

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 – 15.04.04. Автоматизация технологических процессов  
 и производств

Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
<b>Разработка цифрового двойника технологического процесса с использованием производственных данных</b>

УДК 004.896:004.421

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8TM81	Сизинцев Данил Андреевич		03.06.2020

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Филипас Александр Александрович	К.Т.Н		03.06.2020

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОАР ИШИТР	Зарницын Александр Юрьевич	—		03.06.2020

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Конотопский Владимир Юрьевич	К.Э.Н.		03.06.2020

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОКД ШБИП	Горбенко Михаил Владимирович	К.Т.Н.		03.06.2020

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Ефимов Семён Викторович	К.Т.Н.		03.06.2020

Томск – 2020 г.

## Результаты обучения по ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<b>Профессиональные</b>		
P1	Применять глубокие естественно-научные, математические знания в области анализа, синтеза и проектирования для решения научных и инженерных задач производства и эксплуатации автоматизированных систем, включая подсистемы управления и их программное обеспечение	Требования ФГОС (ПК-1, ПК-3, ОПК-1, ОПК-4, ОК-1, ОК-9), Критерий 5 АИОР (п. 1.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P2	Воспринимать, обрабатывать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в области теории, проектирования, производства и эксплуатации автоматизированных систем, принимать участие в командах по разработке и эксплуатации таких устройств и подсистем	Требования ФГОС (ПК-3, ПК-4, ПК-7, ОПК-1, ОПК-3, ОК-1, ОК-4, ОК-5, ОК-6, ОК-9), Критерий 5 АИОР(пп. 1.1, 1.2), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P3	Применять и интегрировать полученные знания для решения инженерных задач при разработке, производстве и эксплуатации современных автоматизированных систем и подсистем (в том числе интеллектуальных) с использованием технологий машинного обучения, современных инструментальных и программных средств	Требования ФГОС (ПК-2, ПК-3, ПК-4, ПК-5, ПК-15, ПК-18, ОПК-3, ОПК-6, ОК-1, ОК-5, ОК-6, ОК-7), Критерий 5 АИОР (пп. 1.2), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P4	Определять, систематизировать и получать необходимую информацию в области проектирования, производства, исследований и эксплуатации автоматизированных систем, устройств и подсистем	Требования ФГОС (ПК-7, ПК-10, ПК-11, ПК-12, ПК-18, ОПК-4, ОПК-6, ОК-1, ОК-4, ОК-6, ОК-8), Критерий 5 АИОР (п.1.3), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P5	Планировать и проводить аналитические, имитационные и экспериментальные исследования для целей проектирования, производства и эксплуатации систем управления технологическим процессом и подсистем (в том числе интеллектуальных) с использованием передового	Требования ФГОС (ПК-1, ПК-2, ПК-3, ПК-4, ПК-5, ПК-6, ПК-13, ПК-17, ПК-18, ОПК-2, ОПК-3, ОК-1, ОК-3, ОК-4, ОК-6, ОК-7, ОК-8, ОК-9), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P6	Понимать используемые современные методы, алгоритмы, модели и технические решения в автоматизированных системах и знать области их применения, в том числе в составе безлюдного производства	Требования ФГОС (ПК-1, ПК-2 ПК-3, ПК-7, ОПК-1, ОПК-3, ОПК-4, ОК-5, ОК-9, ОК-10), Критерий 5 АИОР (п. 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

Универсальные		
P7	Эффективно работать в профессиональной деятельности индивидуально и в качестве члена команды	Требования ФГОС (ПК-1, ПК-2 ПК-7, ПК-8, ПК-16, ПК-17, ОК-1, ОК-2, ОК-4, ОК-6, ОК-9), Критерий 5АИОР (п. 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P8	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде с пониманием культурных, языковых и социально-экономических различий	Требования ФГОС (ПК-4, ПК-8, ПК-9, ПК-16, ОПК-4, ОК-5), Критерий 5 АИОР (п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P9	Проявлять широкую эрудицию, в том числе знание и понимание современных общественных и политических проблем, демонстрировать понимание вопросов безопасности и охраны здоровья сотрудников, юридических аспектов, ответственности за инженерную деятельность, влияния инженерных решений на социальный контекст и окружающую среду	Требования ФГОС (ПК-5, ПК-8, ПК-15, ПК-16, ПК-18, ОПК-1, ОПК-4, ОПК-5, ОК-3, ОК-4, ОК-5, ОК-6, ОК-8, ОК-9), Критерий 5 АИОР (пп. 1.6, 2.3.), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEAN
P10	Следовать кодексу профессиональной этики и ответственности и международным нормам инженерной деятельности	Требования ФГОС (ПК-8, ПК-11, ПК-16, ОПК-3, ОПК-6, ОК-4), Критерий 5 АИОР (пп. 2.4, 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P11	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности	Требования ФГОС (ПК-4, ПК-8, ОПК-3, ОПК-4, ОК-5, ОК-6, ОК-7, ОК-8), Критерий 5 АИОР (2.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

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 (специальность) – 15.04.04. Автоматизация технологических процессов и производств  
 Уровень образования – Магистратура  
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники  
 Период выполнения – осенний/ весенний семестр 2019/ 2020 учебного года

Форма представления работы:

магистерская диссертация
--------------------------

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

### КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	03.06.2020
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
30.05.2020	Основная часть	60
31.05.2020	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	20
10.06.2020	Социальная ответственность	20

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Филипас Александр Александрович	К.Т.Н		24.02.2020

**Консультант**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОАР ИШИТР	Зарницын Александр Юрьевич	—		24.02.2020

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Ефимов Семён Викторович	К.Т.Н.		24.02.2020

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 (специальность) – 15.04.04. Автоматизация  
технологических процессов и производств  
Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники

УТВЕРЖДАЮ:  
Руководитель ООП  
\_\_\_\_\_  
(Подпись)      (Дата)      Ефимов С.В.  
(Ф.И.О.)

### ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

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

Студенту:

Группа	ФИО
8TM81	Сизинцев Данил Андреевич

Тема работы:

Разработка цифрового двойника технологического процесса с использованием производственных данных	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	13.05.2020, 134-22/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	03.06.2020
--	------------

### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p><b>Исходные данные к работе</b> <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объектом исследования является производство БОПП пленки, а именно установка под названием стан тянущих валов (P.R.S), оборудованный моментными двигателями Siemens серии 1FW.</p> <p>Цель работы: создание предсказательной модели с помощью программного пакета Matlab</p>
--	--

<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b> <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	1. Аналитический обзор по литературным источникам 2. Анализ реальных производственных данных 3. Постановка задачи проектирования 4. Создание предсказательной модели 5. Анализ результатов выполнения 6. Реализация программного ПО
<b>Перечень графического материала</b> <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	1. Функциональная схема автоматизации 2. Блок-схема импортирования данных
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> <i>(с указанием разделов)</i>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Конотопский Владимир Юрьевич, доцент ОСГН
Социальная ответственность	Горбенко Михаил Владимирович, доцент ОКД
Раздел на иностранном языке	Горбатова Татьяна Николаевна, ст. преподаватель ОИЯ ШБИП
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	
2. Технологический процесс	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	24.02.2020
--	------------

**Задание выдал руководитель / консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Филипас Александр Александрович	к.т.н.		24.02.2020
Ассистент ОАР ИШИТР	Зарницын Александр Юрьевич	—		24.02.2020

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ТМ81	Сизинцев Данил Андреевич		24.02.2020

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

Студенту:

Группа	ФИО
8TM81	Сизинцев Данил Андреевич

Школа	ИШИТР	Отделение школы (НОЦ)	ОАР
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Автоматизация технологических процессов и производств

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Использовать действующие ценники и договорные цены на потребленные материальные и информационные ресурсы, а также указанную в МУ величину тарифа на эл. энергию
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	—
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Действующие ставки единого социального налога и НДС, ставка дисконтирования = 0,1 (см. МУ)

## Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	Дать характеристику существующих и потенциальных потребителей (покупателей) результатов ВКР, ожидаемых масштабов их использования
2. Разработка устава научно-технического проекта	Разработать проект такого устава в случае, если для реализации результатов ВКР необходимо создание отдельной организации или отдельного структурного подразделения внутри существующей организации
3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	Построение плана-графика выполнения ВКР, составление соответствующей сметы затрат, расчет цены результата ВКР.
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Оценка экономической эффективности использования результатов ВКР, характеристика других видов эффекта

## Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

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

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	24.02.2020
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСТН ШБИП	Конотопский В.Ю.	к.э.н.		24.02.2020

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8TM81	Сизинцев Данил Андреевич		24.02.2020

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
8ТМ81	Сизинцев Данил Андреевич

Школа	ИШИТР	Отделение (НОЦ)	ОАР
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Автоматизация технологических процессов и производств

Тема ВКР:

Разработка цифрового двойника технологического процесса с использованием производственных данных	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
<p>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</p>	<p>Объектом исследования является цифровой двойник технологического процесса, созданный с помощью ПО Matlab (Predictive Maintenance Toolbox). Для создания данного цифрового двойника применены производственные данные. Результатом является модель, имитирующая поведение реального технологического процесса.</p>
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
<p><b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 30.04.2020)</li> <li>– СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.</li> <li>– ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.</li> <li>– СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95</li> </ul> <p>СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.</p>
<p><b>2. Производственная безопасность:</b></p> <p>2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов</p> <p>2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия</p>	<p>Вредные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– повышенный уровень шума;</li> <li>– недостаточная освещенность рабочей зоны;</li> <li>– отклонение параметров микроклимата в помещении;</li> <li>– электромагнитное излучение.</li> </ul> <p>Опасные:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– электрический ток;</li> <li>– пожарная безопасность.</li> </ul>
<p><b>3. Экологическая безопасность:</b></p>	<p>Рассмотрен порядок утилизации используемой организационной техники и люминесцентных ламп.</p>
<p><b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b></p>	<p>Чрезвычайная ситуация техногенного характера для данного помещения – пожар.</p>



	Установка общих правил поведения и рекомендаций во время пожара.
--	--

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	24.02.2020
--	------------

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ШБИП	Горбенко Михаил Владимирович	к.т.н.		24.02.2020

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ТМ81	Сизинцев Данил Андреевич		24.02.2020

## **Реферат**

Выпускная квалификационная работа содержит 101 с., 38 рис., 10 табл., 62 источников, 3 прил.

Ключевые слова: цифровой двойник, предсказательная модель, Matlab, временной ряд.

Объектом исследования является стан тянущих валов производства БОПП-плёнки.

Цель работы – повышение производительности за счёт анализа состояния оборудования по созданному цифровому двойнику в среде разработки Matlab.

В процессе исследования проводились изучение технологического процесса, анализ данных, подготовка данных к обработке, создание моделей, анализ результатов предсказания.

В результате исследования были получены несколько предсказательных моделей и создано приложение для взаимодействия с данными моделями.

Областью применения данной разработки являются непрерывные производства, на которых требуется прогноз выхода оборудования из строя.

От внедрения данной разработки ожидается экономическая эффективность на уровне 10%. Полезность заключается в возможности заранее подготавливать мероприятия по ремонту оборудования, зная примерное время, когда оно выйдет из строя.

В будущем планируется расширение функционала приложения, разработка алгоритмов автоматизированного предсказания выхода оборудования из строя. Также возможна более тщательная подготовка данных для анализа, что сделает их более качественными для создания предсказательных моделей.

## Содержание

Введение .....	13
Обозначения и сокращения .....	15
1 Обзор литературы .....	16
2 Описание технологического процесса .....	23
3 Создание цифрового двойника.....	29
3.1 Подготовка данных .....	29
3.2 Разработка модели.....	37
3.3 Проверка моделей.....	40
3.4 Создание приложения .....	43
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .....	46
4.1 Организация и планирование работ .....	46
4.2 Продолжительность этапов работ.....	47
4.3.1 Расчет затрат на материалы.....	51
4.3.2 Расчет заработной платы .....	52
4.3.3 Расчет затрат на социальный налог .....	53
4.3.4 Расчет затрат на электроэнергию.....	53
4.3.5 Расчет амортизационных расходов.....	54
4.3.6 Расчет расходов, учитываемых непосредственно на основе платежных документов ....	55
4.3.7 Расчет прочих расходов .....	55
4.3.8 Расчет общей себестоимости разработки.....	55
4.3.9 Расчет прибыли.....	56
4.3.10 Расчет НДС.....	56
4.3.11 Цена разработки НИР.....	56
4.4 Оценка экономической эффективности проекта.....	56
5 Социальная ответственность .....	58
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	59
5.1.1 Особенности трудового законодательства.....	59
5.1.2 Компоновка рабочей зоны .....	60
5.2 Производственная безопасность .....	62
5.2.1 Анализ опасных и вредных факторов .....	62
5.2.1.1 Микроклимат производственных помещений.....	62
5.2.1.2 Освещённость рабочей зоны .....	63
5.2.1.3 Повышенный уровень шума.....	64
5.2.1.4 Электромагнитные излучения.....	65
5.2.1.5 Электробезопасность .....	65
5.2.1.6 Пожарная безопасность .....	66

5.3 Экологическая безопасность .....	67
5.3.1 Анализ воздействия на окружающую среду .....	67
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	67
5.4.1 Перечень возможных чрезвычайных ситуаций на объекте.....	67
Выводы по разделу .....	69
Заключение.....	70
Список литературы.....	71
Приложение А.....	78
Приложение Б .....	97
Приложение В.....	100

## **Введение**

Развитие цифровизации в современном мире во многом обусловлено эффективной работой со стремительно увеличивающимися большими объемами данных (Big Data), а точнее с содержательными («умными») данными (Smart Big Data), включая снижение объемов «мусорных» данных и транзакционных издержек, а также повышение прозрачности и наглядности процессов генерации и обработки данных.

Центральное место в экономике по праву занимает материальное производство – высокотехнологичная промышленность, отвечающая, в первую очередь, требованиям высокой производительности труда, экономической эффективности и глобальной конкурентоспособности.

Цифровые двойники способствуют стремительному развитию современных компаний последнее время. С помощью них упрощается поддержка технических систем, возрастает эффективность, митигируются риски ошибок и сбоев, что повышает стабильность работы. Данные возможности позволяют бизнесу максимально повысить доходность от инвестиций, увеличить конкурентоспособность и, нарастить и преумножить клиентскую базу.

Одно из европейских нефтеперерабатывающих предприятий благодаря применению системы предиктивной аналитики от компании Schneider Electric предсказало сбой большого компрессора за 25 дней до того, как он случился. Данное предсказание и оперативное реагирование позволило сэкономить компании несколько миллионов долларов.

Цифровой двойник позволяет по входным данным оборудования предсказать ключевым параметры объекта. Если взять абстрактный пример, то это как по габаритам верхушки айсберга мы получили бы его точный объем и форму с помощью предсказательной модели. При помощи технологии цифровых двойников возможно решать различные типы задач диагностики состояния объекта, оптимизации работы, предсказания.

С помощью технологии цифровых двойников удалось объединить 20 нефтедобывающих и нефтеперерабатывающих предприятий компании ADNOC,

ключевого представителя нефтегазовой отрасли на Ближнем Востоке, в единый диспетчерский пункт. Цифровой двойник состоял из комплекса рассредоточенных по всему Ближнему Востоку объектов компании. Удалось унифицировать все процессы и привести их к единому стандарту.

Данный комплекс содержал в себе большое количество различных пакетов – предиктивная аналитика, визуализация в реальном времени, система моделирования различных режимов работы объектов и анализа нештатных ситуаций. К тому же комплекс предполагал моделирование и оптимизацию ресурсов.

По мнению экспертов в ближайшем будущем потребители и владельцы продуктов смогут пользоваться технологиями цифровых двойников в повседневной жизни, причем цифровые двойники станут возможным использовать с целью улучшения качества человеческой жизни, а не только для оптимизации работы какого-то объекта.

Разработав предиктивную модель производства, необходимо обеспечить ее работоспособность в динамике. Разработчики ПО для взаимодействия с моделями стремятся минимизировать участие человека в процессе. В это находится принципиальное отличие цифрового двойника от обыкновенной трехмерной визуализации. Основа данного этапа – обучение и последующее самообучение моделей для выполнения поставленных задач. Машинное обучение является классом методов искусственного интеллекта, характерной чертой которых является не прямое решение задачи, а обучение в процессе применения решений множества сходных задач. Для построения таких методов используются средства математической статистики, численных методов, методов оптимизации, теории вероятностей, теории графов, различные техники работы с данными в цифровой форме.

## **Обозначения и сокращения**

В работе используются следующие обозначения и сокращения:

АСУТП – автоматизированная система управления технологическим процессом;

МБ – мегабайт;

ПК – персональный компьютер;

ППР – план производства работ

ПО – программное обеспечение;

CSV – Comma-Separated Value;

SCADA – supervisory control and data acquisition.

## 1 Обзор литературы

Процесс работы промышленных установок не обходится без воздействия на него большого количества различных факторов. Данные факторы вызывают изменения в состоянии оборудования, что с течением времени с высокой долей вероятности приведет к отказу. Главной особенностью таких факторов является их случайный (стохастический) характер. Технологические нагрузки, прочностные характеристики материала, геометрические размеры, соблюдение условий технологического процесса, качество технического обслуживания и ремонта, вибрация, температура и многие другие факторы оказывают огромное влияние на процесс изменения состояния оборудования.

К непредсказуемому изменению технического состояния устройств, их узлов, механизмов, следовательно, и времени работы до отказа приводит случайный характер рассмотренных факторов.

Основными стратегиями выполнения ремонтов на данный момент являются стратегия «Ремонт после отказа», что сопровождается большими затратами и стратегия «Планово-предупредительный ремонт», что в половине случаев является, как правило, преждевременным. Вместе с тем наиболее перспективной представляется стратегия «Ремонт по состоянию» с использованием предсказательного подхода к обслуживанию оборудования, позволяющий заранее определять возможные отказы оборудования. Это способствует повышению эксплуатационной надежности.

Для решения задач предсказания отказов в технологических установках существует большое количество моделей и методов, которые отличаются объемом входных данных, методикой работы и формой представления результатов. Также доступно и готовое программное обеспечение (ПО), реализующее систему методов и алгоритмов, направленных на прогнозирование отказов оборудования технологических установок, например ПО Matlab Prediction Toolbox.

Как правило, в своем большинстве применяются вероятностные методы и методы статистического анализа данных.



**Вероятностные методы.** Методы вероятностного прогнозирования основываются на теории вероятностей, теорию случайных процессов и математическую статистику [1]. Использование данных методов предполагает определение вероятностей безотказной работы системы и ее подсистем и элементов, построение функций распределения случайных величин, характеризующих безотказную работу объектов. Чтобы использовать вероятностные методы требуются реальные данные относящиеся к объектам исследования. Для сбора данных необходимо накопление информации о всех режимах работы оборудования и различных причинах выхода из строя. Построение прогнозов состояния оборудования реализуется с помощью расчета показателей надежности системы, отображающие надежность реализации функций и опасность возникновения поломок и выхода из строя. Это такие показатели как:

- коэффициенты эксплуатационной надежности функций подсистем;
- коэффициенты технического использования подсистем, узлов, механизмов;
- коэффициенты сохранения эффективности по функциям;
- показатели вероятности успешного выполнения заданных процедур.

Статистические методы аналогичным образом используют данные, полученные за предыдущие периоды эксплуатации оборудования. На их основе строятся статистические модели. В основном используются модели, представленные ниже.

- Регрессионные модели (однофакторные и многофакторные).

Данные модели позволяют получить прогноз значений заданной характеристики в зависимости от значений выделенных факторов в наблюдаемый период времени.

- Марковские процессы и цепи.

С их помощью производится моделирование переходов системы из одного состояния в другое.

- Имитационные модели.

Структура и используемые показатели этих моделей разрабатываются в зависимости от поставленных задач, оборудования и условий эксплуатации.

**Предиктивная аналитика** (Predictive Analytics). Предиктивная аналитика подразумевает набор методов интеллектуального анализа данных, направленный на прогнозирование [2-5]. Для прогнозирования используются данные о характеристиках оборудования, его использовании, внешних воздействиях, состоянии среды функционирования. Процесс создания прогнозной аналитики основывается на автоматизированной обработке большого количества данных. Обработка нацелена на выявление массивов закономерностей и зависимостей, с помощью которых строятся прогнозные модели. Для этого преимущественно используются статистические методы [6-12]. Примером реализации метода предиктивной аналитики является анализ дерева отказов. Дерево отказов (аварий, происшествий, последствий, нежелательных событий) представляет собой многоуровневую графологическую структуру причинных взаимосвязей, полученных в результате прослеживания опасных ситуаций в обратном порядке для того, чтобы отыскать возможные причины их возникновения [12].

Ценность метода дерева отказов состоит в следующем:

- позволяет показать в явном виде ненадежные места;
- дает возможность выполнять качественный или количественный анализ надежности системы;
- позволяет специалистам поочередно сосредотачиваться на отдельных конкретных отказах системы;
- обеспечивает глубокое представление о поведении системы и проникновение в процесс ее работы;

Недостатки дерева отказов состоят в следующем:

- реализация метода требует значительных затрат средств и времени;
- дерево отказов представляет собой схему булевой логики, на которой показывают только два состояния: рабочее и отказавшее;
- трудно учесть состояние частичного отказа элементов;

- требует от специалистов по надежности глубокого понимания системы и конкретного рассмотрения каждый раз только одного определенного отказа; дерево отказов описывает систему в определенный момент времени (обычно в установившемся режиме), и последовательности событий могут быть показаны с большим трудом, а иногда это оказывается невозможным.

Метод анализа дерева отказов способствует тщательному анализу причин отказов технических систем и выработке мероприятий, наиболее эффективных для их устранения. Такой анализ проводят для каждого периода функционирования, каждой части или системы в целом [12].

Главный плюс прогнозной аналитики заключается в том, что предсказать можно все. К минусам можно отнести то, что интеграция и правильный подход к прогнозной аналитике требует много сил и энергии и к тому же очень дорог. Поэтому реализовать все это довольно сложно, но использовать можно практически везде.

#### **Методы, основанные на машинном обучении.**

Благодаря разнообразным моделям обучения, данная группа методов может быть использована для решения задач, предполагающих использование различных типов данных, получение различных, в том числе неочевидных, закономерностей [13-19].

Различают следующие модели машинного обучения:

- Байесовское обучение [20-23];

Задается априорное распределение вероятностей для выборок, затем  $P(\text{выборка})$  использует теорему Байеса, чтобы найти апостериорную вероятность  $P(\text{выборка} | x)$ . Модель позволяет работать с малыми объемами данных и имеет высокую гибкость. Однако, требует явного задания адекватной априорной величины, из-за чего требуется значительное участие человека. Данный подход предполагает ограниченную автоматизацию.

- Графические/генеративные модели [24, 25];

Задается архитектура со свободными параметрами и применяется к данным градиентный спуск для настройки параметров. Модель дает невысокую вычислительную стоимость, но серьезная проблема – переобучение.

- Обучение на базе ядер [26-32];

Выбирается ядро  $K(x, x')$ , удовлетворяющее определенным условиям, и используется, как мера подобия при обучении. Данный метод МО используется для мониторинга производительности и прогнозирования отказов в оптических сетях [33], где данный метод дал точность прогнозирования 95%. Основным недостатком вычислительная сложность  $O(n^2)$  не обеспечивает достаточную эффективность при больших объемах данных.

- Бустинг [34-38];

Данный метод предполагает создание алгоритма обучения, который может быть несовершенным, но при этом обеспечивает определенный уровень прогнозирования. После чего данный алгоритм применяется многократно различными способами, чтобы получить итоговый предиктор. К достоинствам относится скорость работы и хорошая автоматизация, но при этом фреймворк бустинга ничего не говорит о том, как создать исходный алгоритм.

- Обучение на основе дерева решений [39-42];

Обучение представляет собой процесс разрезания входного пространства и присваивания прогнозов фрагментам пространства. К достоинствам данного алгоритма относятся хорошая автоматизация и достаточно быстрая работа. К основному минусу можно отнести то, что некоторые задачи прогнозирования не могут быть решены с использованием деревьев решений.

Примером обучения на основе дерева решений, является алгоритм МО Random Forest [42]. Данный алгоритм основан на построении большого числа (ансамбля) деревьев решений, каждое из которых строится по выборке, получаемой из исходной обучающей выборки с помощью бутстрепа (выборки с возвращением). В отличие от классических алгоритмов построения деревьев решений у Random Forest при построении каждого дерева на стадиях расщепления вершин используется только фиксируемое число отбираемых

признаков обучающей выборки и строится полное дерево (без усечения). Классификация осуществляется с помощью голосования классификаторов, определяемыми отдельными деревьями, а оценка регрессии – усреднением оценок регрессии всех деревьев. Точность классификации зависит от разнообразия классификаторов ансамбля, чем больше классификаторов, тем выше вероятность.

К плюсам Random Forest относятся: высокая точность классификации, защита от переобучения; легкая параллелизация; обучающая выборка для построения случайного леса может содержать признаки, измеренные в разных шкалах; случайные леса могут использоваться не только для задач классификации и регрессии, но и для задач выявления наиболее информативных признаков, кластеризации, определения прототипов классов и выделения аномальных наблюдений [43, 44].

Решения по прогнозированию отказов оборудования предлагаются производителями ПО. Программное обеспечение MATLAB, Simulink и Predictive Maintenance Toolbox используется для разработки и развертывания программного обеспечения для мониторинга состояния и прогнозного обслуживания в корпоративных ИТ-системах и системах ОТ.

