

Школа Инженерная школа информационных технологий и робототехники  
 Направление подготовки 15.03.06 Мехатроника и робототехника  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение автоматизации и робототехники

### БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Моделирование производственных комплексов с применением технологии цифровых двойников

УДК 519.876:658.016.4:004.356

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8E51	Козлов Иван Владимирович		

Руководитель ВКР

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

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОАР ИШИТР	Зарницын А.Ю.			

Нормоконтроль

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Суханов А.В.	К.Т.Н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Фадеева В.Н.	К.Ф.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООД ШБИП	Немцова О.А.			

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ООП	Мамонова Т.Е.	К.Т.Н.		
Руководитель ОАР ИШИТР	Леонов С.В.	К.Т.Н.		

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО НАПРАВЛЕНИЮ 15.06.03 МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИКА

Код результата	Результат обучения (Выпускник должен быть готов)
<b>Профессиональные компетенции</b>	
P1	применять глубокие естественнонаучные, математические знания в области анализа, синтеза и проектирования для решения научных и инженерных задач производства и эксплуатации мехатронных и робототехнических устройств и систем, в том числе их систем управления.
P2	воспринимать, обрабатывать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в области теории, проектирования, производства и эксплуатации мехатронных и робототехнических устройств и систем, принимать участие в командах по разработке и эксплуатации таких устройств и систем.
P3	применять и интегрировать полученные знания для решения инженерных задач при разработке, производстве и эксплуатации современных мехатронных и робототехнических устройств и систем (в том числе интеллектуальных) с использованием технологий мирового уровня, современных инструментальных и программных средств.
P4	определять, систематизировать и получать необходимую информацию в области проектирования, производства, исследований и эксплуатации мехатронных и робототехнических модулей, устройств и систем
P5	планировать и проводить аналитические, имитационные и экспериментальные исследования для целей проектирования, производства и эксплуатации мехатронных и робототехнических средств и систем (в том числе интеллектуальных) с использованием передового отечественного и зарубежного опыта, уметь критически оценивать полученные теоретические и экспериментальные данные и делать выводы.
P6	понимать используемые современные методы, алгоритмы, модели и технические решения в мехатронике и робототехнике и знать области их применения, в том числе в автоматизированных производствах.
P7	применять глубокие естественнонаучные, математические знания в области анализа, синтеза и проектирования для решения научных и инженерных задач производства и эксплуатации мехатронных и робототехнических устройств и систем, в том числе их систем управления.
<b>Универсальные компетенции</b>	
P8	эффективно работать в профессиональной деятельности индивидуально и в качестве члена команды
P9	владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде с пониманием культурных, языковых и социально-экономических различий
P10	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
P11	следовать кодексу профессиональной этики и ответственности и международным нормам инженерной деятельности

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

Школа Инженерная школа информационных технологий и робототехники  
 Направление подготовки (специальность) 15.03.06 Мехатроника и робототехника  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение автоматизации и робототехники

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_ Мамонова Т.Е.  
 (Подпись) (Дата)                      (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ  
на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Бакалаврской работы

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

Студенту:

Группа	ФИО
8Е51	Козлов Иван Владимирович

Тема работы:

Моделирование производственных комплексов с применением технологии цифровых двойников

Утверждена приказом директора (дата, номер)

06.05.2019 №3492/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

**Исходные данные к работе**

*(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).*

Работа направлена на разработку цифрового двойника абстрактного производственного комплекса с применением Factory I/O, S7-PLCSIM и Simulink/Stateflow.

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><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></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Создание производственного комплекса в Factory I/O.</li> <li>2. Выбор контроллерного оборудования</li> <li>3. Разработка алгоритма управления</li> <li>4. Тестирование</li> <li>5. Разработка модели взаимодействия производство-контроллер в Simulink/Stateflow.</li> </ol>
<p><b>Перечень графического материала</b></p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Образцы кода контроллера.</li> <li>2. Образцы автоматов Stateflow.</li> </ol>
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b></p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p style="text-align: center;"><b>Раздел</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>Консультант</b></p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Фадеева В.Н., доцент ОСГН ШБИП, к.ф.н.</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Немцова О.А., ассистент ООД ШБИП</p>
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p>	
<p>Заключение</p>	

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

**Задание выдал руководитель / консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Филипас А.А.	К.Т.Н.		
Ассистент ОАР ИШИТР	Зарницын А.Ю.			

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8E51	Козлов Иван Владимирович		

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) 15.03.06 Мехатроника и робототехника  
 Уровень образования бакалавриат  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение автоматизации и робототехники  
 Период выполнения осенний / весенний семестр 2018 /2019 учебного года

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

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

### КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
18.06.2019	Основная часть	75
17.06.2019	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
07.06.2019	Социальная ответственность	10

#### СОСТАВИЛ:

##### Руководитель ВКР

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

##### Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОАР ИШИТР	Зарницын А.Ю.			

#### СОГЛАСОВАНО:

##### Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Мамонова Т.Е.	к.т.н.		

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
8Е51	Козлову Ивану Владимировичу

<b>Школа</b>	<b>ИШИТР</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>ОАР</b>
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	15.06.03 Мехатроника и робототехника

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Оклад студента — 17 000 руб. Оклад руководителя — 26 300 руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Премиальный коэффициент 30 %. Коэффициент доплат и надбавок 20 %. Районный коэффициент 1,3. Коэффициент дополнительной заработной платы 12 %. Накладные расходы 5 %.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды 28 %.

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

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Анализ конкурентных технических решений.
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Формирование плана и графика разработки: – определение структуры работ, – определение трудоемкости работ, – создание диаграммы Ганта. Формирование бюджета затрат на разработку: – затраты на специальное оборудование; – заработная плата (основная и дополнительная), – социальные отчисления, – накладные расходы.
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности разработки	Определение потенциального эффекта разработки.

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

1. Диаграмма Ганта 2. Таблицы
----------------------------------

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

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент ОСГН ШБИП	Фадеева В.Н.	к.ф.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
8Е51	Козлов Иван Владимирович		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
8Е51	Козлову Ивану Владимировичу

Школа	ИШИТР	Отделение школы (НОЦ)	ОАР
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	15.06.03 Мехатроника и робототехника

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Работа направлена на разработку цифрового двойника абстрактного производственного комплекса с применением Factory I/O, S7 PLCSIM и Simulink/Stateflow. В цифровых двойниках заинтересованы крупные автоматизированные производства.
--	---

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

1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: — специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; — организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	ГОСТ 12.2.032-78 ГОСТ 21889-76 ГОСТ 22269-76 СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 "Трудовой кодекс Российской Федерации" N 197-ФЗ Статьи 91, 108, 106, 109, 212 ТК РФ
2. Производственная безопасность 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	1. Отклонение показателей микроклимата 2. Повышенный уровень шума 3. Возможность электропоражения 4. Наличие электромагнитных полей 5. Недостаток освещения и повышенная пульсация светового потока 6. Психофизиологическое воздействие
3. Экологическая безопасность	Воздействие объекта на атмосферу, гидросферу отсутствует. Воздействие на литосферу происходит при утилизации ПК.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	Возможной чрезвычайной ситуацией при разработке и эксплуатации является возникновение пожара на рабочем месте

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

### Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООД ШБИП	Немцова О.А.			

### Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8Е51	Козлов Иван Владимирович		

## Реферат

Выпускная квалификационная работа выполнена на 48 с., содержит 3 рис., 13 табл., 33 источника, 3 приложения.

Ключевые слова: Цифровой двойник, Конечный автомат, Динамическая модель, ПЛК - программируемый логический контроллер, Виртуальный ввод в эксплуатацию, Digital twin, Factory I/O, TIA Portal, Simulink, Stateflow.

Целью данной работы является разработка и использование цифрового двойника абстрактного производственного комплекса с применением Factory I/O, S7-PLCSIM и Simulink/Stateflow.

В выпускной квалификационной работе представлена разработка цифрового двойника абстрактного производственного комплекса с использованием Factory I/O, реализующего физическую модель, S7-PLCSIM, симулирующий работу программируемого логического контроллера, и Simulink/Stateflow, модель которого воспроизводит независимо от производства последовательность и длительность состояний отдельных операций. Дано краткое описание применений данных инструментов.



