

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
Противоаварийная защита газовых распределительных станций

УДК 662.767-5

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8TM81	Шадрин Дмитрий Владимирович		3.06.2020

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Громаков Евгений Иванович	к.т.н.		3.06.2020

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Конотопский Владимир Юрьевич	к.экон.н.		3.06.2020

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ШБИП	Горбенко Михаил Владимирович	к.т.н.		3.06.2020

По разделу на иностранном языке

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ОИЯ ШБИП	Пичугова Инна Леонидовна	—		3.06.2020

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Ефимов Семен Викторович	к.т.н.		3.06.2020

Томск – 2020 г.

## Результаты обучения по ООП

Код рез-та	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Профессиональные</i>		
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 <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
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 <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
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 <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
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 <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
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 отечественного и зарубежного опыта, уметь критически оценивать полученные	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 <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>

	теоретические и экспериментальные данные и делать выводы.	
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 <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
<i>Универсальные</i>		
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 <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
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 <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
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 <i>EUR-ACE</i> и <i>FEAN</i>
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 <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
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 <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> .

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 – 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:	05.06.2020
--	------------

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

#### СОСТАВИЛ:

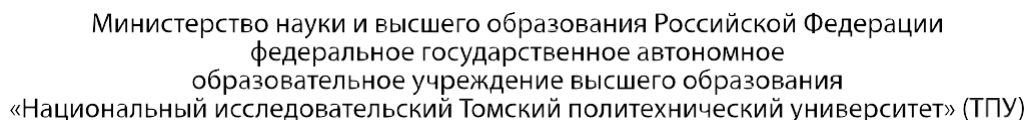
##### Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Громаков Евгений Иванович	к.т.н.		24.02.2020

#### СОГЛАСОВАНО:

##### Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Ефимов Семен Викторович	к.т.н.		24.02.2020



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

В форме:

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

Группа	ФИО
8TM81	Шадрина Дмитрию Владимировичу

Противоаварийная защита газовых распределительных станций	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№59-41/с от 28.02.2020

3.06.2020

<p><b>Исходные данные к работе</b></p>	<p>Актуальной проблемой транспорта газа потребителю является эксплуатационный контроль целевой вероятности отказа системы противоаварийной защиты по требованию (PFD). В ВКР будут выполнены расчеты PFD для ремонтпригодных систем с целью оценки эксплуатационной пригодности СПАЗ в условиях возможной деградации избыточности полевого инструментария. Целью выпускной работы является исследование защищенности от аварий линейных участков газораспределительных систем.</p>
--	--

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p>	<p>1. Обзор метода анализа надежности, использующий основные теоремы теории вероятностей случайных событий;</p> <p>2. Анализ процесса деградации системы противоаварийной защиты ГРС с использованием критериев Маркова;</p> <p>3. Моделирование архитектуры 2oo3D и расчет PFD;</p> <p>4. Расчет безопасности контроллера Tricon, деградировавшего до уровня 2oo2D;</p> <p>5. Расчет безопасности контроллера Tricon, деградировавшего до уровня 1oo1D;</p>
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> (с указанием разделов)</p>	
<p><b>Раздел</b></p>	<p><b>Консультант</b></p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Конотопский Владимир Юрьевич, доцент ОСГН ШБИП, к.экон.н.</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Горбенко Михаил Владимирович, доцент ООД ШБИП, к.т.н.</p>
<p>Раздел на иностранном языке</p>	<p>Пичугова Инна Леонидовна, старший преподаватель ОИЯ ШБИП</p>
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p>	
<p>1. Динамические модели надежности;</p> <p>2. Анализ процесса деградации системы противоаварийной защиты ГРС с использованием критериев Маркова.</p>	

<p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p>	<p>24.02.2020</p>
--	-------------------

**Задание выдал руководитель ВКР:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Громаков Евгений Иванович	к.т.н.		24.02.2020

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8TM81	Шадрин Дмитрий Владимирович		24.02.2020

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

Студенту:

Группа	ФИО
8ТМ81	Шадрину Дмитрию Владимировичу

Инженерная школа	ИШИТР	Отделение	ОАР
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	15.04.04 «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 (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:

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
---

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	<b>24.02.2020</b>
---	-------------------

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент ОСГН ШБИП	Конотопский Владимир Юрьевич	к.экон.н.		24.02.2020

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
8ТМ81	Шадрин Дмитрий Владимирович		24.02.2020



## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
8TM81	Шадрину Дмитрию Владимировичу

Инженерная школа	ИШИТР	Отделение	ОАР
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	15.04.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»

Тема ВКР:

Противоаварийная защита газовых распределительных станций	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения.	<p>Объектом исследования является рабочее место в диспетчерской службе Кемеровского ЛПУМГ.</p> <p>Рабочее место находится в помещении закрытого типа с совмещенным освещением, естественной и искусственной вентиляцией воздуха. Основное оборудование, на котором ведется работа – ПЭВМ. Основной вид деятельности – наблюдение за параметрами технологического процесса, формирование управляющих команд посредством ПЭВМ, формирование отчетной документации, ведение экономических расчетов на основе прогнозов, предоставленных системой.</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<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>	<p>Нормативные документы, устанавливающие правовые и организационные требования обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03;</li> <li>– ГОСТ 12.2.032-78 «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования»;</li> <li>– ГОСТ 12.1.003-2014 «Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности»;</li> <li>– ГОСТ 12.1.005-88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны».</li> </ul>

<b>2. Производственная безопасность:</b> – анализ выявленных вредных и опасных факторов; – обоснование мероприятий по снижению воздействия.	2.1 Рассмотрены вредные факторы: – отклонение показателей микроклимата; – недостаточная освещенность рабочей зоны; – повышенный уровень шума; – электромагнитные излучения; – ионизирующее излучение. 2.2 Рассмотрены опасные факторы: – электрический ток; – пожаробезопасность.
<b>3. Экологическая безопасность</b>	3.1 Рассмотрены негативно влияющие на экологию факторы при эксплуатации компьютера. 3.2 Решения по обеспечению экологической безопасности согласно нормативным документам.
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях</b>	Возможные ЧС на объекте: возгорание, взрыв, короткое замыкание. Наиболее распространённым типом ЧС является пожар.

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.		24.02.20

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ТМ81	Шадрин Дмитрий Владимирович		24.02.2020

## Реферат

Выпускная квалификационная работа выполнена на 130 страницах, содержит 40 рисунков, 17 таблиц и 42 источника литературы.

Ключевые слова: газораспределительная станция, программируемый логический контроллер, автоматизированная система управления технологическим процессом, система противоаварийной защиты, распределенная система управления, АРМ оператора, моделирование, функциональная схема.

Объектом исследования настоящей магистерской диссертации является существующая газораспределительная станция ГРС-4 Томской ПП Томского ЛПУМГ.

Целью выпускной работы является разработка и исследование деградации системы противоаварийной защиты на защищенность от аварий линейных участков газораспределительных систем.

В данной работе разрабатывается и исследуется анализ процесса деградации системы противоаварийной защиты ГРС Кемеровского ЛПУМГ с использованием критериев Маркова. Проведен анализ промышленных логических контроллеров, обеспечивающих отказобезопасность с тройным модульным резервированием, а также проведено моделирование архитектур и расчет средней вероятности отказа по запросу. Разработана функциональная схема автоматизации, а также схема информационных потоков.

Для выполнения работы использовались программные продукты Microsoft Visio 2010, AutoCAD 2014, MATLAB R2018b и MathCAD 2015.

Магистерская диссертация выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2010 компании Microsoft.

Степень внедрения: стадия разработки проектной документации.

Фактором экономического эффекта, достигаемым в предложенной работе, является возможность повышения надежности системы.

## Оглавление

Термины и определения .....	16
Введение.....	18
1 Обзор существующих решений.....	20
2 Описание технологического процесса ГРС .....	22
3 Выбор оборудования .....	23
3.1 Контроллерное оборудование .....	23
3.2 Датчик давления .....	28
3.3 Регулирующий клапан .....	30
4 Схема информационных потоков системы противоаварийной защиты ГРС.....	32
5 Исследование системы противоаварийной защиты с использованием Марковских процессов .....	35
5.1 Основные задачи исследования .....	35
5.2 Введение в системы противоаварийной защиты .....	35
5.3 Роль и место систем ПАЗ в средствах автоматизации объектов нефтегазового производства .....	39
6 Обзор метода анализа надежности, использующей основные теоремы теории вероятностей случайных событий .....	42
6.1 Анализ надежности последовательно-параллельных невосстанавливаемых систем .....	42
7 Динамические модели надежности.....	49
7.1 Марковские случайные процессы.....	49
8 Анализ процесса деградации системы противоаварийной защиты ГРС с использованием критериев Маркова.....	51
8.1 Моделирование архитектуры 2oo3D и расчет PFD контроллера Triconex Tricon.....	54
8.2 Расчет безопасности контроллера Tricon, деградировавшего до уровня 2oo2D .....	66
8.3 Расчет безопасности контроллера Tricon, деградировавшего до уровня 1oo1D .....	72
9 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .	78
9.1 Планирование научно-исследовательских работ .....	78
9.2 Продолжительность этапов работ.....	79