Имеется возможность получения доступа к потоковым и архивированным данным с помощью встроенных интерфейсов облачного хранилища, реляционных и нереляционных баз данных и протоколов, таких как REST, MQTT и OPC UA.

Предварительная обработка данных и извлечение функций для мониторинга состояния оборудования осуществляется с использованием приложений для обработки сигналов и статистических методов.

Разворачивание алгоритмов и моделей на ваш выбор в действующих системах, таких как встроенные системы, периферийные устройства и облако, автоматически генерируя программные компоненты на основе C / C ++, Python, HDL, PLC, GPU, .NET или Java®.

**Методология RCM.** RCM (Reliability-centered Maintenance – техническое обслуживание, ориентированное на надежность) методология, позволяющая определить необходимые меры для того, чтобы каждая производственная система и ее элементы исполняли возложенную на них функцию в рамках производственного процесса [45, 46].

Методология RCM основана на постулате, согласно которому поддержание единицы оборудования в безупречном состоянии не является самоцелью, целью же является обеспечение надежности критических для деятельности предприятия производственных и технических процессов.

Данная методика позволяет совместить систему полного аутсорсинга и стратегию планово-принудительного ремонта без потери эффективности [47].

RCM-анализ дает возможность предсказать отказ по целевой совокупности параметров. Он позволяет отказаться от плановых ремонтов, порой неэффективных операций. Ремонтируется только оборудование, которое действительно в этом нуждается [48].

Главная проблема методики - оперирование большими объемами данных, что практически невозможно без построения автоматизированной системы, хранящей историю ремонтов и данные об объектах [47].

## 2 Описание технологического процесса

Производство по выпуску БОПП-пленки имеет следующие главные стадии обработки для последующего производства:

- Хранение сырьевого материала – секция 1
- Подача сырьевого материала – секция 2
- Экструзионная линия – секция 3
- Устройство отливки – секция 4
- Продольная ориентация (M.D.O.) – секция 5
- Поперечная ориентация (T.D.O.) – секция 6
- Стан тянущих валов (P.R.S.) – секция 7
- Система переработки обрезанных кромок – секция 8
- Намотчик – секция 9

Основные этапы производства:

- Сырьевые материалы

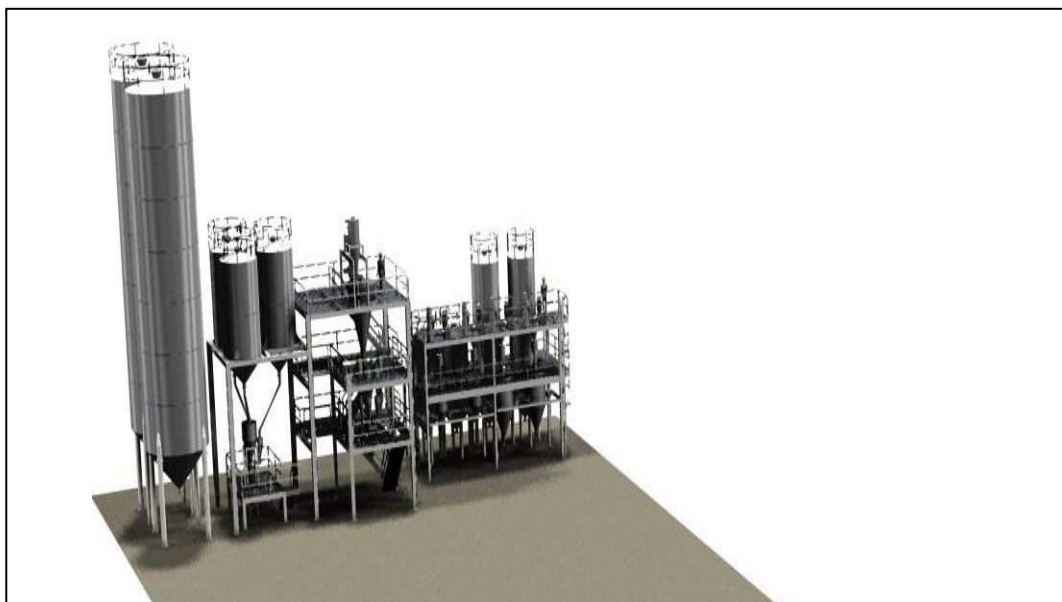


Рисунок 1 – Бункеры хранения сырья

Сырьевые материалы хранятся в различных бункерах. Пневматические конвейеры транспортируют сырьевые материалы из бункеров хранения в промежуточные расходные бункеры. Дозирующий аппарат позволяет добавить полимерные добавки и гранулят; затем они транспортируются в главный смесительный бункер, где сырьевые материалы и отходы обрезанных кромок

смешиваются. Равномерное смешивание позволяет провести их обработку в главном экструдере. Транспортировка сополимеров в соэкструдеры осуществляется из отдельных дозирующих и смешивающих блоков в бункеры соэкструдеров.

– Экструзия/экструзионная головка

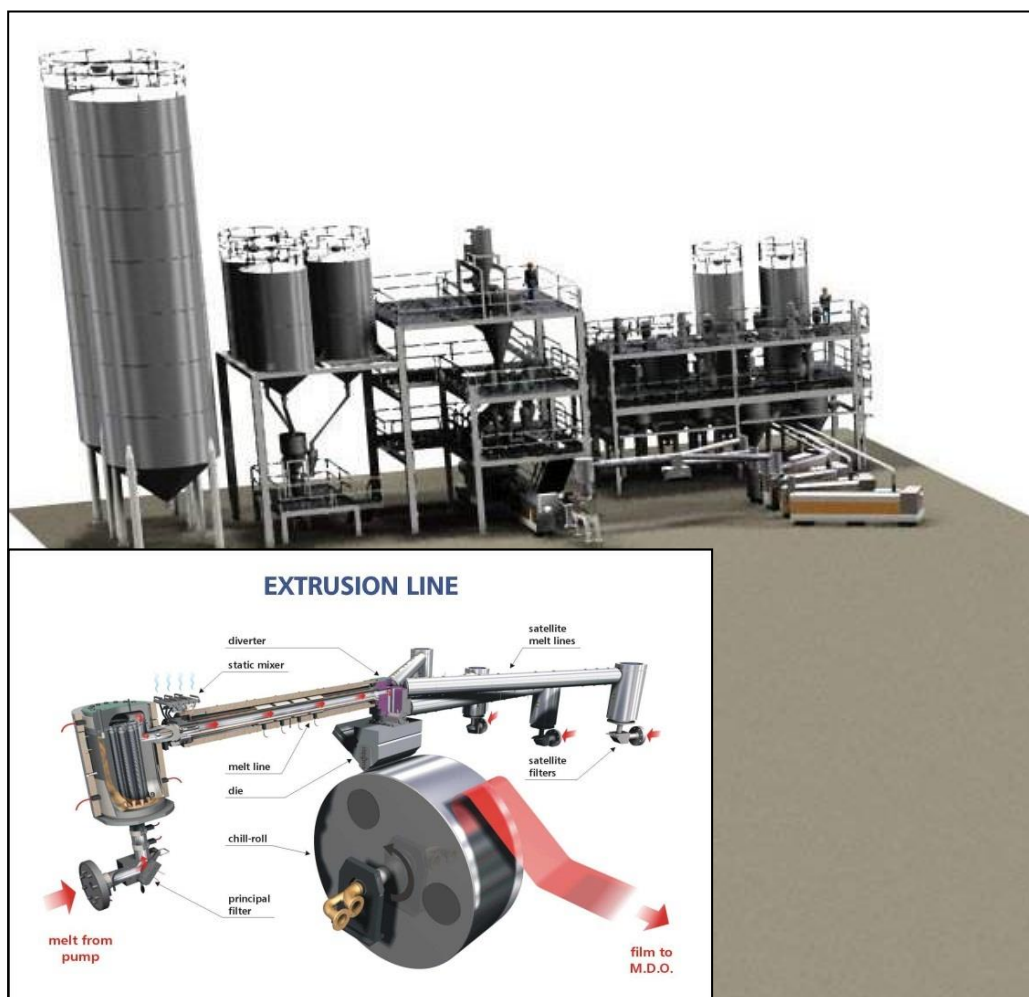


Рисунок 2 – Экструзионная линия

Экструзионный узел состоит из главной экструзионной установки, соэкструдера, фильтров, труб для расплава, разветвительной коробки (отводное устройство) и экструзионной головки. Поток расплава идет из главного экструдера через фильтр в экструзионную головку. Расплавленный полипропилен из главного экструдера и сополимер для поверхностного слоя из соэкструдеров подаются в экструзионную головку, где они превращаются в лист, который непрерывно отливается на охлаждающий барабан.

– Охлаждающий барабан



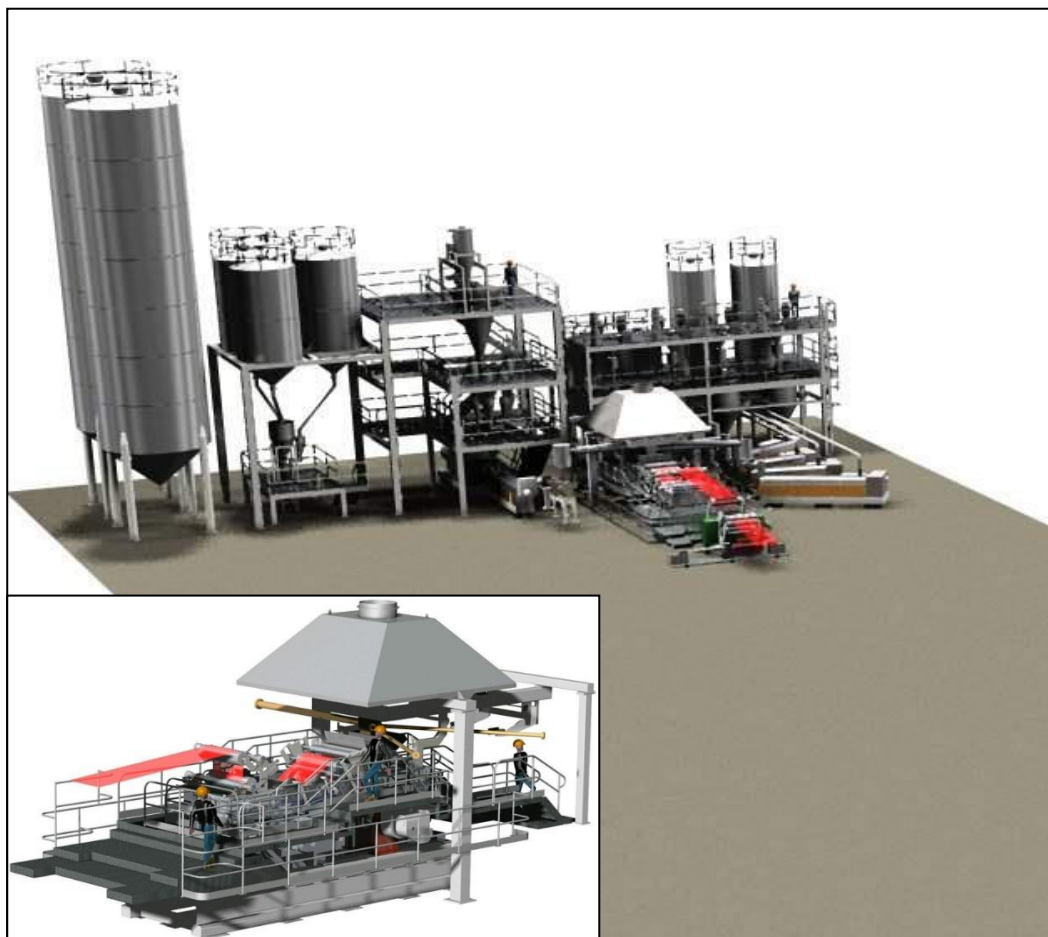


Рисунок 3 – Охлаждающий барабан

Для стабилизации расплава на выходе из экструзионной головки используются большой охлаждающий вал, называемый "охлаждающий барабан", и водяная ванна. Когда расплав выходит из экструзионной головки, его температура достигает  $250^{\circ}\text{C}$ . Цель охлаждающего барабана – это, прежде всего, вытянуть расплав из экструзионной головки, а затем охладить его на большой поверхности охлаждающего вала для стабилизации.

Чтобы идеально нанести расплав на охлаждающий барабан, требуется так называемый "воздушный нож".

От качества данного процесса зависит качество готовой продукции. Расплав должен быть охлажден как можно более равномерно с обеих сторон. Поэтому обратная сторона пленки охлаждается с помощью водяной ванны. После выхода из водяной ванны поливная пленка сушится и направляется в установку для продольной ориентации.

– Установка для продольной ориентации (MDO)

Лист полипропилена вставляется в MDO (установку для продольной ориентации), где нерастянутая пленка растягивается в продольном направлении. Ориентация пленки осуществляется с помощью нагревательных, растягивающих и термофиксирующих валков.

Вспомогательный намотчик служит для намотки пленки перед ее подачей в TDO (установку для поперечной ориентации).

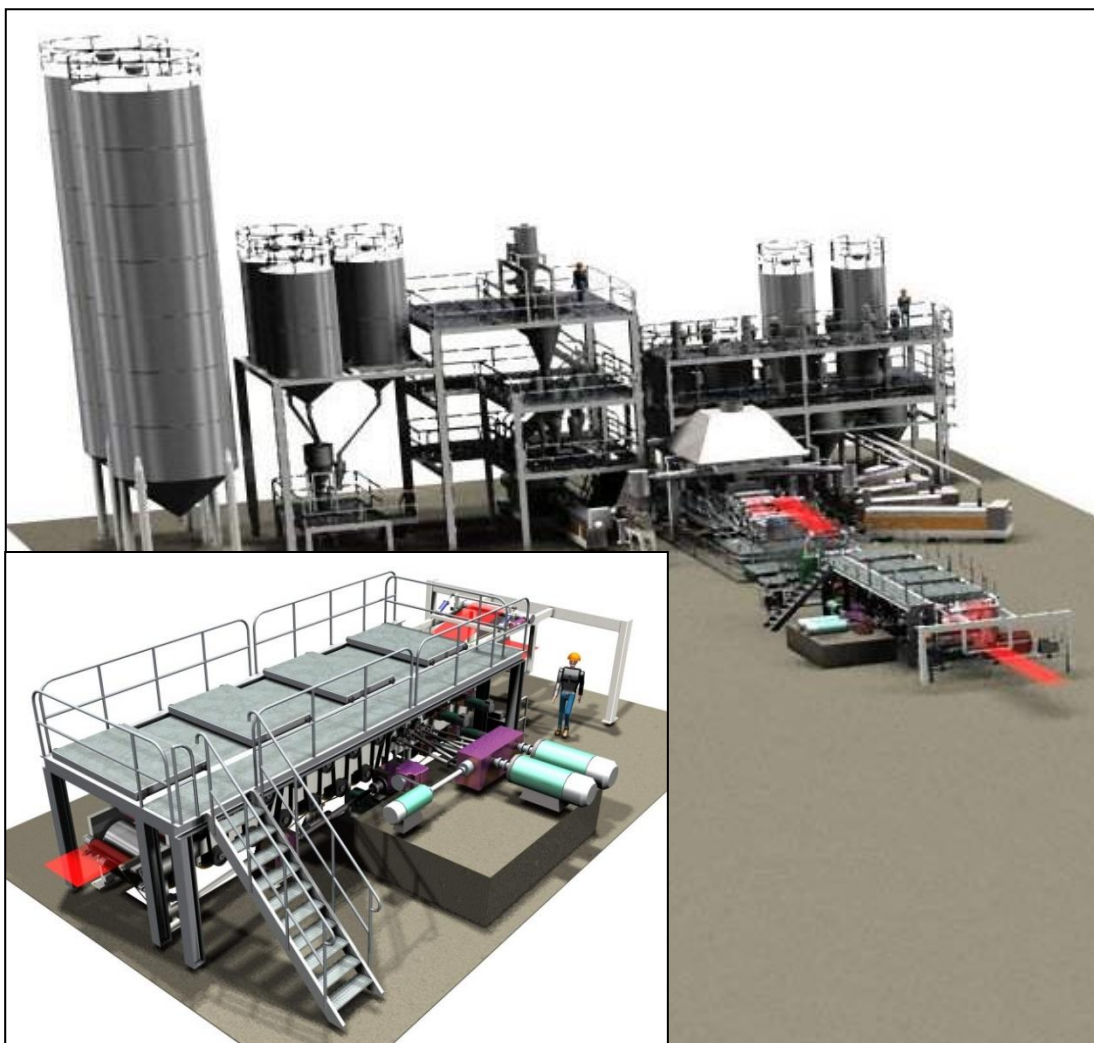


Рисунок 4 – Установка для поперечной ориентации (TDO)

Установка для поперечной ориентации растягивает в поперечном направлении пленку, уже растянутую в продольном направлении. Пленка захватывается и удерживается клуппами с обеих сторон во время движения в системе с непрерывным рельсом и цепями. Она подается в печь, где нагревается горячим воздухом. Как только пленка прошла поперечную вытяжку, вентиляторы охлаждения, установленные в конце печи, охлаждают горячую

пленку. Система отсоса наверху установки для поперечной ориентации обеспечивает удаление паров добавок.

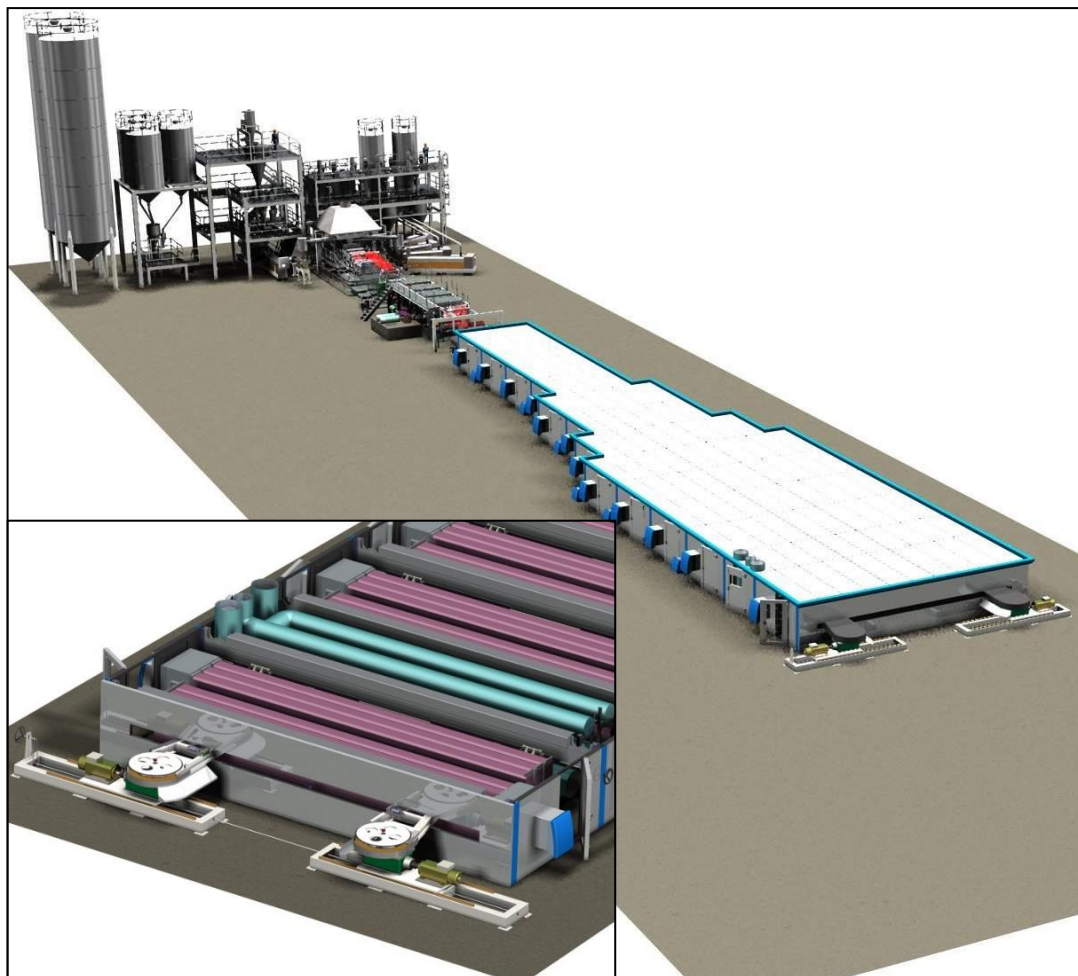


Рисунок 5 – Установка поперечной ориентации (TDO)

– Стан тянущих валов (PRS)

Стан тянущих валов, расположенный на выходе установки для поперечной ориентации, вытягивает ориентированную пленку из TDO и тянет ее к намоточному станку. Перед намоткой пленка измеряется толщиномером, ее кромки обрезаются с помощью бритвенных лезвий, обрезанная кромка направляется в дробильный узел, затем поверхность пленки подвергается электрической обработке коронным разрядом и обработке пламенем, чтобы улучшить печатные свойства поверхности.

Толщина пленки непрерывно контролируется с помощью рентгеновского толщиномера и автоматически регулируется.

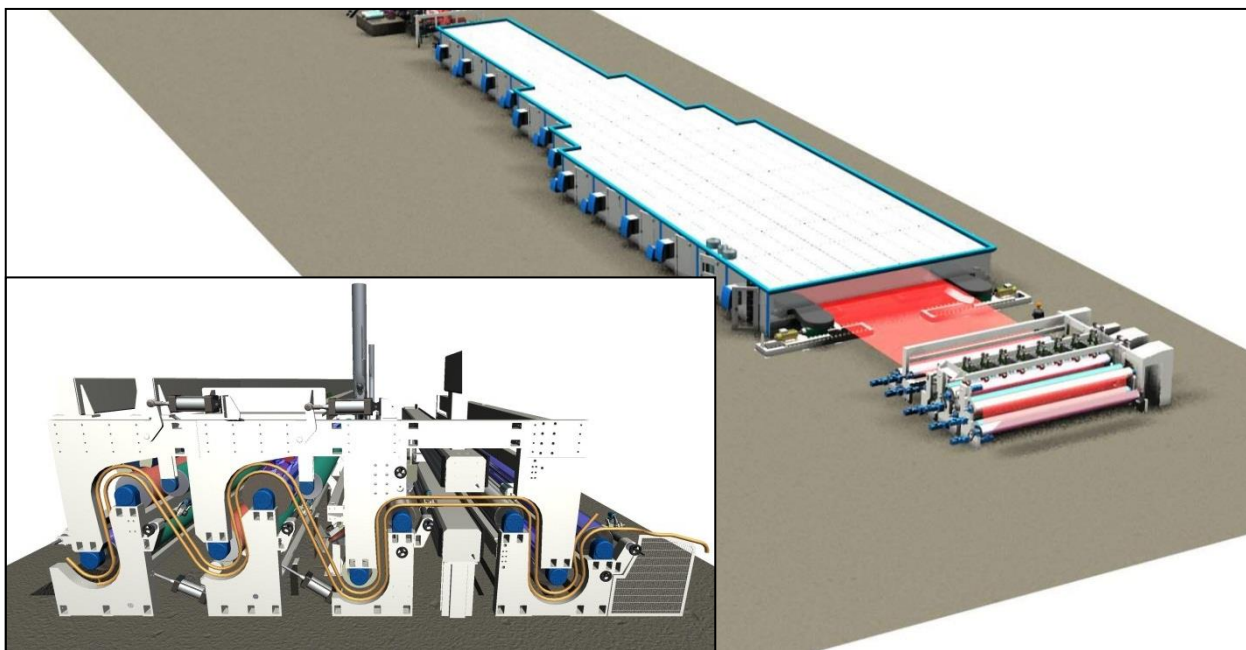


Рисунок 6 – Стан тянущих валов (PRS)

– Намотчик

Как только пленка прошла обработку, она наматывается в рулоны двухпозиционным намотчиком. Когда рулон полностью намотан, режущий аппарат автоматически отрезает пленку.

Замена рулона происходит автоматически, готовый рулон заменяется на пустую шпулю. Затем готовый рулон транспортируется в зону хранения, где он будет храниться до разрезания на несколько рулонов.

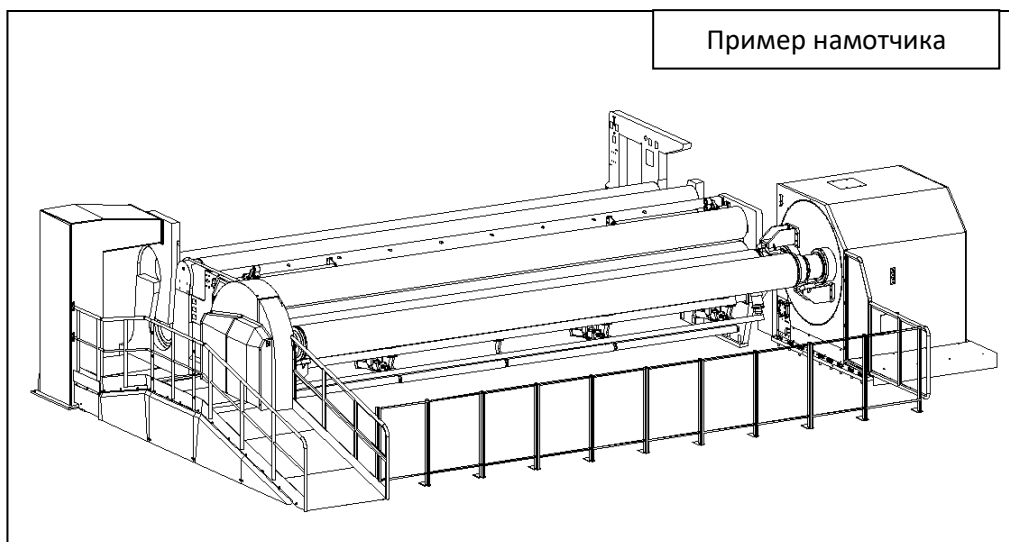


Рисунок 7 – Намотчик



### 3 Создание цифрового двойника

На рисунке 8 представлена обобщенная функциональная схема системы прогнозирования отказов. Нижний уровень представлен датчиками двигателей, с которых снимаются показания, средний уровень представлен ПЛК, который обрабатывает данные сигналы, уровень СУУТП представлен прогнозной моделью и блоком обработки данных. В виде хранилища данных выступает ПК, на котором установлено приложение, созданное в ПО Matlab.