## Оглавление

Введение.....	11
1 Разработка цифрового двойника .....	12
1.1 Создание производственного комплекса.....	12
1.2 Выбор контроллерного оборудования .....	13
1.3 Разработка алгоритма управления .....	14
1.4 Результаты тестирования .....	15
1.5 Разработка модели взаимодействия производство-контроллер.....	16
1.6 Применение модели взаимодействия производство-контроллер .....	16
2 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	18
2.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения .....	18
2.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования .....	18
2.1.2 Анализ конкурентных технических решений .....	18
2.2 Планирование научно-исследовательских работ.....	19
2.2.1 Структура работ в рамках научного исследования .....	19
2.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ .....	19
2.2.3 Разработка графика проведения научного исследования .....	20
2.2.4 Бюджет научно-технического исследования .....	22
2.3 Определение потенциального эффекта разработки .....	25
Заключение по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение».....	26
3 Социальная ответственность .....	27
3.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	27
3.2 Профессиональная социальная безопасность .....	28
3.2.1 Отклонение параметров микроклимата.....	28
3.2.2 Повышенный уровень шума .....	30

3.2.3	Возможность электропоражения.....	31
3.2.4	Наличие электромагнитных полей.....	32
3.2.5	Недостаток освещения и повышенная пульсация светового потока..	33
3.2.6	Психофизиологическое воздействие .....	35
3.2.7	Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов.....	35
3.3	Экологическая безопасность.....	36
3.4	Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	36
	Заключение по разделу «Социальная ответственность» .....	37
	Заключение .....	38
	Conclusion.....	39
	Список использованных источников .....	40
	Приложение А (обязательное) Образцы кода контроллера.....	44
	Приложение Б (обязательное) Образцы автоматов Stateflow.....	46
	Приложение В (справочное) Внешний вид производства Factory I/O .....	48

## Введение

В последнее время все большее количество компаний начинает интересоваться технологиями, связанными с «Индустрией 4.0», поскольку это сокращает время и стоимость внедрения новых продуктов [33]. Исследования в области создания цифровых динамических моделей в виртуальной среде, полностью соответствующие ее физическому объекту в реальном мире, становятся возможными благодаря способности имитировать его характеристики, поведение, жизненный цикл и производительность, называемые цифровыми двойниками [30]. Код программируемого логического контроллера (ПЛК) может быть отлажен перед его использованием в реальной производственной системе. Виртуальный ввод в эксплуатацию [31] — это процесс, который позволяет провести комплексную оценку производственных систем перед выполнением физического ввода в эксплуатацию.

В данной работе представлена разработка цифрового двойника абстрактного производственного комплекса с использованием Factory I/O, реализующего физическую модель, S7-PLCSIM, симулирующий работу ПЛК, и Simulink/Stateflow, модель которого воспроизводит независимо от производства последовательность и длительность состояний отдельных операций, позволяя узнать время изготовления партии деталей произвольного объёма, что позволит оптимизировать использование имеющихся производственных мощностей. При работе цифрового двойника в реальном времени возможно осуществлять сравнение происходящих на производстве событий с цифровым двойником для обнаружения нештатных ситуаций.

## 1 Разработка цифрового двойника

### 1.1 Создание производственного комплекса

Физическая модель абстрактного производства создана в образовательной виртуальной среде Factory I/O. Производство состоит из двух станций обработки, сборщика, погрузчика и автоматизированного склада. Сырьё со входного конвейера распределяется между двумя станциями обработки. Станции обработки изготавливают из сырья составные части изделия — крышку (1-ая станция) и основание (2-ая станция). Крышка изготавливается за 6 секунд, основание — за 3 секунды [32]. Сборщик сдавливает составные части, получая готовое изделие. Готовые изделия направляются либо к выходу, либо к погрузчику в зависимости от того, какое из направлений задано на щитке. Погрузчик укладывает готовые изделия в ящики по 8 штук. Заполненные ящики отправляются на склад, вместимостью 36 ячеек. После остановки производства склад разгружается при нажатии на соответствующую кнопку на щитке.

По заданию требуется, чтобы в работе присутствовал контур автоматического управления. Единственным объектом в Factory I/O, который нуждается в стабилизации какого-либо параметра, является резервуар с жидкостью, который не участвует в процессе производства. Управляемой величиной является входной поток, задаваемые — уровень и производительность выходного насоса. На выходе имеется измеритель потока.

Планировка производственной линии составлялась с учётом:

- минимизации длины конвейерной линии;
- минимизации количества используемого оборудования и датчиков;
- вход и выход с одной и той же стороны;
- визуальной наглядности всего производства.

Схема планировки производства представлена на рисунке 1. Внешний вид производства представлен в [приложении В](#).

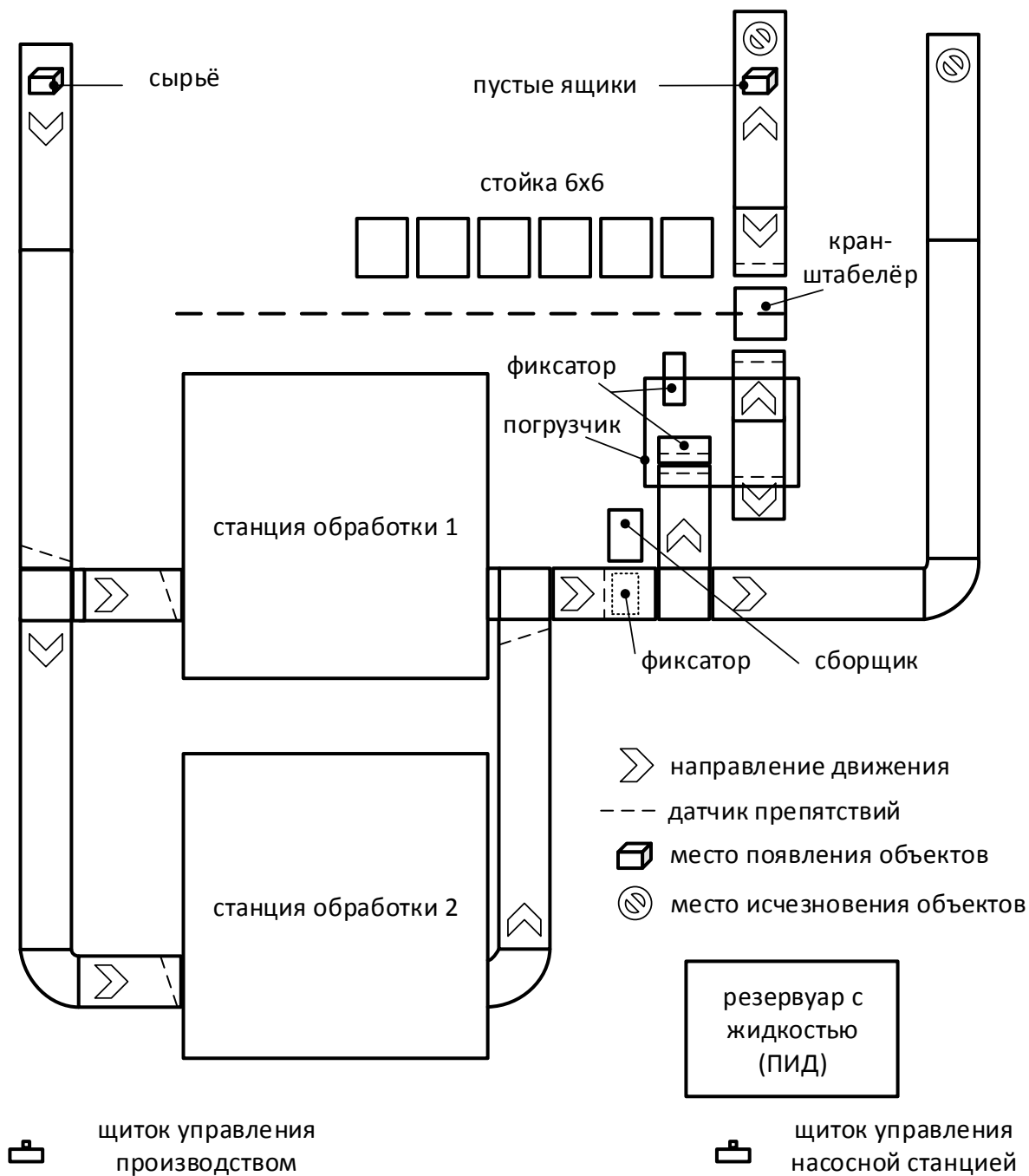


Рисунок 1 – Схема планировки производства

## 1.2 Выбор контроллерного оборудования

Среди продукции Siemens самой дешёвой серией ПЛК является S-1200. Однако, S-1200 не поддерживает язык последовательных функциональных диаграмм (SFC), без которого реализация последовательности действий сводится к созданию конечного автомата, что весьма трудоёмко.

Следующей по ценовой категории идёт серия S-300. Данная серия имеет поддержку языка SFC и ПИД-регулятор с широким функционалом.

В данной работе требуется 24/48 дискретных входов/выходов и 4/12 аналоговых входов/выходов. В таблице 1 приводится сравнение цен [29] конфигураций на базе ПЛК 312, 312с и 313с вместе с дополнительными модулями ввода/вывода. В результате сравнения самой дешёвой конфигурацией оказалась на базе CPU 313с, содержащий в себе наибольшее число встроенных модулей ввода/вывода.

Таблица 1 – Сравнение стоимости контроллерного оборудования

На базе 312	Стоим., €	На базе 312с	Стоим., €	На базе 313с	Стоим., €
6ES7 312-1AE14-0AB0	455,12	6ES7 312-5BF04-0AB0	589,96	6ES7 313-5BG04-0AB0	1 214,38
6ES7 321-1BL00-0AA0	437,32	6ES7 321-1BH02-0AA0	217,64	6ES7 322-1BL00-0AA0	604,58
6ES7 322-1BL00-0AA0	604,58	6ES7 322-1BL00-0AA0	604,58	6ES7 332-5HF00-0AB0	1 301,76
6ES7 322-8BF00-0AB0	506,89	6ES7 334-0KE00-0AB0	513,64	6ES7 332-5HB01-0AB0	436,04
6ES7 334-0KE00-0AB0	513,64	6ES7 332-5HF00-0AB0	1 301,76		
6ES7 332-5HF00-0AB0	1 301,76	6ES7 332-5HD01-0AB0	697,19		
6ES7 332-5HD01-0AB0	697,19				
Итого:	4 516,5		3 924,77		3 556,76

### 1.3 Разработка алгоритма управления

Разработка алгоритма управления осуществляется в интегрированной среде разработки TIA Portal. Участки, требующие последовательность действий, реализованы на языке последовательностных функциональных диаграмм (SFC или, в терминах TIA Portal, GRAPH). К таким участкам относятся входной сортер, сборщик, фиксатор погрузчика, погрузчик и склад. Управление сигналами на щитке, конвертация данных, аварийная остановка и счётчик

виртуального времени реализованы на языке релейно-контактных схем (LD или, в терминах TIA Portal, LAD).

