТ приведены на рисунках 31 – 35.

Model name:

Color:

From input "Voltage" to output "Angle":

$$\frac{51.13}{s^2 + 1.381 s + 1.129}$$

Name: tf1
Continuous-time identified transfer function.

Рисунок 31 – Определение ПФ ДПТ по ЭД № 1

Model name:

Color:

From input "Voltage" to output "Angle":

$$\frac{424.6}{s^2 + 9.666 s + 1.702}$$

Name: tf2
Continuous-time identified transfer function.

Рисунок 32 – Определение ПФ ДПТ по ЭД № 2

Model name:

Color:

From input "Voltage" to output "Angle":

$$\exp(-0.08*s) * \frac{1.311e04}{s^2 + 287.9 s + 26.31}$$

Name: tf3
Continuous-time identified transfer function.

Рисунок 33 – Определение ПФ ДПТ по ЭД № 3

Model name:

Color:

From input "Voltage" to output "Angle":

$$\exp(-0.08*s) * \frac{127.5}{s^2 + 3.474 s + 6.87}$$

Name: tf4
Continuous-time identified transfer function.

Рисунок 34 – Определение ПФ ДПТ по ЭД № 4

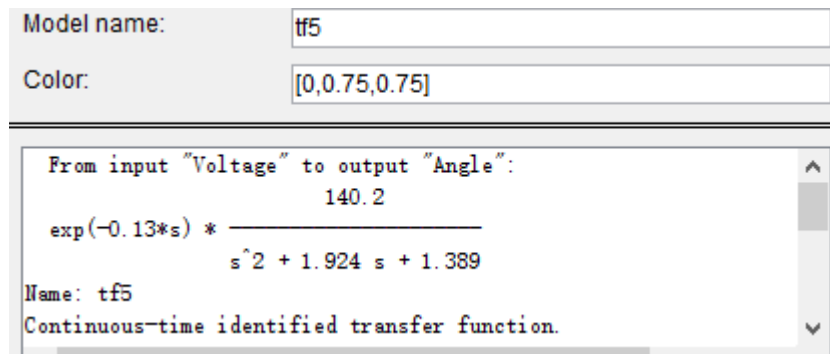


Рисунок 35 – Определение ПФ ДПТ по ЭД № 5

Анализируя результаты эксперимента, представленные на рисунках 31 – 35, можем записать дискретные ПФ ДПТ:

$$W_{PC1}(z) = \frac{0.002545 \cdot z + 0.002533}{z^2 - 1.986 \cdot z + 0.9863} \quad (1)$$

$$W_{PC2}(z) = \frac{0.02056 \cdot z + 0.01991}{z^2 - 1.908 \cdot z + 0.9079} \quad (2)$$

$$W_{PC3}(z) = \frac{0.306 \cdot z + 0.1237}{z^2 - 1.055 \cdot z + 0.05619} \quad (3)$$

$$W_{PC4}(z) = \frac{0.006301 \cdot z + 0.006229}{z^2 - 1.965 \cdot z + 0.9659} \quad (4)$$

$$W_{PC5}(z) = \frac{0.006965 \cdot z + 0.006921}{z^2 - 1.981 \cdot z + 0.9809} \quad (5)$$

где $W_{PC1}(z) - W_{PC5}(z)$ – дискретные функции разомкнутой системы управления (ДПТ) при единичной обратной связи и отсутствии регулятора.

4.2 Разработка и моделирование регулятора с обратной связью

Для разработку ПИД-регулятора для модели достаточно выбрать рабочую точку, линеаризовать модель в её окрестности, а затем разработать контроллер для этой линеаризованной модели. Для улучшения качества регулирования будем использовать ПИД - регулятор: pidtune [20]. На рисунках 36 – 40 показаны настройка параметров ПИД-регулятора по заданным требованиям.

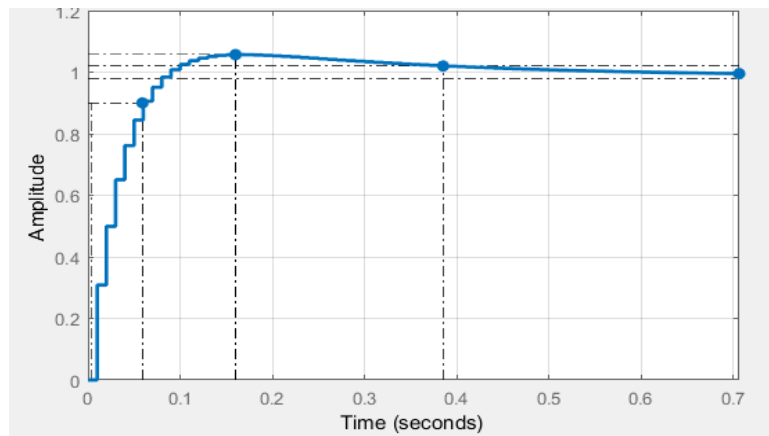


Рисунок – 36 Дискретный сигнал импульсной системы управления с ПИД-регулятором по ЭД № 1

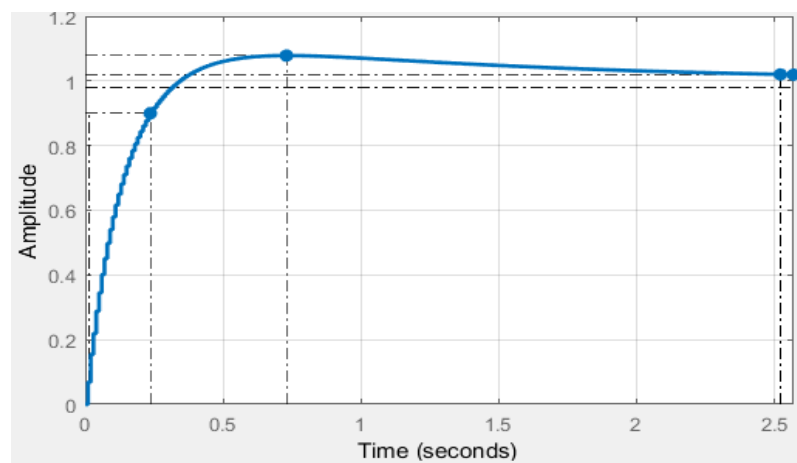


Рисунок – 37 Дискретный сигнал импульсной системы управления с ПИД-регулятором по ЭД № 2

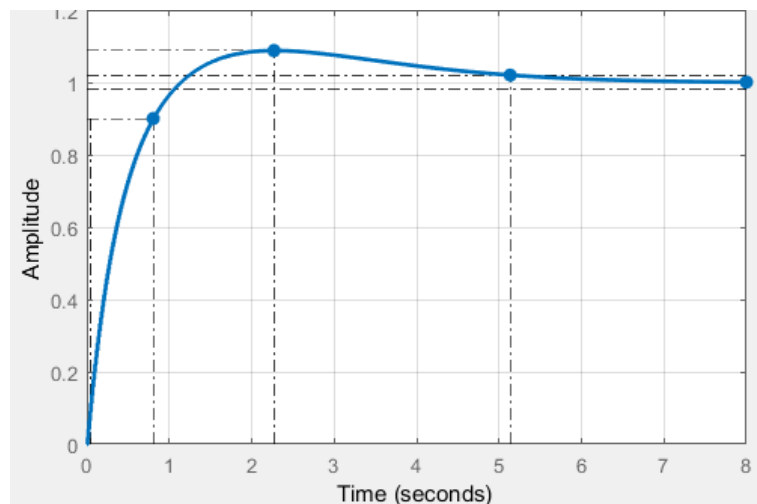


Рисунок – 38 Дискретный сигнал импульсной системы управления с ПИД-регулятором по ЭД № 3

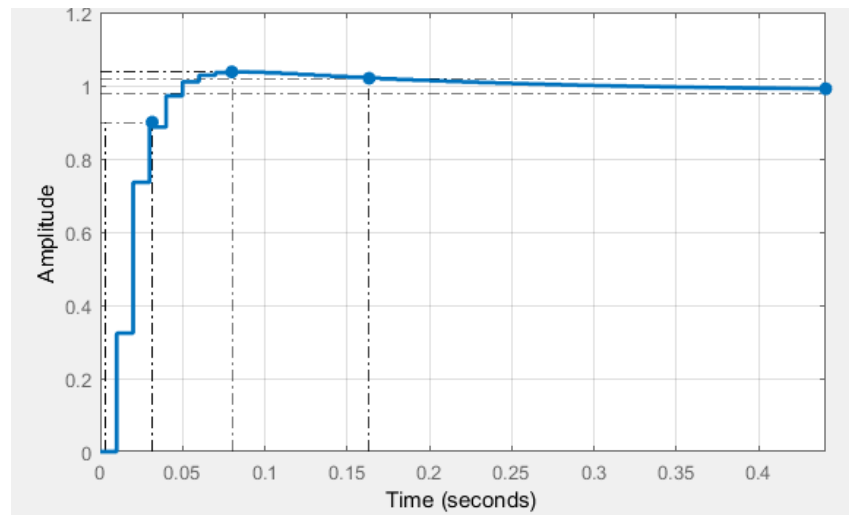


Рисунок – 39 Дискретный сигнал импульсной системы управления с ПИД-регулятором по ЭД № 4

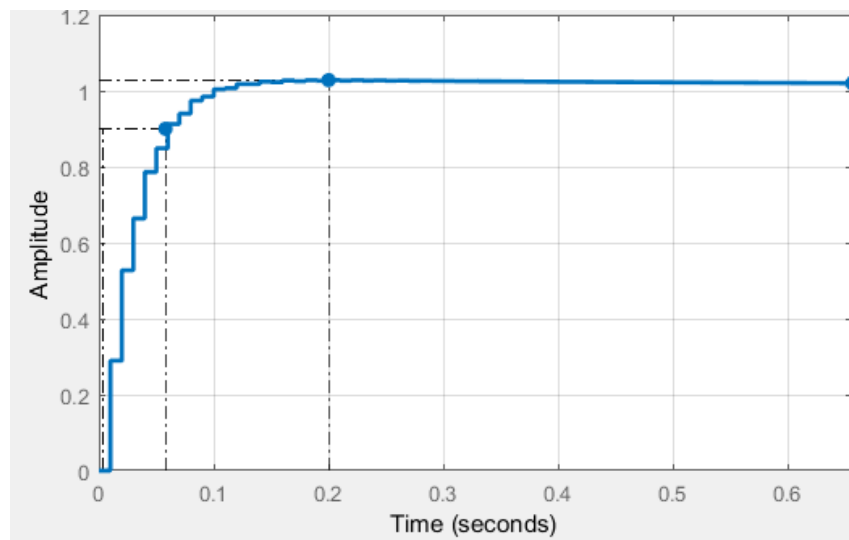


Рисунок – 40 Дискретный сигнал импульсной системы управления с ПИД-регулятором по ЭД № 5

4.3 Сравнение показателей качества

Таблица 4 – Показатели качества систем управления с ПИД -регулятором

Номер ЭД	Совпадение отклика , %	Перерегулирование σ , %	Время переходного процесса t_p , с	Максимальное значение	Время нарастания t_n , с
№ 1	87,81	5,69	0,39	1,06	0,05
№ 2	86,84	7,83	2,53	1,08	0,22
№ 3	76,53	8,77	5,14	1,09	0,76
№ 4	93,28	3,74	0,17	1,04	0,03
№ 5	95,38	2,81	0,67	1,03	0,05

После настройки мы готовы к проверке регулятора на линейных моделях [21]. На рисунке 41 показана модель Simulink для получения отклика от линейных моделей.

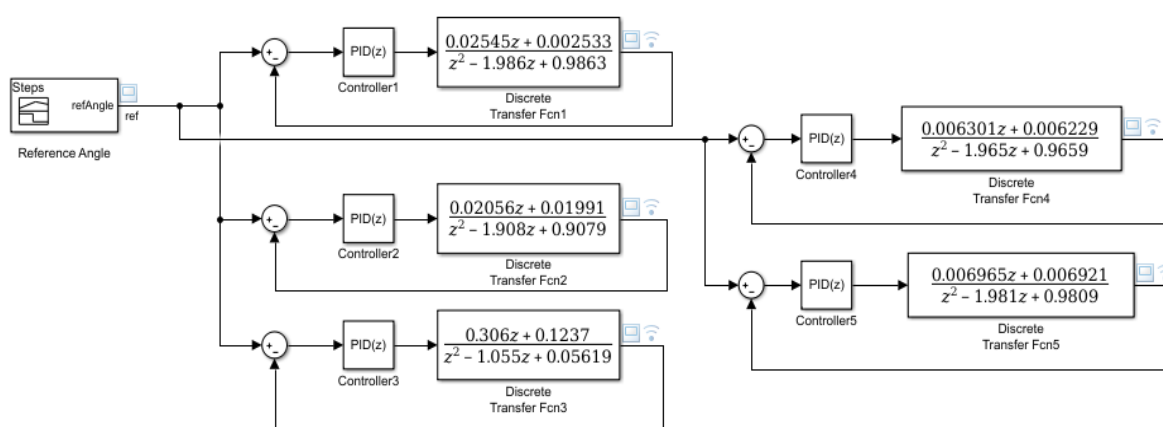


Рисунок – 41 Simulink модель для тестирования регулятора на линейных моделях

После запуска модели мы можем сравнить отклик линейных моделей с обратной связью на ступенчатое воздействие.

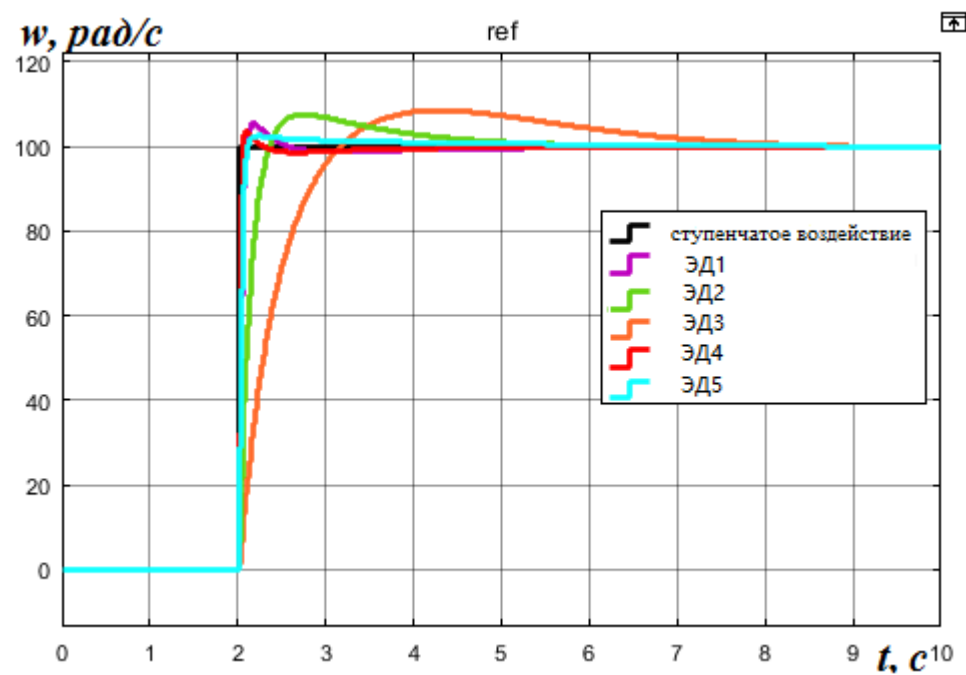


Рисунок – 42 Сравнение откликов линейных моделей на ступенчатое воздействие линеаризованной модели

Вывод: из таблицы 4 какой и рисунка 42, видно, что чем лучше совпадения отклика, тем лучше регулирования. Поскольку ЭД № 1 и № 3 не все части линейные, например, экспериментальные данных № 3, что подгонка в области, где напряжение было высоким, это линейная часть, но подгонка в области, где напряжение было низким, это нелинейная часть, у ее есть зона нечувствительности; а для экспериментальных данных № 1, когда напряжение было достаточно высоким, скорость двигателя достигает максимума и не возрастает, это тоже нелинейная часть. Поэтому, чтобы улучшить качество регулирования, нужно использовать нелинейную модель.

5 Разработка нелинейной модели системы управления

Широко используемые математические модели динамических объектов (спектральные, корреляционные, процессные и т.д.) не применимы в том случае, если объект не является линейным, т.к. они не учитывают характер изменения его свойств.

Для учета свойств таких объектов в состав математических моделей вводятся нелинейные элементы, основанные на использовании искусственных нейронных сетей, вейвлетов и т.д [22]. Основные схемы моделей нелинейных объектов приведены на следующий:

- модель Nonlinear ARX;
- модель Хаммерштейна-Виннера.

5.1 Модель Nonlinear ARX

Модель Nonlinear ARX расширяют линейную модель ARX до нелинейного случая.

Линейная модель SISO ARX имеет следующую структуру [23]:

$$\begin{aligned} y(t) + a_1 \cdot y(t-1) + a_2 \cdot y(t-2) + \dots + a_{na} \cdot y(t-na) \\ = b_1 \cdot u(t) + b_2 \cdot u(t-1) + \dots + b_{nb} \cdot u(t-nb+1) + e(t) \end{aligned} \quad (6)$$

где y – вход сигнала;

u – выход сигнала;

e – шум.