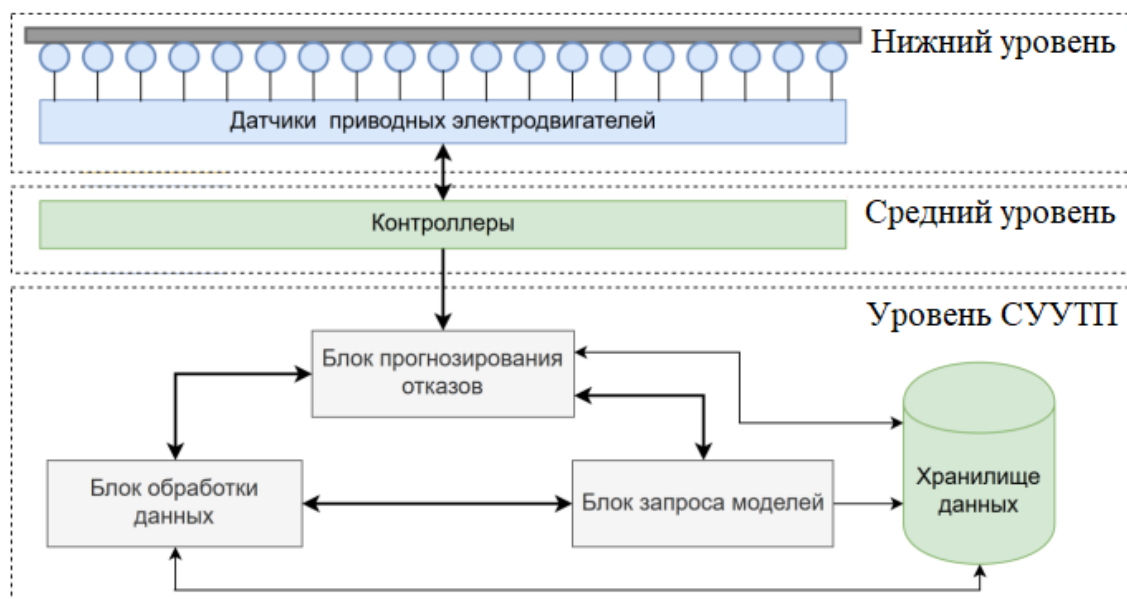


Рисунок 8 – Обобщенная функциональная схема системы прогнозирования отказов

#### 3.1 Подготовка данных

Для создания файлов используется программа Trend Reader, так как в SCADA-системе не предусмотрено встроенной возможности импортировать данные в удобный для анализа формат. Чтобы создать файл Microsoft Excel с расширением \*.CSV необходимо в программе Trend Reader открыть файл с расширением \*.HST из директории SCADA-системы. Далее откроется файл с информацией о хранящихся в нём данных, там содержится имя параметра, единицы измерения, период снятия показаний и т.д. Затем в окне программы нажимаем кнопку «Save». После этих манипуляций начнется сохранение файла в формате Excel и будет отображаться прогресс выполнения данной задачи.

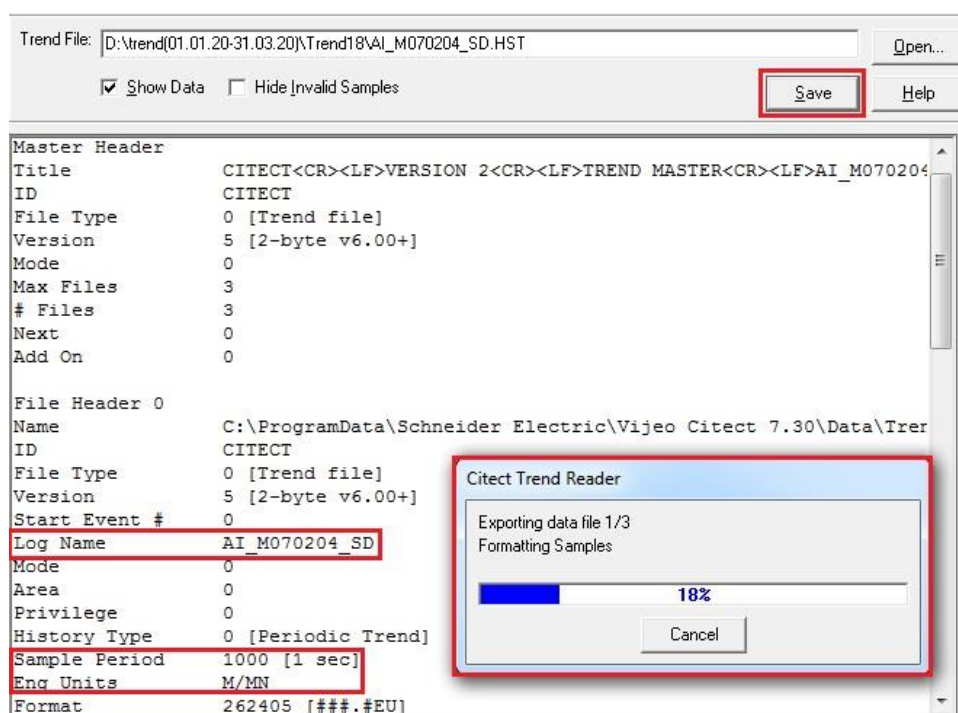


Рисунок 9 – Создание CSV-файла

На рисунке 10 продемонстрирована первоначальная подготовка файлов с данными для дальнейшей обработки. Первым делом мы выбираем разделитель, с помощью которого выполняется запись данных в csv-файл (1). Далее выбираем формат данных, в который необходимо преобразовать данные для каждой колонки в таблице, например Datetime, Number или Text (2). В заключении нажимаем галочку «Import Data» чтобы переместить обработанные данные в рабочую область ПО Matlab для дальнейшего использования.

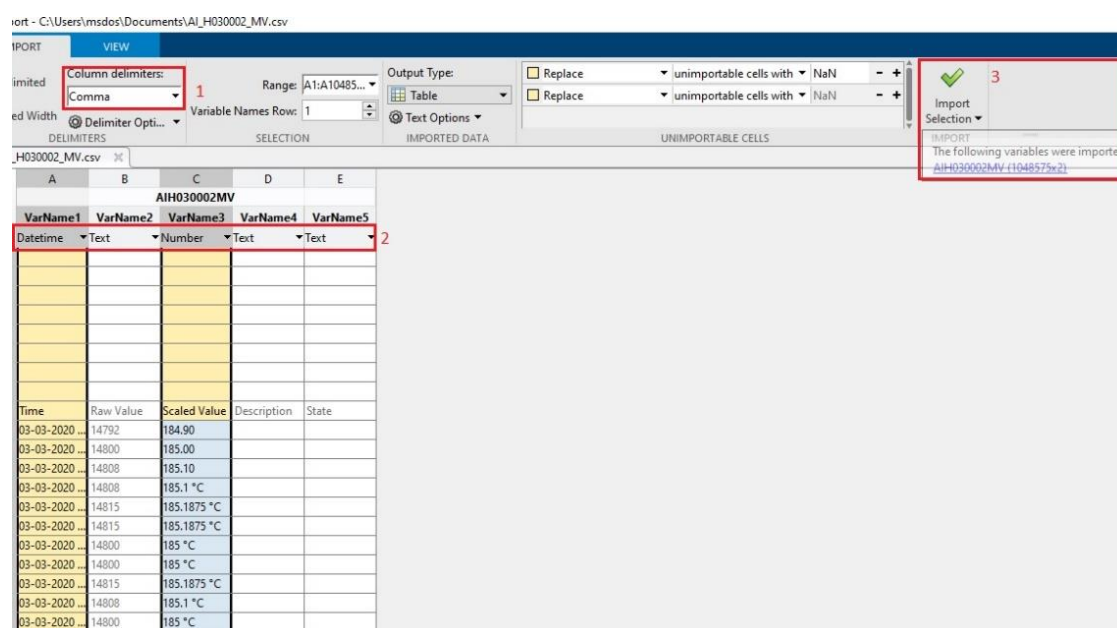


Рисунок 10 – Пример подготовки файла

Когда все файлы готовы можно приступить к созданию цифрового двойника с помощью ПО Matlab.

Для дальнейшего анализа данных необходимо обработать данные. Все манипуляции будем проводить в удобном «live script» от ПО Matlab. Matlab live scripts – это интерактивные документы, которые объединяют код Matlab со встроенным выводом, форматированным текстом, уравнениями и изображениями в единой среде, называемой Live Editor. При подготовке следует придать данным удобный для анализа вид, иначе будет очень сложно работать с неподготовленными данными и не удастся добиться желаемых результатов. Для начала следует придать данным удобный формат.

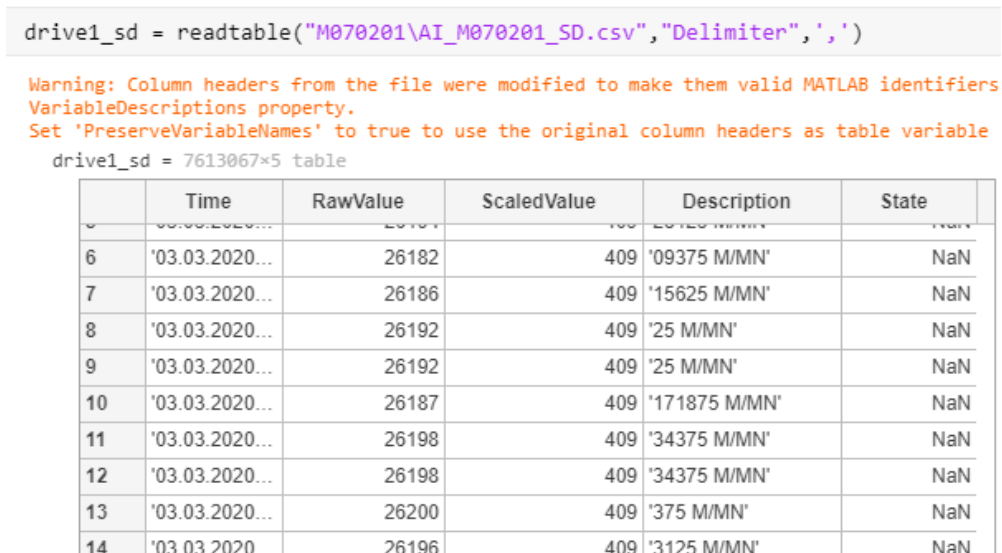


Рисунок 11 – Открытие файла с данными

Откроем файл с данными с помощью команды «readtable» с указанием в качестве разделителя запятой. Проанализировав рисунок 11, можно прийти к выводу, что в открывшемся файле присутствуют лишние данные, которые необходимо удалить, оставив только время и показания скорости двигателя. Также видно, что столбец «Time» отображается в строковом типе. Его необходимо будет переформатировать в тип «Datetime».

```
drive1_sd = readtable("M070201\AI_M070201_SD.csv","Delimiter",',,')
```

Warning: Column headers from the file were modified to make them valid MATLAB identifiers: VariableDescriptions property.  
Set 'PreserveVariableNames' to true to use the original column headers as table variable

drive1\_sd = 7613067x5 table

	Time	ScaledValue	Description	State
6	'03.03.2020...	26186	'09375 M/MN'	NaN
7	'03.03.2020...	26192	'15625 M/MN'	NaN
8	'03.03.2020...	26192	'15625 M/MN'	NaN
9	'03.03.2020...	26187	'15625 M/MN'	NaN
10	'03.03.2020...	26198	'15625 M/MN'	NaN
11	'03.03.2020...	26198	'15625 M/MN'	NaN
12	'03.03.2020...	26198	'15625 M/MN'	NaN
13	'03.03.2020...	26200	'15625 M/MN'	NaN
14	'03.03.2020...	26196	'15625 M/MN'	NaN

Рисунок 12 – Конвертирование столбца с датой и временем

Делается это с помощью встроенной функции Matlab. Следует нажать ПКМ на имени столбца, далее выпадает меню, представленное на рисунке 12. В этом меню выбираем тип данных, в которых хотим конвертировать столбец таблицы и формат, в котором необходимо представить дату и время.

```
Drive1_data = drive1_sd (:, ["Datetime", "ScaledValue"])
```

Drive1\_data = 7613067x2 table

	Datetime	ScaledValue
1	01-Mar-2020 0...	409
2	01-Mar-2020 0...	409
3	01-Mar-2020 0...	409
4	01-Mar-2020 0...	409
5	01-Mar-2020 0...	409
6	01-Mar-2020 0...	409
7	01-Mar-2020 0...	409
8	01-Mar-2020 0...	409
9	01-Mar-2020 0...	409

Рисунок 13 – Результат форматирования данных

После приведенных выше манипуляций получается результат, представленный на рисунке 13. Здесь мы видим, что дата отображается в



правильном виде, также видно, что остались только нужные столбцы (с датой и временем и с показаниями скорости двигателя).

```
Drive1_data = table2timetable(Drive1_data)
```

Drive1\_data = 7613067×1 timetable

	Datetime	ScaledValue
151	01-Mar-2020 00:02:30	409
152	01-Mar-2020 00:02:31	409
153	01-Mar-2020 00:02:32	NaN
154	01-Mar-2020 00:02:33	409
155	01-Mar-2020 00:02:34	409
156	01-Mar-2020 00:02:35	409
157	01-Mar-2020 00:02:36	409
158	01-Mar-2020 00:02:37	409
159	01-Mar-2020 00:02:38	409

Рисунок 14 – Преобразование в «timetable»

Последним шагом является преобразование таблицы типа «table» в тип «timetable» (рисунок 14). Это привязывает время к таблице, т.е. время больше не является переменной. Тем самым мы уменьшаем размерность таблицы обрабатываемых данных. Данное преобразование делает доступными полезные функции для обработки данных типа «timetable» и позволяет автоматически строить графики во временной области. Как видно на рисунке 15, в строке 153 идёт пропуск данных. Чтобы проверить сколько есть пропусков данных в таблице, можно воспользоваться функцией «summary(table)». Данная функция выводит общую информацию о таблице (рисунок 15).

```
summary(Drive1_data)|
```

RowTimes:

Datetime: 7613067×1 datetime

Values:

Min	01-Jan-2020 00:00:00
Median	14-Feb-2020 01:22:13
Max	31-Mar-2020 16:30:09

Variables:

ScaledValue: 7613067×1 double

Properties:

Description: Scaled Value

Values:

Min	0
Median	380
Max	450
NumMissing	1.08996e+06

Рисунок 15 – Общая информация о таблице с данными

Проанализировав рисунок 15, можно увидеть, что в таблице присутствует большое количество пропусков. Чтобы наглядно посмотреть, как пропуски отображаются в графическом виде, можно построить график с помощью функции «`stackedplot(table)`».

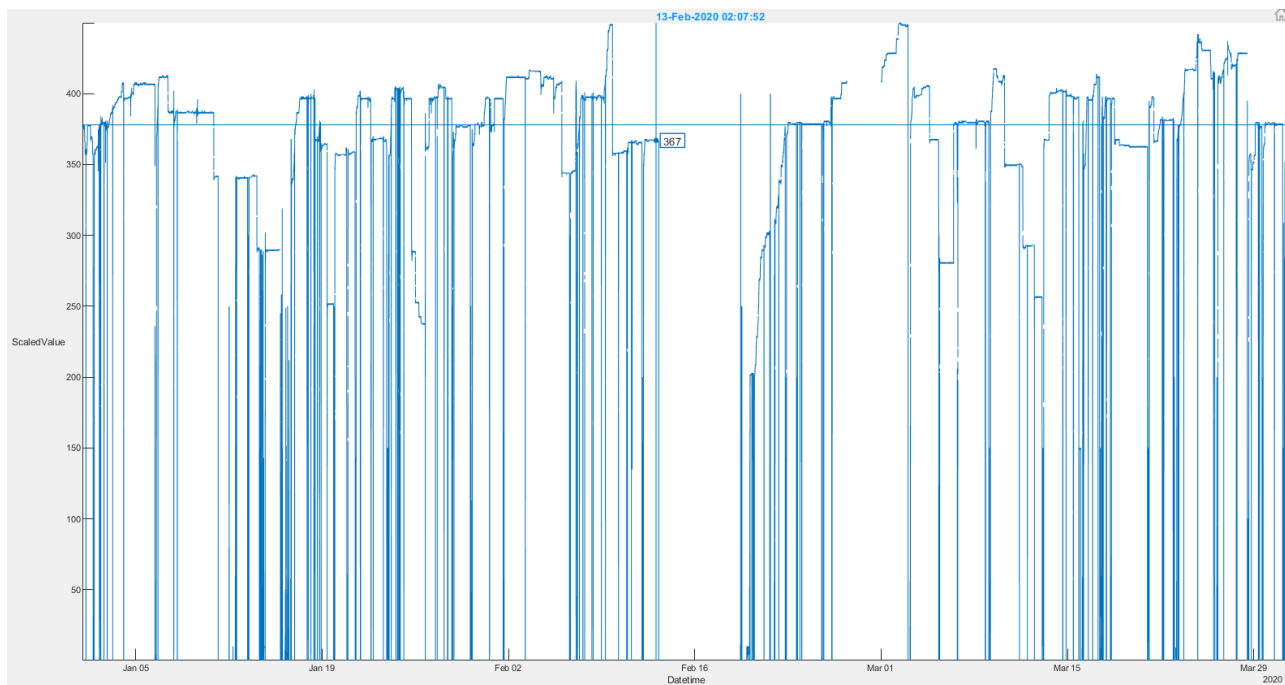


Рисунок 16 – График с данными

Проанализировав рисунок 16, можно сделать вывод, что данные далеко не идеальны для анализа. Среди данных присутствует много шумов и пропусков. Пропуски возникли из-за остановки оборудования. Например, в феврале был большой остановочный ремонт с полным обесточиванием оборудования, поэтому данных за этот участок попросту не может быть. Шумы возникают из-за специфики предприятия, так как производственный цикл меняется каждый день-два. Двигатели постоянно то разгоняются, то тормозятся.

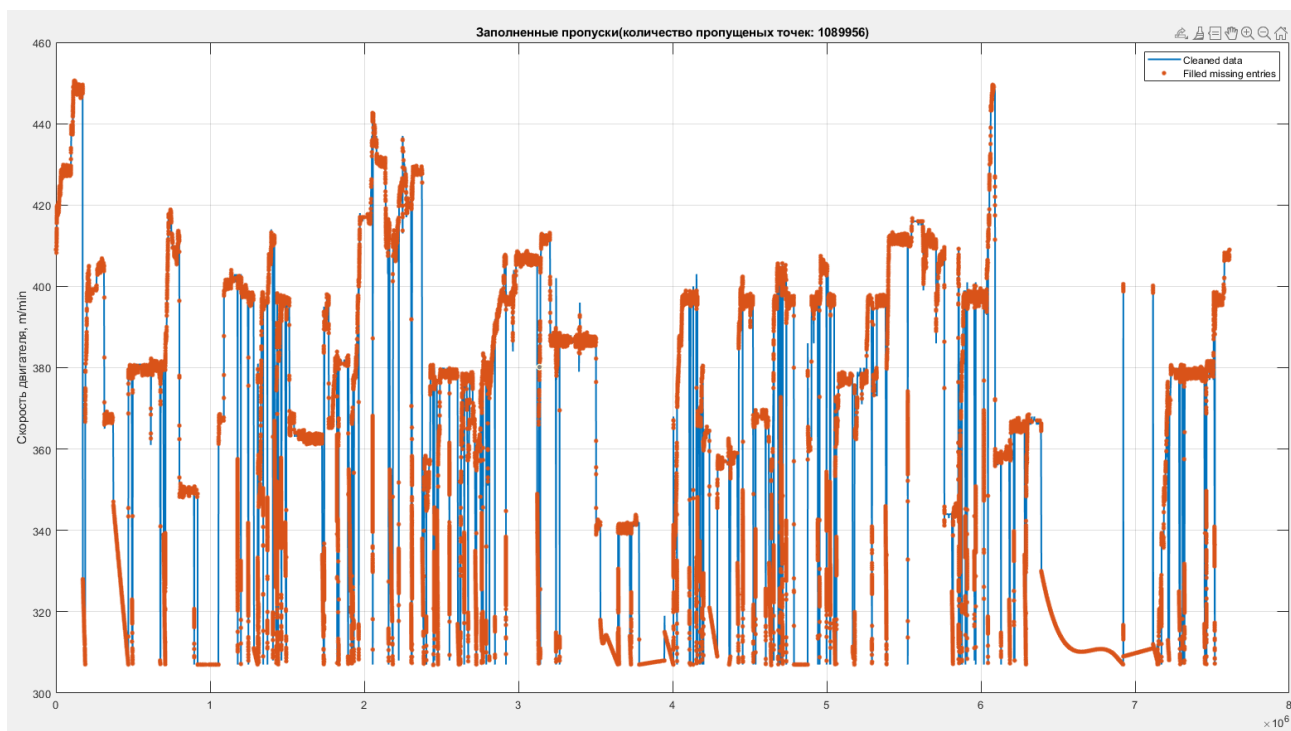


Рисунок 17 – Заполнение пропусков в данных

С помощью функции «`fillmissing (data, method)`» заполним пропущенные значения с помощью гладкой функции. При выполнении данного этапа были протестированы и другие методы заполнения пропусков, такие как линейная интерполяция, среднее, скользящее среднее, но интерполяция кубическими сплайнами оказалась наиболее эффективной. Результат представлен на рисунке 17.

Далее очистим произведем очистку данных от выбросов с помощью функции «`filloutliers (data, cleaning method, detection method)`». В качестве метода очистки выберем линейную интерполяцию, а в качестве метода поиска выбросов – скользящее среднее.

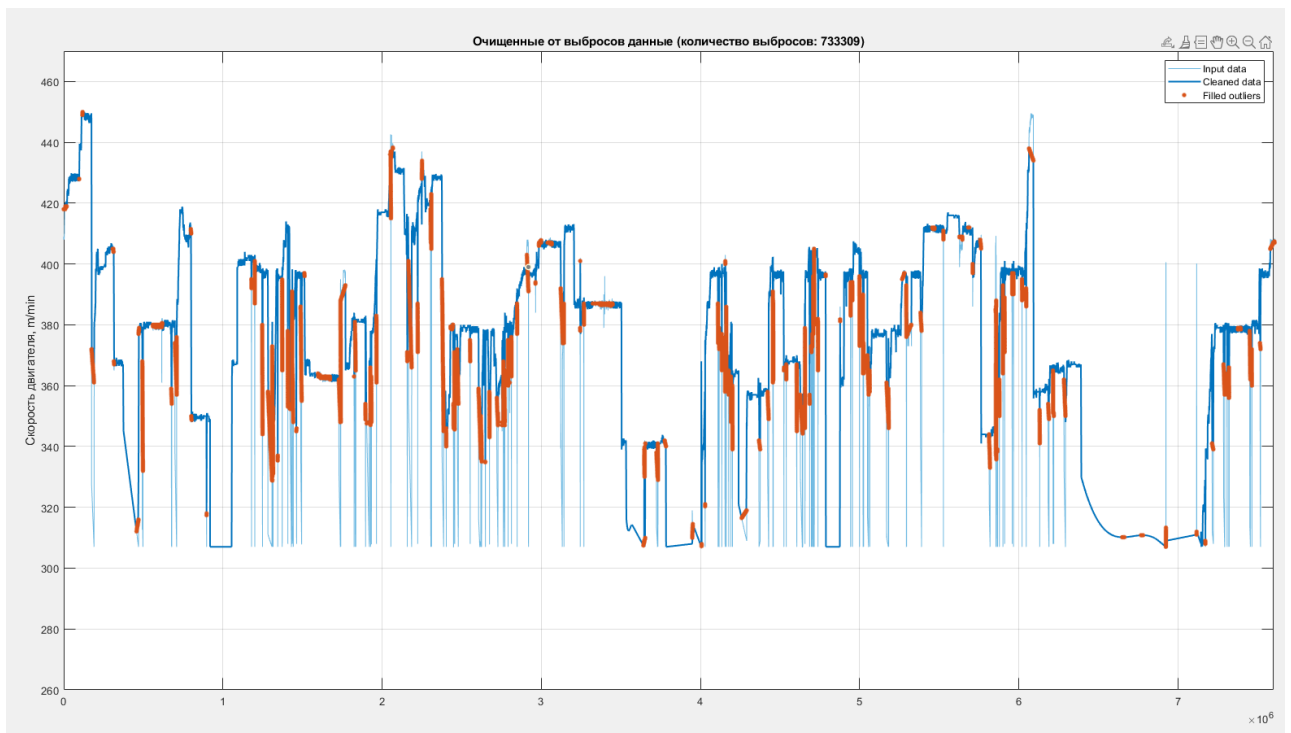


Рисунок 18 – График очищенных от выбросов данных

На рисунке 18 тонкой линией обозначены исходные данные, а жирной линией результаты обработки, методом, описанным выше. Как видно из рисунка 18, выбросы убраны, но данные по-прежнему далеки от идеала. Поэтому следующим этапом будет применение методов сглаживания.