Для стабилизации уровня жидкости резервуаре из всех возможных вариантов регуляторов был выбран ПИ-регулятор с обратной связью по уровню и выходному потоку. Обратная связь по выходному потоку создает упреждающее воздействие до того, как изменится уровень. Интегральная составляющая, используемая для выравнивания установленного и поддерживаемого уровней, не изменяется во времени и равна -10% от входного потока.

Регулятор и счетчик виртуального времени вызываются из блока циклического прерывания с фиксированным временем, равным 500 мс.

Образцы кода контроллера представлены в [приложении А](#).

#### 1.4 Результаты тестирования

Склад, вместимостью 288 изделий, заполняется примерно за 2,5 часа виртуального времени бесперебойной работы. Общая производительность составила 2 шт/мин.

Из-за проблем с захватом погрузчика изделия могут сорваться с погрузчика до того, как изделие достигнет заданной точки. В среднем, такое происходит 1-2 раза на 288 изделий. С целью предотвращения аварии была введена проверка, осталось ли изделие в фиксаторе после его перемещения. При выполнении условия производится полная остановка до повторного нажатия кнопки «Пуск».

Наименьшее расчетное время переходного процесса «0-100 см» при максимальном входном потоке составляет 12,6 секунд. Переходный процесс «0-100 см» длится 17 секунд и происходит при максимальном входном потоке, который начинает снижаться на отметке 70 см при отсутствии выходного потока, после чего уровень останавливается на 97 см. В динамическом режиме при

уставке 100 см уровень стремится к уставке, а перерегулирование при резком изменении выходного потока не превышает 7%.

### 1.5 Разработка модели взаимодействия производство-контроллер

Разработка модели взаимодействия производство-контроллер осуществлена в Simulink с применением расширения Stateflow. Модель представлена на рисунке 2.

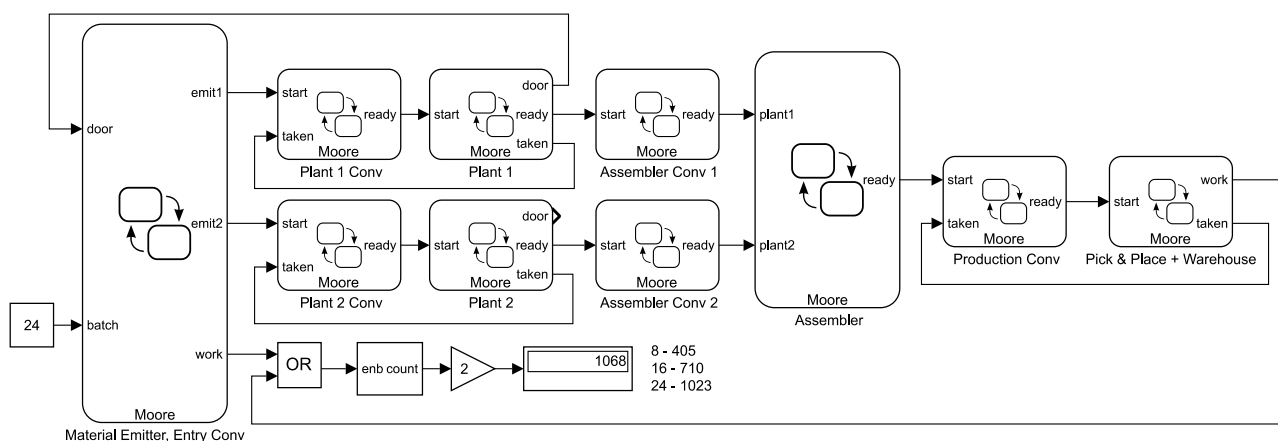


Рисунок 2 – Модель взаимодействия производство-контроллер в Simulink

Stateflow — это расширение Simulink для моделирования и симуляции комбинаторной и последовательной логики принятия решений, основанных на машинах состояний и блок-схемах [28]. Каждый из блоков Stateflow представляет собой автомат Мура, в которых события происходят последовательно. Состояния, временные интервалы и условия перехода воссоздаются точно такими же, как и при штатном режиме работы производства. Образцы автоматов представлены в [приложении Б](#).

### 1.6 Применение модели взаимодействия производство-контроллер

Модель взаимодействия производство-контроллер может использоваться в автономном режиме для определения времени изготовления партии деталей, а



в режиме реального времени — для выявления отклонений в производстве, сравнивая состояние производства и цифрового двойника.

Для определения времени изготовления партии деталей необходимо запустить симуляцию, указав в переменной «batch» размер партии, который должен быть кратен восьми из-за особенности алгоритма погрузчика. По завершению процесса симуляции на дисплее снизу отобразится затраченное время в секундах.

Для работы в режиме реального времени необходимо, чтобы модель Simulink могла получить данные о состоянии входов и выходов контроллера. Это осуществимо, например, посредством единого интерфейса Open Platform Communications (OPC). Данное применение не рассматривается в данной работе из-за возникших проблем с настройкой работы PLCSIM через OPC посредством S7ProSim.

## 2 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

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

#### 2.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Модель взаимодействия производство-контроллер производственного комплекса воспроизводит независимо от производства последовательность и длительность состояний отдельных операций, позволяя узнать время изготовления партии деталей и сравнить происходящие на производстве события с цифровым двойником, что позволит оптимизировать использование имеющихся производственных мощностей и сократить риск возникновения нештатных ситуаций. В цифровых двойниках заинтересованы крупные автоматизированные производства.

#### 2.1.2 Анализ конкурентных технических решений

В данной работе модель взаимодействия производство-контроллер реализована в MATLAB/Simulink из множества связанных между собой блоков Stateflow, каждый из которых представляет автомат Мура, отвечающий за последовательный участок производства. Схожей средой разработки является SimInTech. Функционал конечных автоматов также возможно реализовать на языках программирования (например, Python или C++).

В таблице 1 представлена оценочная карта конкурентных решений. Если на производстве уже имеется лицензия на MATLAB или SimInTech, то реализация цифрового двойника в готовых средах разработки будет обладать большей конкурентоспособностью по сравнению с реализацией на языке программирования. В противном случае, конкурентоспособность решений

примерно одинакова, где стоит выбор между стоимостью и простотой реализации.

Таблица 1 – Оценочная карта сравнения конкурентных решений

Критерии оценки	Баллы			Вес критерия	Конкурентоспособность		
	Simulink	SimInTech	Code		Simulink	SimInTech	Code
1. Дополнительные возможности	5	3	2	0,2	1	0,6	0,4
2. Быстродействие	4	4	5	0,2	0,8	0,8	1
3. Скорость разработки	5	4	1	0,3	1,5	1,2	0,3
4. Дешевизна лицензии	1	3	5	0,3	0,3	0,9	1,5
Итого	15	14	13	1	3,6	3,5	3,2

## 2.2 Планирование научно-исследовательских работ

### 2.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Для организации и систематизации работы был сформирован план работ с назначением исполнителей для каждого этапа работы. План работ содержится в таблице 2.

### 2.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Для определения трудовых затрат используются показатели ожидаемых трудоемкостей и продолжительностей этапов.

Ожидаемая трудоёмкость одного этапа

$$t_{ож\ i} = \frac{3 \cdot t_{\min} + 2 \cdot t_{\max}}{5} \text{ [человеко-дни]},$$

где  $t_{\min}$  — минимально возможная трудоемкость  $i$ -ой работы, чел.-дни,

$t_{\max}$  — максимально возможная трудоемкость  $i$ -ой работы, чел.-дни.

Продолжительность одного этапа

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i} \text{ [рабочих дней]},$$

где  $t_{ожi}$  — ожидаемая трудоемкость одного этапа, чел.-дни,

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

### 2.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

Для построения графика необходимо перевести длительности каждого этапа из рабочих дней в календарные по формуле

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}},$$

где  $T_{ki}$  — продолжительность выполнения  $i$ -й работы в календарных днях,

$T_{pi}$  — продолжительность выполнения  $i$ -й работы в рабочих днях,

$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}$  — коэффициент календарности,

$T_{\text{кал}}$  — количество календарных дней в году,

$T_{\text{вых}}$  — количество выходных дней в году,

$T_{\text{пр}}$  — количество праздничных дней в году.

Согласно производственному календарю для 6-дневной рабочей недели, в 2019 году 365 календарных дней, из них 66 выходных и праздничных дней,

следовательно,  $k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 66} = 1,22$ .