Эта структура подразумевает, что текущий выходной сигнал $y(t)$ прогнозируется как взвешенная сумма прошлых выходных значений и текущих и прошлых входных значений. na – это число прошлых выходных членов, а nb – количество прошлых входных членов, используемых для прогнозирования токовый выход. Заданная задержка nk установлена на ноль для упрощения записи. Переписывание уравнения в виде произведения дает:

$$y_p(t) = [-a_1, -a_2, \dots, -a_{na}, b_1, b_2, \dots, b_{nb}] \cdot [y(t-1), y(t-2), \dots, y(t-na), u(t), u(t-1), \dots, u(t-nb+1)]^T \quad (7)$$

где $y(t-1), y(t-2), \dots, y(t-na), u(t), u(t-1), \dots, u(t-nb-1)$ задерживаются входные и выходные переменные, называемые регрессорами.

Вектор коэффициентов $[-a_1, \dots, b_{nb}]$ представляет взвешивание, применяемое к этим регрессорам, поэтому линейная модель ARX предсказывает текущий выходной сигнал y_p как взвешенную сумму своих регрессоров.

Структура нелинейной модели ARX обеспечивает следующую дополнительную гибкость:

- вместо взвешенной суммы регрессоров, представляющих линейное отображение, нелинейная модель ARX имеет более гибкую функцию нелинейного отображения, F .

$$y_p(t) = F(y(t-1), y(t-2), y(t-3), \dots, u(t), u(t-1), u(t-2), \dots) \quad (8)$$

Входы в F являются модельными регрессорами. Когда указывается структура нелинейной модели ARX, можем выбрать одну из нескольких доступных нелинейных функций. Например, F может представлять собой взвешенную сумму вейвлетов, которые действуют на расстоянии регрессоров от их средних. Для получения дополнительной информации см. Доступные оценки нелинейности для нелинейных моделей ARX.

- Нелинейные регрессоры ARX могут быть как задержанными переменными ввода-вывода, так и более сложными, нелинейными выражениями отложенных входных и выходных переменных. Примерами таких нелинейных регрессоров являются $y(t-1)^2$, $u(t-1) * y(t-2)$, $abs(u(t-1))$ и $max(u(t-1) * y(t-3), -10)$.

Структура моделей Nonlinear ARX

Нелинейная модель ARX (рисунок 43) состоит из модельных регрессоров и оценки нелинейности. Оценщик нелинейности включает в себя как линейные, так и нелинейные функции, которые воздействуют на регрессоры модели для

получения выходных данных модели. Эта блок-схема представляет структуру нелинейной модели *ARX* в сценарии моделирования [24].

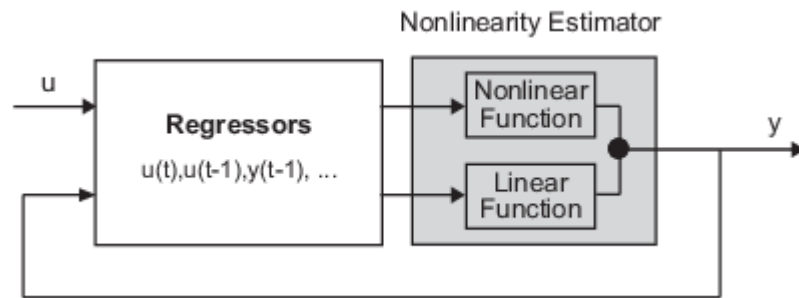


Рисунок 43 – Модель Nonlinear ARX

Программное обеспечение вычисляет выход нелинейной модели *ARX* y в два этапа:

1. Вычисляет значения регрессора из текущих и прошлых входных значений, и прошлых выходных данных;

В простейшем случае регрессорами являются задержанные входы и выходы, такие как $u(t-1)$ и $y(t-3)$. Эти виды регрессоров называются стандартными регрессорами. Задаются стандартные регрессоры, используя модели заказов и задержки. Также можно указать пользовательские регрессоры, которые являются нелинейными функциями задержанных входов и выходов. Например, $u(t-1) \cdot y(t-3)$. Чтобы создать набор регрессоров полиномиального типа, используйте `polyreg`.

По умолчанию все регрессоры являются входными данными как для линейных, так и для нелинейных функциональных блоков оценщика нелинейности. Выбрать поднабор регрессоров в качестве входных данных для нелинейного функционального блока.

2. Отображает регрессоры на выход модели, используя блок оценки нелинейности. Блок оценки нелинейности может включать в себя линейные и нелинейные блоки параллельно. Например:

$$F(x) = L^T(x - r) + d + g(Q(x - r)) \quad (9)$$

где x – вектор регрессоров;

r – среднее значение регрессоров x ;

$L^T(x) + d$ – выход линейного функционального блока и является аффинным, когда $d \neq 0$;

d – скалярное смещение;

$g(Q(x - r))$ – выходной сигнал нелинейного функционального блока;

Q – проекционная матрица, которая делает расчеты хорошо обусловленными.

Точная форма $F(x)$ зависит от выбора оценщика нелинейности. Выбрать одну из доступных оценок нелинейности, таких как сети с разделением на деревья, вейвлет-сети и многослойные нейронные сети. Также можем исключить линейный или нелинейный функциональный блок из оценки нелинейности.

При оценке нелинейной модели ARX программное обеспечение вычисляет значения параметров модели, такие как L , r , d , Q и другие параметры, задающие g .

Получающиеся в результате нелинейные модели ARX являются объектами `idnlarx`, в которых хранятся все данные модели, включая регрессоры модели и параметры оценки нелинейности.

Как правило, мы используем нелинейные модели ARX в качестве структур черного ящика. Нелинейная функция нелинейной модели ARX является гибкой оценкой нелинейности с параметрами, которые не должны иметь физического значения. Оценить нелинейный ARX в приложении System Identification или в командной строке, используя команду `nlarx`. Использовать равномерно дискретизированные данные ввода-вывода во временной области или данные временного ряда (без входных данных) для оценки нелинейных моделей ARX. Наши данные могут иметь один или несколько входных и выходных каналов. Мы не можем использовать данные в частотной области для оценки.

Заказы и задержки модели **Nonlinear ARX**

Используем порядки и задержки нелинейной модели ARX для определения стандартных регрессоров модели. Заказы и задержки определяются следующим образом [25]:

- na – количество прошлых выходных терминов, использованных для прогнозирования текущего выхода;
- nb – количество прошлых входных терминов, использованных для прогнозирования текущего выхода;
- nk – задержка от входа до выхода в зависимости от количества выборок.

Значение na , nb и nk аналогично значению параметров линейной модели ARX. Заказы указываются как скаляры для данных SISO и как матрицы $ny-by-nu$ для данных MIMO, ny и nu – количество выходов и входов. Если мы не уверены, какие значения использовать для заказов и задержек, можем оценить их, как описано в Предварительном шаге – оценка модельных заказов и задержек ввода. Такая оценка основана на линейных моделях ARX и дает только начальное руководство. Лучшие заказы для линейной модели ARX могут не быть лучшими заказами для нелинейной модели ARX.

Программное обеспечение System Identification Toolbox вычисляет стандартные регрессоры с использованием модели заказов и задержек. Например, предположим, что задаем $na = 2$, $nb = 3$ и $nk = 5$ для модели SISO с входом u и выходом y . Панель инструментов вычисляет стандартные регрессоры $y(t-2)$, $y(t-1)$, $u(t-5)$, $u(t-6)$ и $u(t-7)$.

Также можем указать пользовательские регрессоры в дополнение к стандартным регрессорам.

5.2 Модель Хаммерштейна-Виннера

Модели Хаммерштейна-Виннера описывают динамические системы, используя один или два статических нелинейных блока, последовательно соединенных с линейным блоком. Линейный блок представляет собой

дискретную передаточную функцию и представляет динамический компонент модели.

Когда выходные данные системы нелинейно зависят от ее входных данных, иногда можно разделить отношение ввода-вывода на два или более взаимосвязанных элемента. В этом случае представить динамику с помощью линейной передаточной функции и захватить нелинейности с помощью нелинейных модель Хаммерштейна-Виннера достигает этой конфигурации в виде последовательного соединения статических нелинейных блоков с динамическим линейным блоком. Применения модели Хаммерштейна-Виннера охватывают несколько областей, таких как моделирование электромеханической системы и радиочастотных компонентов. Речевая обработка и интеллектуальное управление химическими процессами. Эти модели имеют удобное блочное представление, прозрачную связь с линейными системами и их легче реализовать, чем нелинейные модели для тяжелых условий эксплуатации, такие как нейронные сети и модели Вольтерра.

Оценить модели Хаммерштейна-Виннера в приложении System Identification или в командной строке с помощью команды *nlhw* [26]. Чтобы оценить модель Хаммерштейна-Виннера, сначала подготовим оценочные данные. Затем настраиваем структуру модели и алгоритм оценки, а затем выполняем оценку. После оценки можем проверить оценочную модель, как описано в Валидации моделей Хаммерштейна-Виннера.

Настройка структуры модели Хаммерштейна-Виннера

Структура модели Хаммерштейна-Виннера состоит из входных и выходных нелинейных блоков, последовательно соединенных линейным блоком. Линейный блок представляет собой дискретную передаточную функцию и представляет динамический компонент модели, [27].

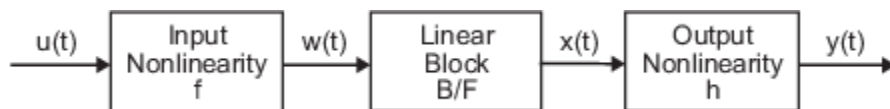


Рисунок 44 – Модель Хаммерштейна-Виннера

где f – нелинейная функция, которая преобразует входные данные $u(t)$ как $w(t) = f(u(t))$;

$w(t)$ – внутренняя переменная, является выходом блока Input нелинейности и имеет тот же размер, что и $u(t)$;

B/F – это линейная передаточная функция, которая преобразует $w(t)$ как $x(t) = (B/F)w(t)$;

$x(t)$ – внутренняя переменная, является выходом линейного блока и имеет тот же размер, что и $u(t)$;

B и F – аналогичны полиномам в линейной модели Output-Error.

Для ny выходов и nu входов линейный блок представляет собой матрицу передаточной функции, содержащую записи:

$$\frac{B_{j,i}(q)}{F_{j,i}(q)}$$

где $j = 1, 2, \dots, ny$;

$i = 1, 2, \dots, nu$.

h – нелинейная функция, которая отображает выходные данные линейного блока $x(t)$ на системный выход $y(t)$ как $y(t) = h(x(t))$.

Поскольку действует на входной порт линейного блока, эта функция называется входной нелинейностью. Аналогично, поскольку действует на выходной порт линейного блока, эта функция называется выходной нелинейностью. Если ваша система содержит несколько входов и выходов определить функции f и h для каждого входного и выходного сигнала.

Чтобы настроить структуру модели Хаммерштейна-Виннера:

1. Сконфигурируйте линейный функциональный блок передачи;

Выполните одно из следующих действий:

Порядок модели и входную задержку для линейной передаточной функции как [28]:

- nb – количество нулей плюс один. nb – длина полинома числителя (B);
- nf – количество полюсов. nf – порядок знаменателя передаточной функции (F полином);

- nk – задержка от входа до выхода;
- в зависимости от количества выборок.

Для систем MIMO с выходами ny и входами ni , nb , nf и nk являются матрицами ny -by- ni .

Инициализируя линейный блок, используя линейную модель с дискретным временем – можем инициализировать, используя линейные модели только в командной строке. Инициализация устанавливает передаточную функцию линейного блока таковой для указанной линейной модели.

2. С конфигурируя входные и выходные нелинейности, f и h соответственно.

Оценки нелинейности входа и выхода по умолчанию являются кусочно-линейными функциями. Чтобы настроить входные и выходные оценки нелинейности:

- выберите тип входных и выходных оценок нелинейности и настройте их свойства;
- исключить входной или выходной нелинейный блок.

Не нужно включать как входную, так и выходную нелинейность в структуру модели. Когда модель содержит только входную нелинейность f , она называется моделью Хаммерштейна. Аналогичным образом, когда модель содержит только выходную нелинейность h , она называется моделью Виннера.

Параметры оценки для моделей Хаммерштейна-Виннера

Чтобы настроить оценку модели, укажите функцию потерь, которую нужно минимизировать, и выберите алгоритм оценки и другие параметры оценки для выполнения минимизации.

Настройка функции потери

Функция потерь или функция затрат является функцией ошибки между выходом модели и измеренным выходом.

В командной строке используйте набор параметров $nlhw$, $nlhwOptions$, чтобы настроить функцию потери. переставлены следующие параметры:

OutputWeight – укажите вес ошибки в оценках с несколькими выходами;

Регуляризация – Модифицируйте функцию потерь, чтобы добавить штраф на дисперсию оценочных параметров.

Алгоритм оценки

Чтобы оценить модель Хаммерштейна-Винера, программное обеспечение использует алгоритмы итеративного поиска, чтобы минимизировать функцию потерь. В командной строке используйте `nlhwOptions`, чтобы указать алгоритм поиска и другие параметры оценки. Некоторые из параметров, которые можем использовать:

`SearchMethod` – метод поиска для минимизации ошибок прогнозирования или моделирования, таких как поиск линий Гаусса-Ньютона и Левенберга-Марквардта и рефлексивный подход Ньютона в доверительной области.

`SearchOptions` – опция, установленная для алгоритма поиска, с полями, которые зависят от значения `SearchMethod`, такими как:

`MaxIterations` – Максимальное количество итераций для выполнения.

Допуск - условие прекращения итеративного поиска, когда ожидаемое улучшение значений параметра меньше указанного значения.

`InitialCondition` – по умолчанию программное обеспечение рассматривает начальные состояния модели как ноль и не оценивает состояния. Оценить начальные состояния, что иногда может улучшить оценку параметров.

После предварительной обработки оценочных данных и настройки структуры модели, функции потерь и параметров оценки можно оценить модель в приложении `System Identification` или с помощью `nlhw`. Полученная модель является объектом `idnlhw`, в котором хранятся все данные модели, включая параметры модели и оценщик нелинейности.

5.3 Идентификация и моделирование нелинейной системы

Линейная модель динамики двигателя, основанная на данных, собранных на линейном участке, несомненно, полезна для разработки. Однако эта модель не описывает нелинейное поведение, которое имеет место в более широком диапазоне условий эксплуатации двигателя. Например, из набора данных 4 мы

видим, что у нашего двигателя предел вращения ротора составляет приблизительно 100 °. При просмотре набора данных 3 можно увидеть, что двигатель не подвержен слабым управляющим сигналам, возможно, из-за сухого трения. На этом этапе мы попытаемся создать более точную модель двигателя постоянного тока. Для этого мы будем использовать нелинейное представление модели. При более пристальном рассмотрении экспериментальных данных мы уже определились с тем, что изменение угла поворота ротора двигателя имеет явно нелинейную связь с поданным на него напряжением [29]. Существует также гистерезис из-за трения. Нелинейные режимы ARX (NLARX) и Hammerstein-Winner значительно более гибкие и могут быть описаны с использованием богатого набора нелинейных функций, таких как вейвлеты и S-образные нейронные сети. Эти функции позволяют использовать наши знания и предположения о нелинейностях, существующих в системе, в форме пользовательских регрессий.

Нелинейная модель имеет множество настраиваемых компонентов. Мы можем настроить порядок моделей, введенные временные задержки, типы нелинейных функций, количество структур и компонентов. Сначала мы добавляем компоненты, которые представляют насыщенность и поведение ограниченной области. После нескольких итераций мы выбрали структуру модели, состоящую из параллельной нейронной сети и линейной функции, и серии последовательно соединенных величин регрессии, используемых для расчета входных данных предыдущего компонента. Исходя из этой структуры, параметры будут рассчитаны для достижения максимального соответствия между откликом и экспериментальными данными (рисунок 45).

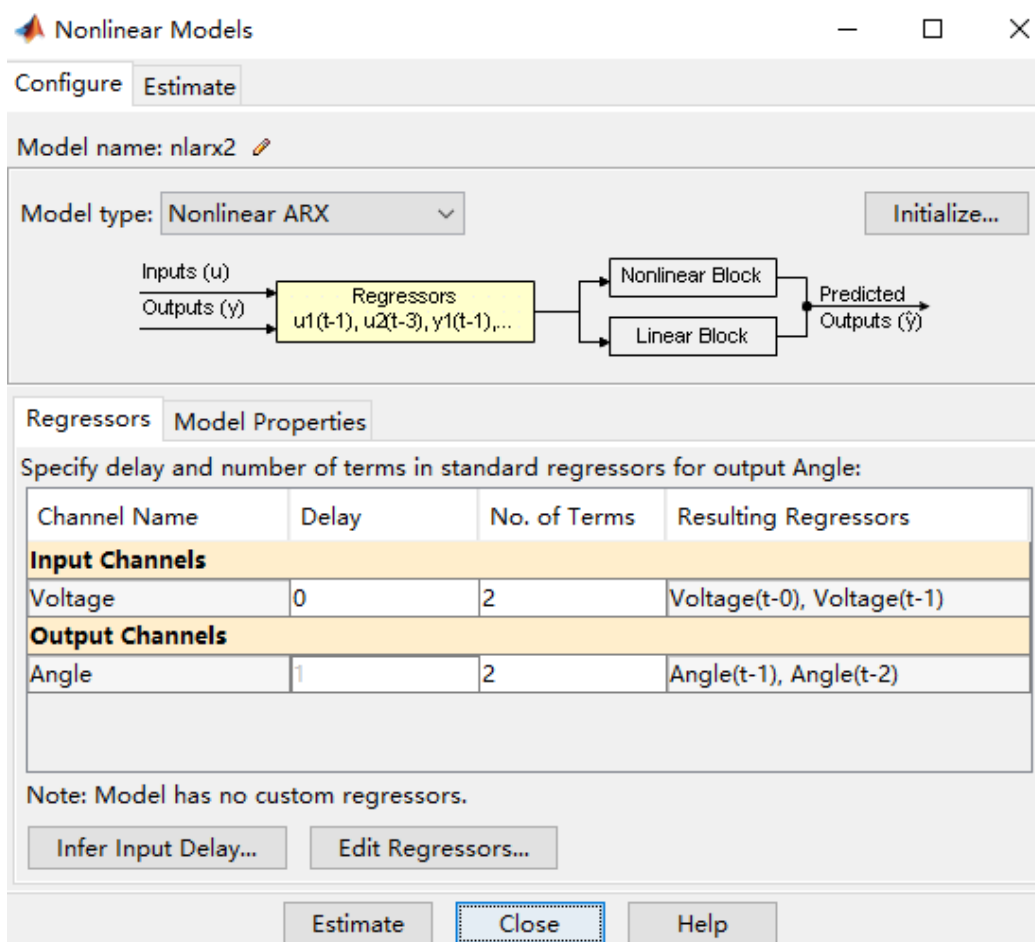


Рисунок 45 – Нелинейная ARX модель

После многих экспериментов, мы выбираем: экспериментальные данные № 1 – Нелинейная ARX модель; а остальные экспериментальных данных – модель Хаммерштейна-Виннера.