Сгладим наши данные с помощью функции «smoothdata». На рисунке 19 приведен пример работы функции.

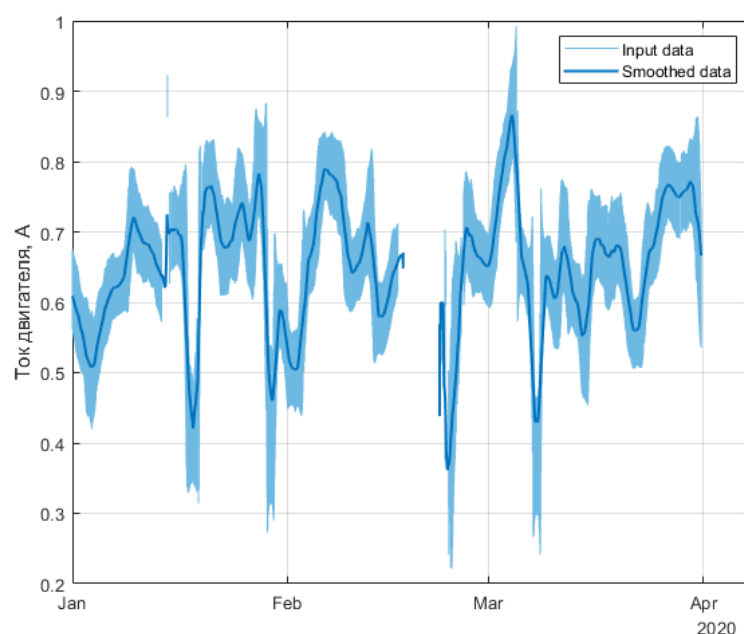


Рисунок 19 – Пример работы функции сглаживания

После применения комбинаций функций, описанных выше, получился результат, представленный на рисунке 20. Далее необходимо применить сглаживание, чтобы убрать резкие скачки данных, и можно приступить к созданию модели.

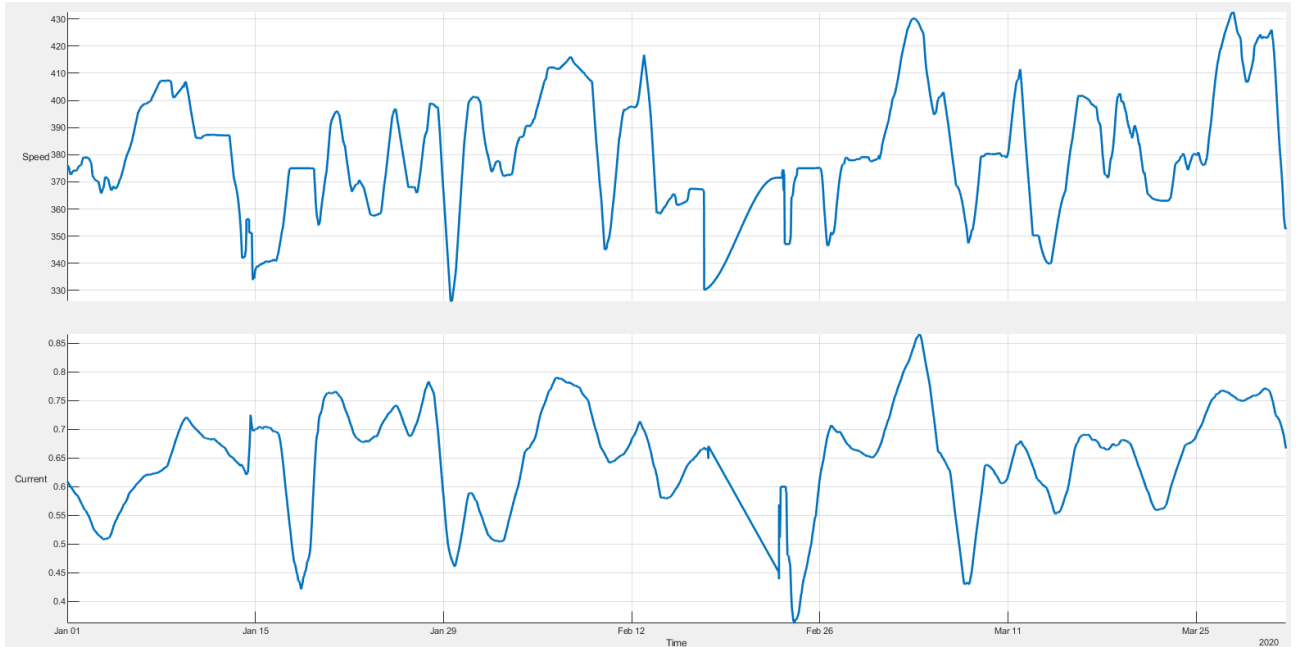


Рисунок 20 – Окончательный вариант

### 3.2 Разработка модели

На рисунке 21 описаны шаги для создания цифрового двойника, в предыдущих главах мы рассмотрели способы получения информации и пре-подготовки. В этой главе определим признаки и обучим модели, далее проанализируем какая из них лучше и создадим код для интеграции её в производственную систему.

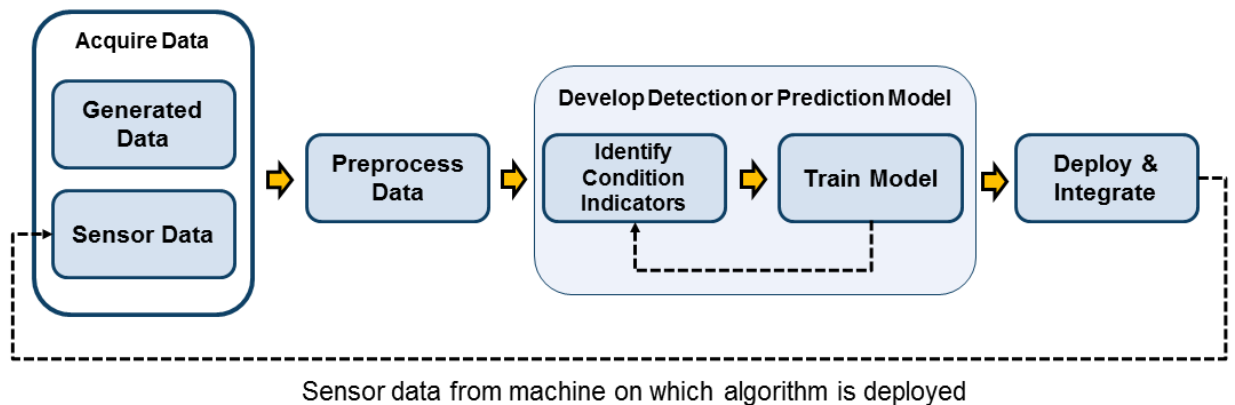


Рисунок 21 – Диаграмма создания цифрового двойника

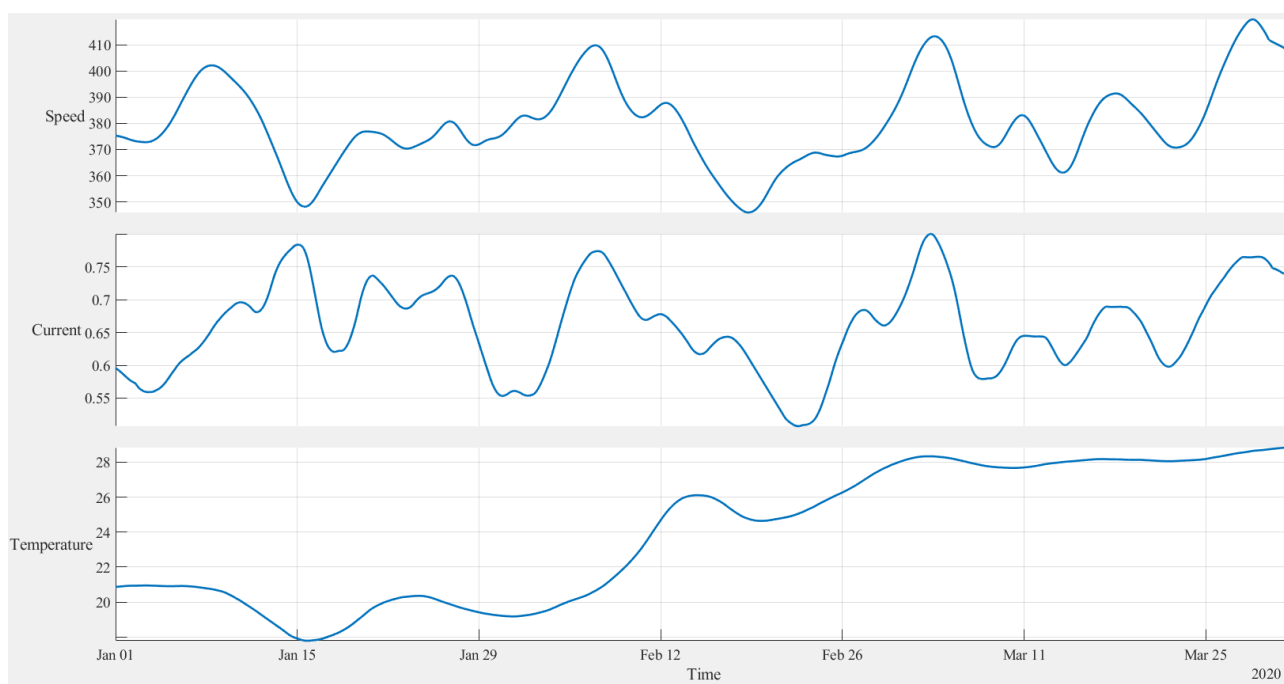


Рисунок 22 – Подготовленные данные

В предыдущей главе были рассмотрены методы подготовки данных. На рисунке 22 представлен конечный результат, который можно использовать для создания модели. Из такого внушительного объема данных следует выбрать область для обучения и создать модель по выбранным данным.

Для этого воспользуемся инструментарием из ПО Matlab под названием «Signal Analyzer». Возможности данного инструментария помогают проанализировать обрабатываемые сигналы. С помощью инструмента «Planner» можно выделить область для анализа, экспортировать ее в рабочую область для дальнейшей обработки. На рисунке 23 приведён пример использования «Signal Analyzer». В нем мы открыли 3 сигнала: скорость, ток и температуру, нормализовав их по оси y для наглядности. Далее выбрали участок, который в дальнейшем будет использоваться для создания модели объекта.

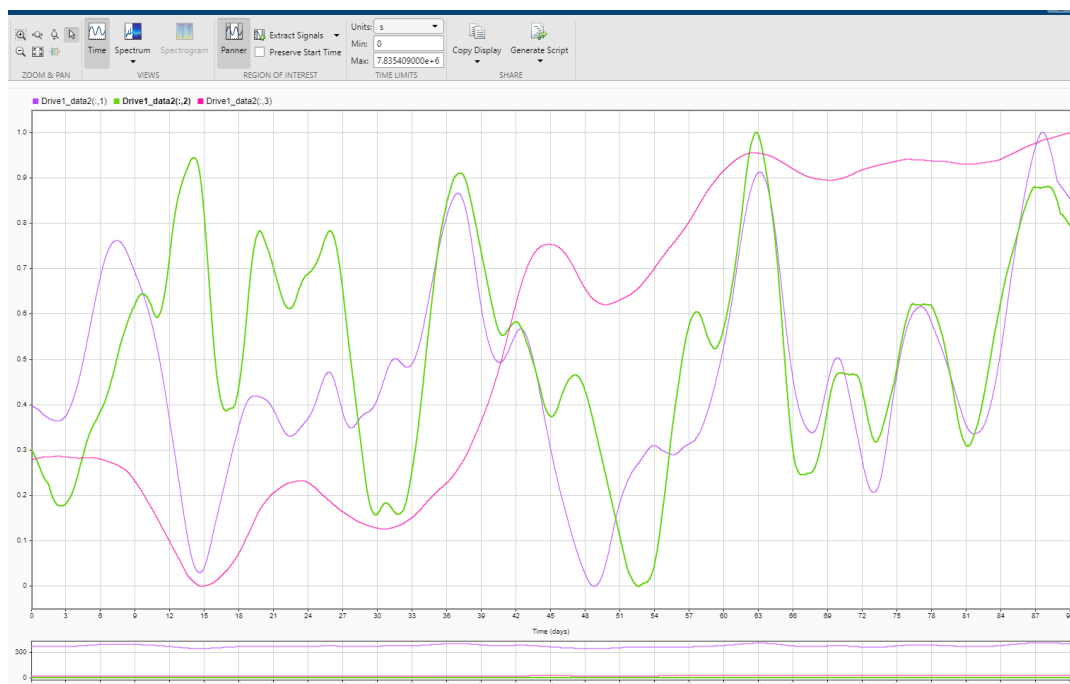


Рисунок 23 – Signal Analyzer

Далее приступим к созданию модели в «Regression Learner». Импортируем ранее выбранные данные через меню, выбираем параметр, который нужно предсказывать (скорость) и признаки, по которым это будет выполняться (ток и температура). Также выбираем метод валидации модели. Построим несколько моделей, с линейной регрессией и с деревом принятия решений.

1.1	☆ Linear Regression	RMSE: 0.065313
	Last change: Linear	3/3 features
1.2	★ Linear Regression	RMSE: 0.06168
	Last change: Interactions Linear	3/3 features
1.3	☆ Linear Regression	RMSE: 0.065453
	Last change: Robust Linear	3/3 features
1.4	☆ Stepwise Linear Regression	RMSE: 0.065313
	Last change: Stepwise Linear	3/3 features
2.1	★ Tree	RMSE: 0.0044342
	Last change: Fine Tree	3/3 features
2.2	☆ Tree	RMSE: 0.0044342
	Last change: Medium Tree	3/3 features
2.3	☆ Tree	RMSE: 0.0044342
	Last change: Coarse Tree	3/3 features
3	★ Ensemble	RMSE: 0.0029389
	Last change: Bagged Trees	3/3 features

Рисунок 24 – Показатели стандартных отклонений для каждой модели

Выберем 3 модели для дальнейшего развертывания в рабочей среде ПО Matlab и предсказания данных.

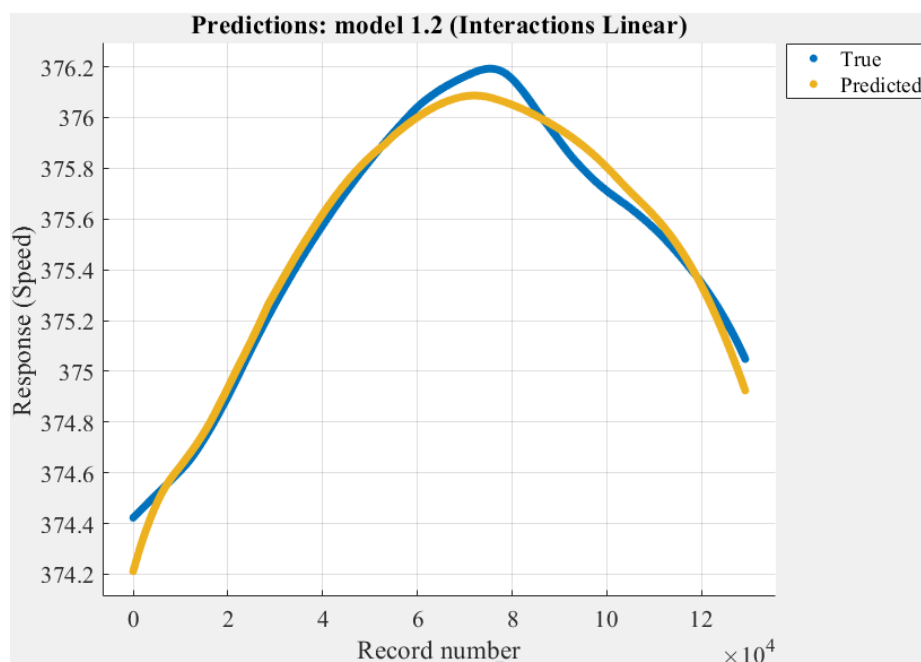


Рисунок 25 – Окно «Regression Learner»

Из всех моделей с линейной регрессией лучше всего себя показала «Interactive Linear». Сохраним выбранную модель в рабочую область ПО Matlab для дальнейшего предсказания и сравнения с исходными данными. Далее обучим модель дерева решений и экспортируем в рабочую область.

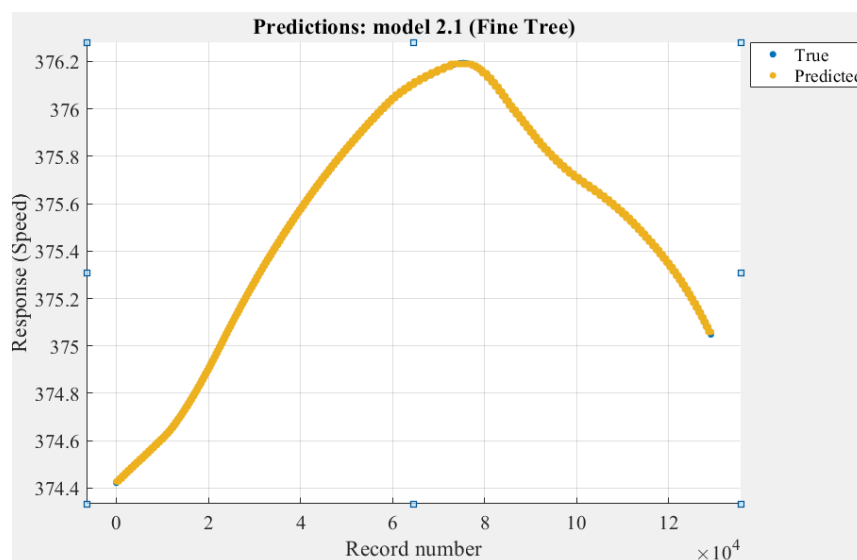


Рисунок 26 – Результаты работы модели «дерево принятия решений»

Из рисунка 26 можно сделать вывод, что дерево решений показала себя лучше на этапе обучения.

### 3.3 Проверка моделей

С помощью функции «predictFcn» обратимся к модели линейной регрессии и предскажем скорость двигателя.



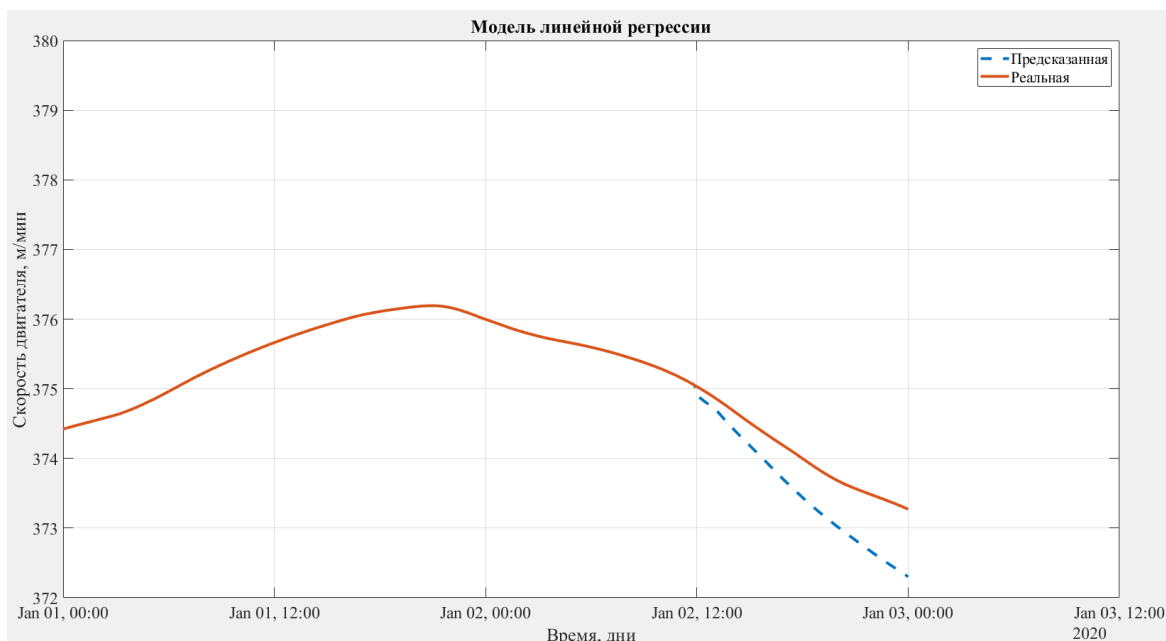


Рисунок 27 – Модель линейной регрессии

На рисунке 27 представлены результаты работы модели линейной регрессии. Проанализировав данный рисунок, можно прийти к выводу, что модель имеет незначительную погрешность, но в целом предсказывает адекватно. Достоинством данной модели является быстрота её создания.

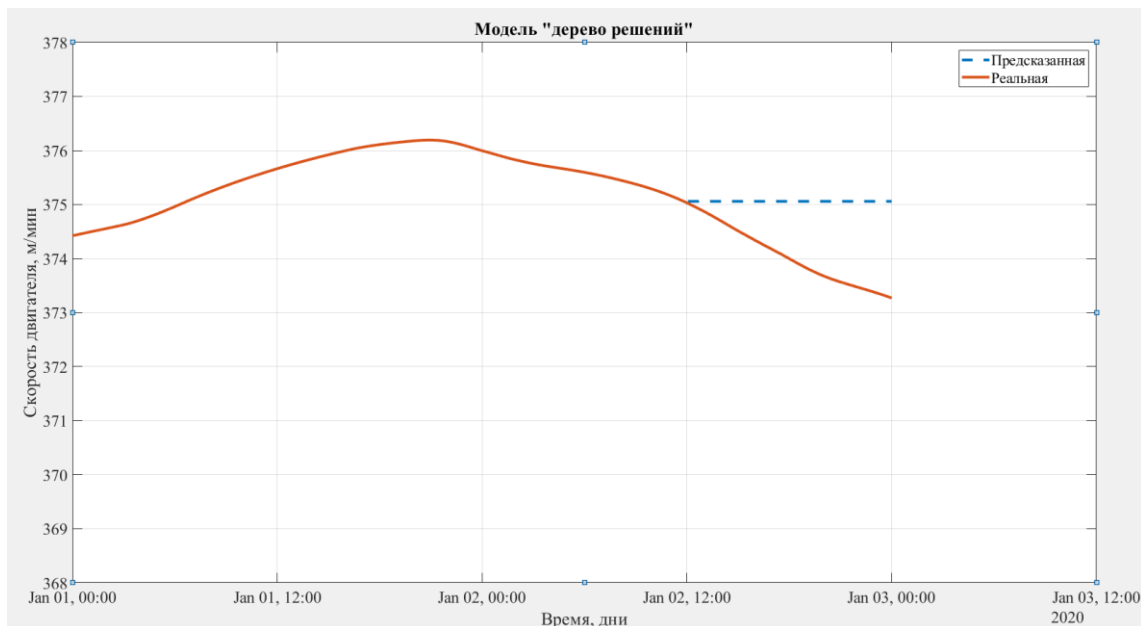


Рисунок 28 – Модель дерево решений

На рисунке 28 представлены результаты проверки работы модели дерева принятия решений. Исходя из рисунка 28, можно сделать вывод, что погрешность данной модели выше, чем у линейной регрессии. Также можно заметить, что данная модель не учитывает тренд.

Исследуем работу нейронной сети. Обучим рекуррентную нейронную сеть в инструментарии «Neural Time Series» с помощью алгоритма Левенберга – Марквардта на тех же данных, что и модели, описанные выше.