Рассчитанные трудоемкости выполнения работ представлены в таблице 2. Диаграмма Ганта представлена на рисунке 3.

Таблица 2 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоемкость работ, чел-дни			Длительность работ в рабочих днях $T_{pi}$	Длительность работ в календарных днях $T_{ki}$
	$t_{min}$	$t_{max}$	$t_{ожи}$		
	Руководитель Студент				
Выбор направления исследования	2	5	3,2	3,2	4
Календарное планирование работ	1	2	1,4	1,4	2
Подбор и изучение материалов по теме	1	2	1,4	1,4	2
Составление технического задания	1	3	1,8	0,9	2
	2	4	2,8	1,4	2
Создание производства в Factory I/O	2	5	3,2	3,2	4
Реализация алгоритма управления производством	5	8	6,2	6,2	8
Отладка и корректировка производства и алгоритма управления	10	15	12	12	15
Разработка модели взаимодействия производство-контроллер	3	5	3,8	3,8	5
Выбор контроллерного оборудования	1	3	1,8	1,8	3
Финансовые расчеты	3	5	3,8	3,8	5
Вопросы безопасности и экологичности проекта	4	6	4,8	4,8	6
Оценка эффективности полученного решения	1	2	1,4	1,4	2
Составление пояснительной записки	2	4	2,8	2,8	4
Итого				4,1	6
				44	58

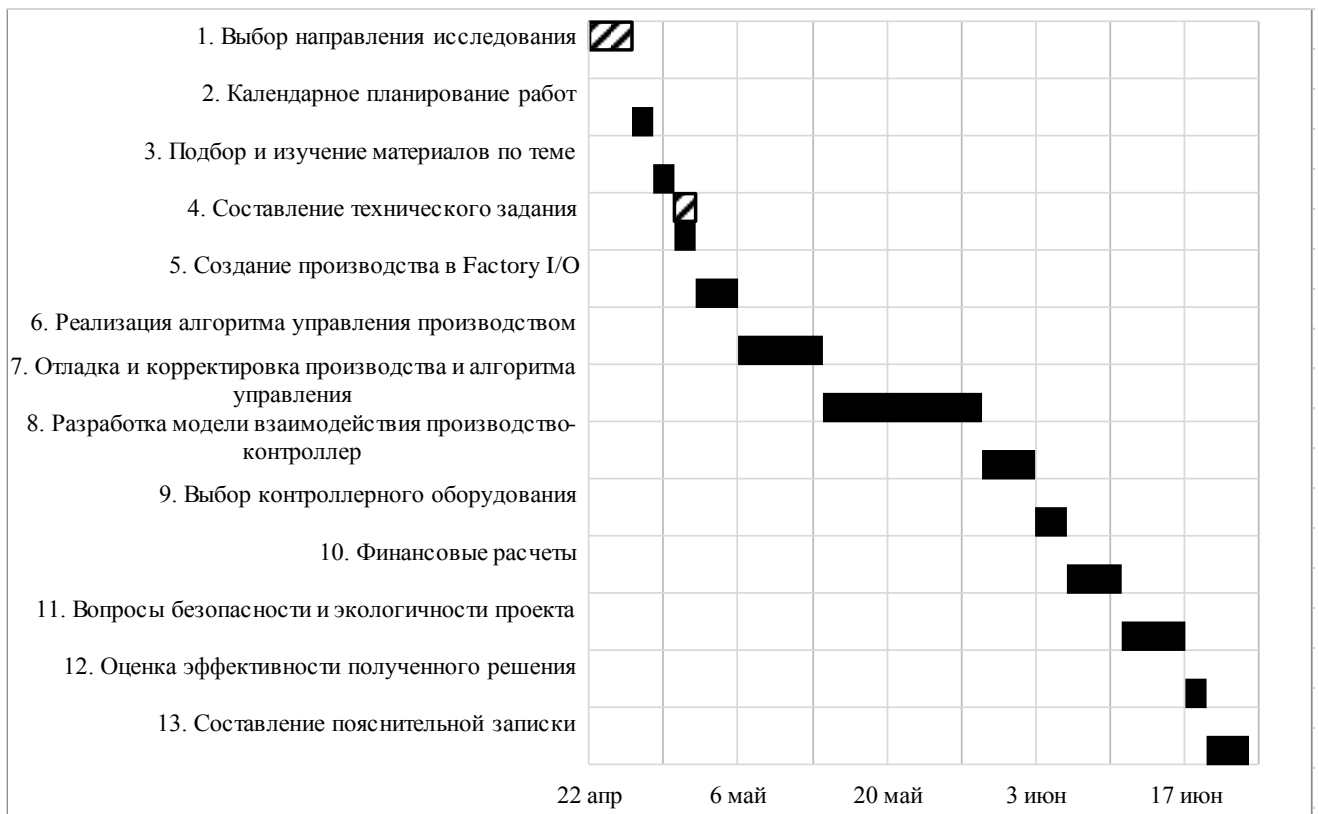


Рисунок 3 – Календарный план-график проведения работ

#### 2.2.4 Бюджет научно-технического исследования

В затраты на специальное оборудование для экспериментальных работ входит амортизация используемого оборудования. При выполнении работы использовался персональный компьютер, первоначальная стоимость которого 29 500 руб. Персональный компьютер относится ко второй амортизационной группе со сроком полезного использования до 3 лет. Персональный компьютер планируется использовать 2 месяца. Тогда:

$$\text{норма амортизации } A_H = \frac{1}{n} \cdot 100\% = 33,3\% ,$$

$$\text{годовые амортизационные отчисления } A_G = 29\,500 \cdot 0,333 = 9\,824 \text{ руб.} ,$$

$$\text{ежемесячные амортизационные отчисления } A_M = 9\,824 / 12 = 819 \text{ руб.} ,$$

$$\text{итоговая сумма амортизации основных средств } A = 819 \cdot 2 = 1\,638 \text{ руб.}$$

Основная заработная плата исполнителей включает премии и доплаты для исполнителей проекта. Месячный оклад доцента со степенью кандидата наук

составляет 26 300 рублей, для студента был взят оклад ассистента без научной степени 17 000 рублей.

Месячный должностной оклад

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

где  $Z_{TC}$  — заработная плата по тарифной ставке, руб.,

$k_{пр}$  — премиальный коэффициент,

$k_d$  — коэффициент доплат и надбавок,

$k_p$  — районный коэффициент.

Среднедневная заработная плата

$$Z_{дн} = \frac{Z_M \cdot M}{F_d},$$

где  $Z_M$  — месячный должностной оклад работника, руб.,

$M = 10,4$  — количество месяцев работы без отпуска в течение года при отпуске в 48 раб. дней месяца для 6-дневной рабочей недели,

$F_d$  — действительный годовой фонд рабочего времени, раб. дн. (таблица 3).

Таблица 3 – Баланс рабочего времени для 6-дневной недели

Показатели рабочего времени	Дни
Календарные дни	365
Нерабочие дни (праздники/выходные)	66
Потери рабочего времени (отпуск/невыходы по болезни)	56
Действительный годовой фонд рабочего времени	243

Основная заработная плата

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p,$$

где  $T_p$  — продолжительность работ в раб. дн.

Результаты расчетов сведены в таблицу 4.

Таблица 4 – Основная заработная плата исполнителей

Исполнитель	$Z_{TC}$	$k_{пр}$	$k_d$	$k_p$	$Z_M$ , руб.	$Z_{дн}$ , руб.	$T_p$ , раб. дни	$Z_{осн}$ , руб.
Руководитель	26 300	0,3	0,2	1,3	51 285	2 194,91	4,1	8 999,13
Студент	17 000				33 150	1 418,77	44	62 425,88
Итого								71 425,01

Для предоставления ежегодного оплачиваемого отпуска вводится дополнительная заработная плата

$$Z_{\text{доп}} = Z_{\text{осн}} \cdot k_{\text{доп}},$$

где  $k_{\text{доп}} = 0,12$  — коэффициент дополнительной заработной платы.

В отчисления во внебюджетные фонды включаются пенсионное, социальное и медицинское страхования. Отчисления во внебюджетные фонды

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

где  $k_{\text{внеб}}$  — суммарный тариф страховых взносов. Согласно подпункта 1 пункта 2 статьи 427 НК РФ N 117-ФЗ (ред. от 06.06.2019) для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность, используется пониженная ставка  $20 + 2,9 + 5,1 = 28\%$ .

Накладные расходы учитывают затраты, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать документов, оплата услуг Интернет-провайдера и общественного транспорта, электроэнергии. Накладные расходы

$$Z_{\text{накл}} = k_{\text{нр}} \cdot \sum Z_i,$$

где  $k_{\text{нр}}$  — доля накладных расходов, принятый за 5 %.

Рассчитанные величины затрат научно-исследовательской работы являются основой для формирования бюджета проекта. Итоговый бюджет представлен в таблице 5.

Таблица 5 – Бюджет разработки

Затраты на	Сумма, руб.	Удельный вес, %
амортизацию	1 638,00	1,5
основную заработную плату	71 425,01	65,4
дополнительную заработную плату	8 571,00	7,8
отчисления во внебюджетные фонды	22 398,88	20,5
накладные расходы	5 201,64	4,8
Общий бюджет	109 234,53	100,0



## 2.3 Определение потенциального эффекта разработки

Интегральный финансовый показатель  $i$ -го варианта исполнения разработки

$$I_{\text{фин.р}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}},$$

где  $\Phi_{pi}$  — стоимость  $i$ -го варианта исполнения,

$\Phi_{\text{max}}$  — максимальная стоимость исполнения.