Для данных, используемых для расчета параметров, а также для данных проверки, отклик полученной модели (рисунки 46 – 50) имеет отличное согласие (больше 85 %). Эта модель может быть использована для синтеза регуляторов, анализа поведения системы и прогнозирования.

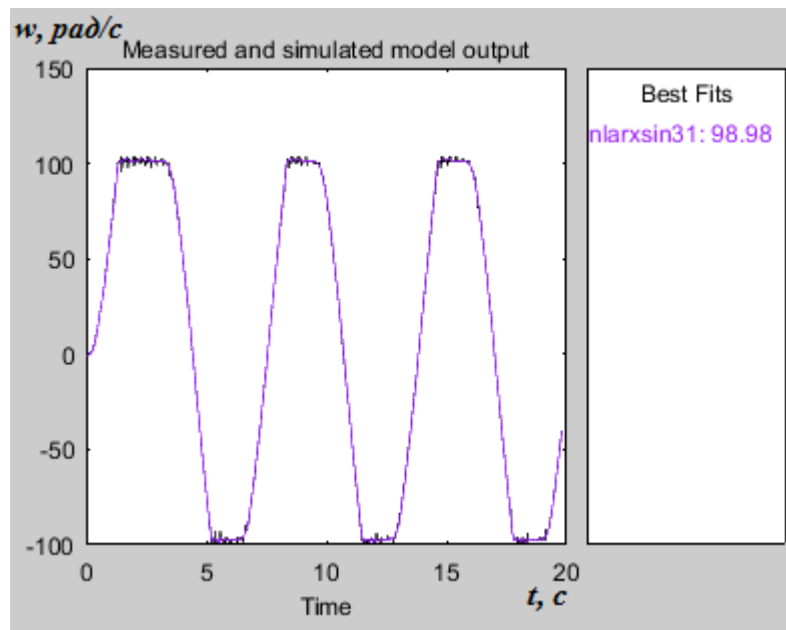


Рисунок 46 – Сравнение отклика расчетной модели и ЭД № 1

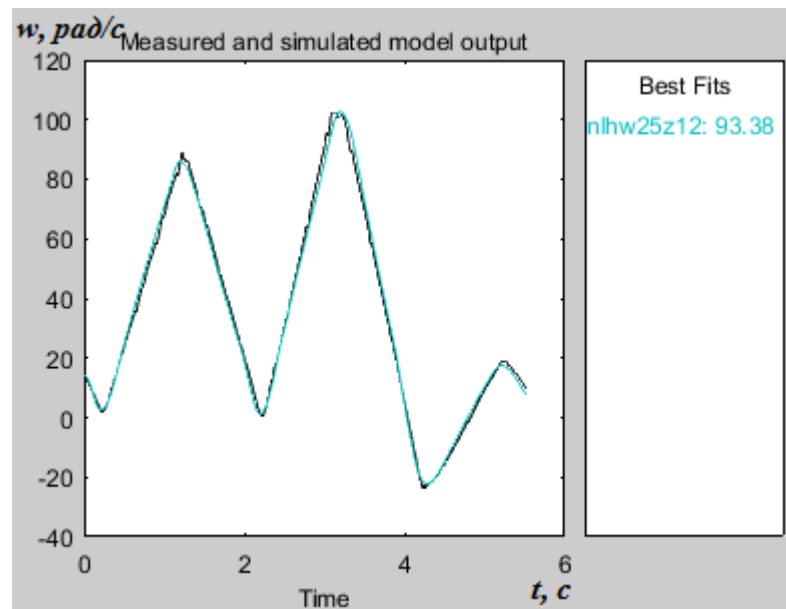


Рисунок 47 – Сравнение отклика расчетной модели и ЭД № 2

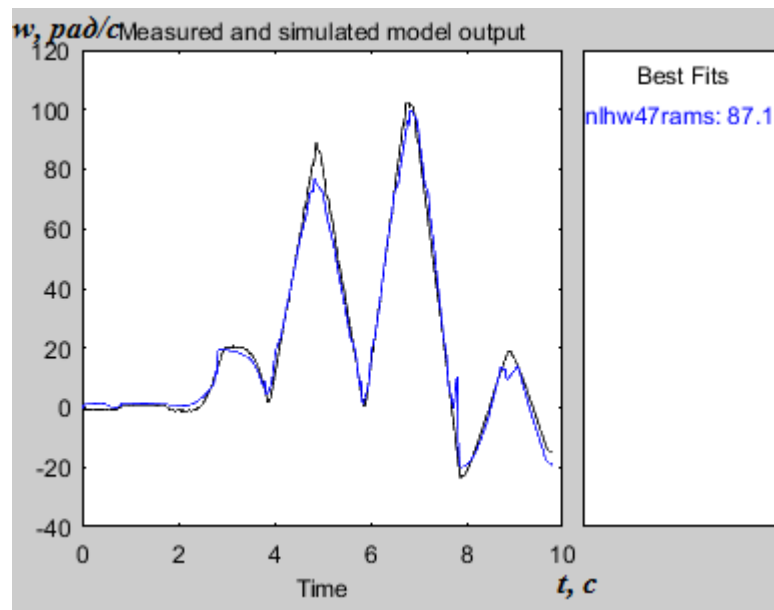


Рисунок 48 – Сравнение отклика расчетной модели и ЭД № 3

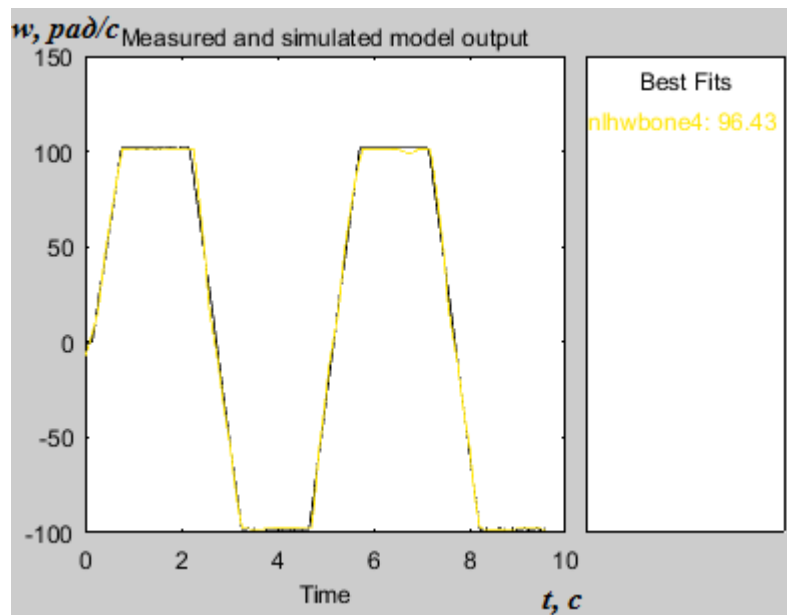


Рисунок 49 – Сравнение отклика расчетной модели и ЭД № 4

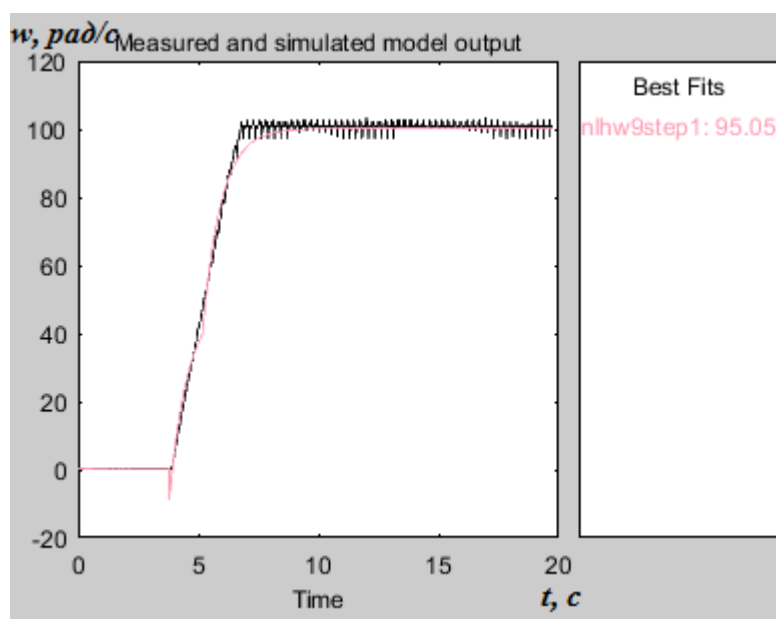


Рисунок 50 – Сравнение отклика расчетной модели и ЭД № 5

Мы можем сравнить отклик нелинейной модели с обратной связью и линейной модели (таблица 5).

Таблица 5 – Сравнение откликов нелинейной модели и линейной модели

Номер ЭД	Совпадение отклика линейной модели, %	Совпадение отклика нелинейной модели, %
№ 1	87,81	98,98
№ 2	86,84	93,38
№ 3	76,53	87,1
№ 4	93,28	96,43
№ 5	95,38	95,05

5.4 Синтез регулятора

Теперь мы готовы начать разработку точного ПИД-регулятора для нелинейной модели. Чтобы делать этот этап, нам нужно линеаризовать нелинейные модели, поэтому мы создаем М-файл, чтобы реализовать линеаризацию.

```

1 function G = myLinearize(BlockData)
2 %Copyright 2013 The MathWorks, Inc.
3
4 % assignin('base','BlockData',BlockData)
5 [x,u] = findop(BlockData.Parameters.Value,'snapshot',2,ones(1000,1));
6 G = linearize(BlockData.Parameters.Value,u,x);
7
8 end

```

Рисунок – 51 Программа М-файл

Теперь можем использовать ПИД-регулятор как линейный модель. Для этого достаточно выбрать рабочую точку, линеаризовать модель в её окрестности, а затем разработать контроллер для этой линеаризованной модели. На рисунках 52 – 56 показаны настройки параметров ПИД-регулятора по заданным требованиям.

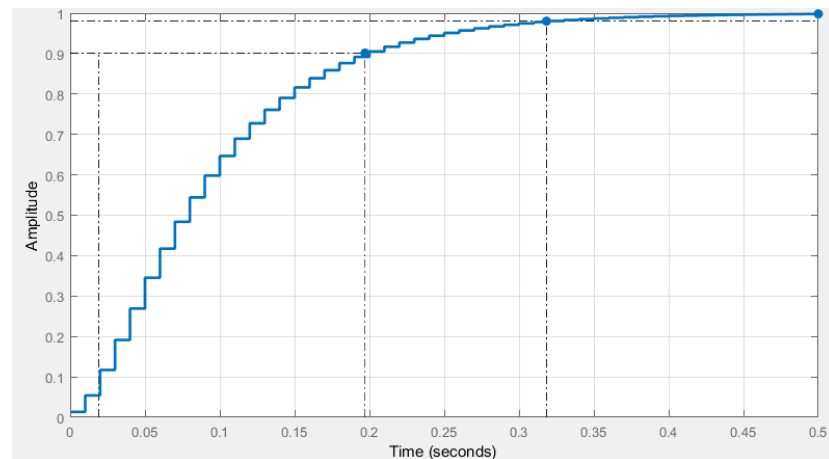


Рисунок – 52 Дискретный сигнал импульсной системы управления с ПИД-регулятором по ЭД № 1

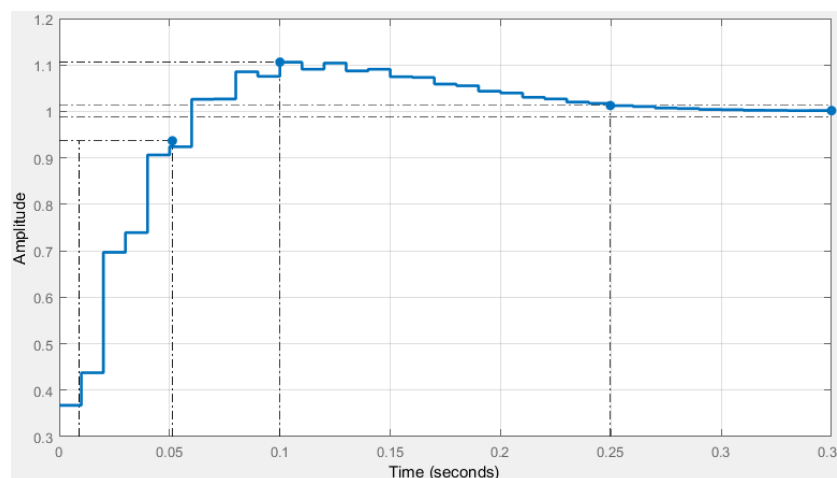


Рисунок – 53 Дискретный сигнал импульсной системы управления с ПИД-регулятором по ЭД № 2

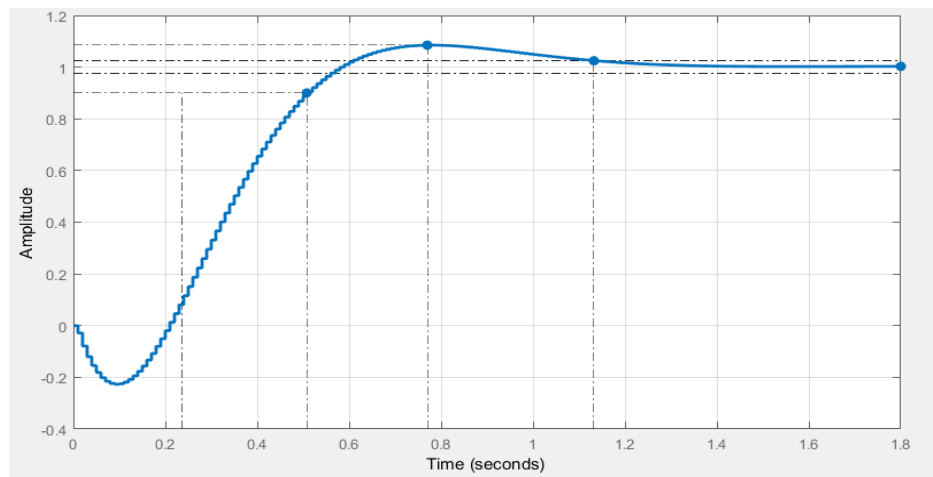


Рисунок – 54 Дискретный сигнал импульсной системы управления с ПИД-регулятором по ЭД № 3

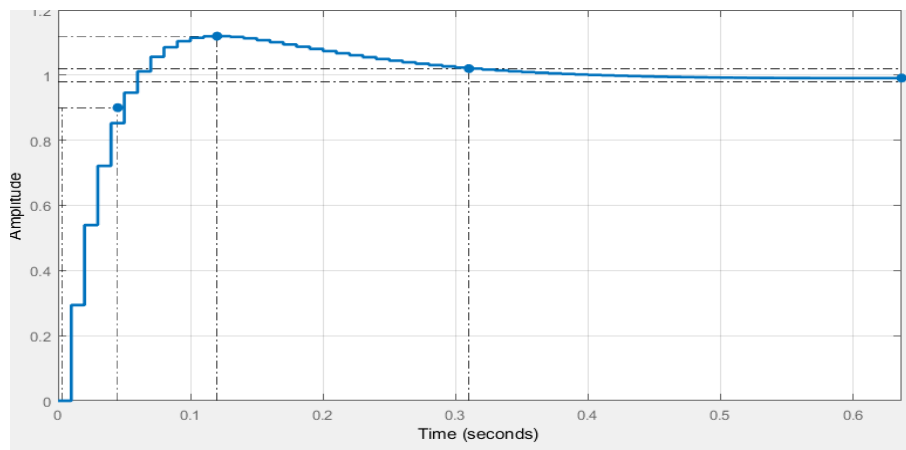


Рисунок – 55 Дискретный сигнал импульсной системы управления с ПИД-регулятором по ЭД № 4

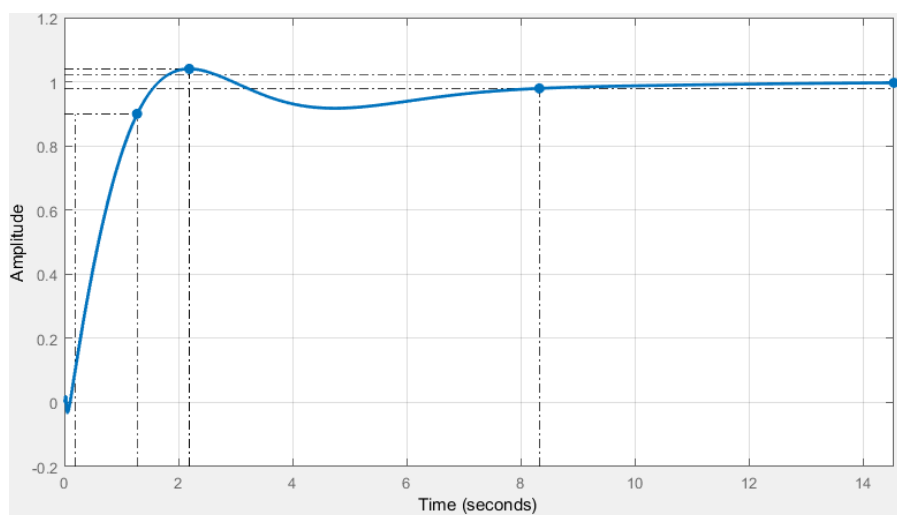


Рисунок – 56 Дискретный сигнал импульсной системы управления с ПИД-регулятором по ЭД № 5

Таблица 6 – Показатели качества систем управления с ПИД -регулятором

Номер ЭД	Совпадение отклика, %		Перерегу- лирование σ , %		Время переходного процесса t_p , с		Максимальное значение ω , рад/с		Время нарастания t_H , с	
	НЛ	Л	НЛ	Л	НЛ	Л	НЛ	Л	НЛ	Л
№1	98,98	87,81	0	5,69	2,32	0,39	100	106	2,18	0,05
№2	93,38	86,84	5,3	7,83	4,25	2,53	105	108	0,34	0,22
№3	87,1	76,53	4,4	8,77	8,14	5,14	104	109	0,27	0,76
№4	96,43	93,28	2	3,74	1,32	0,17	102	104	0,4	0,03
№5	95,05	95,38	0	2,81	4,33	0,67	100	103	1,09	0,05

После настройки мы готовы к проверке регулятора на нелинейной модели. На рисунке 57 показана модель Simulink для получения отклика от нелинейной ARX модели.