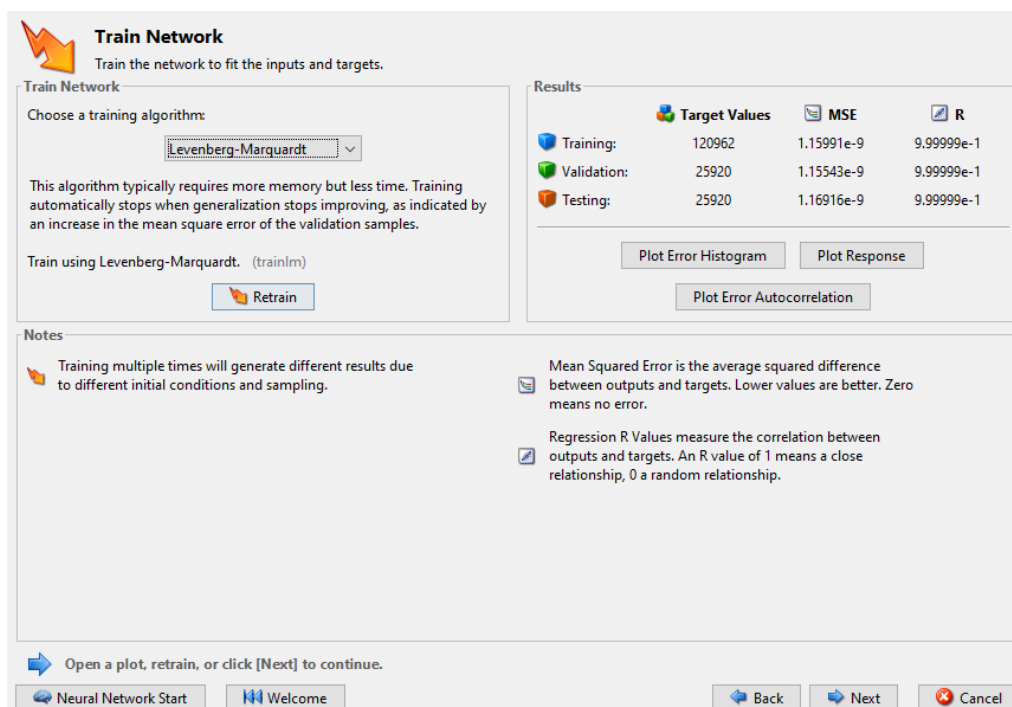


Рисунок 29 – Окно Neural Time Series

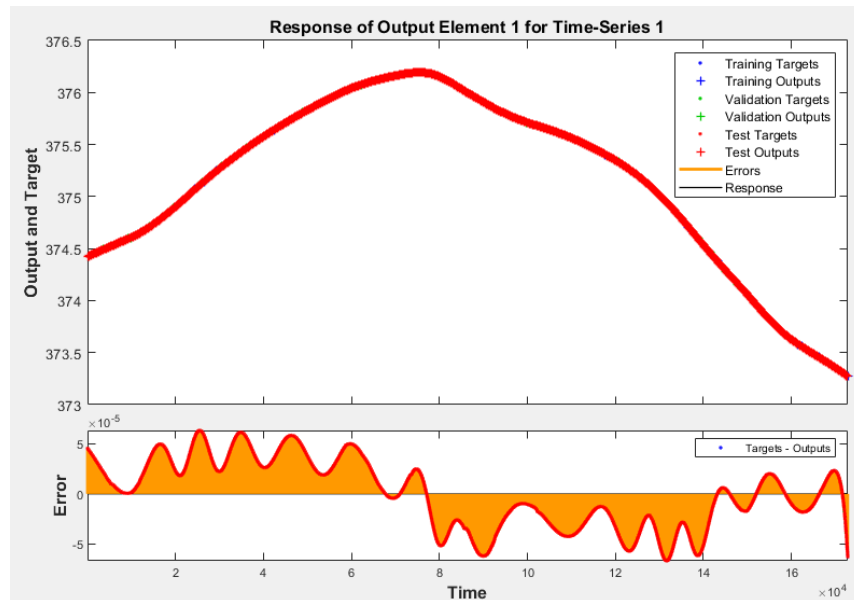


Рисунок 30 – Результаты обучения нейронной сети

Поскольку нейронные сети это более производительный механизм создания модели, её можно протестировать на всех производственных данных за 3 месяца. Результат представлен на рисунке 31.

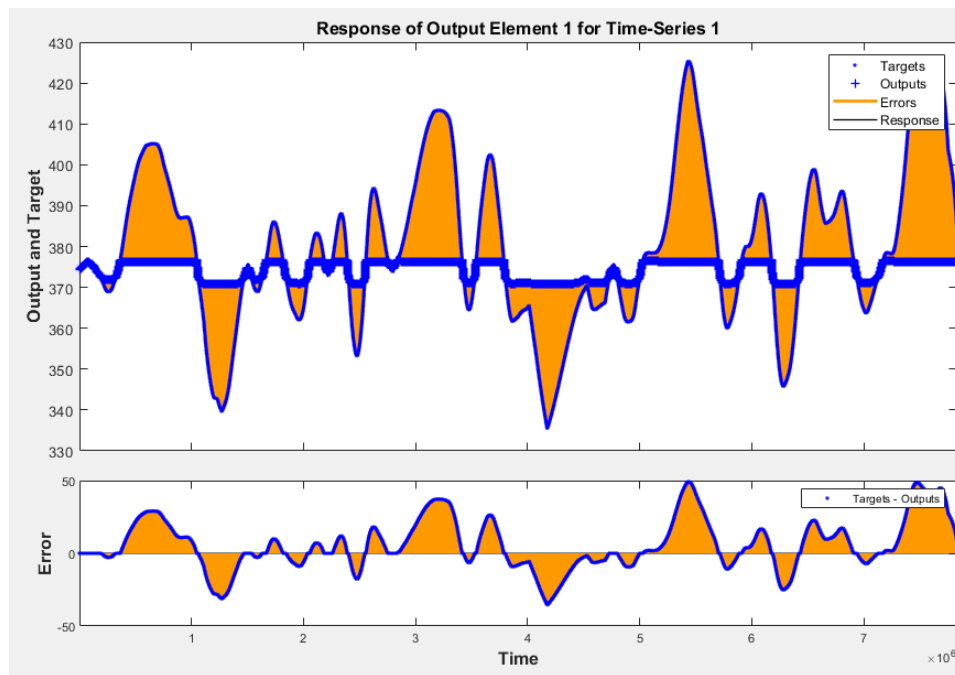


Рисунок 31 – Результат работы нейронной сети

Проанализировав рисунок 31, можно прийти к выводу, что нейросеть отлично показывает себя при небольших отклонениях от среднего значения. Большие отклонения игнорируются, но небольшие колебания предсказываются отлично. Данные всплески можно объяснить не самым лучшим качеством исходных данных, если собирать данные именно с целью последующего анализа, можно достичь лучших результатов.

### 3.4 Создание приложения

Для удобного взаимодействия с моделью (её обучения и предсказания), создадим приложение с помощью Matlab Designer App (рисунок 32). Также в приложении будет возможность загружать данные и обрабатывать их перед загрузкой в цифровой двойник.

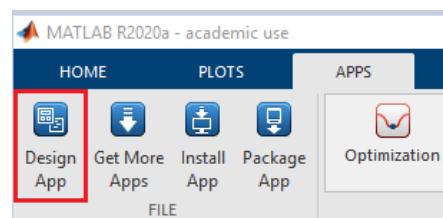


Рисунок 32 – Расположение Designer App

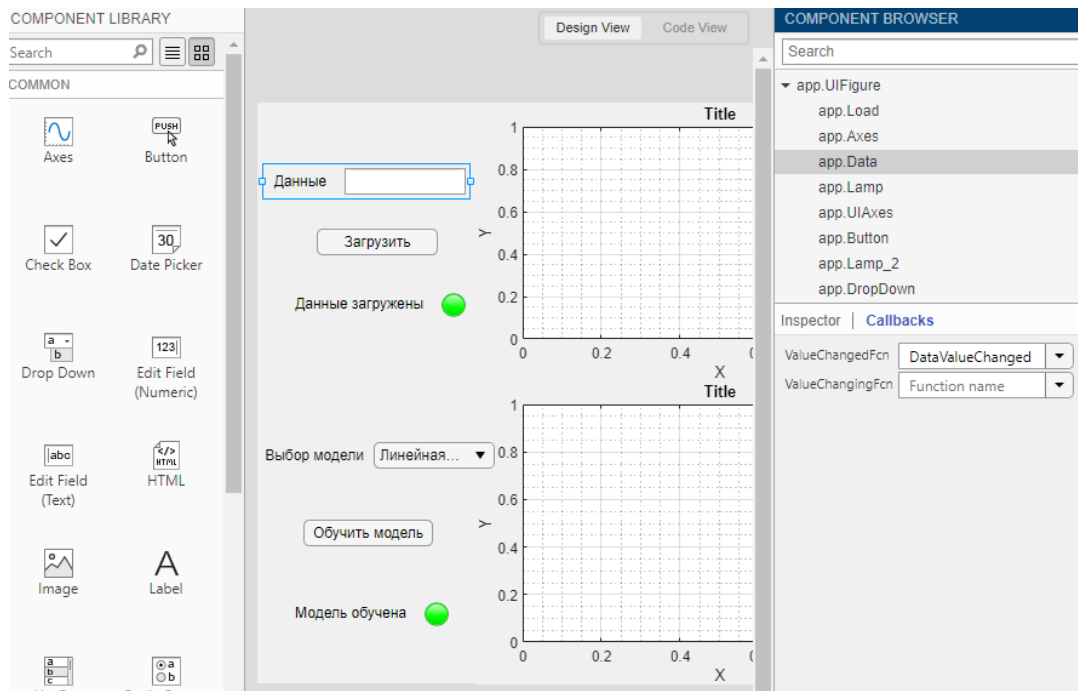


Рисунок 33 – Окно Designer App

В окне, представленном на рисунке 33, добавляются элементы, с помощью вкладки «Callbacks» прописываем действие, которое необходимо совершить при взаимодействии с элементом. Добавим следующие элементы: Button для выполнения действий, Axes для построения графиков, Edit Field для ввода имени файла данных, Drop Down для выбора моделей из списка, Lamp для индикации выполнения действий.

```

1  classdef app1 < matlab.apps.AppBase
2
3      % Properties that correspond to app components
4      properties (Access = public) ...
5
19
20      properties (Access = private)
21          T % Таблица с данными
22          T1 % Таблица с предсказанным
23      end
24
25      % Callbacks that handle component events
26      methods (Access = private)
27
28          % Value changed function: Data
29          function DataValueChanged(app, event)
30              value = app.Data.Value;
31          end
32
33          % Button pushed function: Load
34          function LoadButtonPushed(app, event)
35              app.T = read_data(app.Data.Value);
36              plot_data(app.Axes, app.T);
37          end

```

Рисунок 34 – Часть кода приложения

На рисунке 34 представлена часть кода приложения, в которой написаны команды для взаимодействия с кнопкой «Загрузить». По нажатию кнопки

происходит загрузка данных и строится график «Загруженные данные». После загрузки данных загорается индикатор «Данные загружены», сигнализируя о готовности к обучению модели. Далее выбираем модель и нажимаем кнопку «обучить модель». После нажатия кнопки, данные загружаются в модель и модель обучается на 70% от них. Далее на 30% предсказывается поведение скорости двигателя и выводится на график.

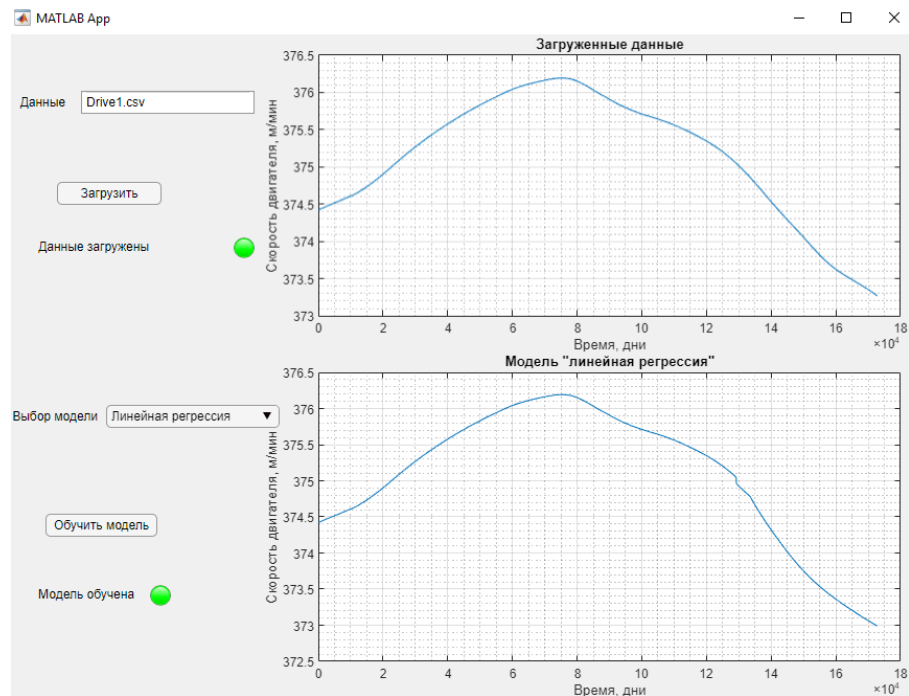


Рисунок 35 – Приложение для работы с данными

Далее для запуска приложения на любом компьютере сделаем файл с расширением .exe с помощью функции, представленной на рисунке 36.

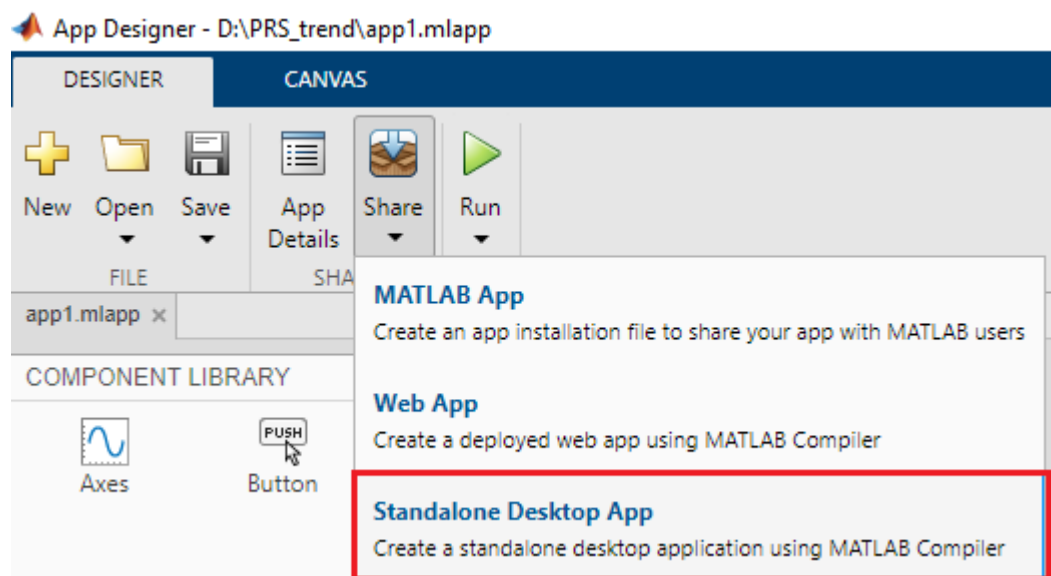


Рисунок 36 – Создание приложения

## **4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

В настоящее время такое понятие как коммерческая ценность разработки является одним из важнейших факторов, определяющим насколько перспективно и ценно будет научное исследование на первых этапах жизненного цикла. Именно коммерческая ценность выступает необходимым условием при поиске финансирования для проведения различных испытаний и внедрения разработки в производство.

Главной целью создания раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является комплексное описание и анализ финансово-экономических аспектов выполненной работы

### **4.1 Организация и планирование работ**

При организации процесса реализации конкретного проекта необходимо рационально планировать занятость каждого из его участников и сроки проведения отдельных работ.

В данном пункте составим полный перечень проводимых работ, определим их исполнителей и рациональную продолжительность. Наглядным результатом планирования работ является линейный график реализации проекта. Для его построения хронологически упорядоченные вышеуказанные данные должны быть сведены в таблицу типа приведенной ниже

Для реализации проекта необходимы два исполнителя – научный руководитель (НР), инженер (И) – в его роли действует исполнитель НИР (ВКР); Разделим выполнение дипломной работы на этапы, представленные в таблице 1. Таблица 1 – Перечень работ и продолжительность их выполнения

<b>Этапы работы</b>	<b>Исполнители</b>	<b>Загрузка исполнителей</b>
Выбор темы дипломной работы	НР, И	НР – 100% И – 30%
Подбор и изучение литературы по теме	НР, И	НР – 100% И – 20%

Окончание таблицы 1 – Перечень работ и продолжительность их выполнения

Выбор технологического процесса	НР, И	НР – 20% И – 100%
Изучение работы технологического процесса	НР, И	НР – 10% И – 100%
Изучение оборудования технологической линии	И	И – 100%
Сбор данных о работе оборудования	И	И – 100%
Подготовка данных для последующей обработки	И	И – 100%
Выбор программных пакетов для обработки данных	НР, И	НР – 50% И – 100%
Обработка данных	И	И – 100%
Разработка прогнозной модели на основе обработанных данных	И	И – 100%
Разработка имитационной модели объекта исследования	И	И – 100%
Тестирование моделей	НР, И	НР – 40% И – 100%
Проверка работы с руководителем	НР, И	НР – 100% И – 10%
Написание раздела «финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	И	И – 100%
Написание раздела «социальная ответственность»	И	И – 100%
Составление пояснительной записки	НР, И	НР – 30% И – 100%
Подготовка материалов для презентации дипломного проекта	И	И – 100%

#### 4.2 Продолжительность этапов работ

Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости используется следующая формула:

$$t_{\text{ож}} = \frac{3*t_{\text{min } i} + 2*t_{\text{max } i}}{5}, \quad (1)$$

где  $t_{\text{min}}$  – минимальная трудоемкость  $i$ -ой работы, чел/дн.;  $t_{\text{max}}$  – максимальная трудоемкость  $i$ -ой работы, чел/дн.

Для построения линейного графика необходимо рассчитать длительность этапов в рабочих днях, а затем перевести ее в календарные дни. Расчет

продолжительности выполнения каждого этапа в рабочих днях ( $T_{РД}$ ) ведется по формуле:

$$T_{РД} = \frac{t_{ож}}{K_{ВН}} \cdot K_{Д}, \quad (2)$$

где  $t_{ож}$  – продолжительность работы, дн.,  $K_{ВН}$  – коэффициент выполнения работ, учитывающий влияние внешних факторов на соблюдение предварительно определенных длительностей, примем данный коэффициент  $K_{ВН} = 1$ ;  $K_{Д}$  – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсацию непредвиденных задержек и согласование работ (примем  $K_{Д} = 1,1$ ).

Расчет продолжительности этапа в календарных днях ведется по формуле:

$$T_{КД} = T_{РД} \cdot T_{К}, \quad (3)$$

где  $T_{КД}$  – продолжительность выполнения этапа в календарных днях,  $T_{К}$  – коэффициент календарности, позволяющий перейти от длительности работ в рабочих днях к их аналогам в календарных днях, и рассчитываемый по формуле:

$$T_{К} = \frac{T_{КАЛ}}{T_{КАЛ} - T_{ВД} - T_{ПД}}, \quad (4)$$

где  $T_{КАЛ}$  – календарные дни,  $T_{ВД}$  – выходные дни,  $T_{ПД}$  – праздничные дни.

Рассчитаем коэффициент календарности для пятидневной рабочей недели:

$$T_{К} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} = \frac{366}{366 - 118} = 1,47. \quad (5)$$

В таблице 2 приведены продолжительности этапов работ и их трудоемкости по исполнителям, занятым на каждом этапе. Стоит отметить, что величины трудоемкости этапов по исполнителям  $T_{КД}$  позволяют построить линейный график осуществления проекта, представленный на рисунке 1.



Таблица 2 – Трудозатраты на выполнение проекта

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Трудоемкость работ по исполнителям чел.- дн.			
					$T_{РД}$		$T_{КД}$	
		$t_{min}$	$t_{max}$	$t_{ож}$	НР	И	НР	И
Выбор темы дипломной работы	НР, И	2	4	2,8	3,1	0,9	4,5	1,4
Подбор и изучение литературы по теме	НР, И	3	5	3,8	4,2	0,8	6,1	1,2
Выбор технологического процесса	НР, И	6	8	6,8	1,5	7,5	2,2	11,0
Изучение работы технологического процесса	НР, И	2	3	2,4	0,3	2,6	0,4	3,9
Изучение оборудования технологической линии	И	6	8	6,8	0,0	7,5	0,0	11,0
Сбор данных о работе оборудования	И	5	7	5,8	0,0	6,4	0,0	9,4
Подготовка данных для последующей обработки	И	5	6	5,4	0,0	5,9	0,0	8,7
Выбор программных пакетов для обработки данных	НР, И	6	8	6,8	3,7	7,5	5,5	11,0
Обработка данных	И	6	8	6,8	0,0	7,5	0,0	11,0
Разработка прогнозной модели на основе обработанных данных	И	8	9	8,4	0,0	9,2	0,0	13,6
Разработка имитационной модели объекта исследования	И	4	5	4,4	0,0	4,8	0,0	7,1
Тестирование моделей	НР, И	10	12	10,8	4,8	11,9	7,0	17,5
Проверка работы с руководителем	И	3	5	3,8	4,2	0,4	6,1	0,6
Написание раздела «финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	И	2	3	2,4	0,0	2,6	0,0	3,9
Написание раздела «социальная ответственность»	НР, И	2	3	2,4	0,0	2,6	0,0	3,9
Составление пояснительной записки	НР, И	5	7	5,8	1,9	6,4	2,8	9,4
Подготовка материалов для презентации дипломного проекта	И	2	4	2,8	0,0	3,1	0,0	4,5
<b>Итого</b>				<b>88,2</b>	<b>23,6</b>	<b>87,8</b>	<b>34,7</b>	<b>129,0</b>

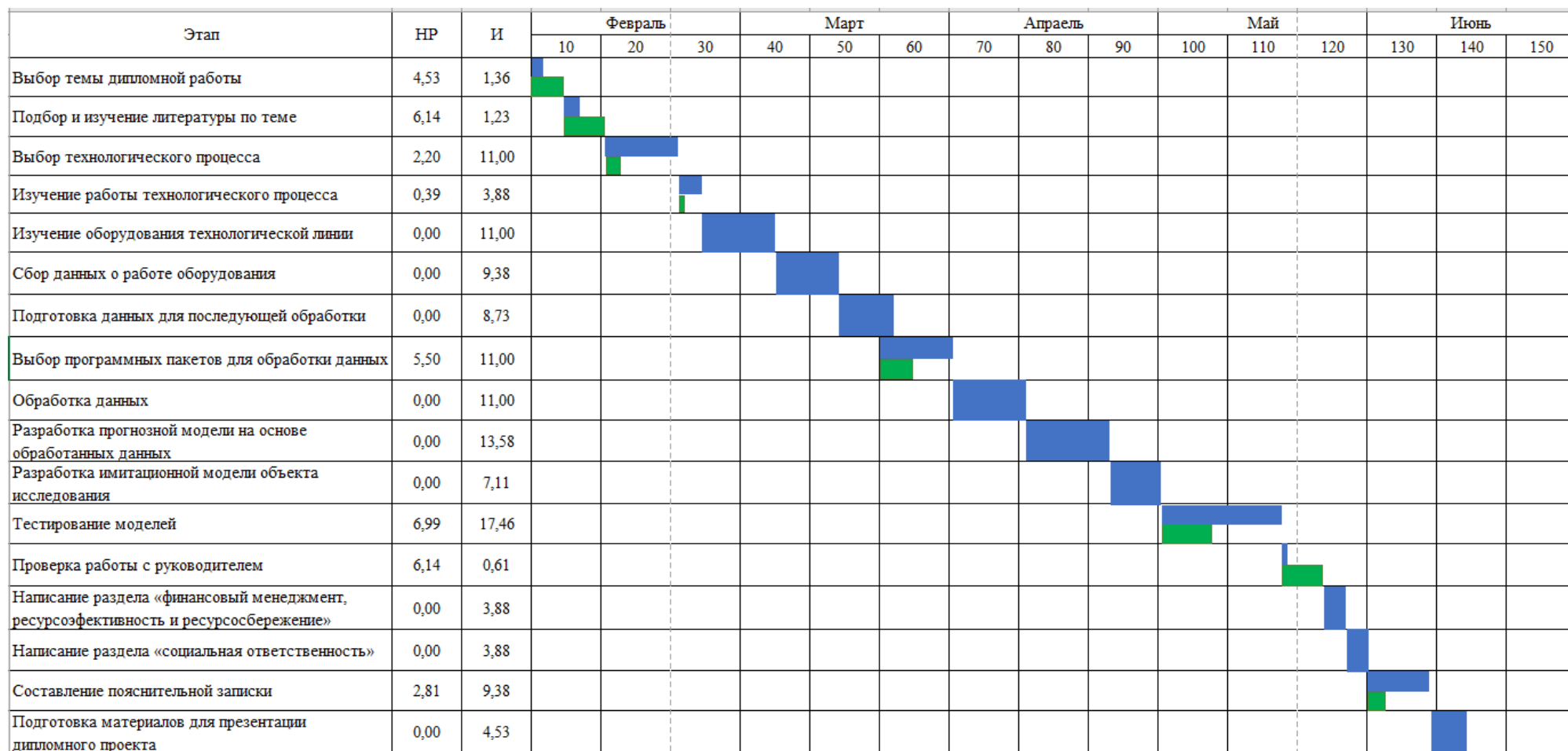


Рисунок 37 – Линейный график осуществления проекта

#### 4.3 Расчет сметы затрат на выполнение проекта

В состав затрат на создание проекта включается величина всех расходов, необходимых для реализации комплекса работ, составляющих содержание данной разработки. Расчет сметной стоимости ее выполнения производится по следующим статьям затрат:

- материалы и покупные изделия;
- заработная плата;
- социальный налог;
- расходы на электроэнергию (без освещения);
- амортизационные отчисления;
- командировочные расходы;
- оплата услуг связи;
- арендная плата за пользование имуществом;
- прочие услуги (сторонних организаций);
- прочие (накладные) расходы.

##### 4.3.1 Расчет затрат на материалы

К данной статье расходов относится стоимость материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых непосредственно в процессе выполнения работ над объектом проектирования. Кроме того, статья включает так называемые транспортно-заготовительные расходы. Примем их как 10% от отпускной цены закупаемых материалов. Затраты на материалы сведены в таблице 3.