Стоимости вариантов исполнения зависят от стоимости лицензии используемого программного обеспечения и затрачиваемого на разработку времени при данных инструментах разработки. Оценочная карта относительных финансовых затрат конкурентных решений приведена в таблице 6.

Таблица 6 – Оценочная карта относительных финансовых затрат конкурентных решений

Критерии оценки	Баллы			Вес критерия	Относительные затраты		
	Simulink	SimInTech	Code		Simulink	SimInTech	Code
1. Время разработки	1	2	5	0,5	0,5	1	2,5
2. Стоимость лицензий	5	3	1	0,5	2,5	1,5	0,5
Итого	21	19	19	1	3	2,5	3

Интегральный показатель ресурсоэффективности  $i$ -го варианта исполнения разработки

$$I_{\text{р-исп.}i} = \sum_i^n a_i b_i,$$

где  $a_i$  — весовой коэффициент  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$b_i$  — бальная оценка  $i$ -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

$n$  — число параметров сравнения.

В таблице 7 интегральные показатели ресурсоэффективности приведены из таблицы 1 без учёта стоимости лицензий и скорости разработки.

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки

$$I_{\text{исп.}i} = \frac{I_{\text{р-исп.}i}}{I_{\text{фин.р}}}$$

Сравнительная эффективность разработки представлена в таблице 7.

Таблица 7 – Сравнительная эффективность разработки

Показатели	Simulink	SimInTech	Code
Относительная стоимость	3	2,5	3
Интегральный финансовый показатель	1,00	0,83	1,00
Интегральный показатель ресурсоэффективности	1,80	1,40	1,40
Интегральный показатель эффективности	1,80	1,68	1,40
Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,07	0,93	0,78
	1,29	1,20	0,83

Заключение по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

За счет скорости разработки Simulink выигрывает по интегральному показателю эффективности по сравнению с остальными инструментами разработки. Длительность разработки составляет 62 календарных дней (период с 22.04.2019 по 23.06.2019), при этом бюджет был оценен в 109 234,53 рублей. Цифровой двойник производственного комплекса позволит оптимизировать использование имеющихся производственных мощностей и сократить риск возникновения нештатных ситуаций.

### 3 Социальная ответственность

В данном разделе приводятся анализ вредных и опасных факторов труда, разработка мер защиты от вредных и опасных производственных факторов для проектируемого рабочего места в соответствии с требованиями нормативно-технической документации и рекомендации по созданию оптимальных условий труда и охране окружающей среды. Проведение мероприятий по снижению негативных воздействий позволит сохранить здоровье персонала и состояние окружающей среды в целом, повысить производительность труда и сократить выплаты на компенсацию за работу во вредных и (или) опасных условиях труда.

Цель выпускной квалификационной работы — разработка цифрового двойника абстрактного производственного комплекса с применением Factory I/O, S7-PLCSIM и Simulink/Stateflow. Данная работа применима к крупным автоматизированным производствам. Создание цифрового двойника производственного комплекса позволит сократить время выпуска продукции и риск возникновения нештатных ситуаций.

Проектируемым рабочим местом является диспетчерский пункт. Оператор будет работать с ПЭВМ в положении сидя за рабочим столом и следить за состоянием производства по мнемосхеме с дисплея ПЭВМ.

#### 3.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Согласно Статьям 91 и 108 ТК РФ, регламентированное время продолжительности рабочего времени не должно превышать 40 часов в неделю, в течение рабочего дня работодатель обязан предоставить работнику перерыв для отдыха и питания от 30 минут до 2 часов.

Статья 109 ТК РФ предусматривает предоставление специальных перерывов в течение рабочего времени. В соответствии со Ст. 106 ТК РФ время

отдыха — это свободное от исполнения трудовых обязанностей время, которое работник может использовать по своему усмотрению.

Обязанности по обеспечению безопасных условий и охраны труда возлагаются на работодателя и отражены в Ст. 212 ТК РФ.

Среди органов, осуществляющих контроль и надзор в организациях, имеются Федеральная инспекция труда, Федеральная служба по труду и занятости населения, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека и другие.

Общие требования к организации и оборудованию рабочих мест с ПЭВМ даны в СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 [14]. Рабочее место должно быть организовано с учетом эргономических требований ГОСТ 12.2.032-78 [8] и ГОСТ 22269-76 [11]. Эргономические требования к креслу оператора должны соответствовать ГОСТ 21889-76 [10].

### 3.2 Профессиональная социальная безопасность

Перечень опасных и вредных факторов, характерных для проектируемой производственной среды, согласно ГОСТ 12.0.003-2015 [1], представлен в таблице 8.

#### 3.2.1 Отклонение параметров микроклимата

На показатели микроклимата, прежде всего, влияют погодные условия и климат. Температура помещения зависит от состояния теплоизоляции помещения и наличия источников тепла таких, как нагретые поверхности оборудования и трубопроводов. Источниками влажности являются участки, где вода или пар сообщается с открытым воздухом, и организм работающего. Подвижность воздуха возникает при вентиляции (естественной и/или искусственной), при неравномерном нагреве воздуха, а также за счет устройств воздушного охлаждения и движущихся частей оборудования.

Таблица 8 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Нормативные документы
1. Отклонение показателей микроклимата	СанПиН 2.2.4.3359-16 [15], СанПиН 2.2.4.548-96 [13], СП 60.13330.2016 [19], ГОСТ 12.1.005-88 [3]
2. Повышенный уровень шума	СанПиН 2.2.4.3359-16 [15], СН 2.2.4/2.1.8.562-96 [16], СП 51.13330.2011 [17], ГОСТ 12.1.003-2014 [2], ГОСТ 12.1.029-80 [6]
3. Возможность электропоражения	ТОИ Р-45-084-01 [20], ГОСТ 12.1.019-2017 [5], ГОСТ 12.1.030-81 [7], ГОСТ 12.1.038-82 [9]
4. Наличие электромагнитных полей	СанПиН 2.2.4.3359-16 [15], ГОСТ 12.1.006-84 [4]
5. Недостаток освещения и повышенная пульсация светового потока	СанПиН 2.2.4.3359-16 [15], СП 52.13330.2016 [18], СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 [14]
6. Психофизиологическое воздействие	ТОИ Р-45-084-01 [20], СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 [14]

Высокая температура воздуха способствует быстрой утомляемости, может привести к перегреву организма. Низкая температура воздуха может вызвать местное и (или) общее охлаждение организма, стать причиной простудного заболевания, обморожения. Высокая относительная влажность при высокой температуре воздуха способствует перегреванию организма. При низкой температуре воздуха повышенная влажность усиливает теплоотдачу с поверхности кожи и способствует переохлаждению организма. Недостаточный воздухообмен ослабляет внимание, вызывает нервозность, раздражительность. Высокая подвижность воздуха (сквозняки) вызывает простудные заболевания.

Оптимальные показатели микроклимата на рабочих местах производственных помещений для категории работ 1б приведены в таблице 9 из СанПиН 2.2.4.3359-16 [15].

Таблица 9 – Оптимальные показатели микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	1б (140-174 Вт)	21 ÷ 23	20 ÷ 24	60 ÷ 40	0,1
Теплый		22 ÷ 24	21 ÷ 25	60 ÷ 40	0,1

К средствам нормализации воздушной среды относятся устройства отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, а также изолирование помещения от не желаемых источников путем герметизации и теплоизоляции.

### 3.2.2 Повышенный уровень шума

Источниками шума в производственной среде являются вибрирующие поверхности машин, пневматическое, ударное, режущее и точильное оборудование, вентиляторы, выпуск газа под большим давлением. Источниками шума в рабочем помещении является персонал и ПЭВМ.

Шум снижает производительность труда, особенно при выполнении точных работ, затрудняет восприятие опасности, снижает разборчивость речи. Длительное воздействие шума может вызвать быструю утомляемость, головную боль, тугоухость, гипертонию. При воздействии инфразвука нарушается нормальная деятельность сердца, легких, желудка, возможны паралич, обморок, остановка сердца. Внезапные шумы высокой интенсивности, даже кратковременные (взрывы, удары и т.п.), могут вызвать как головокружение, звон в ушах, так и физические повреждения барабанной перепонки, среднего уха и улитки.

Нормативным эквивалентным уровнем звука на рабочих является 80 дБА. Зоны с уровнем звука выше 80 дБ должны быть обозначены знаками безопасности, а работающих в этих зонах необходимо обеспечить средствами индивидуальной защиты органов слуха. Максимальные уровни звука А,

измеренные с временными коррекциями S и I, не должны превышать 110 дБА и 125 дБА соответственно. Запрещается кратковременное пребывание в зонах с октавными уровнями звукового давления выше 135 дБ в любой октавной полосе. Пиковый уровень звука C не должен превышать 137 дБС.

Снижение воздействия шума может быть достигнуто правильной планировкой, при которой шумные участки производства располагают вдали от персонала, звукоизоляцией помещений с персоналом, применением звукоизоляционных кожухов и экранов для шумных механизмов и наушников для персонала при выходе в шумную зону.