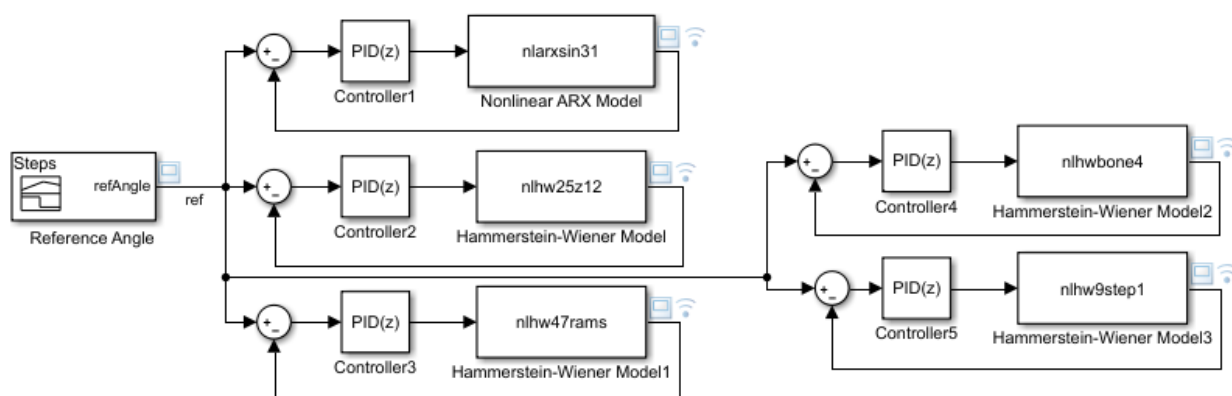


Рисунок 57 – Simulink модель для тестирования регулятора на нелинейной модели

После запуска модели мы можем сравнить отклик нелинейных моделей с обратной связью на ступенчатое воздействие.

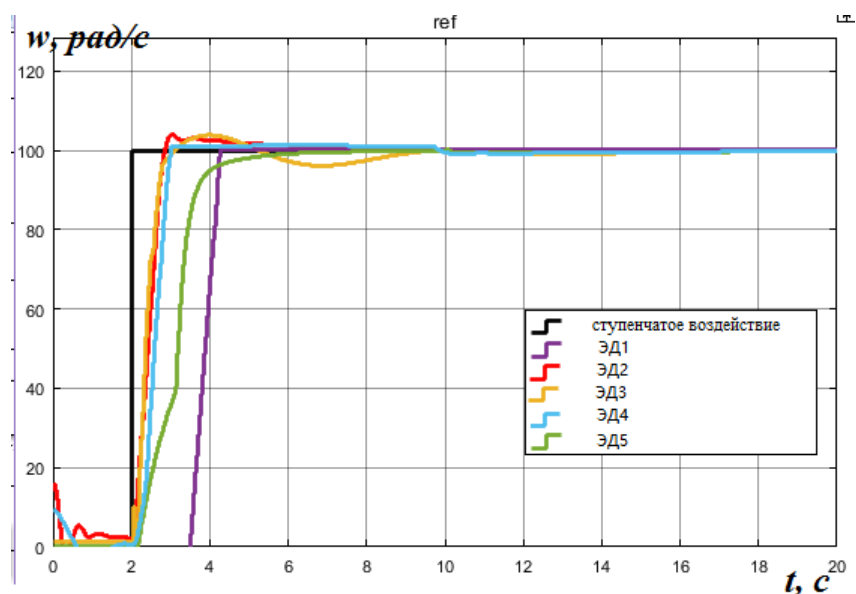


Рисунок – 58 Сравнение откликов нелинейных моделей на ступенчатое воздействие линейризованной модели

Вывод: из таблицы 6 и рисунка 58, видно, что чем лучше совпадения отклика, тем лучше регулирования. Для нелинейных модели, мы получили хороший результат, хотя ЭД № 1 и № 5 немного медленно, тоже хорошо совпадает с ступенчатого воздействия.

Сравнение экспериментальные данных линейных и нелинейных модели, хотя линейные модели быстрее, нелинейные модели точнее, потому что отклики нелинейных моделей лучше, чем линейных моделей, и меньше перерегулирования.

6 Финансовый менеджмент ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В настоящее время перспективность научного исследования определяется главным образом коммерческой ценностью разработки, а не только ее ресурс - эффективностью и высокотехнологичными свойствами, которые в начале разработки продукта бывает достаточно трудно оценить. Высокая коммерческая ценности разработки является необходимым условием

при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов. Эти моменты важно учитывать разработчикам, которые должны представлять высокие перспективы проводимых научных исследований.

Таким образом, целью работы является проведение таких научных исследований, тема которых актуальна на сегодняшний день и отвечает современным требованиям в области ресурсосбережения и ресурсоэффективности.

Достижение цели обеспечивается решением ряда задач:

- оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научного исследования;
- планирование научно-исследовательской работы;
- определение возможных альтернатив проведения научного исследования, отвечающих современным требованиям в области ресурсосбережения и ресурсоэффективности.

6.1 Анализ конкурентных технических решений

Анализ конкурентных технических решений помогает внести коррективы в проект, чтобы успешнее противостоять соперникам. При проведении данного анализа необходимо оценить сильные и слабые стороны конкурентов. Для этого составлена оценочная карта (таблица 7).

Объектом анализа является материал тепловой изоляции для трубопроводов тепловых сетей.

Для сравнения могут быть взяты два основных вида материала тепловой изоляции, которые используются в России: минеральная вата с различными защитными покрытиями и ППУ в защитной оболочке.

Таблица 7 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б _{к1}	Б _{к2}	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
1. Надежность	0,13	4	5	0,52	0,65
2. Долговечность	0,13	3	5	0,39	0,65
3. Экологическая безопасность	0,12	4	5	0,48	0,6
4. Технологичность при изготовлении и при монтаже теплопроводов	0,11	4	5	0,44	0,55
Экономические критерии оценки эффективности					
1. Конкурентоспособность продукта	0,11	4	4	0,44	0,44
2. Цена	0,15	5	4	0,75	0,6
3. Время прокладки	0,11	4	5	0,44	0,55
4. Потери тепла	0,14	3	4	0,42	0,56
Итого	1			3,88	4,60

При оценке качества используется два типа критериев: технические и экономические.

Веса показателей в сумме составляют 1. Баллы по каждому показателю оцениваются по пятибалльной шкале.

Конкурентоспособность конкурента К

$$K = \sum B_i \cdot B_i \quad (10)$$

где B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Полученные результаты расчета сведены в таблицу 7. В строке «Итого» указана сумма всех конкурентоспособностей по каждому из материалов тепловой изоляции для трубопроводов тепловых сетей.

Одним из важных направлений эффективности теплоснабжения в современных системах является снижение тепловых потерь в тепловых сетях. Тепловой изоляции из ППУ по сравнению с изоляцией из минеральной ваты характерно значительное снижение потерь тепла вследствие более низкого коэффициента теплопроводности.

Трубы с ППУ изоляцией являются более надежной конструкцией, которая приводит к несколько большей первоначальной стоимости тепловых сетей. Тем не менее за счет высокого качества трубопроводов затраты на их техническое обслуживание снижаются, вследствие чего стоимость тепловых сетей, приведенная к одному году эксплуатации, уменьшается по сравнению с аналогичной тепловой сетью с теплоизоляцией из минеральной ваты.

Анализ технических решений теплоизоляционных материалов показал, что наиболее эффективным и не дорогим (по показателю стоимости тепловых сетей, приведенной к одному году эксплуатации) является пенополиуретан.

В добавлении к анализу технических решений проведено сравнение теплоизоляционных материалов по физико-техническим показателям (таблица 8).

Таблица 8 – Сравнение теплоизоляционных материалов по физико-техническим показателям [14]

Показатели	Теплоизоляционный материал	
	Минеральная вата	ППУ
Плотность, кг/м ³	50 - 200	40 - 70
Коэффициент теплопроводности, Вт/м·°С	0,045 - 0,056	0,021 - 0,035
Температура применения, °С	-180 - 400	-180 - 150
Водопоглощение, % (по массе)	10 - 15	2
Срок эксплуатации, год	3	40 - 50
Группа горючести	Не горючие	Г3, Г4

Из таблицы 8 видно, что у пенополиуретана меньшее водопоглощение по сравнению с изоляцией из минеральной ваты, то есть пенополиуретан более устойчив к влаге.

К преимуществам трубопроводов с теплоизоляцией из пенополиуретана можно отнести низкий коэффициент теплопроводности и большой срок эксплуатации.

ППУ относится к горючим веществам, но взрывобезопасен.

Ограничением в применении изоляции из пенополиуретана в тепловых сетях является температура применения, в то время как изоляция из минеральной ваты может применяться в широком диапазоне температур.

6.2 Планирование работ по проектированию тепловой сети

В данной работе проектная организация состоит из двух человек: руководитель проекта и инженер. Планирование работ позволяет распределить обязанности между исполнителями проекта, рассчитать заработную плату сотрудников, а также гарантирует реализацию проекта в срок. Последовательность и содержание работ, а также распределение исполнителей приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Перечень этапов работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя	Продолжительность, дни
Разработка и выдача технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель, инженер	1
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	20
	3	Выбор направления исследований	Руководитель, инженер	1
	4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель, инженер	1
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Инженер	25
	6	Построение макетов (моделей) и проведение экспериментов	Инженер	55
	7	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	Инженер	3
Обобщение и оценка результатов	8	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель, Инженер	5
	9	Определение целесообразности проведения ВКР	Руководитель, инженер	1
Разработка технической документации и проектирование	10	Разработка стенда для выполнения проекта	Инженер	2
	11	Выбор и расчет стенда	Инженер	2
	12	Оценка эффективности работы и применения проектируемого изделия	Инженер	3
	13	Лабораторные испытания макета	Инженер	11
Оформление комплекта документации по ВКР	14	Составление пояснительной записки	Руководитель, инженер	33
	15	Проверка пояснительной записки		4

Проектирование тепловых сетей реализуется в семь этапов. Основные работы выполняются инженером проектной организации.

6.3 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты являются основной частью стоимости разработки проекта.

Трудоемкость выполнения проекта оценивается в человеко-днях и носит вероятностный характер.

Среднее (ожидаемое) значение трудоемкости

$$t_{ожі} = \frac{3 \cdot t_{mini} + 2 \cdot t_{maxi}}{5} \quad (11)$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы, чел.-дн.;

t_{mini} – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, чел.-дн.;

t_{maxi} – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, чел.-дн..

После определения ожидаемой трудоемкости работ необходимо рассчитать продолжительность каждой из работ в рабочих днях T_p . Величина T_p учитывает параллельность выполнения этих работ несколькими исполнителями.

$$T_p = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}, \quad (12)$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.;

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел..

Результаты расчета приведены в таблице 10.

6.4 Разработка графика проведения проекта

Диаграмма Ганта представляет собой горизонтальный ленточный график, на котором работы по разрабатываемому проекту представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Длительность каждого этапа работ из всех рабочих дней могут быть переведены в календарные дни с помощью следующей формулы

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (13)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;
 T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;
 $k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (14)$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году;
 $T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году;
 $T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году.

Пример расчета для 1 этапа работ (составление и утверждение технического задания на проектирование тепловой сети)

$$t_{\text{ожі}} = \frac{3t_{\text{mini}} + 2t_{\text{maxi}}}{5} = \frac{3 \cdot 2 + 2 \cdot 7}{5} = 4 \text{ чел} - \text{дней};$$

$$T_{pi} = \frac{t_{\text{ожі}}}{\text{Ч}_i} = \frac{4}{1} = 4 \text{ дня}.$$

Для шестидневной рабочей недели (для руководителя) коэффициент календарности равен

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 51 - 15} = 1,22;$$

$$T_k = T_p \cdot k_{\text{кал}} = 4 \cdot 1,22 = 4,88 \approx 5 \text{ дней}.$$

Для пятидневной рабочей недели (для инженера) коэффициент календарности равен

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 102 - 15} = 1,47;$$

$$T_k = T_p \cdot k_{\text{кал}} = 7 \cdot 1,47 = 10,30 \approx 10 \text{ дней}.$$

Полученные результаты расчета занесены в таблицу 10.

На основе таблицы 10 строим календарный план-график (для максимального по длительности исполнения работ).

Таблица 10 – Временные показатели проведения проекта тепловых сетей

Название Работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях T_{pi}		Длительность работ в календарных днях T_{ki}	
	t_{mini} , чен- дней		t_{maxi} , чен-дней		$t_{ожи}$, чен- дней					
	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер
Составление технического	2		7		4		4		4	
Проведение сбора базовой информации		5		10		7		7		10
Составление календарного плана проектирования теплотрассы	2		4		2,8		2,8		3	
Гидравлический расчет трубопроводов		3		6		4,2		4,2		6
Расчет трубопроводов на прочность		4		7		5,2		5,2		8

Продолжение таблицы 10 – Временные показатели проведения проекта тепловых сетей

Название Работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях T_{pi}		Длительность работ в календарных днях T_{ki}	
	t_{mini} , чен- дней		t_{maxi} , чен-дней		$t_{ожи}$, чен- дней		Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер
	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер				
Расчет трубопроводов на компенсацию тепловых удлинений		4		7		5,2		5,2		8
Расчет нагрузок на опоры трубопроводов		4		7		5,2		5,2		8
Тепловой расчет трубопроводов		3		6		4,2		4,2		6
Подбор сетевых и подпиточных насосов		2		5		3,2		3,2		5
Оценка эффективности полученных результатов	3		5		3,8		3,8		5	
Контроль качества выполнения проекта и проектировщиков	5		8		6,2		6,2		8	

Продолжение таблицы 10 – Временные показатели проведения проекта тепловых сетей

Название Работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях T_{pi}		Длительность работ в календарных днях T_{ki}	
	t_{mini} , чен- дней		t_{maxi} , чен- дней		$t_{ожи}$, чен- дней		Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер
	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер				
План трассы		10		20		14		14		21
Разработка технологической, структурной и функциональной схемы, схемы автоматизации, схемы продольных и поперечных разрезов труб.		10		15		12		12		18
Монтажная и электрическая схема		7		14		9,8		9,8		14
Составление эксплуатационно- технической документации		5		10		7		7		10
Составление приборов, устройств, арматуры и других средств		5		8		6,2		6,2		9

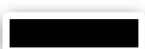
Таблица 11 – Календарный план-график проведения работ по проектированию тепловых сетей

№ работ	Вид работ	Исполнители	T_{ki} , кал.дн.	Продолжительность выполнения работ											
				Декабрь		Январь				Март					
				15	16	4	5	6	29	2	13	17	18	20	22
1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель, инженер	1												
2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	20												
3	Выбор направления исследований	Научный руководитель, инженер	1												
4	Календарное планирование работ по теме	Научный руководитель, инженер	1												
5	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Инженер	25												
6	Построение макетов (моделей) и проведение экспериментов	Инженер	55												
7	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	Инженер	3												
8	Оценка эффективности полученных результатов	Научный руководитель, инженер	5												
9	Определение целесообразности проведения ВКР	Научный руководитель, инженер	1												

Продолжение таблицы 11 – Календарный план-график проведения ВКР

№ работ	Вид работ	Исполнители	T_{ki} , кал.дн.	Продолжительность выполнения работ												
				Декабрь		Январь				Март						
				15	16	4	5	6	29	2	13	17	18	20	22	25
10	Разработка стенда для выполнения проекта	Инженер	2													
11	Выбор и расчет стенда	Инженер	2													
12	Оценка эффективности работы и применения проектируемого изделия	Инженер	3													
				Март				Апрель				Май				
				25		26		3		12		13		17		
13	Лабораторные испытания макета	Инженер	11													
14	Составление пояснительной записки	Инженер	33													
15	Проверка пояснительной записки	Инженер	4													

Научный руководитель – 

Инженер – 

На основе данных графика (таблица 11) можно сделать вывод, что продолжительность работ по проектированию тепловых сетей займет 15 декад. Начало разработки проекта придется на вторую декаду февраля и закончится первой декадой июля.