Таблица 3 – Расчет затрат на материалы

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во	Сумма, руб.
Лицензионное ПО MatLaB	15600	1 экз.	15600
Лицензионное ПО Microsoft Office 2019	3200	1 экз.	3200
Лицензионное ПО TIA Portal 15	12000	1 экз.	12000
Бумага для принтера формата A4	300	1 уп.	300
Картридж для принтера	600	1 шт.	600
Итого			31700

Расходы на материалы с учетом ТЗР будут равны:  $C_{\text{мат}} = 31700 * 1,1 = 34870$  руб.

#### 4.3.2 Расчет заработной платы

Данная статья расходов включает заработную плату научного руководителя и инженера, а также премии, входящие в фонд заработной платы. Расчет основной заработной платы выполняется на основе трудоемкости выполнения каждого этапа и величины месячного оклада исполнителя.

Среднедневная тарифная заработная плата ( $ЗП_{\text{дн-т}}$ ) рассчитывается по формуле:

$$ЗП_{\text{дн-т}} = MO/20,6, \quad (6)$$

учитывающей, что в году 248 рабочих дней и, следовательно, в месяце в среднем 20,6 рабочих дня (при пятидневной рабочей неделе).

Расчеты затрат на полную заработную плату приведены в таблице 4. Затраты времени по каждому исполнителю в рабочих днях с округлением до целого взяты из таблицы 2. Для учета в ее составе премий, дополнительной зарплаты и районной надбавки используется следующий ряд коэффициентов:  $K_{\text{ПР}} = 1,1$ ;  $K_{\text{доп.ЗП}} = 1,113$ ;  $K_{\text{р}} = 1,3$ . Таким образом, для перехода от тарифной (базовой) суммы заработка исполнителя, связанной с участием в проекте, к соответствующему полному заработку (зарплатной части сметы) необходимо первую умножить на интегральный коэффициент  $K_{\text{и}} = 1,1 * 1,113 * 1,3 = 1,6$ . Данные значения взяты для пятидневной рабочей недели.

Таблица 4 – Затраты на заработную плату

Исполнитель	Оклад, руб./мес.	Среднедневная ставка, руб./раб.день	Затраты времени, раб.дни	Коэффициент	Фонд з/п., руб.
НР	33 664	1634	24	1,6	62 745,6
И	13 500	655	88	1,6	93 632
Итого					156 377,2

### 4.3.3 Расчет затрат на социальный налог

Затраты на единый социальный налог (ЕСН), включающий в себя отчисления в пенсионный фонд, на социальное и медицинское страхование, составляют 30% от полной заработной платы по проекту, т.е.  $C_{\text{соц.}} = C_{\text{зп}} * 0,3$ .  
Итак, в нашем случае  $C_{\text{соц.}} = 156\,377,2 * 0,3 = 46\,913,28$  руб.

### 4.3.4 Расчет затрат на электроэнергию

Данный вид расходов включает в себя затраты на электроэнергию, потраченную в ходе выполнения проекта на работу используемого оборудования, рассчитываемые по формуле:

$$C_{\text{эл.об.}} = P_{\text{об}} \cdot t_{\text{об}} \cdot \text{ЦЭ}, \quad (7)$$

где  $P_{\text{об}}$  – мощность, потребляемая оборудованием, кВт,  $\text{ЦЭ}$  – тариф на 1 кВт·час,  $t_{\text{об}}$  – время работы оборудования, час.

Для ТПУ  $\text{ЦЭ} = 6,59$  руб./кВт·час (с НДС).

Время работы оборудования вычисляется на основе итоговых данных таблицы 2 для инженера ( $T_{\text{рд}}$ ) из расчета, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов:

$$t_{\text{об}} = T_{\text{рд}} * K_t, \quad (8)$$

где  $K_t \leq 1$  – коэффициент использования оборудования по времени, равный отношению времени его работы в процессе выполнения проекта к  $T_{\text{рд}}$ , примем данный коэффициент равным 0,7.

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{\text{об}} = P_{\text{ном.}} * K_C, \quad (9)$$

где  $P_{\text{ном.}}$  – номинальная мощность оборудования, кВт,  $K_C \leq 1$  – коэффициент загрузки, зависящий от средней степени использования номинальной мощности. Для технологического оборудования малой мощности  $K_C = 1$ .

Расчет затрат на электроэнергию для технологических целей приведен в таблице 5.

Таблица 5 – Затраты на электроэнергию технологическую

Наименование оборудования	Время работы оборудования tОБ, час	Потребляемая мощность РОБ, кВт	Затраты ЭОБ, руб.
Персональный компьютер	696*0,7	0,3	963,2
Струйный принтер	2	0,1	1,3
Итого			964,5

#### 4.3.5 Расчет амортизационных расходов

В статье «Амортизационные отчисления» рассчитывается амортизация используемого оборудования за время выполнения проекта.

Используется формула:

$$C_{AM} = \frac{H_A * Ц_{ОБ} * t_{pf} * n}{F_d}, \quad (10)$$

где  $H_A$  – годовая норма амортизации единицы оборудования,  $Ц_{ОБ}$  – балансовая стоимость единицы оборудования с учетом ТЗР,  $F_d$  – действительный годовой фонд времени работы соответствующего оборудования, берется из фактического режима его использования в текущем календарном году,  $t_{pf}$  – фактическое время работы оборудования в ходе выполнения проекта,  $n$  – число задействованных однотипных единиц оборудования.

Для определения  $H_A$  следует обратиться к фрагменту из постановления правительства РФ «О классификации основных средств, включенных в амортизационные группы». Оно позволяет получить рамочные значения сроков амортизации (полезного использования) оборудования (СА). Для ПК это  $2 \div 3$  года. Необходимо задать конкретное значение СА из указанного интервала, примем это значение 2 года. Далее определяется  $H_A$  как величина обратная СА, в данном случае это 0,5. Аналогичное значение будет для принтера.

Рассчитаем  $C_{AM}$  для ПК. Стоимость ПК 60000 руб., время использования 696 часа,  $H_A = 0,5$ ,  $F_d = 248*8 = 1984$  часов (для пятидневной рабочей недели):

$$C_{AM} = \frac{0,5*60000*696*1}{1984} = 10\,524 \text{ руб.} \quad (11)$$

Рассчитаем  $C_{AM}$  для принтера. Стоимость принтера 7000 руб., время использования 2 часа,  $H_A = 0,5$ ,  $F_D = 300$  часов:

$$C_{AM} = \frac{0,5 \cdot 7000 \cdot 2 \cdot 1}{300} = 23 \text{ руб.} \quad (12)$$

Итого начислено амортизации 10 547 руб.

#### 4.3.6 Расчет расходов, учитываемых непосредственно на основе платежных документов

К данному пункту можно отнести плату за услуги интернет-связи за 5 месяцев (февраль-июнь) при ежемесячной плате 400 рублей. Таким образом,  $C_{нр} = 400 \cdot 5 = 2000$  руб.

#### 4.3.7 Расчет прочих расходов

В статье «Прочие расходы» отражены расходы на выполнение проекта, которые не учтены в предыдущих статьях, их следует принять равными 10% от суммы всех предыдущих расходов, т.е.

$$C_{проч.} = (C_{мат} + C_{зп} + C_{соц} + C_{эл.об.} + C_{ам} + C_{нр}) \cdot 0,1 = (34\,870 + 156\,377,2 + 46\,913,28 + 964,5 + 10\,547 + 2000) \cdot 0,1 = 25\,167,2 \text{ руб.} \quad (13)$$

#### 4.3.8 Расчет общей себестоимости разработки

Проведя расчет по всем статьям сметы затрат на разработку, можно определить общую себестоимость проекта.

Таблица 6 – Смета затрат на разработку проекта

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
Материалы и покупные изделия	$C_{мат}$	34 870
Основная заработная плата	$C_{зп}$	156 377,2
Отчисления в социальные фонды	$C_{соц}$	46 913,28
Расходы на электроэнергию	$C_{эл.}$	964,5
Амортизационные отчисления	$C_{ам}$	10 547
Непосредственно учитываемые расходы	$C_{нр}$	2000
Прочие расходы	$C_{проч}$	25 167,2
Итого		276 839,2

Таким образом, затраты на разработку составили  $C = 276\,839,2$  руб.

#### **4.3.9 Расчет прибыли**

В связи с тем, что мы не располагаем данными для определения точной величины прибыли примем данное значение как 15% от полной себестоимости проекта. Таким образом, прибыль составляет 41 525,9 руб.

#### **4.3.10 Расчет НДС**

НДС составляет 20% от суммы затрат на разработку и прибыли. В нашем случае это:

$$\text{Ц}_{\text{НДС}} = (276\,839,2 + 41\,525,9) * 0,2 = 63\,673,0 \text{ руб.} \quad (14)$$

#### **4.3.11 Цена разработки НИР**

Цена равна сумме полной себестоимости, прибыли и НДС:

$$\text{Ц}_{\text{НИР(КР)}} = 276\,839,2 + 41\,525,9 + 63\,673,0 = 382\,038,12 \text{ руб.} \quad (15)$$

#### **4.4 Оценка экономической эффективности проекта**

Актуальным аспектом качества выполненного проекта является экономическая эффективность его реализации, т.е. соотношение обусловленного ей экономического результата (эффекта) и затрат на разработку проекта. Внедрение системы с цифровым двойником позволит предсказывать отказ оборудования. Данная возможность поможет лучше планировать план производственных работ. В следствии чего сократится время ремонта оборудования, снизятся простои и незапланированные остановки производства.

Таким образом, разработанный проект имеет потенциал повысить экономические показатели работы предприятия, а именно: выпуск готовой продукта и сократить время простоя оборудования. В рамках данной работы не представляется возможным рассчитать прибыль проекта и, следовательно период окупаемости, так как данная разработка не была внедрена на действующем предприятии. Стоит отметить, что при внедрении системы с цифровым двойником предприятия ожидается увеличение производительности оборудования на 10-15%, так как, при отклонении рабочих параметров оборудования, система будет реагировать на эти отклонения и сигнализировать о необходимой замене или ремонте оборудования, тем самым давая больше



времени на подготовку к мероприятиям по ремонту и обслуживанию, что должно сократить отходы производства и повысить объем выпуска готовой продукции.

## **5 Социальная ответственность**

В научно-исследовательской и проектной деятельности необходимо учитывать безопасность труда и окружающей среды. Под понятием «социальная ответственность» понимается состояние рабочего места и помещения, режим трудовой деятельности и обеспечение мероприятий по защите трудящихся в моменты чрезвычайных ситуаций.

Таким образом, организация, контролирующая проектную деятельность, несет ответственность за решения, которые могут повлиять на общество, рабочую обстановку и окружающую среду.

В качестве рабочего места, рассматривается рабочее место инженера АСУТП, оснащенное различной техникой, такой как монитор, системный блок, клавиатура, мышь, и т.д.

Написание выпускной квалификационной работы проходило в рамках преддипломной практики в компании ООО «Биакспен Т», инженерно-техническая служба эксплуатационно-ремонтного участка.

Внедрение проекта, разработанного в рамках выполнения ВКР позволит более оперативно производить ремонтные работы в рамках ППР, так как с помощью цифрового двойника производства можно будет заранее планировать работы исходя из полученных данных. Сокращение времени ППР приведет к снижению времени нахождения обслуживающего персонала на производственной линии и к повышению производительности производства.

В рамках выполнения ВКР было сделано следующее:

- Подбор материала и его изучение по принципам работы производства. Вникание в тонкости работы каждой установки в отдельности. Изучение принципов и механизмов взаимодействия между установками.
- Подбор материала и его изучение по оборудованию. Получение навыков работы с программами для наладки и использования изученного оборудования.

- Накапливание материала по основным неисправностям, часто возникаемым проблемам.
- Изучение ПО Matlab, Predictive Maintenance Toolbox, Diagnostic Feature Designer. Данное ПО необходимо для анализа и подготовки данных и создания цифрового двойника производства.
- Изучение структуры формирования данных, выбор которых необходим для анализа.
- Разработка цифрового двойника производства на основе данных с производства, проверка работоспособности модели.

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

### **5.1.1 Особенности трудового законодательства**

Согласно Трудовому кодексу РФ (N 197-ФЗ) [49] для работника устанавливается:

- пятидневная рабочая неделя;
- выплата заработной платы производится в денежной форме в валюте Российской Федерации (в рублях);
- сверхурочная работа оплачивается за первые два часа работы не менее чем в полуторном размере, за последующие часы - не менее чем в двойном размере. По желанию работника сверхурочная работа вместо повышенной оплаты может компенсироваться предоставлением дополнительного времени отдыха, но не менее времени, отработанного сверхурочно. Работа, произведенная сверх нормы рабочего времени в выходные и нерабочие праздничные дни и оплаченная в повышенном размере либо компенсированная предоставлением другого дня отдыха;
- доплата за вредность предусмотрена в виде натуральных выплат (выдача молока), либо денежная компенсации;
- обязательное проведение периодических медосмотров за счет работодателя;
- защита персональных данных осуществляется в соответствии с требованиями ст. 86 ТК РФ.

### **5.1.2 Компоновка рабочей зоны**

Далее описаны моменты, которые нужно учитывать при планировке рабочего места.

При размещении рабочих мест с ПЭВМ расстояние между рабочими столами с видеомониторами (в направлении тыла поверхности одного видеомонитора и экрана другого видеомонитора), должно быть не менее 2,0 м, а расстояние между боковыми поверхностями видеомониторов - не менее 1,2 м.

Рабочие места с ПЭВМ в помещениях с источниками вредных производственных факторов должны размещаться в изолированных кабинах с организованным воздухообменом.

Рабочие места с ПЭВМ при выполнении творческой работы, требующей значительного умственного напряжения или высокой концентрации внимания, рекомендуется изолировать друг от друга перегородками высотой 1,5-2,0 м.

Экран видеомонитора должен находиться от глаз пользователя на расстоянии 600-700 мм, но не ближе 500 мм с учетом размеров алфавитно-цифровых знаков и символов.

Конструкция рабочего стола должна обеспечивать оптимальное размещение на рабочей поверхности используемого оборудования с учетом его количества и конструктивных особенностей, характера выполняемой работы. При этом допускается использование рабочих столов различных конструкций, отвечающих современным требованиям эргономики. Поверхность рабочего стола должна иметь коэффициент отражения 0,5-0,7.

Конструкция рабочего стула (кресла) должна обеспечивать поддержание рациональной рабочей позы при работе на ПЭВМ, позволять изменять позу с целью снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и спины для предупреждения развития утомления. Тип рабочего стула (кресла) следует выбирать с учетом роста пользователя, характера и продолжительности работы с ПЭВМ.

Рабочий стул (кресло) должен быть подъемно-поворотным, регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки от переднего края сиденья, при этом регулировка каждого параметра должна быть независимой, легко осуществляемой и иметь надежную фиксацию.

Поверхность сиденья, спинки и других элементов стула (кресла) должна быть полумягкой, с нескользящим, слабо электризующимся и воздухопроницаемым покрытием, обеспечивающим легкую очистку от загрязнений.

Согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 [50], норма площади рабочего места с персональным компьютером составляет 4,5 м<sup>2</sup>. На рабочем месте кабинета установлено 2 рабочих места с персональными компьютерами и жидкокристаллическими экранами. Соответственно, на одного человека приходится 15 м<sup>2</sup>, что соответствует вышеуказанным требованиям.

На рисунке 1 представлен план кабинета, в котором осуществлялась трудовая деятельность.

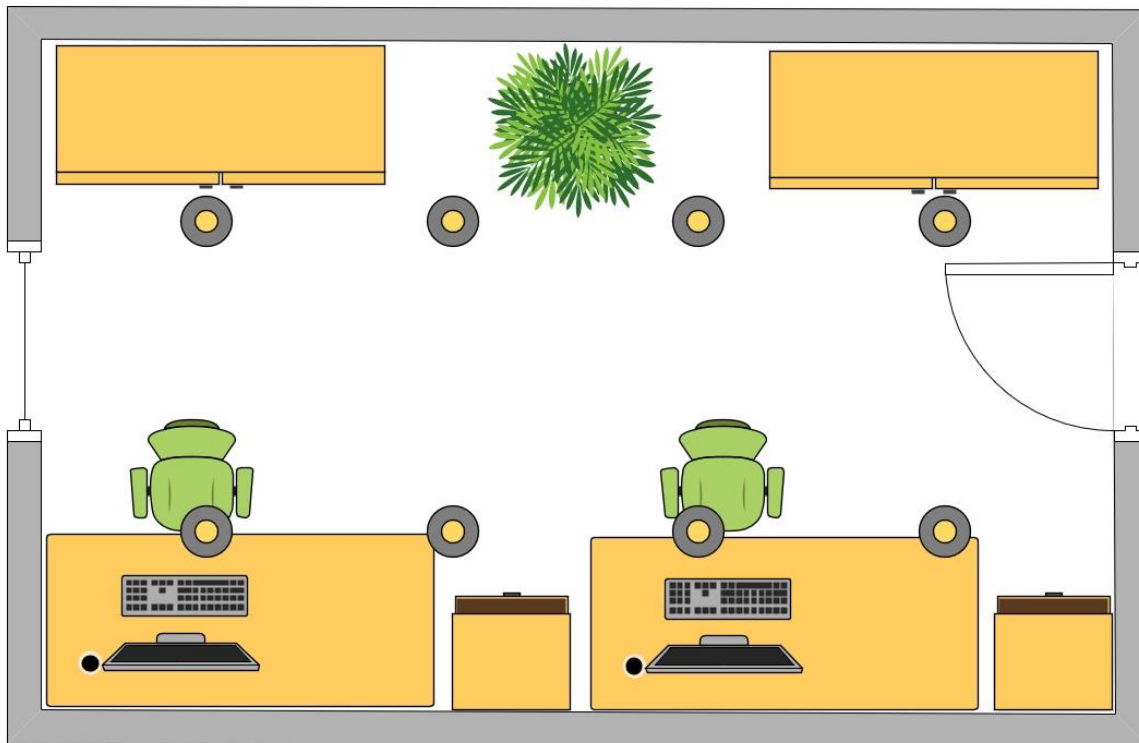


Рисунок 1 – План кабинета

## 5.2 Производственная безопасность

Возможные опасные и вредные факторы по ГОСТ 12.0.003-2015 [51] сведены в таблицу 7.

Таблица 7 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ		Нормативные документы
	Разработка	Эксплуатация	
1. Отклонение показателей микроклимата	+	+	ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. [52]
2. Недостаточная освещенность рабочей зоны	+	+	СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95 [53]
3. Повышенный уровень шума	+	+	ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности [54]; СП 51.13330.2011 Защита от шума [55]
4. Электромагнитные излучения	+	+	СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы [56]
5. Поражение электрическим током	+	+	ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. [57]
6. Опасные факторы, связанные с пожаром	+	+	ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования. [58]

### 5.2.1 Анализ опасных и вредных факторов

#### 5.2.1.1 Микроклимат производственных помещений

Согласно ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. [51] показателями, характеризующими микроклимат, являются:

- температура воздуха;
- относительная влажность воздуха;
- скорость движения воздуха;
- интенсивность теплового излучения.

Данные показатели могут изменяться в зависимости от погодных условий, времени года, отопительного сезона.

Допустимые нормы представим в таблице 8.

Таблица 8 – Допустимые нормы показателей микроклимата [4]

Период года	Температура, °С			Относительная влажность, %		Скорость движения, м/с	
	Оптимальная	Допустимая		Оптимальная	Допустимая на рабочих местах постоянных и непостоянных, не более	Оптимальная, не более	Допустимая на рабочих местах
		Верхняя граница	Нижняя граница				
Холодный	22-24	25	21	40-60	75	0,1	Не более 0,1
Теплый	23-25	28	22	40-60	55 (при 28 °С)	0,1	0,1-0,2

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. В рассматриваемом рабочем месте вентиляция осуществляется естественным и механическим путём. В зимнее время в помещении предусматривается система отопления. Это обеспечивает нормальное состояние здоровья работников в кабинете.

#### 5.2.1.2 Освещённость рабочей зоны

Рабочее освещение – освещение, обеспечивающее нормируемые световые условия (освещённость, качество освещения) в помещениях и местах производства работ вне зданий.

Неудовлетворительное освещение может привести к напряжению зрения, ослаблению внимания, раздражению, головной боли и утомлению. Основным

документом, регламентирующим нормы освещенности, является СП 52.13330.2016 [53].

Основным показателем качества освещения является освещенность Е – поверхностная плотность светового потока. По характеристике зрительной работы труд программиста относится к разряду III подразряду Г (высокой точности), т.е. наименьший размер объекта различения от 0,3 до 0,5 мм (точка). Это значит, что нормативное значение освещенности рабочего места должно быть 200 лк [53].

В рабочем кабинете используются 8 ламп, что позволяет создать уровень освещения, требуемый для комфортной работы за ПК.

#### **5.2.1.3 Повышенный уровень шума**

Шум может стать причиной головной боли, раздражительностью, утомляемостью, снижением аппетита, боли в ушах и т. д. Перечисленные факты снижают производительность, работоспособность человека, а также качество труда.

Шумовой фон рабочего места могут создавать работающие компьютеры, система вентиляции и кондиционирования или внешние шумы, поступающие извне кабинета.

Производственный шум регулируется в соответствии с нормами в ГОСТ 12.1.003-83 «ССБТ. Шум. Общие требования безопасности» [54]. Допустимые уровни звука и звукового давления для рабочего места представлены в таблице 15.

Таблица 9 – Предельно допустимые уровни звука

Вид трудовой деятельности/Частоты	Уровни звука и звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Рабочие места программистов вычислительных машин	86	71	61	54	49	45	42	40	38



Методы для уменьшения воздействий шума представлены в СП 51.13330.2011 Защита от шума [55]:

- экранирование рабочих мест, то есть установка перегородок между рабочими местами;
- установка оборудования, производящего минимальный шум;
- применение звукопоглощающих материалов.

Для обеспечения снижения уровня шума персональных компьютеров, необходимо регулярно проводить чистку от пыли, замену смазывающих веществ и прочее техническое обслуживание. Также необходимо поддерживать в исправном состоянии систему вентиляции и кондиционирования.

#### **5.2.1.4 Электромагнитные излучения**

Электромагнитное излучение – распространяющееся в пространстве возмущение электрических и магнитных полей. Источниками электромагнитного излучения в данном исследовании являются мониторы и системный блок.

Оценка величины уровней ЭМП, проведенная по паспортным данным компьютера и монитора, показала их соответствие нормам СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03[56] (Таблица 10).

Таблица 10 – Предельно допустимые уровни напряженности ЭМП

Наименование параметров		ВДУ ЭМП
Напряженность электрического поля	В диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц	25 В/м
	В диапазоне частот 2 кГц – 400 Гц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	В диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц	250 нТл
	В диапазоне частот 2 кГц – 400 Гц	25 нТл
Электростатический потенциал экрана видеомонитора		500 В

В целях снижения вредного воздействия компьютера для работника предусмотрены перерывы в работе на 10-15 минут каждые пару минут часов работы.

#### **5.2.1.5 Электробезопасность**

Поражение током является опасным фактором согласно ГОСТ 12.0.003-2015 [51]. Персональный компьютер питается от сети 220В переменного тока с

частотой 50 Гц. Помещение с ПЭВМ, где проводились описанные выше работы, относится к помещениям без повышенной опасности.

К мероприятиям по предотвращению возможности поражения электрическим током относятся:

- при включенном сетевом напряжении работы на задней панели компьютера должны быть запрещены;
- все работы по устранению неисправностей должен производить квалифицированный персонал;
- необходимо постоянно следить за исправностью электропроводки.

#### **5.2.1.6 Пожарная безопасность**

Пожарная безопасность также относится к опасным факторам. Пожарная безопасность осуществляется системой пожарной защиты и системой предотвращения пожара.

Рассматриваемое рабочее место относится к пожароопасной категории В. Для избегания возникновения пожара необходимо проводить следующие профилактические работы, направленные на устранение возможных источников возникновения пожара:

- периодическая проверка проводки;
- отключение оборудования при покидании рабочего места;
- проведение периодического инструктажа работников о пожаробезопасности;
- назначение ответственных за пожарную безопасность.

Для предотвращения и оповещения пожара на рабочем месте с ПЭВМ имеются огнетушители, расположенные в специально отведенных и обозначенных местах. Также присутствуют кнопки для извещения о пожаре и пожарные извещатели.

## **5.3 Экологическая безопасность**

### **5.3.1 Анализ воздействия на окружающую среду**

В ходе проектной деятельности возможно вредное воздействие на литосферу, которое объясняется из-за утилизации электронной техники: компьютеров, сканеров и т.п.

При рассмотрении влияния процесса утилизации персонального компьютера были выявлены особо вредные выбросы согласно ГОСТ Р 51768-2001 [59]. В случае выхода из строя компьютеров, они списываются и отправляются на специальный склад, который при необходимости принимает меры по утилизации списанной техники и комплектующих. Процесс эксплуатации объекта не подразумевает никаких вредных аспектов, которые влияют на окружающую среду.

## **5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

### **5.4.1 Перечень возможных чрезвычайных ситуаций на объекте**

Наиболее вероятными чрезвычайными ситуациями являются:

- авария;
- взрыв;
- пожар.

Всякий работник при обнаружении пожара должен [60]:

- незамедлительно сообщить об этом в пожарную охрану;
- принять меры по эвакуации людей, каких-либо материальных ценностей согласно плану эвакуации;
- отключить электроэнергию, приступить к тушению пожара первичными средствами пожаротушения.