### 3.2.3 Возможность электропоражения

Опасность поражения электрическим током появляется при несоблюдении мер безопасности и при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением в случае нарушения изоляции токоведущих частей.

Электропоражение сопровождается судорожными сокращениями мышц, при котором может произойти остановка дыхания и сердца, а также, в зависимости от условий, степени и длительности поражения, термическим ожогом, разложением органических жидкостей, расслоению ткани и поражением глаз.

Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов при аварийном режиме производственных электроустановок напряжением до 1000 В с глухозаземленной или изолированной нейтралью и выше 1000 В с изолированной нейтралью не должны превышать значений, указанных в таблице 10 из ГОСТ 12.1.038-82 [9].

Таблица 10 – Предельно допустимые уровни напряжения и токов

Род тока	Нормируемая величина	Предельно допустимые значения, не более, при продолжительности воздействия тока $I$ , с											
		0,01-0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	Св. 1,0
Переменный 50 Гц	$U$ , В	550	340	160	135	120	105	95	85	75	70	60	20
	$I$ , мА	650	400	190	160	140	125	105	90	75	65	50	6
Постоянный	$U$ , В	650	500	400	350	300	250	240	230	220	210	200	40
	$I$ , мА												15

Для обеспечения электробезопасности необходимо применять защитное заземление, использовать низковольтное оборудование, точно соблюдать правила технической эксплуатации электроустановок, следить за состоянием изоляции электрических проводов, исключить случайное прикосновение к токоведущим частям.

### 3.2.4 Наличие электромагнитных полей

Источниками электромагнитных полей являются дисплеи (например, от импульсного преобразователя напряжения), и системный блок ПЭВМ (например, от тактового генератора частоты).

Длительное действие электромагнитных полей радиочастотного диапазона умеренной интенсивности влияет на биофизические процессы. Наиболее чувствительны к их воздействию центральная нервная и сердечно-сосудистая системы. У людей появляются головные боли, гипотония, повышается утомляемость, изменяется проводимость сердечной мышцы, наблюдаются выпадение волос, ломкость ногтей, возможны незначительные и нестойкие изменения в крови.

Предельно допустимые уровни электромагнитных полей на рабочих местах пользователей ПК представлены в таблице 11 из СанПиН 2.2.4.3359-16 [15].



Таблица 11 – Предельно допустимые уровни электромагнитных полей на рабочих местах пользователей ПК

Наименование параметров		ПДУ
Напряженность электрического поля	5 Гц – < 2 кГц	25 В/м
	2 кГц – < 400 кГц	2,5 В/м
Напряженность магнитного поля	5 Гц – < 2 кГц	250 нТл
	2 кГц – < 400 кГц	25 нТл
Плотность потока энергии	300 МГц – 300 ГГц	10 мкВт/см
Напряженность электростатического поля		15 кВ/м

Одной из существенных мер защиты от действия на человека электромагнитного излучения является дистанцирование (наибольшее возможное удаление). Среди технических средств защиты имеются отражатели и поглотители мощности. Среди средств индивидуальной защиты имеются очки со спектральными фильтрами. При использовании жидкокристаллических дисплеев с ШИМ-регуляцией яркости следует, по возможности, установить максимальную яркость. Современные материнские платы ПЭВМ обладают функцией расширения спектра (spread spectrum), находящаяся в настройках базовой системы ввода-вывода (BIOS), снижающая пиковую амплитуду сигналов тактового генератора частоты.

### 3.2.5 Недостаток освещения и повышенная пульсация светового потока

Естественное освещение положительно влияет на зрение, тонизирует организм человека и оказывает благоприятное психологическое воздействие. При недостаточном естественном освещении или в темное время суток применяется искусственное освещение.

Источниками пульсаций светового потока являются дисплей и осветительные приборы (например, люминесцентные лампы). Пульсации освещенности при работе с неподвижными поверхностями вызывают быстрое утомление зрения и головную боль.

Помещения, в которых работающий находится более 50% рабочего времени или более 2 часов непрерывно, должны иметь естественное освещение. Требования к освещению рабочих мест в залах ЭВМ приведены в таблице 12 из приложения 9 к СанПиН 2.2.4.3359-16 [15]. Требования к освещению на рабочих местах, оборудованных ПЭВМ, приведены в таблице 13 из СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 [14].

Таблица 12 – Требования к освещению рабочих мест в залах ЭВМ

Рабочая поверхность и плоскость нормирования КЕО и освещенности (Г - горизонтальная, В - вертикальная) и высота плоскости над полом, м		Г-0,8		Экран монитора:	В-1,2
Естественное освещение	КЕО, %	при верхнем или комбинированном освещении		3,5	–
		при боковом освещении		1,2	–
Совмещенное освещение	КЕО, %	при верхнем или комбинированном освещении		2,1	–
		при боковом освещении		0,7	–
Искусственное освещение	Освещенность, лк	при комбинированном освещении	всего	500	–
			от общего	300	–
	при общем освещении		400	Не более 200	
	Объединенный показатель дискомфорта, UGR, не более		14	–	
	Коэффициент пульсации освещенности, %, не более		5	–	

Таблица 13 – Требования к освещению на рабочих местах, оборудованных ПЭВМ

Освещенность на экране ПЭВМ	Не выше 300 лк
Блики на экране	Не выше 40 кд/м <sup>2</sup>
Прямая блескость источника света	200 кд/м <sup>2</sup>
Отношение ярости между рабочими поверхностями (и поверхностями стен)	3:1-5:1 (10:1)

Ограничение пульсаций освещения достигается равномерным чередованием питания ламп от различных фаз трехфазной сети. При

использовании жидкокристаллических дисплеев с ШИМ-регуляцией яркости следует, по возможности, установить максимальную яркость.

### 3.2.6 Психофизиологическое воздействие

Психофизиологическое воздействие на оператора ПЭВМ связано с монотонностью труда, напряженностью внимания и статической рабочей позой.

Длительное сосредоточение внимания создает зрительное утомление. Монотонность труда вызывает снижение зрительного восприятия, концентрации внимания. Статическая рабочая поза вызывает гиподинамию, проблемы с опорно-двигательным аппаратом, кровообращением, дыханием, пищеварением и др.

Перерывы установлены в ТОО Р 45-084-01 [20]. Во время перерывов следует выполнять специальную гимнастику для снятия напряжения с глаз, представленную в Приложении 8 к СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 [14]. Выполнять какую-либо работу во время перерыва нельзя, так как перерыв приравнивается к времени отдыха. Продолжительность непрерывной работы на ПЭВМ не должна превышать 2-х часов. Для оператора ПЭВМ при работе по считыванию информации с дисплея с предварительным запросом, не свыше 60000 считываемых знаков за смену, перерыв предоставляется два раза по 15 минут через два часа после начала работы и перерыва на обед. Если рабочая смена длится 12 часов, время регламентированных перерывов при работе на ПЭВМ за 8 часов работы предоставляется в вышеуказанном порядке, а за оставшиеся 4 часа — 15 минут за каждый час.

### 3.2.7 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов

ПЭВМ является источниками шума, электромагнитного излучения и пульсирующего светового потока. Шум системы охлаждения компьютера

возможно снизить за счет уменьшения частоты вращения вентиляторов до минимально необходимого для недопущения перегрева, либо заменой радиаторов с меньшим коэффициентом теплового сопротивления радиатор-среда. Для защиты от электромагнитного излучения рекомендуется расположить системный блок на удалении от рабочего места и использовать функцию материнской платы Spread Spectrum, находящуюся в настройках BIOS. В дневное время установить максимальную яркость жидкокристаллического дисплея для исключения работы ШИМ-регуляции и, как следствие, пульсации подсветки. Проводить проветривание помещения после каждого часа работы на ПЭВМ. Выполнять специальную гимнастику для снятия напряжения с глаз.

### 3.3 Экологическая безопасность

Воздействие на литосферу происходит при утилизации компьютера. Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» [22] запрещает юридическим лицам самовольно избавляться от опасных отходов. Утилизация осуществляется сертифицированными учреждениями. Обращение с отходами регламентируется ГОСТ Р 53692-2009 «Ресурсосбережение. Обращение с отходами» [12].

### 3.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Наиболее вероятной чрезвычайной ситуацией при разработке алгоритма является пожар на рабочем месте. В качестве противопожарных мероприятий должны быть применены следующие меры:

- Недопущение использования неисправного оборудования;
- Ознакомление сотрудников с правилами пожарной безопасности;
- Сотрудники должны знать место нахождения средств пожаротушения, связи и номера экстренных служб.

При возникновении пожара:

- Сообщить о нем руководителю, постараться устранить очаг возгорания имеющимися силами при помощи первичных средств пожаротушения;
- Привести в действие ручной пожарный извещатель, если очаг возгорания потушить не удастся;
- Сообщить о возгорании в службу пожарной охраны, сообщить адрес, место и причину возникновения пожара;
- Принять меры по эвакуации людей;
- Встретить пожарную охрану, при необходимости сообщить всю необходимую информацию и оказать помощь при выборе наилучшего подхода к очагу возгорания.