Значение реальной продолжительности работ может быть как меньше (при благоприятных обстоятельствах) посчитанного значения, так и больше (при неблагоприятных обстоятельствах), так как трудоемкость носит вероятностный характер.

Длительность выполнения проекта в календарных днях равна:

- 13 дня (длительность выполнения проекта руководителем);
- 167 дня (длительность выполнения проекта инженером).

6.5 Бюджет затрат на проектирование

При планировании бюджета проекта необходимо учесть все виды расходов, которые связаны с его выполнением. Для формирования бюджета проекта используется следующая группа затрат:

- материальные затраты проекта;
- основная заработная плата исполнителей проекта;
- дополнительная заработная плата исполнителей проекта;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

Расчет материальных затрат проекта

К материальным затратам относятся: приобретаемые со стороны сырье и материалы, покупные материалы, канцелярские принадлежности, картриджи и т.п.

Таблица 12 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Цена, руб.	Объем потребления	Затраты на материалы $З_m$, руб.
Краска для принтера	Шт.	1200	1	1200
Бумага для принтера формата А4 (500 листов)	пачка	200	2	400
Ручка шариковая	Шт.	80	3	240
Карандаш чертежный	Шт.	20	5	100
Канцелярские товары	-	-	-	3200
Двигатель постоянного тока	Шт.	250	1	250
Микроконтроллер	Шт.	310	1	310
Провода	Шт.	10	20	200
Драйвер	Шт.	270	1	270
Итого				6170

В сумме материальные затраты составили 6170 рублей. Цены взяты средние по городу Томску

Основная заработная плата исполнителей проекта

Статья включает в себя основную заработную плату $З_{осн}$ и дополнительную заработную плату $З_{доп}$.

$$З_{зп} = З_{осн} + З_{доп}. \quad (15)$$

Дополнительная заработная плата составляет 12 - 20 % от $З_{осн}$.

Основная заработная плата руководителя (инженера)

$$З_{осн} = З_{дн} \cdot T_p, \quad (16)$$

где T_p – продолжительность работ, выполняемых исполнителем проекта, раб.дн. (таблица 10).

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

$$З_{дн} = \frac{З_m \cdot M}{F_d}, \quad (17)$$

где Z_M – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 28 раб.дней $M=11$ месяцев, 5 - дневная неделя;

при отпуске в 56 раб.дней $M = 10$ месяцев, 6 - дневная неделя;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени исполнителей проекта, раб.дн..

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_M = Z_{тс} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p, \quad (18)$$

где $Z_{тс}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{пр}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30 % от $Z_{тс}$);

k_d – коэффициент доплат и надбавок, принимаем 0,2;

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Дополнительная заработная плата исполнителей проекта

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций.

Дополнительная заработная плата

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн}, \quad (19)$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимаем равным 0,135).

Оклады взяты в соответствии с занимаемыми должностями ТПУ.

Расчет заработной платы руководителя (шестидневная рабочая неделя)

$$Z_M = Z_{тс} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p = 26300 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 51285 \text{ руб.};$$

$$Z_{дн} = \frac{Z_M \cdot M}{F_d} = \frac{51285 \cdot 10}{365 - 66 - 56} = 2110,5 \text{ руб.};$$

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p = 2110,5 \cdot 16,8 = 35456,3 \text{ руб.};$$

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,135 \cdot 35456,3 = 4786,6 \text{ руб.}$$

Расчет заработной платы инженера (пятидневная рабочая неделя)

$$З_M = З_{тс} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p = 17000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 33150 \text{ руб.};$$

$$З_{дн} = \frac{З_M \cdot M}{F_d} = \frac{33150 \cdot 11}{365 - 117 - 28} = 1657,5 \text{ руб.};$$

$$З_{осн} = З_{дн} \cdot T_p = 1657,5 \cdot 83,2 = 137904 \text{ руб.};$$

$$З_{доп} = k_{доп} \cdot З_{осн} = 0,135 \cdot 17316 = 2337,66 \text{ руб.}$$

Результаты расчета по заработной плате всех исполнителей проекта приведены в таблице 13.

Таблица 13 – Расчет основной заработной платы

Исполнитель проекта	$З_{тс},$ руб.	$k_{пр}$	k_d	k_p	$З_M,$ руб.	$З_{дн},$ руб.	$T_p,$ раб. дн.	$З_{осн},$ руб.	$k_{доп}$	$З_{доп},$ руб.	Итого, руб.
Руководитель	26300	0,3	0,2	1,3	51285	2110,5	16,8	35456,3	0,135	4786,6	40242,9
Инженер	17000				33150	1657,5	83,2	137904		2337,66	156521,0

В результате данных расчетов посчитана основная заработная плата у исполнителей проекта. Из таблицы 13 видно, что ставка руководителя наибольшая, но итоговая основная заработная плата получилась наибольшей у инженера, так как основная заработная плата зависит от длительности работы проекта.

Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды включают в себя установленные законодательством Российской Федерации нормы органов государственного социального страхования (ФСС), пенсионный фонд (ПФ) и медицинское страхование (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}), \quad (20)$$

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

На 2017 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30 %.

В таблице 14 представлены результаты по расчету отчислений во

внебюджетные фонды всех исполнителей.

Таблица 14 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель проекта	Основная заработная плата, <i>руб.</i>	Дополнительная заработная плата, <i>руб.</i>
Руководитель проекта	35456,3	4786,6
Инженер	137904	18617,0
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,3	
Итого		
Руководитель проекта	12072,9	
Инженер	46956,3	

Накладные расходы

Накладные расходы включают прочие затраты организации, которые не учтены в предыдущих статьях расходов: оплата услуг связи, электроэнергии, интернета и т.д.

Накладные расходы

$$З_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1/4) \cdot k_{\text{нр}}, \quad (21)$$

где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы, принимаем в размере 16 %.

$$З_{\text{накл}} = (З_{\text{м}} + З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}} + З_{\text{внеб}}) \cdot 0,16; \quad (22)$$

$$З_{\text{накл}} = (1135 + 173360,3 + 23403,6 + 59029,2) \cdot 0,16 = 41108,5 \text{ руб.}$$

Формирование затрат на проектирование

Определение бюджета затрат на проект приведено в таблице 15.

Таблица 15 – Бюджет затрат на проектирование тепловой сети

Наименование статьи	Сумма, руб.	В % к итогу
1. Материальные затраты проекта	6170	2,03
2. Затраты по основной заработной плате	173360,3	57,2
3. Затраты по дополнительной заработной плате	23403,6	7,77
4. Отчисления во внебюджетные фонды	59029,2	19,48
5. Накладные расходы	41108,5	13,56
Бюджет затрат на проектирование	303071,6	100

Бюджет всех затрат проекта равен 303071,6 рублей. Наибольший процент бюджета составляет основная заработная плата (57,2 %).

Определение капиталовложений в тепловую сеть

Капиталовложения в тепловую сеть:

$$K_{\text{вл}} = C_{\text{тр}} \cdot (1 + \alpha_{\text{тр}}) + Z_{\text{монт}}, \quad (23)$$

где $C_{\text{тр}}$ – цена материала, руб;

$Z_{\text{монт}}$ – стоимость монтажных работ, руб.

Цена материала складывается из цены труб и цены изоляции:

$$C_{\text{тр}} = C_{\text{трруб}} + C_{\text{из}} \cdot L_{\text{мс}}, \quad (24)$$

где $C_{\text{трруб}}$ – цена одного погонного метра трубы, руб/м.

По [24] цена трубы за 1 м составляет 63250 руб. Зная, что вес 1 м трубы 157,8 кг, 1 труба длиной 11,5 м, следовательно, 6,34 м трубы в 1 м. На тепловую трассу длиной 31000 м требуется 4891,8 м, и $C_{\text{трруб}} = 309406350$ руб/м;

$C_{\text{из}}$ – цена изоляции для одного погонного метра трубы, из

$$C_{\text{из}} = 15400 \text{ руб [25];}$$

$L_{\text{мс}}$ – длина всей тепловой сети (подающего и обратного трубопровода).

тс $L_{\text{мс}} = 31000$ м.

$$C_{\text{тр}} = 309406350 + 1540 + 31000 = 786806350 \text{ руб.}$$

Стоимость монтажных работ:

$$З_{\text{монт}} = Ц_{\text{монт}} \cdot L_{\text{мс}}, \quad (25)$$

где $Ц_{\text{монт}}$ – цена работы по монтажу одного погонного метра тепловой трассы,
 $Ц_{\text{монт}} = 15000 \text{ руб/м}$ [26].

$$З_{\text{монт}} = 15000 \cdot 31000 = 465000000 \text{ руб.}$$

$$К_{\text{вл}} = 115964800 \cdot (1 + 0,15) + 465000000 = 1798595200 \text{ руб.}$$

Таблица 16 – Капиталовложения в тепловую сеть

Наименование затрат	Цена, руб.
Стоимость труб	309406350
Стоимость изоляции	477400000
Стоимость монтажных работ	465000000
Стоимость проектирования	298036,6
Итого, Квл	1798595200

Определение эксплуатационных издержек

Эксплуатационные ежегодные издержки:

$$И = З_{\text{рем}} + З_{\text{зп}} \cdot (1 + \alpha_{\text{сс}}) \cdot (1 + \alpha_{\text{доп}}) + З_{\text{перек}} + З_{\text{ам}} + З_{\text{пот}}, \quad (26)$$

где $З_{\text{рем}}$ – затраты на ремонт теплотрассы, руб/год;

$З_{\text{зп}}$ – затраты на обслуживание, руб/год;

$\alpha_{\text{сс}}$ – отчисления на социальное страхование, $\alpha_{\text{сс}} = 0,3$;

$\alpha_{\text{доп}}$ – отчисления на дополнительную заработную плату, $\alpha_{\text{доп}} = 0,2$;

$З_{\text{перек}}$ – затраты на перекачку теплоносителя через тепловую сеть, руб/год;

$З_{\text{ам}}$ – амортизационные отчисления, руб/год;

$З_{\text{пот}}$ – потери тепла в трубопроводах, руб/год.

Затраты на ремонт теплотрассы:

$$З_{\text{рем}} = Ц_{\text{рем}} \cdot L_{\text{мс}}, \quad (27)$$

где $Ц_{\text{рем}}$ – цена ремонта одного метра теплотрассы, руб/год·м.

$$З_{\text{рем}} = 7000 \cdot 31000 = 217000000 \text{ руб / год.}$$

Затраты на обслуживание:

$$З_{\text{зп}} = 12 \cdot n \cdot З_{\text{зп1}}, \quad (28)$$

где n – количество человек обслуживающих теплотрассу, к ним относится 4

слесаря тепловых сетей и 4 слесаря КИПиА. Принимаем $n = 8$;

$Z_{зп1}$ – средняя заработная плата одного человека, руб/мес. Средняя заработная плата персонала, обслуживающего теплотрассу по Томской области на 2017 год, составляет 29500 руб/мес.

$$Z_{зп} = 12 \cdot 8 \cdot 29500 = 2832000 \text{ руб/год.}$$

Значительной статьей эксплуатационных расходов в водяных тепловых сетях являются затраты на перекачку теплоносителя. Эта часть расходов включает в себя стоимость электроэнергии, расходуемой на привод сетевых насосов.

Расход теплоносителя в течение года зависит от тепловой нагрузки района теплоснабжения (отопительный и неотопительный период), поэтому затраты на перекачку теплоносителя составляют сумму ежегодных издержек на перекачку теплоносителя в отопительный и неотопительный период

$$Z_{\text{перек}} = Z_{\text{перек}}^{\text{от}} + Z_{\text{перек}}^{\text{неот}}. \quad (29)$$

Затраты на перекачку теплоносителя в отопительный период

$$Z_{\text{перек}}^{\text{от}} = \frac{G_d \cdot \Delta P \cdot h_{om}}{\rho \cdot \eta_{\text{н.у.}}} \cdot \text{Ц}_{\text{ЭН}} \cdot 10^{-3}, \quad (30)$$

где G_d – расход сетевой воды в отопительный период, кг/с;

ΔP – потеря напора в трубопроводах, Па;

$h_{om} - h = 5664$ ч, число часов работы сетевых насосов в отопительный период;

ρ – плотность воды, кг/м³;

$\eta_{\text{н.у.}}$ – КПД насосной установки, который определяется как произведение КПД насоса $\eta_{\text{н}}$ на КПД электродвигателя $\eta_{\text{эд}}$.

Для средних условий: $\eta_{\text{н.у.}} = 0,6 - 0,7$.

$\text{Ц}_{\text{ЭН}}$ – тариф на электроэнергию, $\text{Ц}_{\text{ЭН}} = 3,25$ руб/кВт·ч [27].

$$Z_{\text{перек}}^{\text{от}} = \frac{412,1 \cdot 399981 \cdot 5664}{951 \cdot 0,65} \cdot 3,25 \times 10^{-3} = 4908567 \text{ руб/год.}$$

Затраты на перекачку теплоносителя в неотопительный период:

$$Z_{\text{перек}}^{\text{неот}} = \frac{G_{h\text{max}}^s \cdot \Delta P \cdot h_{\text{неот}}}{\rho \cdot \eta_{\text{н.у.}}} \cdot \text{Ц}_{\text{ЭН}} \cdot 10^{-3}, \quad (31)$$

где $G_{h\text{max}}^s$ – расход сетевой воды в неотапительный период, кг/с;

$h_{\text{неот}} - h = 2760$ ч, число часов работы сетевых насосов в неотапительный период.

$$Z_{\text{перек}}^{\text{неот}} = \frac{286,1 \cdot 399981 \cdot 2760}{951 \cdot 0,65} \cdot 3,25 \cdot 10^{-3} = 1660565, \text{ руб/год}$$

Тогда затраты на перекачку теплоносителя составляют

$$Z_{\text{перек}} = 4908567 + 1660565 = 6569132 \text{ руб/год}$$

Амортизационные отчисления:

$$Z_{\text{ам}} = P_{\text{ам}} \cdot K_{\text{вл}}, \quad (32)$$

где $P_{\text{ам}}$ – норма амортизации, 1/год

$$P_{\text{ам}} = \frac{1}{n_{\text{ам}}}, \quad (33)$$

где $n_{\text{ам}}$ – срок амортизации, год. Сеть тепловая магистральная относится к пятой амортизационной группе, $n_{\text{ам}} = (7 - 10)$ лет.

$$P_{\text{ам}} = \frac{1}{10} = 0,1,$$

$$Z_{\text{ам}} = 0,1 \cdot 1369827303 = 136982730 \text{ руб /год.}$$

Потери тепла в трубопроводах:

$$Z_{\text{пот}} = Q_{\text{пот}} \cdot \text{Ц}_{\text{ТЭ}}, \quad (34)$$

где $Q_{\text{пот}}$ – тепловые потери в год, Гкал/год

$$Q_{\text{пот}} = (q_L^{\text{под}} + q_L^{\text{обр}}) \cdot l \quad (35)$$

где $q_L^{\text{под}}, q_L^{\text{обр}}$ – удельные тепловые потери в подающем и обратном трубопроводе соответственно, Вт/м

$$Q_{\text{пот}} = (115,3 + 68,4) \cdot 15500 = 2847350 \text{ Вт;}$$

$$Q_{\text{пот}} = 21447 \text{ Гкал / год;}$$

$\text{Ц}_{\text{ТЭ}}$ – тариф на тепловую энергию, $\text{Ц}_{\text{ТЭ}} = 1590,46 \text{ руб/Гкал}$ [27].

$$Z_{\text{пот}} = 21447 \cdot 1590,46 = 34110596 \text{ руб / год.}$$

Тогда эксплуатационные ежегодные издержки равны:

$$И = 217000000 + 2832000 \cdot (1 + 0,3) \cdot (1 + 0,2) + 6569132 + 136982730 + 34110596 = 399080378 \text{ руб/год.}$$

Прочие затраты. К прочим затратам относятся затраты, платежи, налоги, сборы и другие обязательные отчисления, производимые в соответствии с установленным законодательством порядком.