При возникновении пожара во всем корпусе должна сработать система пожаротушения, передав на пункт пожарной станции сигнал о чрезвычайной ситуации. В случае если система не сработала, то необходимо самостоятельно произвести вызов пожарной службы по телефону 101, сообщить точный адрес места возникновения ЧС и ожидать приезда специалистов.

Произведем расчёт фактического времени эвакуации [61]:

Исходные данные:

$N_1$  – число людей на первом участке, чел;

$f$  – средняя площадь проекции человека, кв. м.;

$\delta_1$  – ширина первого участка пути, м;

$l_1, l_2$  – длина первого и второго участка пути, м;

$q_1, q_2, q_3$  – интенсивности движения на первом втором и третьем участках пути;

$\delta_1, \delta_2, \delta_3$  – ширина участков пути, м;

$\delta_{дв}$  – ширина дверного проёма, м;

$D_1$  – плотность людского потока, м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>;

$v_1, v_2$  – значение скоростей движения людского потока, м/мин;

$t_1, t_2$  – время движения до выхода из 1 и 2 участков, мин;

$t_{12}$  – общее время движения до выхода из 1 и 2 участков, мин;

$t_{зкор}$  – задержка в коридоре, мин;

$t_{кор}$  – время прохождения коридора, мин;

$t_{здв}$  – время задержки двери, мин;

$t_{итог}$  – итоговое время эвакуации, мин.

```

N1 := 112   q1 := 13,5   tзкор := 336.0,1. ( 1 / (16,5.δ3) - 1 / (q2.δ2) )
v1 := 52   δ2 := 6
f := 0,1   δ3 := 2,5   tздв := 336.0,1. ( 1 / (19,6.δдв) - 1 / (q3.δ3) )
δдв := 1,45
δ1 := 1,8   v2 := 60   tитог := t1 + t2 + tзкор + tкор + tздв
l1 := 24   l2 := 24
D1 := (N1.f) / (δ1.l1)   q2 := (3.q1.δ1) / δ2   t2 := (l2 / v2)
t1 := (l1 / v1)   q3 := (q2.δ2) / δ3   t12 := t1 + t2
D1 = 0,2593
t1 = 0,4615
q2 = 12,15
t2 = 0,4
t12 = 0,8615
q3 = 29,16
tзкор = 0,3536
tкор := (4,5 / 15) = 0,3
tздв = 0,7214
tитог = 2,2365

```

Рисунок 38 – Расчёт в ПО MathCad

Итоговое время эвакуации равно 2,2365 минуты, что является больше минимально требуемого времени на эвакуацию. Для понижения времени эвакуации можно расширить дверные проёмы.

### **Выводы по разделу**

В рамках раздела «социальная ответственность» были выявлены и проанализированы наиболее вероятные вредные и опасные производственные факторы, а также предложены мероприятия по снижению уровней их воздействия на работника. Было приведено описание рабочего места и перечень выполненных работ. Произведен расчет времени эвакуации. Помимо этого, в подразделе «экологическая безопасность» рассматривается характер воздействия проектируемого решения на окружающую среду. Также рассмотрены наиболее возможные чрезвычайные ситуации на рабочем месте и алгоритм действий при их возникновении.

## **Заключение**

В работе в рамках поставленной задачи были достигнуты следующие цели:

1. Изучен технологический процесс стана тянущих валов, для лучшей интерпретации данных.
2. Выполнен анализ реальных данных, сделана обработка методами сглаживания, заполнения пропусков и удаления выбросов для последующей обработке и создания предсказательных моделей.
3. Разработаны модели прогнозирования временных рядов скорости приводных электродвигателей стана тянущих валов (P.R.S.), используя функции Matlab.
4. Создано приложение для взаимодействия с моделью предсказания с помощью Designer App. Данное приложение можно разместить на любом ПК. ПО Matlab для корректного функционирования не требуется.

## Список литературы

1. Фейгенберг И.М. Быстрота моторной реакции и вероятностное прогнозирование //Физиология человека. – 2018. – Т. 34. – №. 5. – С. 51-62.
2. Waller M. A., Fawcett S. E. Data science, predictive analytics, and big data: a revolution that will transform supply chain design and management//Journal of Business Logistics. – 2013. – Т. 34. – №. 2. – С. 77-84
3. Hazen B. T. et al. Data quality for data science, predictive analytics, and big data in supply chain management: An introduction to the problem and suggestions for research and applications //International Journal of Production Economics. – 2014. – Т. 154. – С. 72-80.
4. Schoenherr T., Speier- Pero C. Data science, predictive analytics, and big data in supply chain management: Current state and future potential //Journal of Business Logistics. – 2015. – Т. 36. – №. 1. – С. 120-132.
5. Eckerson W. W. Predictive analytics //Extending the Value of Your Data Warehousing Investment. TDWI Best Practices Report. – 2007. – Т. 1. – С. 1-36.
6. Чугреев В.Л. Системы поддержки принятия решений с использованием методов машинного обучения и прогнозной аналитики \ Чугреев В.Л. \ Проблемы экономического роста и устойчивого развития территорий Материалы научно-практической интернет-конференции г. Вологда, 27–29 апреля 2016 г. С. 79-83.
7. Siegel E. Predictive analytics: The power to predict who will click, buy, lie, or die. – Hoboken: Wiley, 2013. – С. 148.
8. Waller M. A., Fawcett S. E. Data science, predictive analytics, and big data: a revolution that will transform supply chain design and management //Journal of Business Logistics. – 2013. – Т. 34. – №. 2. – С. 77-84.
9. Shmueli G., Koppius O. R. Predictive analytics in information systems research //Mis Quarterly. – 2011. – С. 553-572.

10. Schoenherr T., Speier- Pero C. Data science, predictive analytics, and big data in supply chain management: Current state and future potential //Journal of Business Logistics. – 2015. – Т. 36. – №. 1. – С. 120-132.
11. Eckerson W. W. Predictive analytics //Extending the Value of Your Data Warehousing Investment. TDWI Best Practices Report. – 2007. – Т. 1. – С. 1-36.
12. Боровиков С.М. ИТ-система прогнозирования надёжности сложных электронных систем методом анализа дерева отказов \ С. М. Боровиков, А. Е. Епихин \ Информационные системы и технологии: управление и безопасность. 2013. №2. С. 140-144.
13. Гречко И.А. Использование методов машинного обучения для прогнозирования опасных конвективных явлений с помощью численной модели конвективного облака \ Санкт-Петербург 2017 г.
14. Wirth, Rüdiger and Jochen Hipp. – CRISP-DM: Towards a Standard Process Model for Data Mining. (2000).
15. Кожевников А.В. Применение методов машинного обучения в рамках прогнозирования состояния электромеханических систем прокатного производства \ Кожевников А.В., Илатовский И.С., Соловьева О.И. \ Вестник Череповецкого государственного университета, 2017, №1. С. 33-39
16. Shipp M. A. et al. Diffuse large B-cell lymphoma outcome prediction by gene-expression profiling and supervised machine learning //Nature medicine. – 2002. – Т. 8. – №. 1. – С. 68.
17. Nielsen H., Brunak S., von Heijne G. Machine learning approaches for the prediction of signal peptides and other protein sorting signals //Protein engineering. – 1999. – Т. 12. – №. 1. – С. 3-9.
18. Challagulla V. U. B. et al. Empirical assessment of machine learning based software defect prediction techniques //International Journal on Artificial Intelligence Tools. – 2008. – Т. 17. – №. 02. – С. 389-400.



19. Suthaharan S. Big data classification: Problems and challenges in network intrusion prediction with machine learning //ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review. – 2014. – Т. 41. – №. 4. – С. 70-73.
20. Тулупьев А. Л., Фильченков А. А., Вальтман Н. А. Алгебраические байесовские сети: задачи автоматического обучения //Информационноизмерительные и управляющие системы. – 2011. – Т. 9. – №. 11. – С. 57-61.
21. Van Hinsbergen C. P. I. J., Van Lint J. W. C., Van Zuylen H. J. Bayesian training and committees of state-space neural networks for online travel time prediction //Transportation Research Record. – 2009. – Т. 2105. – №. 1. – С. 118-126.
22. MacKay D. J. C. et al. Bayesian nonlinear modeling for the prediction competition //ASHRAE transactions. – 1994. – Т. 100. – №. 2. – С. 1053-1062.
23. Akoush S., Sameh A. Mobile user movement prediction using Bayesian learning for neural networks //Proceedings of the 2007 international conference on Wireless communications and mobile computing. – ACM, 2007. – С. 191-196.
24. Суворова А. В. и др. Вероятностные графические модели социальнозначимого поведения индивида, учитывающие неполноту информации //Труды СПИИРАН. – 2012. – Т. 3. – №. 22. – С. 101-112.
25. Artamonov Y. S. Prediction of cluster system load using adaptive model mixture //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – Т. 5. – №. 5. – С. 9-15.
26. Singh S. et al. SVM based system for classification of microcalcifications in digital mammograms //Engineering in Medicine and Biology Society, 2006. EMBS'06. 28th Annual International Conference of the IEEE. – IEEE, 2006. – С. 4747-4750.
27. Wee L. J. K. et al. SVM-based prediction of linear B-cell epitopes using Bayes Feature Extraction //BMC genomics. – BioMed Central, 2010. – Т. 11. – №. 4. – С. 21.

28. Ma C. Y. et al. Prediction models of human plasma protein binding rate and oral bioavailability derived by using GA–CG–SVM method //Journal of pharmaceutical and biomedical analysis. – 2008. – Т. 47. – №. 4-5. – С. 677-682.
29. Deris A. M., Zain A. M., Sallehuddin R. Hybrid GR-SVM for prediction of surface roughness in abrasive water jet machining //Meccanica. – 2013. – Т. 48. – №. 8. – С. 1937-1945.
30. Chen J. H., Lin J. Z. Developing an SVM based risk hedging prediction model for construction material suppliers //Automation in construction. – 2010. – Т. 19. – №. 6. – С. 702-708.
31. Lin J. Y., Cheng C. T., Chau K. W. Using support vector machines for long-term discharge prediction //Hydrological Sciences Journal. – 2006. – Т. 51. – №. 4. – С. 599-612.
32. Sapankevych N. I., Sankar R. Time series prediction using support vector machines: a survey //IEEE Computational Intelligence Magazine. – 2009. – Т. 4. – №. 2.
33. Wang Z. Failure prediction using machine learning and time series in optical network \ Zhilong Wang, Min Zhang, Danshi Wang, Chuang Song, Min Liu, In Li, Liqi Lou, Zhuo Liu \ Opt Express. 2017 Aug 7; 25(16):18553-18565
34. Маценов А. А. Комитетный бустинг: минимизация числа базовых алгоритмов при простом голосовании //Всероссийская конференция ММРО- 3. – 2007. – С. 180-183.
35. Кашницкий Ю. С., Игнатов Д. И. Ансамблевый метод машинного обучения, основанный на рекомендации классификаторов/Machine Learning in Python, Journal of Machine Learning Research, 12.-2825-2830. – 2011.
36. Попова Т. П. Ансамбли моделей как современный инструмент анализа данных //ББК 65.04 К64 Ответственные за выпуск: доктор экономических наук, ректор Уральского государственного экономического университета. – 2017. – С. 256.

37. Schapire R. E., Singer Y. Improved boosting algorithms using confidencerated predictions //Machine learning. – 1999. – Т. 37. – №. 3. – С. 297-336.
38. Freund Y., Schapire R., Abe N. A short introduction to boosting //JournalJapanese Society For Artificial Intelligence. – 1999. – Т. 14. – №. 771-780. – С. 1612.
39. Берестнева О. Г., Муратова Е. А. Построение логических моделей с использованием деревьев решений //Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – №. 2.
40. Freund Y., Mason L. The alternating decision tree learning algorithm //icml. – 1999. – Т. 99. – С. 124-133.
41. Prasad A. M., Iverson L. R., Liaw A. Newer classification and regression tree techniques: bagging and random forests for ecological prediction //Ecosystems. – 2006. – Т. 9. – №. 2. – С. 181-199.
42. Летова М.С. Реализация регрессивных и классификационных задач с помощью метода Random Forest \ М.С. Летова \ \ E-Scio. 2017. №8 (11). С. 15- 21.
43. Чистяков С. П. Случайные леса: обзор //Труды Карельского научного центра Российской академии наук. – 2013. – №. 1.
44. Пальмов С. В. Случайный лес: основные особенности / С.В. Пальмов, А.О. Денисова // Наука сегодня: теоретические и практические аспекты. - 2017, стр.: 51-52.
45. Беляков М. И. Оптимизация программы обслуживания оборудования на основе методологии RCM //Главный механик. – 2015. – №. 9. – С. 69.
46. Мухарямов Т. Ш. Современные подходы к автоматизации управления состоянием основного оборудования в гидроэнергетике России //Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2006. – №. 7-8.
47. Баскакова Н. Т. Использование методологии RCM в технологическом обслуживании и ремонтах металлургического оборудования \ Баскакова Н.Т., Сидорук И.Л., Ганникова А.А. \ \ Моделирование и развитие поцессов ОМД. 2013. № 19. С. 235-239.

48. Баскакова Н. Т. Оптимизация затрат ремонтов в условиях теории ограничений с применением методов RCM \ Н.Т. Баскакова, И.Л. Сидорук \ Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2014. Т.2. №1. С. 207-211.

49. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 30.04.2020)

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

51. ГОСТ 12.0.003-2015 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

52. ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.

53. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95

54. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности;

55. СП 51.13330.2011 Защита от шума

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

57. ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты

58. ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования.

59. ГОСТ Р 51768-2001 Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Методика определения ртути в ртутьсодержащих отходах. Общие требования.

60. О противопожарном режиме (с изменениями на 23 апреля 2020 года).

61. Приказ МЧС РФ от 10.07.2009 N 404 (ред. от 14.12.2010) "Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах.

62. Об утверждении Правил обращения с отходами производства и потребления в части осветительных устройств, электрических ламп,

ненадлежащие сбор, накопление, использование, обезвреживание, транспортирование и размещение которых может повлечь причинение вреда жизни, здоровью граждан, вреда животным, растениям и окружающей среде (с изменениями на 1 октября 2013 года).

**Приложение А**  
(обязательное)

Раздел 2.1.1. Технологический процесс  
Technological process

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ТМ81	Сизинцев Данил Андреевич		

Консультант ИШИТР ОАР:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Филипас Александр Александрович	к.т.н.		

Консультант – лингвист ШБИП ОИЯ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ОИЯ ШБИП	Горбатова Татьяна Николаевна	—		

## **1 Introduction to the production of B.O.P.P. film**

Bi-Oriented Polypropylene, abbreviated B.O.P.P., is a film made of polypropylene resin. The manufacture of this type of flat film includes a two-stage direction stretching process: firstly, a film is stretched in the longitudinal direction, and then in the transverse direction, to improve its mechanical properties.

BOPP film production is based on raw materials to be proportioned, mixed, and polymerized to produce the final product.

The BOPP film production plant has the main processing phases for further production: 1. Raw materials storage; 2. Raw materials feeding; 3. Extrusion line; 4. Casting machine; 5. Machine Direction Orienting (M.D.O.); 6. Transverse Direction Orienting (T.D.O.); 7. Pull roll stand (P.R.S.); 8. Edge trim recycling system; 9. Winder.

### **1. 1 Raw material storage and dosing (general description)**

#### **1.1.1 Storage recommendations**

##### **Homopolymers, copolymers**

Resins should be stored in large bulk silos. However, they are often kept in bags (when resins are not delivered directly from trains or trucks tanks).

Bags must be stored, in a covered and clean warehouse. They must be protected from rain, high humidity, sun, and extreme temperatures. Bags should be treated carefully to avoid some damage.

#### **1.1.2 Raw material storage and feeding for main extruder**

The homopolymer is stored in large volume silos (sized according to consumption and delivery time of resins).

Then it is pneumatically transported to a dosing unit where it is mixed in accurate proportion with additives and reclaim before being conveyed to a weighing hopper.

Film fluff gained as a result of the edge recycling is pneumatically conveyed into a cyclone located directly above the extruder hopper.

Any outside material is removed by metal detectors located between the cyclone and the weighing hopper.

### **1.1.3 Raw material storage and feeding for satellite extruders**

The copolymer is stored in large volume silos (sized according to consumption and delivery time of resins).

The raw material for the co-extruders which is mainly copolymer is conveyed directly from a small dosing unit to a feeding hopper located above the satellite extruders.

### **1.2 Extrusion unit (general description)**

The extrusion unit melts and uniformly mixes the PP raw materials and discharge them as a flat profile in continuous operation.

The unit consists of the main extruder, the co-extruder(s), the melt filters, and the die. Extruders, filters, and the die are connected by adapters.

The mixture of the PP granules, regranulate, and the edge trim fluff are melted in the main extruder and delivered at the inlet of the filtration system. The filter is to retain contamination from the melt. Further, the melt is transferred to the flat sheet die so that the flat sheet in a molten state free from gels, dirt, and defects is ejected out of the die.

Co-extruders are used for co-extrusion. They melt and uniformly mixes polypropylene granules, various additives masterbatches, and deliver the sealing layer material at the inlet of the filtration system. Then this melt is transferred to the flat sheet die.

The ratio of the layer thickness can be controlled by varying the output of the extruder.

#### **1.2.1 Single screw extruder**

The single screw extruder is used to mix, plasticize the raw materials, and convey the product out of the extruder. It is made up of two separate screws, located one after the other.

The single screw extruder is composed of 2 zones:



- The feed section feeds the plastic feedstock from a hopper to the barrel. This section is cooled. The feed screw has four functions: feeding, melting, mixing, and pumping.
- The second screw, located in the barrel, pumps the material to the die. The barrel is heated, the number of heating zones, and, therefore, the number of heaters is determined by the L/D ratio.

### **1.2.2 Twin-screw extruder**

The twin-screw extruder exploits the mechanical forces created by two screws rotating in the same direction in a barrel previously heated. The extruder screws are used to mix, plasticize, degas the raw materials introduced inside the barrel, and convey the product out of the extruder.

The twin-screw extruder is composed of 4 zones:

- Feeding area: transport elements (they are used to moving along the extruder the raw materials and the product at the viscous state).
- Melting area: mixing elements.
- Degassing area: transport elements.
- Thrust area: transport elements, used to created pressure.

### **1.2.3 Gear pump with gear reducer**

The pump is specially designed to provide high reliability and exact dosing of the melt delivered to the die. It provides a low-pressure fluctuation.

### **1.2.4 Filtration**

The filtration system is to remove the not molten gels and dirt and to provide clean melt to the die to achieve the optical properties of the film and less break film during production.

The molten polymer coming out from the extrusion system is passed through the pleated candles by maintaining the inlet pressure at the inlet of the filter.

### **1.2.5 Melt flow piping**

The caloduc heating system provides uniform temperature on the entire inner surface of the pipe, which enhances the quality of the film.

The liquid turns into vapor at production temperature (max 260°C). The vapor is distributed equally along the melt line, including the flanges, heating uniformly the melt by condensation. The vapor permanently circulates inside the double-chamber, providing an excellent temperature accuracy.

#### **1.2.6 Die body**

The melt of plain film and the co-extruded film is discharged by the die. The die distributes the melt stream or melts streams (in case of co-extrusion) of the same thickness across the total width. Temperature and die lips opening can be adjusted.

#### **1.2.7 Die adjustment**

During production, there are changes in the film profile. Therefore, the film tolerances must be corrected accordingly by readjusting the die lip. The coarse adjustment of the profile is made manually from the die flexible slide lip by adjusting the coarse adjustment of the profile is made manually from the die flexible slide lip by adjusting the length of bolts. The fine adjustment and control are taken over by the thickness gauge.

#### **1.2.8 Die exhaust hood with blower**

A hood is located above the die for removing the hot air, fumes, and volatile released by the polymer during production. The main function is to avoid an accumulation of oligomers in the chill roll area.

### **1.3 Film casting unit (general description)**

#### **1.3.1 Film casting machine**

The film casting machine draws the melt from the die. In this unit, the film is strengthened by cooling down. For this process, a big cooling roll, called “chill roll” is used.

The casting unit performs two main functions:

- To achieve proper and uniform pinning of the melt flat sheet on the chill roll.
- To rapidly cool down the molten flat sheet to achieve the desired crystallinity.

#### **1.3.2 Film cooling**

Cooling conditions of the chill roll and the water bath influence the crystallization of the PP, and thus the optical properties as well as the stretchability of the film. A quick cooling process of the melt influences the crystal or spherulite structure of the cast film in a way to keep the crystal structure as even as possible and the size of the crystals rather small. As a result, the haze of the film is minimized, the film is easy to be oriented, and the final film shows better thickness tolerances.

The melt is cooled down on one side by the chill roll and the other side in the water bath which results in uniform cooling down of both sides. Since the film is cooled from outside, the inside cooling conditions are not as good, i.e. the cooling speed is smaller, and therefore the spherulites are bigger.

Therefore, the temperatures of the film casting machine should be set as low as possible. However, there are limits due to the following effect: at too low temperatures, the melt would cool down too quickly and the film would burst because of the great thermal shrinkage on the chill roll. By that, the perfect contact between the chill roll and the film is no longer guaranteed, and penetrating water could cause spots on the film; this again would impair the cooling conditions resulting in a non-homogeneous crystal structure.

### **1.3.3 Cooling roll drying**

The chill roll is permanently dried to avoid bubbles: if the chill roll is not dried, the water turns into vapor, so the film can't stick to the chill roll anymore and it crystallizes.

### **1.3.4 High precision air knife pinning system**

The purpose of the air knife is to pin the molten sheet onto the chill roll and to make the edges of the cast film so that the MD and TD stretching break less. High-velocity air, created by a turbine blower onto the film surface across the width, sticks the film web on the chill roll.

### **1.3.5 Air knife position adjustment**

The ideal casting angle is the one where the web makes a natural tangent to the chill roll surface. Pinning should take place at the point of contact with the chill roll

and the air knife jet should be normal to the web surface at this point. The jet stream of air used to pin the surface should ideally be extracted away from this area and not be allowed to form vortices between the air knife and die. Vortices cause web flutter which can affect the gauge.

The air knife angle should be adjusted to remove the “crater-like” appearance of the base web on the chill roll surface.

Air knife deckles are used to direct the flow of air to the thick edges.

#### **1.4 MDO machine (general description)**

On the first stage, the machine direction oriented (abbreviated MDO) orients the unstretched cast film in the longitudinal direction.

This requires a specific stretching temperature. To warm up the cast film to stretching temperature several pre-heating rolls are needed.

The preheated cast film can be oriented in longitudinal direction in the stretching zone. This zone consists of stretching rolls running at different speeds.

After stretching, the longitudinally oriented film is thermo-fixed by the so-called “heat-setting rolls”.

The pre-heating rolls of the MDO are heated. The temperature is always set for one roll. The first rolls have a chromium-plated surface, the last rolls are Teflon-coated. The Teflon-coating is necessary for a specific temperature program to produce the co-extruded film. The stretching unit consists of 4 rolls. The usual stretch ratio is between 4,8 and 5,3.

Limits are set by the minimum and the maximum stretch ratio. A too low longitudinal stretching ratio will cause excessive thickness tolerances in a longitudinal direction. If a too high stretch ratio is chosen, the film is oriented too much in a longitudinal direction and it cannot be stretched in transverse direction without breaking in the TDO.

Increasing the stretch ratio increases the tensile strength of the film and reduces the elongation at break.

During longitudinal orientation, the film becomes thinner concerning the stretch ratio. In the short-gap stretching system the neck-in of the film during the stretching process is so small that it can be disregarded.

After longitudinal stretching the film passes over the heat-setting rolls for thermo-fixing. By increasing the temperature and decreasing the speed between the heat-setting rolls it is possible to reduce the thermal shrinkage of the film during heat treatment. At an excessive fixing temperature, the film becomes hazy. Too low speed can cause wrinkles.

#### **1.4.1 Temperature program for coextrusion**

There are limits for setting the stretching temperatures of the MDO since the film will stick to the chromium-plated rolls. The sticking point for PP homopolymer is at approx. 140 – 145°C. For PP copolymer, it is approximately 120 - 125°C. Consequently, a plain film can be stretched at temperatures of 140 – 145°C, while a co-extruded film with PP copolymer as outside layers must be oriented at temperatures of 120 – 125°C. The required lower stretching temperatures for a co-extruded film would result in an increased thermal shrinkage and impaired sealing properties.

To be able to stretch the PP homopolymer in the inner layer at higher temperatures than 120 – 125°C, the Teflon-coated pre-heating rolls are used. Considerably higher temperatures can be adjusted for the Teflon-coated rolls without making the film stick. Experience has shown that for coextruded film temperatures up to 134°C can be set for Teflon-coated rolls.

Thus, also the film core can be heated up to 132°C. For the ensuing stretching process, however, chromium-plated rolls are necessary. For the process, the outside layers of the film must be cooled down again to 120 – 125°C.

Since the radii of the stretch rolls are considerably smaller than the radii of the pre-heating rolls and therefore the residence time of the film on these rolls is shorter, only the outside layers of the film are cooled.

By overheating the sealing layer on the Teflon-coated pre-heating rolls and by subsequent cooling down of the outside layers on the cooling rolls, it is possible to

orient the coextruded film at optimum temperatures for each layer, i.e. approximately 120°C for the sealing layer and approximately 132°C for the core layer.