#### Заключение по разделу «Социальная ответственность»

В ходе выполнения работы над разделом «Социальная ответственность» были выявлены опасные и вредные факторы, воздействию которых может подвергнуться исследователь и оператор, был проведен анализ нормативной документации. Был предложен ряд мер для исключения или уменьшения влияния опасных и вредных факторов на человека и окружающую среду. Согласно Федеральному закону "О специальной оценке условий труда" [23] условия труда являются допустимыми.

## Заключение

В ходе проделанной работы был разработан цифровой двойник абстрактного производственного комплекса с использованием Factory I/O, S7-PLCSIM и Simulink/Stateflow. Factory I/O и S7-PLCSIM позволили произвести отладку кода программируемого логического контроллера и комплексную оценку производственных систем. Simulink/Stateflow позволил определить время изготовления произвольной партии деталей, не прибегая к медленному взаимодействию Factory I/O и S7-PLCSIM. Simulink является конкурентоспособной средой для разработки модели взаимодействия производство-контроллер в сравнении с SimInTech или реализацией на языке программирования.

## Conclusion

In the course of this work, a digital twin of the abstract industrial complex was developed using Factory I/O, S7-PLCSIM and Simulink/Stateflow. Factory I/O and S7-PLCSIM made it possible to debug the programmable logic controller code and comprehensively evaluate production systems. Simulink/Stateflow allowed determining the time of manufacture of an arbitrary batch of parts, without resorting to the slow interaction of the Factory I/O and S7-PLCSIM. Simulink is a competitive environment for developing a production-controller interaction model in comparison with SimInTech or a programming language implementation.

## Список использованных источников<sup>1</sup>

1. ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
2. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности
3. ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (с Изменением N 1)
4. ГОСТ 12.1.006-84 ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля (с Изменением N 1)
5. ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты
6. ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ. Средства и методы защиты от шума. Классификация
7. ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление (с Изменением N 1)
8. ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования
9. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов (с Изменением N 1)
10. ГОСТ 21889-76 Система "Человек-машина". Кресло человека-оператора. Общие эргономические требования (с Изменением N 1)
11. ГОСТ 22269-76 Система "Человек-машина". Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места. Общие эргономические требования
12. ГОСТ Р 53692-2009 Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Этапы технологического цикла отходов

---

<sup>1</sup> Интернет-ресурсы действительны на момент написания данной работы (18.06.2019)



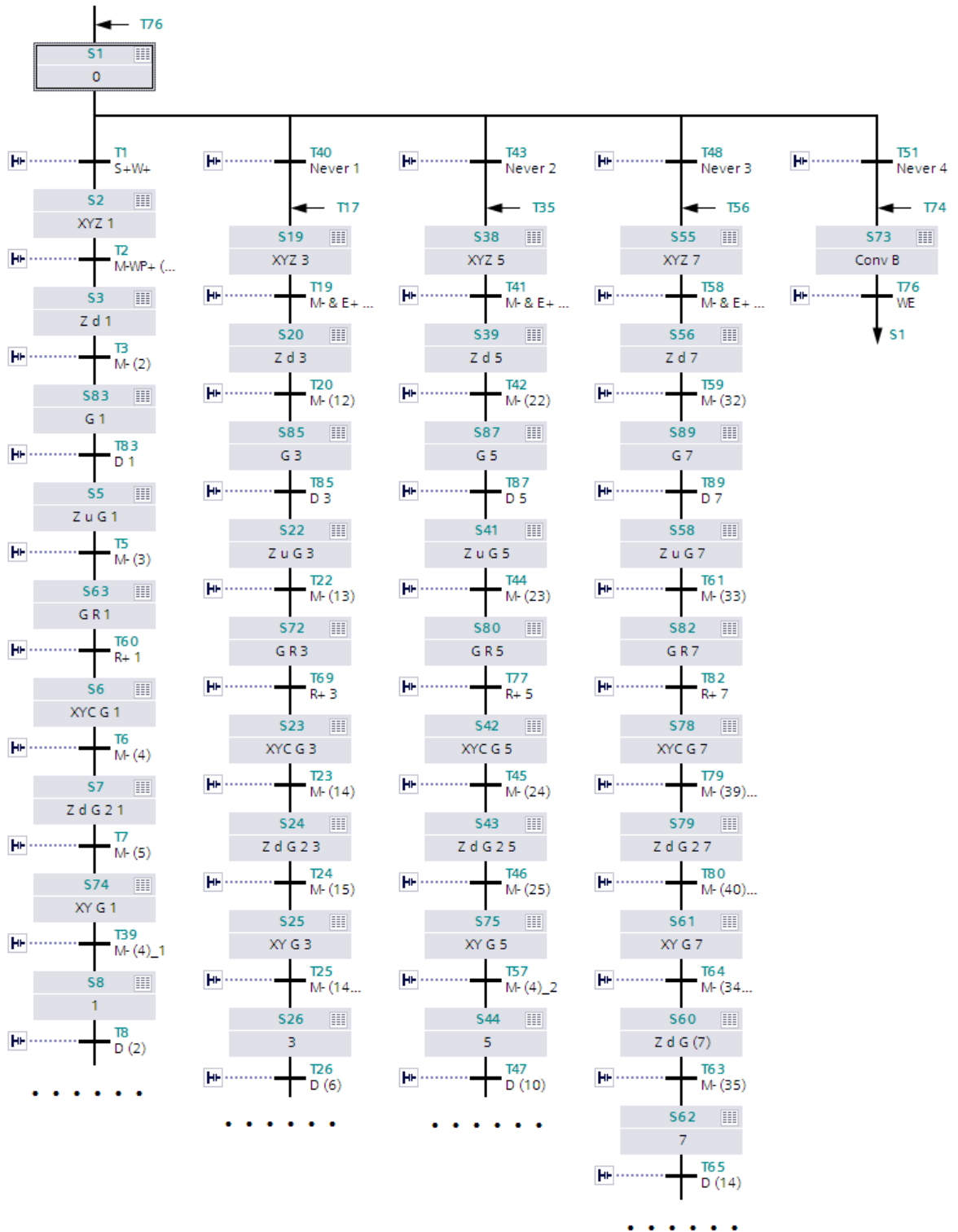
13. СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений
14. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 "Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы" (с изменениями на 21 июня 2016 года)
15. СанПиН 2.2.4.3359-16 "Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах"
16. СН 2.2.4/2.1.8.562-96 Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Санитарные нормы
17. СП 51.13330.2011 Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003 (с Изменением N 1)
18. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95
19. СП 60.13330.2016 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003
20. ТОИ Р-45-084-01 Типовая инструкция по охране труда при работе на персональном компьютере
21. «Трудовой кодекс Российской Федерации» от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 01.04.2019)
22. Федеральный закон "Об отходах производства и потребления" от 24.06.1998 N 89-ФЗ (с изменениями на 25 декабря 2018 года)
23. Федеральный закон "О специальной оценке условий труда" от 28.12.2013 N 426-ФЗ (с изменениями на 27 декабря 2018 года)
24. Белов, Сергей Викторович. Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды (техносферная безопасность) : учебник для академического бакалавриата / С. В. Белов. - 5-е изд., перераб. и доп. — Москва: Юрайт ИД Юрайт, 2015. — 703 с. URL: <http://catalog.lib.tpu.ru/catalogue/advanced/document/RU%5CTPU%5Cbook%5C315981>

25. Безопасность жизнедеятельности. Безопасность технологических процессов и производств. Охрана труда: учебное пособие для вузов / П.П. Кукин и др. — 5-е изд., стер. — М.: Высшая школа, 2009. — 335 с. URL: <http://catalog.lib.tpu.ru/catalogue/advanced/document/RU%5CTPU%5Cbook%5C164153>
26. Давыдов, Борис Ильич. Биологическое действие, нормирование и защита от электромагнитных излучений / Б. И. Давыдов, В. С. Тихончук, В. В. Антипов. — Москва: Энергоатомиздат, 1984. — 177 с.: ил.: 21 см. URL: <http://catalog.lib.tpu.ru/catalogue/simple/document/RU%5CTPU%5Cbook%5C319317>
27. Авраамов, Ю. С. Защита человека от электромагнитных воздействий / Ю. С. Авраамов, Н. Н. Грачев, А. Д. Шляпин. — Москва: Изд-во МГИУ, 2002. — 232 с.: ил. — Это важно знать!. — Библиогр.: с. 227-231. URL: <http://catalog.lib.tpu.ru/catalogue/simple/document/RU%5CTPU%5Cbook%5C113470>
28. Stateflow — конечные автоматы и управляющая логика для Simulink // Центр компетенций Mathworks. — URL: <https://matlab.ru/products/stateflow>
29. Поиск по заказному номеру // Симатик-Маркет. — URL: <http://simatic-market.ru/search/>
30. Cunbo Zhuang (2018). Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor / Cunbo Zhuang, Jianhua Liu, Hui Xiong // INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY, 96, pp. 1149-1163.
31. Heidari, A., Salamon O (2012). Virtual Commissioning of an Existing Manufacturing Cell at Volvo Car Corporation Using DELMIA V6, Master's Thesis in the Master Degree Programme Systems, Control and Mechatronics Automation Group, Department of Signals and Systems CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Goteborg, Sweden 2012, Report No. EX023/2012.