Прочие затраты составляют 5 % от суммы предыдущих:

$$З_{\text{пр}} = И \cdot 0,05 = 399080378 \cdot 0,05 = 19954019 \text{ руб/год}$$

Тогда эксплуатационные ежегодные издержки с учетом прочих затрат равны:

$$И^* = И + З_{\text{пр}} = 399080378 + 19954019 = 419034397 \text{ руб/год.}$$

Таблица 17 – Эксплуатационные ежегодные издержки

Наименование затрат	Цена, руб./год
Затраты на ремонт теплотрассы, $З_{\text{рем}}$	217000000
Затраты на обслуживание, $З_{\text{зп}}$	4417920
Затраты на перекачку теплоносителя через тепловую сеть, $З_{\text{перек}}$	6569132
Амортизационные отчисления, $З_{\text{ам}}$	136982730
Потери тепла в трубопроводах, $З_{\text{пот}}$	34110596
Прочие затраты, $З_{\text{пр}}$	19954019
Итого, $И^*$	419034397

6.6 Ресурсоэффективность

Определение ресурсоэффективности происходит на основе интегрального показателя ресурсоэффективности:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (36)$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности;

a_i – весовой коэффициент проекта;

b_i – бальная оценка проекта, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания.

Таблица 18 – Сравнительная оценка характеристик разрабатываемого проекта

Критерии	Весовой коэффициент	Бальная оценка разработки
1. Безопасность	0,2	5
2. Надежность	0,2	5
3. Долговечность	0,2	5
4. Удобство в эксплуатации	0,15	4
5. Технологичность	0,15	4
6. Энергоэкономичность	0,1	3
Итого	1,00	4,33

Рассчитываем показатель ресурсоэффективности:

$$I_{pi} = 0,2 \cdot 5 + 0,2 \cdot 5 + 0,2 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 + 0,1 \cdot 3 = 4,5.$$

В результате выполнения данного раздела проведен анализ конкурентных технических решений, с помощью которого выбран наиболее эффективный и недорогой материал тепловой изоляции для трубопроводов тепловых сетей, а именно пенополиуретан.

Построен календарный план–график проведения работ по проектированию тепловых сетей каждого из исполнителей проекта. Общее количество дней на выполнение проектных работ составляет 144 дня. Затраты на проектирование составили 298036,6 руб..

Бюджет затрат проекта равен 1798 млн. рублей.

Показатель ресурсоэффективности по пятибалльной шкале равен 4,5, что говорит об эффективной реализации работ по проектированию тепловых сетей.

На основании полученных результатов данного раздела делаем вывод о том, что работа по проектированию тепловых сетей является экономически целесообразной и успешной.

7 Социальная ответственность

Представление о понятии «Социальная ответственность» будущий специалист может получить из международного стандарта IC CSR-08260008000:2011 «Социальная ответственность организации. Требования» [38], который был утвержден и введен в действие Международным Комитетом по корпоративной социальной ответственности (IC CSR), протокол № 2 от 03 марта 2011 г.

В настоящем стандарте используются термины и определения, такие как: социальная ответственность (social responsibility) – ответственность организации за воздействие ее решений и деятельности на общество и окружающую среду через прозрачное и этическое поведение, которое:

- содействует устойчивому развитию, включая здоровье и благосостояние общества;
- учитывает ожидания заинтересованных сторон;
- соответствует применяемому законодательству и согласуется с международными нормами поведения;
- интегрировано в деятельность всей организации и применяется в ее взаимоотношениях.

Научно-исследовательская работа выполнялась в помещении, далее офис, находящемся на кафедре «Автоматики и компьютерных систем», десятого корпуса Томского Политехнического Университета, в аудитории 117а.

Площадь, приходящаяся на одно рабочее место пользователя ПК с ЭЛТ-монитором, должна составлять не менее 6 м², с монитором на базе плоских дискретных экранов – 4,5 м², что позволяет расположить технические средства на безопасном расстоянии до пользователя.

Для данной рабочей зоны необходимо проанализировать следующие факторы. К вредным факторам относятся: отклонения от норм параметров микроклимата, повышенный шум, электромагнитные поля, недостаточное освещение.

К опасным факторам рабочей зоны относятся: опасность возникновения

пожара и опасность поражения электрическим током.

Чрезвычайные ситуации характерные для данного объекта: пожар.

Вопросы, относящиеся к организации и охране труда при работе за компьютером, регулируются:

- Трудовым кодексом Российской Федерации;
- СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы»;
- Инструкцией по охране труда при работе на ПК.

7.1 Техногенная безопасность

Анализ вредных факторов производственной среды

Микроклимат рабочего помещения

Микроклимат рабочих помещений – климат внутренней среды этих помещений, который определяется действующими на организм человека сочетаниями температуры, влажности и скорости движения воздуха, а также интенсивности теплового излучения от нагретых поверхностей [39].

Мероприятия по доведению микроклиматических показателей до нормативных значений включаются в комплексные планы предприятий по охране труда. Для создания благоприятных условий работы, соответствующих физиологическим потребностям человеческого организма, санитарные нормы устанавливают оптимальные и допустимые метеорологические условия в рабочей зоне помещения (таблицы 19 – 20) [40]. Выполняемая работа относится к категории легкая (1б).

Таблица 19 – Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений (СанПиН 2.2.4.548-96)

Период года	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	21 - 23	20 - 24	40 - 60	0,1
Теплый	23 - 25	22 - 26	40 - 60	0,1

Таблица 20 – Допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений (СанПиН 2.2.4.548-96)

Период года	Температура воздуха, °С		Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с	
	диапазон ниже оптимальных величин	диапазон выше оптимальных величин			для диапазона температур воздуха ниже оптимальных величин, не более	для диапазона температур воздуха выше оптимальных величин, не более
Холодный	19,0 – 20,9	23,1– 24,0	18,0 – 25,0	15 – 75	0,1	0,2
Теплый	20,0 – 21,9	24,1– 28,0	19,0 – 29,0	15 – 75	0,1	0,3

В данном случае температура воздуха и температура поверхностей составляют 21°С и 20 °С при относительной влажности 50 % в холодный период года; 24°С и 23°С при относительной влажности воздуха 55 % в теплый период года, что соответствует нормам СанПиН 2.2.4.548-96.

Производственные шумы

Шум – это совокупность различных звуков, возникающих в процессе производства и неблагоприятно воздействующих на организм [41].

Шум может привести к нарушениям слуха (в случае постоянного нахождения при шуме более 85 децибел (dB)), может являться фактором стресса и повысить систолическое кровяное давление.

Дополнительно, он может способствовать несчастным случаям, маскируя предупреждающие сигналы и мешая сконцентрироваться.

Для рассматриваемого помещения основными источниками шума являются персональные компьютеры, кондиционер и вытяжные вентиляторы на окнах.

Нормативным документом, регламентирующим уровни шума для различных категорий рабочих мест служебных помещений, является ГОСТ 12.1.003-83 «ССБТ. Шум. Общие требования безопасности» [42].

Помещения, в которых для работы используются ПК не должны граничить с помещениями, в которых уровни шума превышают нормируемые значения.

В помещениях, оборудованных ПК, которые являются основным источником шума при выполнении данных видов работ, уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБА [42].

Недостаточная освещенность

Важнейшим физическим фактором является освещенность производственного помещения в целом и рабочего места конкретно. С этой целью производят нормирование производственного освещения, поскольку такие показатели как: яркость дисплея экрана, частота обновления изображения, общая освещенность в рабочей зоне оказывают сильнейшее влияние на зрение работника.

Работа, выполняемая с использованием ПК, имеют следующие недостатки:

- отражение экрана;
- вероятность появления прямой блёскости;
- ухудшенная контрастность между изображением и фоном.

При выполнении работ категории высокой зрительной точности (наименьший размер объекта различения 0,3...0,5 мм) величина коэффициента естественного освещения (КЕО) должна быть не ниже 1,5 %, а при зрительной работе средней точности (наименьший размер объекта различения 0,5...1,0 мм) КЕО должен быть не ниже 1,0 %. Для общего освещения помещений следует использовать лампы со световой отдачей не менее 55 лм/Вт. Для освещения

помещений, оборудованных персональными компьютерами, следует применять систему общего освещения. Также допускается применение комбинированного освещения с целью дополнительного освещения бумажного носителя при исключении засветки от экрана монитора.

Требования к освещенности в помещениях, где установлены компьютеры, по ГОСТ Р 55710-2013, следующие: при выполнении зрительных работ высокой точности общая освещенность должна составлять 300 лк, а комбинированная – 750 лк; аналогичные требования при выполнении работ средней точности – 200 лк и 300 лк соответственно [43].

Расчет искусственного освещения

Задачей расчета является выполнение общего равномерного освещения помещения.

Размеры помещения 15х8х4 м, высота рабочей поверхности $h_{pn} = 0,8$ м. Требуется создать освещенность $E = 300$ лк.

Световой поток лампы определяется по формуле [52]:

$$\Phi = \frac{E_M \cdot S \cdot Z \cdot K_{\Sigma}}{N \cdot \eta} \quad (37)$$

Коэффициент отражения стен $R_c = 50 \%$, потолка $R_n = 70 \%$.

Коэффициент запаса $k = 1,8$, коэффициент неравномерности $Z = 1,1$. Рассчитываем систему общего люминесцентного освещения. Выбираем светильники типа ОД, $\lambda = 1,4$.

Приняв $h_c = 0,5$ м; получаем $h = 4 - 0,5 - 0,8 = 2,7$ м;

$L = 1,4 \cdot 2,7 = 3,78$ м; $L / 3 = 1,26$ м.

Размещаем светильники в три ряда. В каждом ряду можно установить 8 светильников типа ОД мощностью 40 Вт (с длиной 1,23 м), при этом разрывы между светильниками в ряду составят 50 см. Учитывая, что в каждом светильнике установлено две лампы, общее число ламп в помещении $N = 48$.

Находим индекс помещения:

$$i = 120 / [2,7 \cdot (15 + 8)] = 1,93$$

Коэффициент использования светового потока: $\eta = 0,61$.

$$\Phi = \frac{300 \cdot 120 \cdot 1,8 \cdot 1,1}{48 \cdot 0,61} = 2434,43 \text{ лм.}$$

Определяем потребный световой поток ламп в каждом из рядов, выбираем ближайшую стандартную лампу – ЛТБ 40 Вт с потоком 2850 лм. Делаем проверку выполнения условия:

$$-10 \% \leq (\Phi_{\text{ст}} - \Phi_{\text{расч}}) / \Phi_{\text{ст}} \cdot 100 \% \leq 20 \% \quad (38)$$

$$-10 \% \leq (2850 - 2434,43) / 2850 \cdot 100 \% \leq 20 \%$$

Определяем электрическую мощность осветительной установки:

$$P = 48 \cdot 40 = 1920 \text{ Вт.}$$

Электромагнитные излучения

Вредные проявления факторов рассматриваемой рабочей зоны выражаются в электромагнитном и электрическом излучениях (ЭМИ и ЭСИ). Объясняется это тем, что ПК оснащают сетевыми фильтрами, источниками бесперебойного питания и другим оборудованием, что в совокупности формирует сложную электромагнитную обстановку на рабочем месте пользователя. Техногенные ЭМП приводят к следующему: появление головной боли, повышение температуры тела, ожоги, катаракты. Радиочастотное ЭМП влияет на нервную и сердечно – сосудистую системы [44].

Источником ЭСП является экран ПК и трение поверхности клавиатуры и компьютерной мыши. ЭСП может способствовать нарушению гормональной и иммунной систем. Показатели ЭМИ и ЭСИ на рабочих местах с ПК представлены в таблице 7.4 [44]:

Таблица 21 – Допустимые уровни напряженности электромагнитных полей по СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03

Параметры воздействия, частота излучения		Допустимые значения
Статическое поле		20 000 В/м
На расстоянии 50 см вокруг	в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц	25 В/м
	в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц	2,5 В/м
Переменное поле на расстоянии 50 см вокруг		0,25 А/м
Магнитная индукция не более	в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц	250 нТл
	в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц	25 нТл
Поверхностный электростатический потенциал не более		500 В

Длительное воздействие электромагнитного поля на организм человека может привести к дыхательной, нервной и сердечно-сосудистой систем, головным болям, утомляемости. Для обеспечения меньшего уровня электромагнитного излучения использован жидкокристаллический монитор. Необходимо чтобы компьютер был заземлен, а также необходимо по возможности сокращать время работы за компьютером.

7.2 Анализ опасных факторов производственной среды

Электробезопасность

Электробезопасность – система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного для жизни воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества [45].

Опасное и вредное воздействия на людей электрического тока и электрической дуги проявляются в виде электротравм и профессиональных заболеваний.

Помещение, где расположены персональные вычислительные машины, относится к помещениям без повышенной опасности [46], так как отсутствуют следующие факторы:

- сырость;
- токопроводящая пыль;
- токопроводящие полы;
- высокая температура.

Возможность одновременного прикосновения человека к имеющим соединение с землёй металлоконструкциям зданий, технологическим аппаратам и механизмам и металлическим корпусам электрооборудования.

К мероприятиям по предотвращению возможности поражения электрическим током следует отнести [47]:

- при производстве монтажных работ необходимо использовать только исправный инструмент, аттестованный службой КИПиА;
- с целью защиты от поражения электрическим током, возникающим между корпусом приборов и инструментом при пробое сетевого напряжения на корпус, корпуса приборов и инструментов должны быть заземлены;
- при включенном сетевом напряжении работы на задней панели должны быть запрещены;
- все работы по устранению неисправностей должен производить квалифицированный персонал;
- необходимо постоянно следить за исправностью электропроводки.

Перед началом работы следует убедиться в отсутствии свешивающихся со стола или висящих под столом проводов электропитания, в целостности вилки и провода электропитания, в отсутствии видимых повреждений аппаратуры и рабочей мебели, в отсутствии повреждений и наличии заземления при экранного фильтра.

Токи статического электричества, наведенные в процессе работы компьютера на корпусах монитора, системного блока и клавиатуры, могут приводить к разрядам при прикосновении к этим элементам. Такие разряды опасности для человека не представляют, но могут привести к выходу из строя компьютера. Для снижения величин токов статического электричества

используются нейтрализаторы, местное и общее увлажнение воздуха, использование покрытия полов с антистатической пропиткой.

Психофизиологические факторы

Наиболее эффективные средства предупреждения утомления при работе на производстве – это средства, нормализующие активную трудовую деятельность человека. На фоне нормального протекания производственных процессов одним из важных физиологических мероприятий против утомления является правильный режим труда и отдыха (СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03).

Существуют следующие меры по снижению влияния монотонности:

- необходимо применять оптимальные режимы труда и отдыха в течение рабочего дня;
- соблюдать эстетичность производства.

Для уменьшения физических нагрузок организма во время работы рекомендуется использовать специальную мебель с возможностью регулировки под конкретные антропометрические данные, например, эргономичное кресло.

Пожарная безопасность

Пожарная безопасность – комплекс организационных и технических мероприятий, направленных на обеспечение безопасности людей, на предотвращение пожара, ограничение его распространения, а также на создание условий для успешного тушения пожара [48].

Рабочее помещение, в котором производится работа по выполнению ВКР по пожарной и взрывной опасности относят к категории В.

К противопожарным мероприятиям в помещении относят следующие мероприятия:

- 1) помещение должно быть оборудовано: средствами тушения пожара (огнетушителями, ящиком с песком, стендом с противопожарным инвентарем); средствами связи; должна быть исправна электрическая проводка осветительных приборов и электрооборудования;

2) каждый сотрудник должен знать место нахождения средств пожаротушения и средств связи; помнить номера телефонов для сообщения о пожаре; уметь пользоваться средствами пожаротушения.

Помещение обеспечено средствами пожаротушения в соответствии с нормами [49]:

- 1) пенный огнетушитель ОП-10 – 1 шт;
- 2) углекислотный огнетушитель ОУ-5 – 1 шт.

При невозможности самостоятельно потушить пожар необходимо вызвать пожарную команду, после чего поставить в известность о случившемся инженера по технике безопасности.

Вынужденная эвакуация при пожаре протекает в условиях нарастающего действия опасных факторов пожара. Кратковременность процесса вынужденной эвакуации достигается устройством эвакуационных путей и выходов, число, размеры и конструктивно-планировочные решения которых регламентированы строительными нормами СНиП 2.01.02-85.

Помещение и этаж оборудованы следующими средствами оповещения:

- световая индикация в коридорах этажа;
- звуковая индикация в виде громкоговорителя;
- пассивными датчиками задымленности.

Экологическая безопасность

Экологическая безопасность – это состояние, при котором в регионе защищены региональные интересы в широком их понимании, включающем политические, социальные, экономические, военные, экологические аспекты, риски, связанные с внешнеэкономической деятельностью, распространением оружия массового поражения, а также предотвращения угрозы духовным и интеллектуальным ценностям населения региона.

На сегодняшний день одним из самых распространенных источников ртутного загрязнения являются вышедшие из эксплуатации люминесцентные лампы. Каждая такая лампа, кроме стекла и алюминия, содержит около 60 мг ртути. Поэтому отслужившие свой срок люминесцентные лампы, а также другие

приборы, содержащие ртуть, представляют собой опасный источник токсичных веществ.

В целом, утилизация ламп предполагает передачу использованных ламп предприятиям – переработчикам, которые с помощью специального оборудования перерабатывают вредные лампы в безвредное сырье – сорбент, которое в последующем используют в качестве материала для производства, например, тротуарной плитки.