#### **1.4.2 Pre-heating rolls**

The preheating section heats the base web to just below the sticking point of the copolymer. The latter rollers are Teflon-coated to reduce sticking. Crystallinity is not alerted at this temperature but stretching is made easier.

#### **1.4.3 Stretching rolls**

The stretching section stretches the film normally in one gap by having the stretching rolls rotating faster than the pre-heating rolls. The loss in width experienced by the base web is related directly to the length of the gap between the stretching rolls. Two gaps are available for stretching if the stretch ratio is too high for one gap to cope.

#### **1.4.4 Heat-setting rolls**

The heat-setting section is used to try and take-out the in-built strains of the stretching process. This is carried out by having the last two heat-setting rolls rotating up to 10% slower than the two previous rolls.

#### **1.4.5 Nip rolls set**

At the MDO inlet, nip rolls fix the web to the MDO rolls. During the stretching operation, the film is similarly held on the rolls by nip rolls to avoid the slippage of the film on the rolls and the trapping of air bubbles. This also allows for a better thermal exchange.

#### **1.4.6 Film tension measurement**

Tension gauges at the inlet and exit of the MDO maintain constant tension of the film between the casting machine and the MDO, as well as between the MDO and the TDO. These tension gauges are installed to control the speed of the MDO and the TDO.

### **1.5 TDO (general description)**

The transverse direction orienting machine, abbreviated TDO, serves to orient the longitudinally stretched film in the second stage into a transverse direction. Thus, the film is biaxially oriented, i.e. stretched in longitudinal and in transverse directions.

To orient the longitudinally stretched film in a transverse direction, a stretching temperature of approx. 160°C is necessary. Since the transverse stretching temperature is considerably higher than the longitudinal stretching temperature, the film must be pre-heated to that temperature. For thermo-fixing of the oriented film, also a heat-setting zone is required. Finally, the hot film must be cooled down to room temperature. For the above reasons, the TDO is subdivided into four sections:

- Pre-heating section,
- Stretching section,
- Heat-setting section,
- Cooling section.

The film is transported through the TDO by a clip system mounted on a chain and guided by a chain rail.

At the film inlet into the TDO, the distance between the clips is monitored by the edge guiding unit according to the width of the longitudinally oriented film.

In the preheating section, the temperatures are set at approx. 170 – 180°C. The chain rail adjustment in this section is mainly parallel, i.e. in the preheating section, the film must not be stretched at all but transported only.

In the stretching section, the chain rail adjustment becomes continuously wider. That means that the film is stretched in a transverse direction.

The transverse stretching temperature is approx. 160°C. If a too low stretching temperature is chosen, the film will break with a loud noise. In this case, the thermal shrinkage of the film during heat treatment increases too. If the stretching temperature is too high, the thickness tolerances are bad. The film becomes hazy and finally breaks.

During transverse stretching the film also becomes thinner concerning the stretch ratio.

As the film edges are held by clips, the edges remain unstretched during transverse orientation. This is why the edges stay thicker. For this reason, the unstretched edges must be removed after leaving the TDO.

In the heat-setting section, the transport system converges to thermo-stabilize the film by temperature and relaxation. The film width is decreased by approx. 5-10% compared to the width of the last stretching zone.

The heat-setting temperature is limited since too high temperatures make the film hazier. The normal heat-setting temperatures are approx. 160 – 165°C.

The last section behind the TDO is a cooling zone. Here, the air at room temperature is blown onto the film to cool it down. Quick cooling down is necessary to achieve good optical properties, especially for the co-extruded film, and to avoid dimensional changes on the winder by thermal shrinkage.

After cooling down, the film is released from the clip system for further conveyance by the pull roll stand.

#### **1.5.1 Chain tension**

Each turn-around (right and left) receives one oversized hydraulic cylinder to maintain a constant chain tension independently from the chain track pattern.

During production, the chain remains under continuous stress and tends to elongate with a period. The cylinder keeps the tension at a pre-set tension value. The tension is monitored by measuring the pressure applied to the cylinder. The elongation of the chain is measured by a sensor and the chain is protected by monitoring the prescribed values of the elongation on supervisory control.

#### **1.5.2 Clips closing system**

Two magnetic devices are mounted above the onwards chain path on the centerline of the turn-around. This concept avoids contact with the clips.

The retraction allows avoiding closing of the clips during oven heat-up or before film threading.

#### **1.5.3 Clips cooling system**

This system cools down the chain clips to avoid that the film sticks onto them.

#### **1.5.4 Edge control ejection**



If the edge control ejection system is in automatic mode, it starts automatically when a film break occurs: the airflow on the clips ejects the film edges entangled in the clips.

#### **1.5.5 Width adjustment**

The chain rail position can be adjusted.

The width adjustment system is installed at each zone of the TDO and the adjustment can be done from outside the TDO.

#### **1.5.6 Air circulation fan (air balance)**

Heating and cooling of the film is performed by a heating and cooling air stream. This airstream is spread evenly across the film. Therefore, the TDO is subdivided into heating zones and cooling zone.

The airspeed may be different depending on the zone and the requested heat transfer, but an equal distribution of airspeed and temperature all over the width, for each zone, shall be optimized as it affects directly the thickness tolerance.

Due to process constraints, there are very important differences in temperature between the TDO zones (preheating, stretching, heat-setting, neutral and cooling zones). The air flow inside the TDO must be perfectly balanced in order to avoid air circulation between the TDO zones.

This system avoids airflow perturbation and allows good temperature control.

During film production, additives are evaporated from the polymer. These additives in gaseous states are exhausted out of the oven, hence the amount of air exhausted tries to get balanced through atmospheric air transfer to oven. To avoid the entry of the direct cold air and to provide a balance of air pressure within the oven, preheated air is supplied at each zone of the oven. This ensures proper air mixture of equilibrium temperature conditions and avoids the stretching patches on the web.

#### **1.5.7 Air distribution plenum**

The air pressurized by the fan is distributed to each of the individual nozzles through aerodynamically designed adjusting dampers allowing an exact balancing of

the air quantity and air pressure delivered to each nozzle above and below the film as well as in machine direction.

### **1.5.8 Fumes exhaust system**

During stretching, generated fumes due to additives evaporation must be exhausted out to avoid condensation of the fumes and deposition on the web in form of droplets. Dripping additives could cause spots on the film or film breaks.

### **1.6 PRS (general description)**

- The pull roll stand carries out seven functions in the process:
- Pulling the web out of the TDO.
- Cooling the web to room temperature.
- Spreading to avoid wrinkles.
- Measuring the thickness measurement with a non-contact gauge.
- Edge trimming and removing.
- Treatment of the web.
- Controlling of the film tension before the winder.

Its purpose is to pull off the bi-axially oriented film from the TDO and to forward the film to the winder.

The thickness gauge for measuring the thickness of the final film, the edge trim system, and the corona treatment are installed in the pull roll stand.

The edge is trimmed on the left and the right side blades. The width of the trim is approx. 120 – 150 mm. Edge trimming is followed by the corona treatment station.

#### **1.6.1 Cooling rolls**

During the film production, the film coming out of the TDO is first cooled down by blower and plenum arrangement installed before the outlet sprockets, then travels to the PRS. Its temperature is still in the range of 50°C to 60°C, but the edges are at higher temperatures due to the thickness of the edges. The film and edges are cooled down by cooling rolls to stop the film crystallization.

#### **1.6.2 Corona treatment**

Corona treatment is required on all films to be printed, adhesively laminated, or metalized films so that printing ink, adhesive, or aluminum metal vapor adheres to the film surface.

To get printing inks to spread on the surface (technical term ‘wetting’) and then stick to the surface of the polypropylene films, the surface energy of the polypropylene must be the same or higher than the surface energy of the printing ink.

Surface energy is measured in dynes/cm and untreated polypropylene surface energy is approximately 43 dynes/cm. Most printing inks and adhesives are in the region of 38-42 dynes/cm therefore the surface energy of polypropylene has to be increased for compatibility. Increasing surface energy can be done by other methods as a flame treatment or acid etching.

The surface tension can be evaluated with testing liquids or by edge angle definition. The testing liquids can be made in a do-it-yourself process according to ASTM-Standard D-2578. It must be considered that the testing liquids are hygroscopic, which means their values may change with time when absorbing humidity. The accuracy of the testing liquids is  $\pm 1$  mN/m. The surface tension can also be determined more precisely by edge angle definition.

However, the treatment level must be increased during production by approx. 2 – 4 dynes/cm, since it decreases during storage.

All surface energy modifiers work to a common goal by placing various chemical groups on the surface of the relatively inert copolymer surface. Corona discharge converts the oxygen and nitrogen in the air to ozone, nitrides, and complex oxides of nitrogen. All groups attack the film surface and the by-products are excess ozone and nitric acid. Ozone is extracted but nitric deposits on the treater bars and the candles have to be cleaned at regular intervals.

The treater assembly can be described as a heavy-duty capacitor consisting of 2 plates and a dielectric where the treater bar electrode is one plate, the steel treater roll is the other plate and the dielectric is a combination of treater roll covering, the film to be treated and the air gap.

Discharge starts only when the voltage is high enough to overcome the dielectric resistance of the 2 mm air gap between the bar and roll surface. Treatment starts when the provided frequency or power of the discharge is high enough to ionize the gases in the air.

The corona treatment affects the film surface. For one-side corona treatment, the sealing strength, the minimum sealing temperature, and the coefficient of friction must be measured separately on each side.

Films with additives require higher treatment intensity than films without additives.

The distance between the electrode and film should be at approx. 2 mm.

Since the electrode and the roll warm up during operation, the parallelism of the electrode to the roll must be checked from time to time.

Corona treatment results in giving out Ozone ( $O^3$ ) in the area around the arc. This gas is harmful and therefore it should be pumped out. For treating both sides of the film, corona treatment stations are installed both at the top and at the bottom.

### **1.6.3 Flame treatment**

The flame treatment has the same function as corona treatment.

Flaming consists of exposing the surface to be decorated to a suitable oxidizing flame for a period in the range of 0,2 to 3,0 seconds. This treatment brings about a change to the polymer surface that makes it wettable and permits a strong adhesive bond between the film surface and the coating. This change in surface properties can be readily seen by immersing an untreated and treated film in water.

On removal, the water will run off in globules from the untreated surface but will form a continuous film on the treated surface which will last for a varying length of time depending on the present flaming conditions used.

The following major parameters should be monitored for effective flaming conditions:

- Gas/air ratio: it depends on the type of gas used (town gas, methane, propane, and butane are suitable). A laminar flow flame is preferable to the turbulent flame.

- The distance of the burner to the film surface.
- The residence time of the film in the flame.

It has been established that the gas/air ratio is the most important and critical factor in flame treatment. The importance of control over this parameter cannot be overstressed and the gas/air flow must be maintained at a pre-determined level.

The effect of incorporating antistatic additives depends on the type of additive used, its concentration, and the type of flame treater. Additives, which by their diffusivity and compatibility characteristics, become active immediately after processing, demand more critical flaming conditions, and can give rise to difficulty if used at higher concentrations than those recommended. The level of addition at which difficulty is encountered in achieving acceptable print adhesion depends on the type of burner used for treatment. Most anti-static additives are only effective after flaming, and these additives do not affect on the flaming conditions necessary for acceptable print adhesion.

#### **1.6.4 Nip rolls**

Tension isolation between TDO and winder is provided by nip rolls on the treater stations. It is important to have a controlled tension between TDO and inside treater, between inside and outside treater, between outside treater and pull rolls and pull rolls to winder otherwise the winder will pull the film through the trim removal section and cut the web on blades.

Attached to every corona treatment roll there is a nip roll to prevent slipping of the film on the rolls. Thus, the winder cannot pull the film through the pull roll stand. Moreover, the proper nip roll operation is essential for the elimination of reverse treatment created by air between the film and the corona roll.

#### **1.6.5 Spreader rolls pair**

By pulling the edge of the film, the spreader roll pair removes completely the wrinkles during the transportation of the film.

#### **1.6.6 Heating and cooling unit for corona roll**

During corona treatment, the film temperature increases. Therefore, it is necessary to cool the corona rolls down to avoid crystallization due to the film heating.

#### **1.6.7 Edges recycling**

The film in the clips and the film close to the clips is very thick and cannot be wound into the film. To prevent waste production the edge trim is cut to fluff by a grinder and is recycled to the main extruder. This is in a continuous process during production.

#### **1.6.8 Film thickness gauge**

The thickness gauge is installed at the pull roll stand and is used for measuring the thickness profile of the final film.

The film thickness is measured during production in a non-tangent and continuous way through an X-ray scanner.

The thickness gauge does not only measure and indicate the film profile, but it also adjusts the film profile automatically and, by calculating the average film thickness for each scan, it keeps the film thickness on a constant level during production.

During production, there are changes in the film profile. Therefore, the film tolerances must be corrected accordingly by readjusting the die lip. The coarse adjustment of the profile is made manually by push/pull bolts. The fine adjustment and control are taken over by the thickness gauge. For this purpose, the push/pull bolts are designed as heated expansion bolts. These expansion bolts are controlled by the thickness gauge. The necessary temperature of the expansion bolts is calculated by the computer of the thickness gauge concerning the measured film profiles.

#### **1.7 Winder (general description)**

The winder station consists of a two-station turret winder with an automatic cutting unit.

With this winder, it is possible to change the film rolls without interrupting the production process.

While winding up the film on one station, on the other side of the unit the completed jumbo roll can be removed and an empty winding core can be fixed.

When starting-up the line, the film is wound on one winding station, first. Then, the machine parameters are optimized, and finally, the film can be laid on to the empty winding-core by the automatic lay-on and cutting unit.

It is necessary to adjust the winding characteristics to obtain well-wound film rolls.

The computer system pre-sets the winding characteristics via Force/Diameter diagram, displayed on the screen.

### **1.7.1 Tension roll**

The function of this roll, mounted on both sides on the high precision electronic load cell, is to permanently monitor the film tension just ahead of the contact roll and to wind the film at a constant tension.

Winding with tension control is possible in gap or contact modes.

The software calculates of the AC motor torque according to the tension setpoint and the mill roll diameter.

The load cell (located on the tension roll) measures the film tension and corrects the torque of the motor to have a tension equivalent to the set point.

The tension is set on the CPCS winder tension view according to the mill roll diameter. The winding is done in torque regulation with speed control to avoid having over-speed in case of film break.

### **1.7.2 Contact roll**

The function of this roll, is to remove air between the film layers and to maintain the layers.

### **1.7.3 Contact winding**

The film is wound with the contact roll pressing the mill roll.

A pneumatic regulator controls the pressure applied to the mill roll to ensure a constant contact pressure (the contact pressure is defined in the CPCS winder pressure view according to the mill roll diameter).

Every time the carriage reaches the detection switch it starts moving backward till it pulls away again. The contact mode used for a thin film with thickness  $< 36\mu$ .

As the film is thin, there is air between the layers when winding. So, to remove it, it is necessary to apply more pressure on the roll (air gives bad characteristics to the film (waves)).

Winding with tension control is possible in gap or contact modes.

The software calculates of the AC motor torque according to the tension setpoint and the mill roll diameter.

The load cell (located on the tension roll) measures the film tension and corrects the torque of the motor to have a torque equivalent to the set point.

The tension is set on the CPCS (Computerized Process Control System) winder tension view according to the mill roll diameter.

The winding is done in torque regulation with speed control to avoid having over-speed in case of film break.

#### **1.7.4 Ionization bar**

The ionization bar connected to a high-tension generator produces positive and negative ions, neutralizing the static electricity of the film. It avoids the layers shift to the right/left (layers not aligned).



## Приложение Б

(справочное)

### Листинг кода для подготовки данных

Добавляем данные о двигателе

```
current1.Description = erase(current1.Description, ' A')
current1.Time = datetime(current1.Time,'InputFormat','MM.dd.yyyy HH:mm:ss')
summary(AIM070201CU)
summary(AIM070201SD)
```

Проверка на соблюдение шага времени

```
isregular(AIM070201SD)
step = seconds(diff(AIM070201SD.Time));
figure
plot(step)
mode(step)
```

Проверка на соблюдение шага времени

```
isregular(AIM070201CU)
step1 = seconds(diff(AIM070201CU.Time));
figure
plot(step1)
mode(step1)
```

Приведение шага времени к нормальному (скорость)

```
AIM070201SD1 =
retime(AIM070201SD,"regular","fillwithconstant","TimeStep",seconds(1));
```

Приведение шага времени к нормальному (ток)

```
AIM070201CU1 = retime(AIM070201CU,"regular","mean","TimeStep",seconds(1));
```

Сведение тока и скорости в одну таблицу

```
% Join tables
Drive1_SD_CU = join(AIM070201SD1,AIM070201CU1)
```

Вывод графиков для наглядности

```
stackedplot(Drive1_SD_CU)
```

Обработка данных: заполним пропуски, удалим выбросы, сгладим

```
% Fill outliers
[cleanedData2,outlierIndices] = filloutliers(Drive1_SD_CU.Speed,'linear',...
    'ThresholdFactor',2,'SamplePoints',Drive1_SD_CU.Time);
% Display results
clf
plot(Drive1_SD_CU.Time,Drive1_SD_CU.Speed,'Color',[109 185 226]/255,...
    'DisplayName','Input data')
hold on
plot(Drive1_SD_CU.Time,cleanedData2,'Color',[0 114 189]/255,'LineWidth',1.5,...
    'DisplayName','Cleaned data')
% Plot outliers
plot(Drive1_SD_CU.Time(outlierIndices),Drive1_SD_CU.Speed(outlierIndices),'x',...
    'Color',[64 64 64]/255,'DisplayName','Outliers')
title(['Number of outliers: ' num2str(nnz(outlierIndices))])
hold off
legend
clear outlierIndices
```

## Продолжение приложения Б

(справочное)

### Листинг кода для подготовки данных

```
Drive1_SD_CU.Speed = cleanedData2
% Fill outliers
[cleanedData,outlierIndices2] = filloutliers(Drive1_SD_CU.Current,'linear',...
'movmedian',days(1.5),'ThresholdFactor',1,'SamplePoints',Drive1_SD_CU.Time);
% Display results
clf
plot(Drive1_SD_CU.Time,Drive1_SD_CU.Current,'Color',[109 185 226]/255,...
'DisplayName','Input data')
hold on
plot(Drive1_SD_CU.Time,cleanedData,'Color',[0 114 189]/255,'LineWidth',1.5,...
'DisplayName','Cleaned data')
% Plot outliers
plot(Drive1_SD_CU.Time(outlierIndices2),Drive1_SD_CU.Current(outlierIndices2),'x',.
'Color',[64 64 64]/255,'DisplayName','Outliers')
title(['Number of outliers: ' num2str(nnz(outlierIndices2))])
hold off
legend
clear outlierIndices2
Drive1_SD_CU.Current = cleanedData
% Smooth input data
smoothedData = smoothdata(Drive1_SD_CU.Speed,'movmean','SmoothingFactor',0.25,...
'SamplePoints',Drive1_SD_CU.Time);
% Display results
clf
plot(Drive1_SD_CU.Time,Drive1_SD_CU.Speed,'Color',[109 185 226]/255,...
'DisplayName','Input data')
hold on
plot(Drive1_SD_CU.Time,smoothedData,'Color',[0 114 189]/255,'LineWidth',1.5,...
'DisplayName','Smoothed data')
hold off
legend
Drive1_SD_CU.Speed = smoothedData
% Smooth input data
smoothedData = smoothdata(Drive1_SD_CU.Current,'movmean','SmoothingFactor',0.25,...
'SamplePoints',Drive1_SD_CU.Time);
% Display results
clf
plot(Drive1_SD_CU.Time,Drive1_SD_CU.Current,'Color',[109 185 226]/255,...
'DisplayName','Input data')
hold on
plot(Drive1_SD_CU.Time,smoothedData,'Color',[0 114 189]/255,'LineWidth',1.5,...
'DisplayName','Smoothed data')
hold off
legend
```

## Окончание приложения Б

(справочное)

### Листинг кода для подготовки данных

```
Drive1_SD_CU.Current = smoothedData
% Fill missing data
[cleanedData,missingIndices] = fillmissing(Drive1_SD_CU.Speed,'spline',...
    'SamplePoints',Drive1_SD_CU.Time);
% Display results
clf
plot(Drive1_SD_CU.Time,cleanedData,'Color',[0 114 189]/255,'LineWidth',1.5,...
    'DisplayName','Cleaned data')
hold on
% Plot filled missing entries
plot(Drive1_SD_CU.Time(missingIndices),cleanedData(missingIndices),'.',...
    'MarkerSize',12,'Color',[217 83 25]/255,...
    'DisplayName','Filled missing entries')
title(['Number of filled missing entries: ' num2str(nnz(missingIndices))])
hold off
legend
clear missingIndices
%Drive1_SD_CU.Speed = cleanedData
% Fill missing data
[cleanedData,missingIndices2] = fillmissing(Drive1_SD_CU.Current,'linear',...
    'SamplePoints',Drive1_SD_CU.Time);
% Display results
clf
plot(Drive1_SD_CU.Time,cleanedData,'Color',[0 114 189]/255,'LineWidth',1.5,...
    'DisplayName','Cleaned data')
hold on
% Plot filled missing entries
plot(Drive1_SD_CU.Time(missingIndices2),cleanedData(missingIndices2),'.',...
    'MarkerSize',12,'Color',[217 83 25]/255,...
    'DisplayName','Filled missing entries')
title(['Number of filled missing entries: ' num2str(nnz(missingIndices2))])
hold off
legend
clear missingIndices2
Drive1_SD_CU.Current = cleanedData
```

## Приложение В

(справочное)

### Скрипт нейронной сети

```
% Solve an Autoregression Time-Series Problem with a NAR Neural Network
% Script generated by Neural Time Series app
% Speed - feedback time series.
T = Speed;
% Choose a Training Function
% 'trainlm' is usually fastest.
% 'trainbr' takes longer but may be better for challenging problems.
% 'trainscg' uses less memory. Suitable in low memory situations.
trainFcn = 'trainlm'; % Levenberg-Marquardt backpropagation.
% Create a Nonlinear Autoregressive Network
feedbackDelays = 1:2;
hiddenLayerSize = 10;
net = narnet(feedbackDelays,hiddenLayerSize,'open',trainFcn);
% For a list of all processing functions type: help nnprocess
net.input.processFcns = {'removeconstantrows','mapminmax'};
% Prepare the Data for Training and Simulation
% numbers of delays, with open loop or closed loop feedback modes.
[x,xi,ai,t] = preparets(net,{}, {},T);
% Setup Division of Data for Training, Validation, Testing
% For a list of all data division functions type: help nndivision
net.divideFcn = 'dividerand'; % Divide data randomly
net.divideMode = 'time'; % Divide up every sample
net.divideParam.trainRatio = 70/100;
net.divideParam.valRatio = 15/100;
net.divideParam.testRatio = 15/100;
% Choose a Performance Function
% For a list of all performance functions type: help nnperformance
net.performFcn = 'mse'; % Mean Squared Error
% Choose Plot Functions
% For a list of all plot functions type: help nnplot
net.plotFcns = {'plotperform','plottrainstate','ploterrhist', ...
    'plotregression','plotresponse','ploterrcorr','plotinerrcorr'};
% Train the Network
[net,tr] = train(net,x,t,xi,ai);
% Test the Network
y = net(x,xi,ai);
e = gsubtract(t,y);
performance = perform(net,t,y)
% Recalculate Training, Validation and Test Performance
trainTargets = gmultiply(t,tr.trainMask);
valTargets = gmultiply(t,tr.valMask);
testTargets = gmultiply(t,tr.testMask);
trainPerformance = perform(net,trainTargets,y)
valPerformance = perform(net,valTargets,y)
testPerformance = perform(net,testTargets,y)
% View the Network
view(net)
% Plots
% Uncomment these lines to enable various plots.
%figure, plotperform(tr)
%figure, plottrainstate(tr)
%figure, ploterrhist(e)
%figure, plotregression(t,y)
%figure, plotresponse(t,y)
%figure, ploterrcorr(e)
%figure, plotinerrcorr(x,e)
```

## Окончание приложения В

(справочное)

### Скрипт нейронной сети

```
% Closed Loop Network
% Use this network to do multi-step prediction.
% The function CLOSELOOP replaces the feedback input with a direct
% connection from the output layer.
netc = closeloop(net);
netc.name = [net.name ' - Closed Loop'];
view(netc)
[xc,xic,aic,tc] = preparets(netc,{}, {},T);
yc = netc(xc,xic,aic);
closedLoopPerformance = perform(net,tc,yc)
[xl,xio,aio,t] = preparets(net,{}, {},T);
[y1,xfo,afo] = net(xl,xio,aio);
[netc,xic,aic] = closeloop(net,xfo,afo);
[y2,xfc,afc] = netc(cell(0,5),xic,aic);
nets = removedelay(net);
nets.name = [net.name ' - Predict One Step Ahead'];
view(nets)
[xs,xis,ais,ts] = preparets(nets,{}, {},T);
ys = nets(xs,xis,ais);
stepAheadPerformance = perform(nets,ts,ys)
if (false)
    genFunction(net,'myNeuralNetworkFunction');
    y = myNeuralNetworkFunction(x,xi,ai);
end
if (false)
    genFunction(net,'myNeuralNetworkFunction','MatrixOnly','yes');
    x1 = cell2mat(x(1,:));
    xi1 = cell2mat(xi(1,:));
    y = myNeuralNetworkFunction(x1,xi1);
end
if (false)
    gensim(net);
end
```