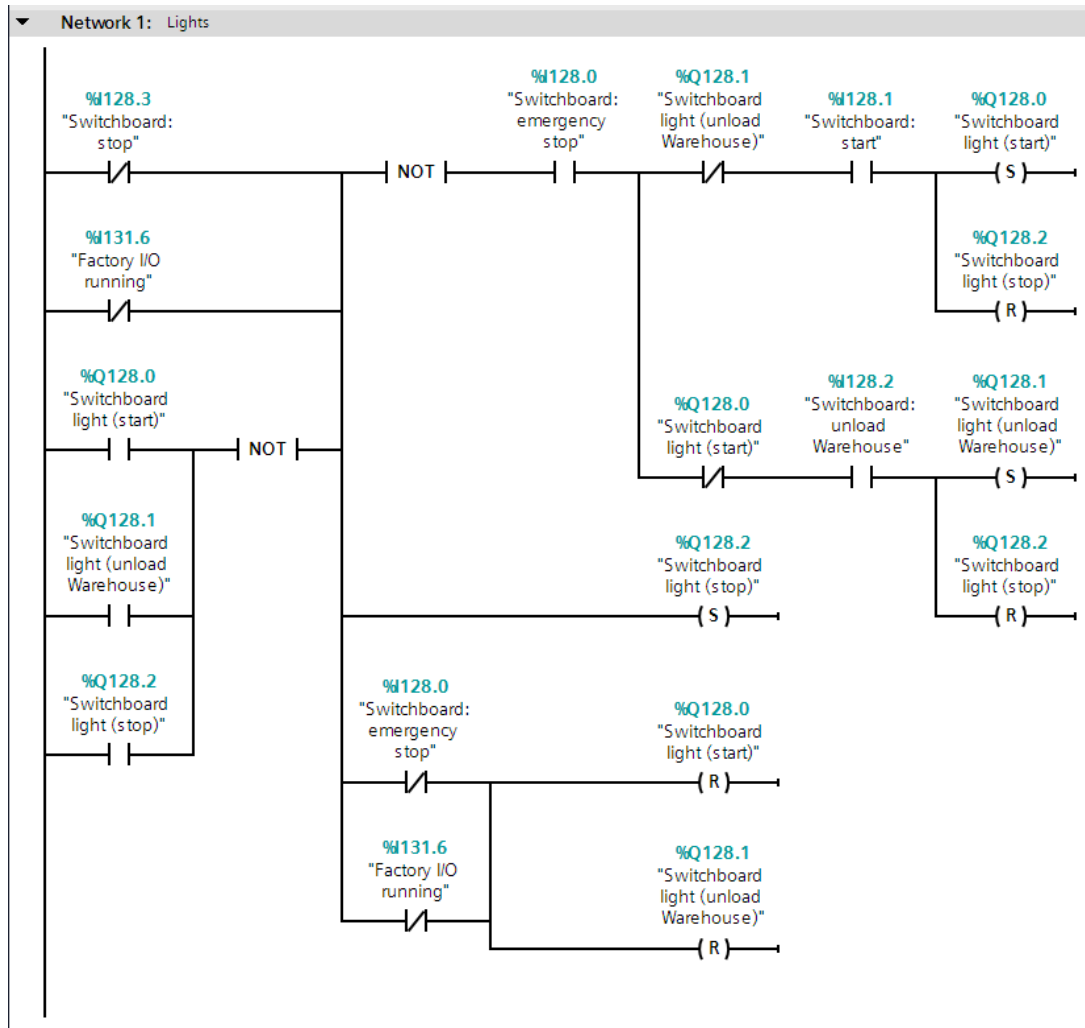
32. Items // FACTORY I/O Docs. — URL: <http://factoryio.com/docs/manual/>
33. Industry 4.0 and the digital twin // Deloitte Insights. — URL: <https://www2.deloitte.com/insights/us/en/focus/industry-4-0/digital-twin-technology-smart-factory.html>

Приложение А  
(обязательное)  
Образцы кода контроллера

Пример кода погрузчика на языке SFC



## Образец кода сигнальных ламп щитка на языке LD

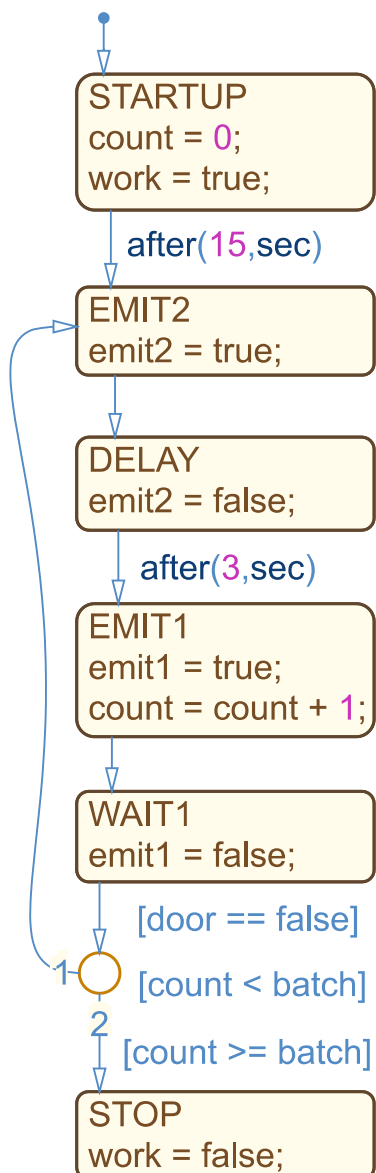


# Приложение Б

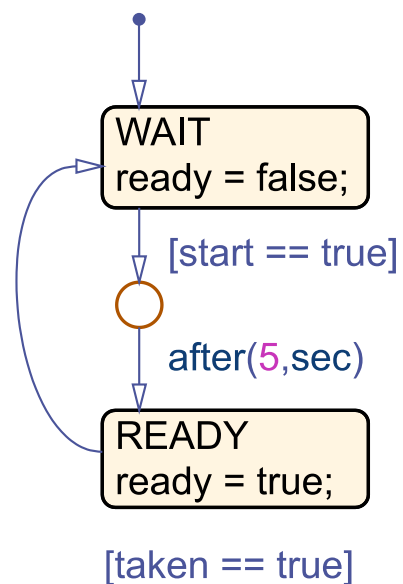
(обязательное)

## Образцы автоматов Stateflow

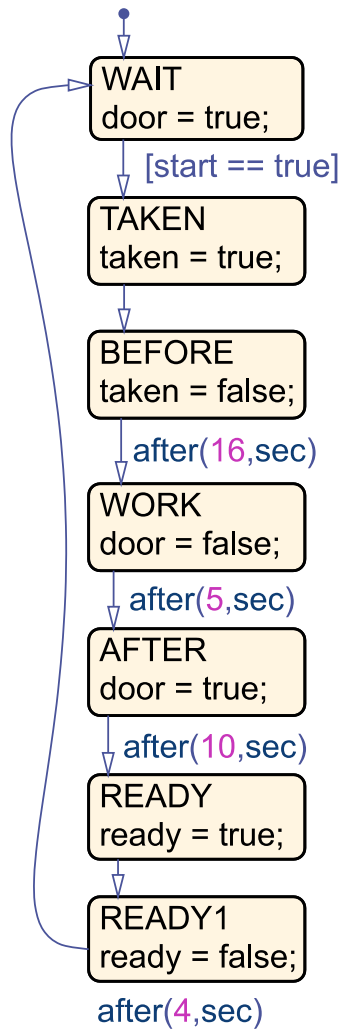
Material Emitter, Entry Conv



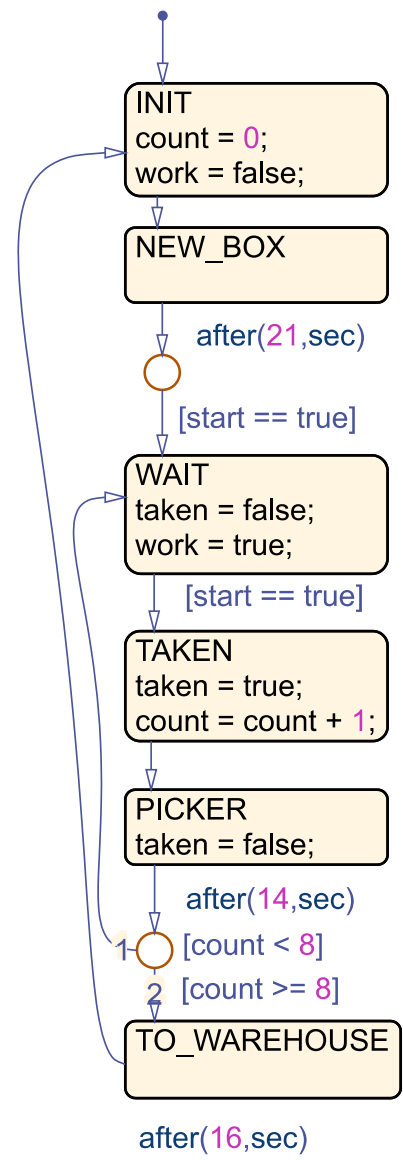
Plant 1 Conv



### Plant 1



### Pick & Place + Warehouse



## Приложение В

(справочное)

### Внешний вид производства Factory I/O