Под хранением отходов понимается временное размещение их в специально отведённых для этого местах или объектах до их утилизации. Отработанные люминесцентные лампы, согласно Классификатору отходов ДК 005 - 96, утвержденному приказом Госстандарта № 89 от 29.02.96 г., относятся к отходам, которые сортируются и собираются отдельно, поэтому утилизация люминесцентных ламп и их хранение должны отвечать определенные требованиям [50].

7.3 Организационные мероприятия обеспечения безопасности

Требования к организации рабочих мест пользователей:

- рабочее место должно быть организовано с учетом эргономических требований согласно ГОСТ 12.2.032-78 «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования» [17] и ГОСТ 12.2.061-81 «ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности к рабочим местам» [51];

- конструкция рабочей мебели (рабочий стол, кресло, подставка для ног) должна обеспечивать возможность индивидуальной регулировки соответственно росту пользователя и создавать удобную позу для работы. Вокруг ПК должно быть обеспечено свободное пространство не менее (60 – 120) см;

- на уровне экрана должен быть установлен оригинал-держатель.

На рисунке 59. представлены требования к рабочему месту.

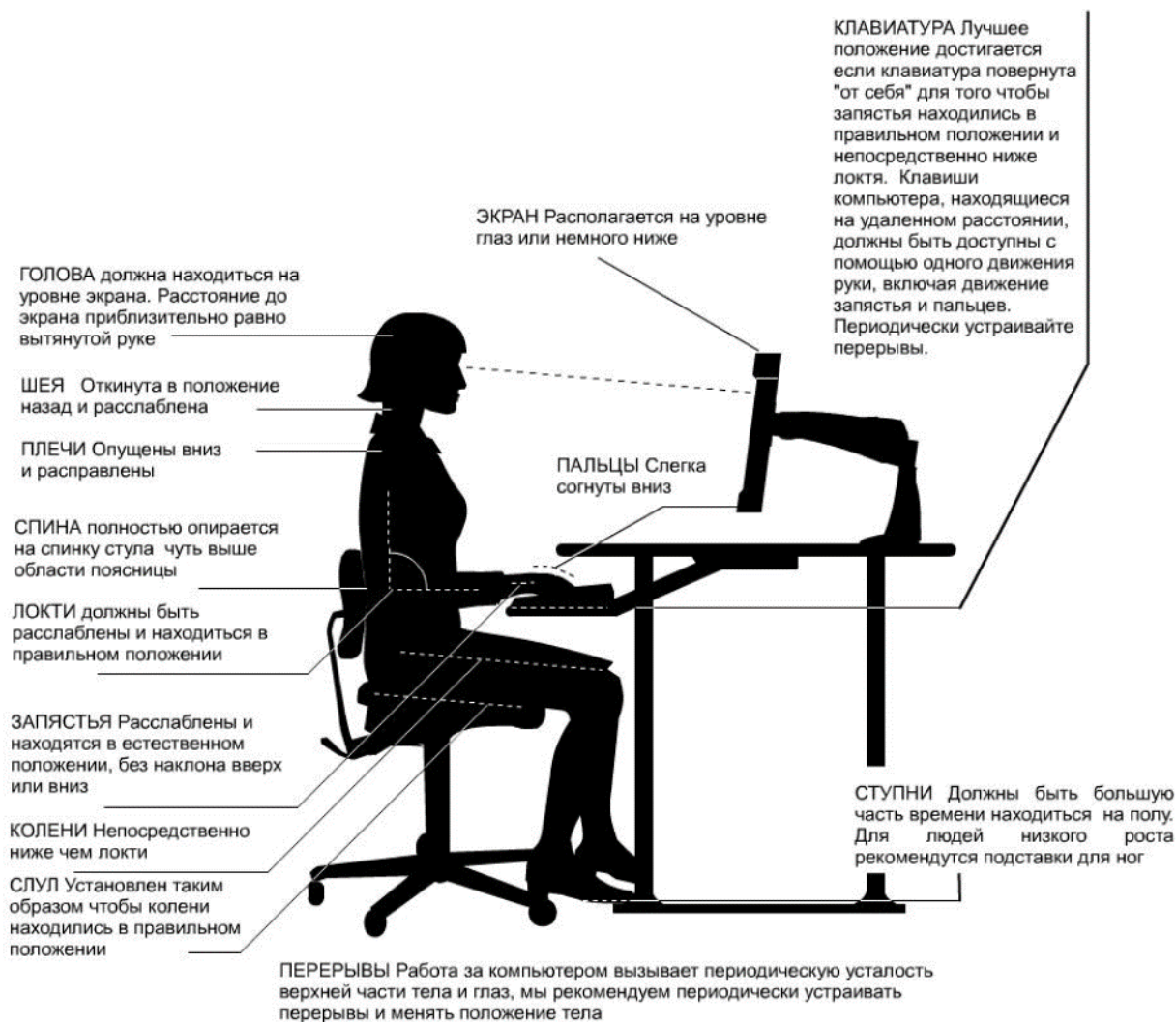


Рисунок 59 – Организация рабочего места

В соответствии с государственными стандартами и правовыми нормами обеспечения безопасности предусмотрена рациональная организация труда в течение смены, которая предусматривает:

- длительность рабочей смены не более 8 часов;
- установление двух регламентируемых перерывов (не менее 20 минут после 1-2 часов работы, не менее 30 минут после 2 часов работы);
- обеденный перерыв не менее 40 минут.

Обязательно предусмотрен предварительный медосмотр при приеме на работу и периодические медосмотры.

Каждый сотрудник должен пройти инструктаж по технике безопасности перед приемом на работу и в дальнейшем, должен быть пройден инструктаж по электробезопасности и охране труда.

Особенности законодательного регулирования проектных решений

При реализации данного технологического решения, представленного в ВКР, был разработан комплекс мер по обеспечению безопасности труда при работе на данном объекте. При разработке данных мер были использованы следующие нормативные документы:

- СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы»;
- СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений»;
- ГОСТ 12.1.003-83 «ССБТ. Шум. Общие требования безопасности»;
- СНиП 2.01.02-85 «Противопожарные нормы»;
- ГОСТ 12.2.061-81 «ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности к рабочим местам»;
- ГОСТ 12.2.032-78 «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования».

Безопасность в чрезвычайных ситуациях

В данном случае на объекте (офис) могут возникать чрезвычайные ситуации (ЧС) следующего характера:

- техногенные;
- экологические;
- природные.

Наиболее типичной ЧС для помещения, котором производится выполнение ВКР, является пожар. Данная ЧС может произойти в случае замыкания электропроводки оборудования, обрыву проводов, не соблюдению мер пожаробезопасности и т.д.

Для того чтобы избежать возникновения пожара необходимо проводить следующие профилактические работы, направленные на устранение возможных источников возникновения пожара:

- периодическая проверка проводки;
- отключение оборудования при покидании рабочего места;

- проведение инструктажа работников о пожаробезопасности.

Чтобы увеличить устойчивость офисного помещения к ЧС необходимо устанавливать системы противопожарной сигнализации, реагирующие на дым и другие продукты горения, установка огнетушителей, обеспечить офис и проинструктировать рабочих о плане эвакуации из офиса, а также назначить ответственных за эти мероприятия. Два раза в год (в летний и зимний период) проводить учебные тревоги для отработки действий при пожаре. В ходе осмотра офисного помещения были выявлены системы, сигнализирующие о наличие пожара или задымленности помещения и наличие огнетушителей.

В случае возникновения ЧС как пожар, необходимо предпринять меры по эвакуации персонала из офисного помещения в соответствии с планом эвакуации (рисунок 60). При отсутствии прямых угроз здоровью и жизни произвести попытку тушения возникшего возгорания огнетушителем. В случае потери контроля над пожаром, необходимо эвакуироваться вслед за сотрудниками по плану эвакуации и ждать приезда специалистов, пожарников. При возникновении пожара должна сработать система пожаротушения, издав предупредительные сигналы, и передав на пункт пожарной станции сигнал о ЧС, в случае если система не сработала, по каким-либо причинам, необходимо самостоятельно произвести вызов пожарной службы по телефону 101, сообщить место возникновения ЧС и ожидать приезда специалистов.

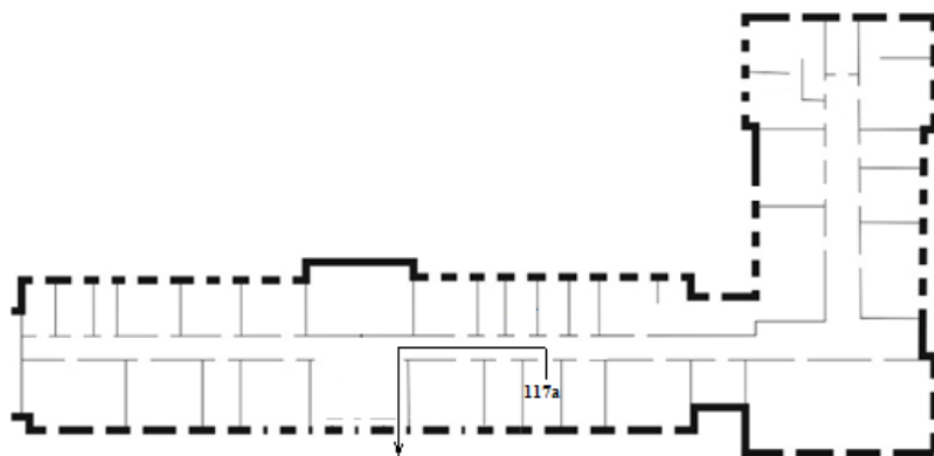


Рисунок 60 – План эвакуации при пожаре и других ЧС из помещений учебного корпуса № 10, пр. Ленина, 1 этаж

Заключение

В выпускной квалификационной работе было разработано подключение аппаратного обеспечения двигателя постоянного тока с драйвером, создана модель управления двигателем в Simulink, определены передаточные функции и выполнены расчет показателей качества для линейной и нелинейной моделей. Кроме того, проведено сравнение отклика расчетной модели и экспериментальных данных, проанализированы полученные графики экспериментальных данных и переходных процессов по линейной и нелинейной моделям.

В работе решается задача информационного моделирования и разработки системы управления двигателем постоянного тока с помощью микроконтроллером, персонального компьютера и программного продукта Matlab.

Для повышения отклика экспериментальных данных и улучшения показателей качества управления был применён ПИД-регулятор. Решение задач информационного моделирования системы управления ДПТ может быть использовано в учебном процессе.

The conclusion

In the final qualifying work, the connection of the DC motor hardware with a driver was developed, a model of motor control was created in Simulink, the transfer functions were determined, and the quality indicators for linear and nonlinear models were calculated. In addition, a comparison was made of the response of the computational model and experimental data, and the resulting graphs of experimental data and transients were analyzed using linear and non-linear models.

The paper solves the problem of information modeling and development of a control system for a DC motor using a microcontroller, a personal computer and Matlab software.

To improve the response of experimental data and improve management quality indicators, a PID controller was used. The solution of the problems of information modeling of the control system of DC can be used in the educational process.

Список публикаций

1. Яковлева Е.М., Ван Ши. Информационное моделирование системы управления серводвигателем БПЛА // Евразийское Научное Объединение (ЕНО) – Москва, 2017. — 236-239 с.
2. Яковлева Е.М., Ван Ши. Информационное моделирование и разработка системы управления двигателем постоянного тока с помощью микроконтроллером Евразийское Научное Объединение (ЕНО) – Москва, 2018. — 128-132 с.

Список используемых источников

1. Яковлева Е.М., Ван Ши. Информационное моделирование и разработка системы управления двигателем постоянного тока с помощью микроконтроллером М.: Моском, 2018. — 128 с.
2. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink. М.: Моском, 2014. — 288 с.
3. Герасимов В. Г., Кузнецов Э. В., Николаева О. В. Электротехника и электроника. Кн. 2. Электромагнитные устройства и электрические машины. — М.: Энергоатомиздат, 1996. — С. 62. — ISBN 5-283-05005-X.
4. Naoto Nagaosa, Jairo Sinova, Shigeki Onoda, A. H. MacDonald and N. P. Ong. Anomalous Hall effect (англ.) // Rev. Mod. Phys.. — 2010. — Vol. 82, iss. 2. — P. 1539—1592.
5. Модуль драйвера двигателей L298N и Arduino [Электронный ресурс] URL: http://zelectro.cc/Motor_shield_L298N_Arduino – Загл. с экрана – Яз. рус. – Дата обращения: 19.05.2019 г.
6. Петин В.А. Проекты с использованием контроллера Arduino. — БХВ-Петербург, 2014. — 400 с. — ISBN 9785977533379.
7. What is an Arduino? [Электронный ресурс] URL: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/what-is-an-arduino/all> – Загл. с экрана – Яз. англ. – Дата обращения: 26.04.2019 г.
8. Matlab and Arduino / Fantc 2013-12-3
9. System Identification Toolbox [Электронный ресурс] URL: <https://matlab.ru/products/system-identification-toolbox> – Загл. с экрана – Яз. рус. – Дата обращения: 18.05.2019 г
10. What is Simulink? [Электронный ресурс] URL: <https://ewh.ieee.org/r1/ct/sps/PDF/MATLAB/chapter8.pdf> – Загл. с экрана – Яз. англ. – Дата обращения: 26.04.2019 г
11. Simulink Basics Tutorial [Электронный ресурс] URL: http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?aux=Basics_Simulink – Загл. с экрана – Яз. англ. – Дата обращения: 26.04.2019 г

12. Arduino Support from Simulink [Электронный ресурс] URL: <https://www.mathworks.com/hardware-support/arduino-simulink.html> – Загл. с экрана – Яз. англ. – Дата обращения: 26.04.2019 г
13. Build Arduino projects using high level programming and block diagrams [Электронный ресурс] URL: <https://www.mathworks.com/discovery/arduino-programming-matlasimulink.html> – Загл. с экрана – Яз. англ. – Дата обращения: 26.04.2019 г.
14. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. Д.Х. Янг, У. Уинвер. – М.: Машиностроение, 1985. – 482 с.
15. Arkadiy Turevskiy, PID Control Made Easy 14 Mar 2017
16. Drive with PID Control / MathWorks [Электронный ресурс] URL: <https://ww2.mathworks.cn/help/supportpkg/arduino/examples/drive-with-pid-control.html> – Загл. с экрана – Яз. англ. – Дата обращения: 21.03.2019 г.
17. Pravallika Vinnakota, Motor Control with Arduino: A Case Study in Data-Driven Modeling and Control Design. 2013 г.
18. DC Servo Motor Parameter Estimation / MathWorks [Электронный ресурс] URL: https://ww2.mathworks.cn/help/slido/examples/dc-servo-motor-parameter-estimation.html?s_tid=srchtitle – Загл. с экрана – Яз. англ. – Дата обращения: 21.03.2019 г.
19. Guy Rouleau, Estimating Continuous-Time Transfer Functions with System Identification Toolbox March 28, 2012.
20. Guy Rouleau, Implementing a PID Controller on an Arduino Board April 21, 2013
21. Яковлева Е.М. Автоматизированное проектирование средств и систем управления: учебное пособие. Томск: ТПУ, 2016. — 200 с
22. Qing Yue, Идентификация и контроль нелинейной системы Гаммерштейна-Винера 2011.
23. What are Nonlinear ARX Models? / MathWorks [Электронный ресурс] URL: <https://www.mathworks.com/help/ident/ug/what-are-nonlinear-arx-models.html> – Загл. с экрана – Яз. англ. – Дата обращения: 21.03.2019 г.

24. Identifying Nonlinear ARX Models/ MathWorks [Электронный ресурс]
URL: <https://www.mathworks.com/help/ident/ug/identifying-nonlinear-arx-models.html#bq5906d-1> – Загл. с экрана – Яз. англ. – Дата обращения: 21.03.2019 г.
25. Validate Nonlinear ARX Models/ MathWorks [Электронный ресурс]
URL: <https://www.mathworks.com/help/ident/ug/validating-nonlinear-arx-models.html> – Загл. с экрана – Яз. англ. – Дата обращения: 21.03.2019 г.
26. Identifying Hammerstein-Wiener Models/ MathWorks [Электронный ресурс] URL: <https://www.mathworks.com/help/ident/ug/identifying-hammerstein-wiener-models.html#bq596zm-2> – Загл. с экрана – Яз. англ. – Дата обращения: 21.03.2019 г.
27. What Are Polynomial Models? / MathWorks [Электронный ресурс]
URL: <https://www.mathworks.com/help/ident/ug/what-are-polynomial-models.html> – Загл. с экрана – Яз. англ. – Дата обращения: 21.04.2019 г.
28. What are Hammerstein-Wiener Models? / MathWorks [Электронный ресурс] URL: <https://www.mathworks.com/help/ident/ug/what-are-hammerstein-wiener-models.html> – Загл. с экрана – Яз. англ. – Дата обращения: 21.03.2019 г.
29. В.Е. Овсянников, В.Ю. Терещенко, Некоторые аспекты построения моделей нелинейных объектов, 2011
30. Servo Control / MathWorks [Электронный ресурс] URL: <https://ww2.mathworks.cn/examples/simulink/mw/arduino-ex54219490-servo-control> – Загл. с экрана – Яз. англ. – Дата обращения: 11.04.2019 г.
31. Drive with PID Control / MathWorks [Электронный ресурс] URL: <https://ww2.mathworks.cn/help/supportpkg/arduino/examples/drive-with-pid-control.html> – Загл. с экрана – Яз. англ. – Дата обращения: 21.03.2019 г.
32. Широтно-импульсная модуляция [Электронный ресурс] URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> – Загл. с экрана – Яз. рус. – Дата обращения: 18.05.2019 г.
33. David Kushner, The Making of Arduino. How five friends engineered a small circuit board that's taking the DIY world by storm, IEEE Spectrum, 26 Oct 2011
34. Барский А.Б. Нейронные сети: распознавание, управление, принятие

решений / А.Б. Барский. - М.: Финансы и статистика, 2004. – 176 с. ил.

35. Хайкин С. Нейронные сети полный курс, 2-е издание.: Пер. с англ. /С. Хайкин. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2006. – 1104 с. ил.

36. Ультразвуковой датчик измерения расстояния HC-SR04 [Электронный ресурс] URL: <http://robocraft.ru/blog/electronics/772> –Загл. с экрана – Яз. рус. – Дата обращения: 26.04.2017г

37. Панин В.Ф., Сечин А.И., Федосова В.Д. Экология для инженера://под ред. Проф. В.Ф. Панина. – М: Изд. Дом «Ноосфера», 2000. – 284с.

38. Международный стандарт «Социальная ответственность организации. Требования». 2011.

39. ГОСТ 12.0.003-74 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация».

40. СанПиН 2.2.4.548–96. «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений».

41. СН 2.2.4/2.1.8.562–96. «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки».

42. ГОСТ 12.1.003-83. «ССБТ. Шум. Общие требования безопасности».

43. ГОСТ Р 55710-2013. «Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы измерений».

44. СанПиН 2.2.4.1191-03. «Электромагнитные поля в производственных условиях».

45. ГОСТ 12.1.009-76. «Электробезопасность. Термины и определения».

46. ГОСТ 12.1.019-79. ССБТ «Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты».

47. ГОСТ Р 12.1.019-2009 ССБТ. «Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты».

48. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы».

49. СНиП 21-01-97. «Пожарная безопасность зданий и сооружений».

50. СНиП 2.01.02-85. «Противопожарные нормы».

51. Назаренко, Ольга Брониславовна. Безопасность жизнедеятельности: учебное пособие / О. Б. Назаренко, Ю. А. Амелькович; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — 3-е изд., перераб. и доп. — Томск: Изд-во ТПУ, 2013. — 177 с
52. СНиП 23-05-95. «Естественное и искусственное освещение».
53. ГОСТ 12.2.032-78. «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования».
54. ГОСТ 12.2.061-81. «ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности к рабочим местам».

Приложение А

(обязательное)

Раздел ВКР выполненный на иностранном языке

Раздел 5 Разработка нелинейной модели системы управления

Section 5 Development of a non-linear model of the control system

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8AM71	Ван Шии		

Руководитель ВКР:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Скороспешкин М.В.	к.т.н.		

Консультант – лингвист:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИЯ ШБИП	Сидоренко Т. В.	к.п.н.		

5 Development of a non-linear model of the control system

The widely used mathematical models of dynamic objects (spectral, correlation, process, etc.) are not applicable if the object is not linear, since they do not take into account the nature of changes in its properties.

To account for the properties of such objects, nonlinear elements based on the use of artificial neural networks, wavelets, etc., are introduced into the composition of mathematical models [22]. The basic schemes for the models of non-linear objects are given in the following:

- Model Nonlinear ARX;
- Hammerstein-Winner model.

5.1 Model Nonlinear ARX

Nonlinear ARX models extend the linear ARX model to the nonlinear case. Estimate nonlinear ARX models in the System Identification app or at the command line using the `nlarx` command. To estimate a nonlinear ARX model, first prepare the estimation data. Then configure the model structure and estimation algorithm, and then perform the estimation. After estimation, validate the estimated model as described in Validate Nonlinear ARX Models.

The structure of these models enables to model complex nonlinear behavior using flexible nonlinear functions, such as wavelet and sigmoid networks.

The linear SISO ARX model has the following structure [23]:

$$\begin{aligned} y(t) + a_1 \cdot y(t-1) + a_2 \cdot y(t-2) + \dots + a_{na} \cdot y(t-na) \\ = b_1 \cdot u(t) + b_2 \cdot u(t-1) + \dots + b_{nb} \cdot u(t-nb+1) + e(t) \end{aligned} \quad (6)$$

Where u – input;

y – output;

e – noise.

This structure implies that the current output $y(t)$ is predicted as a weighted sum of past output values and current and past input values. na is the number of past output terms, and nb is the number of past input terms used to predict the current output. The input delay nk is set to zero to simplify the notation. Rewriting the equation as a product gives:

$$y_p(t) = [-a_1, -a_2, \dots, -a_{na}, b_1, b_2, \dots, b_{nb}] \cdot [y(t-1), y(t-2), \dots, y(t-na), u(t), u(t-1), \dots, u(t-nb+1)]^T \quad (7)$$

where $y(t-1), y(t-2), \dots, y(t-na), u(t), u(t-1), \dots, u(t-nb-1)$ are delayed input and output variables, called regressors. The coefficients vector $[-a_1, \dots, b_{nb}]$ represents the weighting applied to these regressors. The linear ARX model thus predicts the current output y_p as a weighted sum of its regressors.

The structure of a nonlinear ARX model allows the following additional flexibility:

Instead of the weighted sum of the regressors that represents a linear mapping, the nonlinear ARX model has a more flexible nonlinear mapping function, F .

$$y_p(t) = F(y(t-1), y(t-2), y(t-3), \dots, u(t), u(t-1), u(t-2), \dots) \quad (8)$$

- Inputs to F are model regressors. When we specify the nonlinear ARX model structure, we can choose one of several available nonlinear functions. For example, F can represent a weighted sum of wavelets that operate on the distance of the regressors from their means.

- Nonlinear ARX regressors can be both delayed input-output variables and more complex, nonlinear expressions of delayed input and output variables. Examples of such nonlinear regressors are $y(t-1)^2, u(t-1) * y(t-2), \text{abs}(u(t-1))$ и $\max(u(t-1) * y(t-3), -10)$.

Structure of Nonlinear ARX Models

A nonlinear ARX model (figure 43) consists of model regressors and a nonlinearity estimator. The nonlinearity estimator comprises both linear and nonlinear functions that act on the model regressors to give the model output. This block diagram represents the structure of a nonlinear ARX model in a simulation scenario [24].

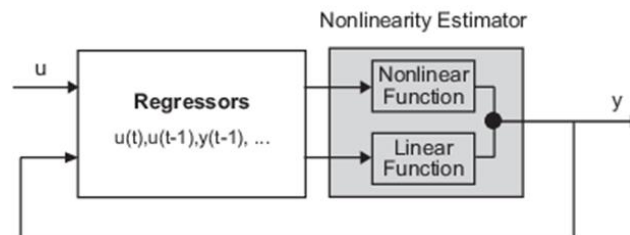


Figure 43 – Model Nonlinear ARX

The software computes the nonlinear ARX model output y in two stages:

1. It computes regressor values from the current and past input values and past output data;

In the simplest case, regressors are delayed inputs and outputs, such as $u(t - 1)$ and $y(t - 3)$. These kind of regressors are called standard regressors. You specify the standard regressors using the model orders and delay. For more information, see Nonlinear ARX Model Orders and Delay. You can also specify custom regressors, which are nonlinear functions of delayed inputs and outputs. For example, $u(t - 1) * y(t - 3)$. To create a set of polynomial type regressors, use `polyreg`.

By default, all regressors are inputs to both the linear and the nonlinear function blocks of the nonlinearity estimator. You can choose a subset of regressors as inputs to the nonlinear function block.

2. It maps the regressors to the model output using the nonlinearity estimator block. The nonlinearity estimator block can include linear and nonlinear blocks in parallel. For example:

$$F(x) = L^T(x - r) + d + g(Q(x - r)) \quad (9)$$

Where x – vector of the regressors;

r – mean of the regressors x ;

$L^T(x) + d$ – output of the linear function block and is affine when $d \neq 0$. d – scalar offset;

$g(Q(x - r))$ – the output of the nonlinear function block.

Q – a projection matrix that makes the calculations well-conditioned.

The exact form of $F(x)$ depends on our choice of the nonlinearity estimator. We can select from available nonlinearity estimators, such as tree-partition networks, wavelet networks, and multilayer neural networks. We can also exclude either the linear or the nonlinear function block from the nonlinearity estimator.

When estimating a nonlinear ARX model, the software computes the model parameter values, such as L , r , d , Q , and other parameters specifying g .

Resulting nonlinear ARX models are `idnlarx` objects that store all model data, including model regressors and parameters of the nonlinearity estimator.

Typically, you use nonlinear ARX models as black-box structures. The nonlinear function of the nonlinear ARX model is a flexible nonlinearity estimator with parameters that need not have physical significance. Estimate nonlinear ARX in the System Identification app or at the command line using the `nlrx` command. We can use uniformly sampled time-domain input-output data or time-series data (no inputs) for estimating nonlinear ARX models. Our data can have one or more input and output channels. Cannot use frequency-domain data for estimation.

Nonlinear ARX Model Orders and Delay

Using the orders and delays of a nonlinear ARX model to define the standard regressors of the model. The orders and delay are defined as follows:

- na — number of past output terms used to predict the current output;
- nb — number of past input terms used to predict the current output;
- nk — delay from input to the output in terms of the number of samples.

The meaning of na , nb , and nk is similar to that for linear ARX model parameters. Orders are specified as scalars for SISO data, and as ny -by- nu matrices for MIMO data, where ny and nu are the number of outputs and inputs. If we are not sure what values to use for the orders and delays, we can estimate them as described in Preliminary Step – Estimating Model Orders and Input Delays. Such an estimate is based on linear ARX models and only provides initial guidance. The best orders for a linear ARX model might not be the best orders for a nonlinear ARX model.

System Identification Toolbox software computes standard regressors using the model orders and delays. For example, suppose that you specify $na = 2$, $nb = 3$, and $nk = 5$ for a SISO model with input u and output y . The toolbox computes standard regressors $y(t-2)$, $y(t-1)$, $u(t-5)$, $u(t-6)$ and $u(t-7)$.

Also specify custom regressors in addition to standard regressors.

5.2 Hammerstein-Wiener Models

When the output of a system depends nonlinearly on its inputs, sometimes it is possible to decompose the input-output relationship into two or more interconnected elements. In this case, to represent the dynamics by a linear transfer function and capture the nonlinearities using nonlinear functions of inputs and outputs of the linear

system. The Hammerstein-Wiener model achieves this configuration as a series connection of static nonlinear blocks with a dynamic linear block. Hammerstein-Wiener model applications span several areas, such as modeling electromechanical system and radio frequency components, audio and speech processing, and predictive control of chemical processes. These models have a convenient block representation, a transparent relationship to linear systems, and are easier to implement than heavy-duty nonlinear models such as neural networks and Volterra models.

Using a Hammerstein-Wiener model as a black-box model structure because it provides a flexible parameterization for nonlinear models. For example, to estimate a linear model and try to improve its fidelity by adding an input or output nonlinearity to this model. We can also use a Hammerstein-Wiener model as a grey-box structure to capture physical knowledge about process characteristics. For example, the input nonlinearity can represent typical physical transformations in actuators and the output nonlinearity can describe common sensor characteristics.

Configure Hammerstein-Wiener Model Structure

Hammerstein-Wiener models (figure 44) describe dynamic systems using one or two static nonlinear blocks in series with a linear block. The linear block is a discrete transfer function that represents the dynamic component of the model.

This block diagram represents the structure of a Hammerstein-Wiener model:

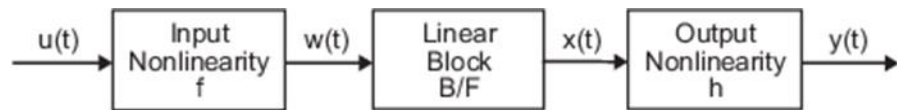


Figure 44 – Hammerstein-Wiener Model

where f – a nonlinear function that transforms input data $u(t)$ as $w(t) = f(u(t))$.

$w(t)$ – an internal variable, is the output of the Input Nonlinearity block and has the same dimension as $u(t)$.

B/F – a linear transfer function that transforms $w(t)$ as $x(t) = (B/F)w(t)$.

$x(t)$ – an internal variable, is the output of the Linear block and has the same dimension as $y(t)$.

B and F are similar to polynomials in a linear Output-Error model. For more information about Output-Error models.

For n_y outputs and n_u inputs, the linear block is a transfer function matrix containing entries:

$$\frac{B_{j,i}(q)}{F_{j,i}(q)}$$

where $j = 1, 2, \dots, n_y$

$i = 1, 2, \dots, n_u$.

h is a nonlinear function that maps the output of the linear block $x(t)$ to the system output $y(t)$ as $y(t) = h(x(t))$.

Because f acts on the input port of the linear block, this function is called the input nonlinearity. Similarly, because h acts on the output port of the linear block, this function is called the output nonlinearity. If system contains several inputs and outputs, we must define the functions f and h for each input and output signal. Do not have to include both the input and the output nonlinearity in the model structure. When a model contains only the input nonlinearity f , it is called a Hammerstein model. Similarly, when the model contains only the output nonlinearity h , it is called a Wiener model.

The software computes the Hammerstein-Wiener model output y in three stages:

1. Compute $w(t) = f(u(t))$ from the input data;

$w(t)$ is an input to the linear transfer function B/F .

The input nonlinearity is a static (memoryless) function, where the value of the output at a given time t depends only on the input value at time t .

To configure the input nonlinearity as a sigmoid network, wavelet network, saturation, dead zone, piecewise linear function, one-dimensional polynomial, or a custom network. We can also remove the input nonlinearity.

2. Compute the output of the linear block using $w(t)$ and initial conditions:

$$x(t) = (B / F) \cdot w(t).$$

To configure the linear block by specifying the orders of numerator B and denominator F .

3. Compute the model output by transforming the output of the linear block $x(t)$ using the nonlinear function h as $y(t) = h(x(t))$.

Similar to the input nonlinearity, the output nonlinearity is a static function. You can configure the output nonlinearity in the same way as the input nonlinearity. You can also remove the output nonlinearity, such that $y(t) = x(t)$.

To configure the structure of a Hammerstein-Wiener model:

1. Configure the linear transfer function block.

Perform one of the following:

- Specify model order and input delay for the linear transfer function as:

nb — number of zeros plus one. nb is the length of the numerator (B) polynomial;

nf — number of poles. nf is the order of the transfer function denominator (F polynomial);

nk — delay from input to the output in terms of the number of samples.

For MIMO systems with N_y outputs and N_u inputs, nb , nf , and nk are N_y -by- N_u matrices.

- Initialize the linear block using a discrete-time linear model — to initialize using linear models at the command line only. The initialization sets the transfer function of the linear block to that of the specified linear model.

2. Configure the input and output nonlinearities, f and h respectively.

The default input and output nonlinearity estimators are piecewise linear functions. To configure the input and output nonlinearity estimators:

- Choose the type of input and output nonlinearity estimators, and configure their properties.
- Exclude the input or output nonlinear block.

We do not have to include both the input and the output nonlinearity in the model structure. When a model contains only the input nonlinearity f , it is called a Hammerstein model. Similarly, when the model contains only the output nonlinearity h , it is called a Wiener model.

Specify Estimation Options for Hammerstein-Wiener Models

To configure the model estimation, specify the loss function to be minimized, and choose the estimation algorithm and other estimation options to perform the minimization.

Configure Loss Function

The loss function or cost function is a function of the error between the model output and the measured output.

At the command line, use the `nlhw` option set, `nlhwOptions` to configure your loss function. You can specify the following options:

- `outputWeight` — Specify a weighting of the error in multi-output estimations;
- `regularization` — Modify the loss function to add a penalty on the variance of the estimated parameters.

Specify Estimation Algorithm

To estimate a Hammerstein-Wiener model, the software uses iterative search algorithms to minimize the loss function. At the command line, use `nlhwOptions` to specify the search algorithm and other estimation options. Some of the options we can specify are:

`SearchMethod` — Search method for minimization of prediction or simulation errors, such as Gauss-Newton and Levenberg-Marquardt line search, and Trust-region reflective Newton approach.

`SearchOptions` — Option set for the search algorithm, with fields that depend on the value of `SearchMethod`, such as:

`MaxIterations` — Maximum number of iterations to perform.

`Tolerance` — Condition for terminating iterative search when the expected improvement of the parameter values is less than a specified value.

`InitialCondition` — By default, the software treats the initial states of the model as zero and does not estimate the states. To choose to estimate initial states, which sometimes can improve parameter estimates.

After preprocessing the estimation data and configuring the model structure, loss function, and estimation options, to estimate the model in the System Identification app, or using `nlhw`. The resulting model is an `idnlhw` object that stores all model data, including model parameters and nonlinearity estimator.

The conclusion

In the final qualifying work, the connection of the DC motor hardware with a driver was developed, a model of motor control was created in Simulink, the transfer functions were determined, and the quality indicators for linear and nonlinear models were calculated. In addition, a comparison was made of the response of the computational model and experimental data, and the resulting graphs of experimental data and transients were analyzed using linear and non-linear models.

The paper solves the problem of information modeling and development of a control system for a DC motor using a microcontroller, a personal computer and Matlab software.

To improve the response of experimental data and improve management quality indicators, a PID controller was used. The solution of the problems of information modeling of the control system of DC can be used in the educational process.