9.3	Расчет сметы затрат на выполнение проекта.....	86
9.3.1	Расчет затрат на материалы.....	86
9.3.2	Расчет заработной платы .....	87
9.3.3	Расчет затрат на социальный налог .....	88
9.3.4	Расчет затрат на электроэнергию .....	88
9.3.5	Расчет амортизационных расходов .....	89
9.3.6	Расчет расходов, учитываемых непосредственно на основе платежных документов .....	90
9.3.7	Расчет прочих расходов.....	91
9.3.8	Расчет общей себестоимости разработки .....	91
9.3.9	Расчет прибыли .....	91
9.3.10	Расчет НДС .....	92
9.3.11	Цена разработки магистерской диссертации .....	92
9.3.12	Определение срока окупаемости инвестиций (PP – payback period).....	92
9.4	Выводы по разделу .....	92
10	Социальная ответственность .....	94
10.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	95
10.1.1	Специальные правовые нормы трудового законодательства.....	95
10.1.2	Эргономические требования к рабочему месту .....	95
10.2	Анализ опасных и вредных производственных факторов .....	96
10.2.1	Отклонение показателей микроклимата .....	97
10.2.2	Недостаточная освещенность рабочей зоны .....	99
10.2.3	Превышение уровня шума .....	102
10.2.4	Электромагнитное и электростатическое излучении .....	102
10.3	Экологическая безопасность .....	104
10.4	Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	105
10.5	Вывод по разделу «Социальная ответственность» .....	107
	Заключение .....	108
	Список литературы .....	109
	Приложение А Технологическая схема ГРС-1 .....	113
	Приложение Б Схема информационных потоков.....	115

Приложение В Architecture modeling and calculation of the triconex Tricon PFD controller ..... 117

## Термины и определения

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

**SCADA (англ. Supervisory Control And Data Acquisition):** инструментальная программа для разработки программного обеспечения систем управления технологическими процессами в реальном времени и сбора данных.

**Автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУ ТП):** автоматизированная система управления технологическим процессом – комплекс программных и технических средств, предназначенный для автоматизации управления технологическим оборудованием на предприятиях. Под АСУ ТП обычно понимается комплексное решение, обеспечивающее автоматизацию основных технологических операций на производстве в целом или каком-то его участке, выпускающем относительно завершённый продукт.

**Автоматизированное рабочее место (АРМ):** программно-технический комплекс, предназначенный для автоматизации деятельности определённого вида. При разработке АРМ для управления технологическим оборудованием, как правило, используют SCADA-системы.

**Программируемый логический контроллер (ПЛК):** специализированное компьютеризированное устройство, используемое для автоматизации технологических процессов. В отличие от компьютеров общего назначения, ПЛК имеют развитые устройства ввода-вывода сигналов датчиков и исполнительных механизмов, приспособлены для длительной работы без серьёзного обслуживания, а также для работы в неблагоприятных условиях окружающей среды. ПЛК являются устройствами реального времени.

**Распределённая система управления (РСУ):** система управления технологическим процессом, характеризующаяся построением распределённой системы ввода вывода и децентрализацией обработки данных.

**Система противоаварийной защиты (СПАЗ):** система противоаварийной защиты оборудования, персонала, и окружающей среды при отказах программно-технических средств, технологического оборудования, либо ошибочных действиях персонала, базирующаяся на средствах и элементах КИПиА, вычислительной техники и управляемых ими исполнительных устройствах.

**Технологический процесс (ТП):** последовательность технологических операций, необходимых для выполнения определенного вида работ. Технологический процесс состоит из рабочих операций, которые в свою очередь складываются из рабочих движений (приемов).



## Введение

В настоящее время одной из важных задач современного общества является задача автоматизации технологических процессов путем разработки и внедрения автоматизированных систем управления технологическими процессами.

Опыт показывает, что внедрение АСУ ТП дает значительный технико-экономический эффект за счет оптимизации и интенсификации технологических процессов.

Автоматизация освобождает человека от необходимости непосредственного управления механизмами. В автоматизированном процессе производства роль человека сводится к наладке, регулировке, обслуживании средств автоматизации и наблюдению за их действием.

Автоматизация производства, при нынешнем состоянии экономического, социального и научно-технического развития, должна осуществляться на новой совершенной технической базе, включающей широкое применение вычислительной техники.

Своевременность интеграционных процессов на предприятии обусловлена такими факторами как:

- а) повышение эффективности производства возможно только на основе объективной картины технических и технологических параметров;
- б) существующие информационные и организационные барьеры между управленческими и технологическими уровнями предприятия приводят к блокированию важной для анализа деятельности предприятия информации, а также резко снижают оперативность принятия управленческих решений;
- в) рынок средств и систем автоматизации предлагает все необходимые компоненты для осуществления комплексной интеграции, т.е. для построения интегрированной автоматизированной системы управления.

Целью данной магистерской диссертации является исследование деградации СПАЗ на защищенность от аварий линейных участков

газораспределительных систем, обеспечивающее улучшение качества работы системы управления и, как следствие, большую экономическую эффективность из-за устранения проблемных мест в работе станции. Автоматизация системы управления ГРС предполагает внедрение противоаварийной защиты для узла редуцирования газа.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

а) провести обновление инструментальной части узла редуцирования газа;

б) выполнить расчеты PFD для ремонтнопригодных систем с целью оценки эксплуатационной пригодности СПАЗ в условиях возможной деградации избыточности полевого инструментария.

Актуальность данной магистерской диссертации является использование современных контроллеров, обладающих новым уровнем безопасности в СПАЗ при условиях деградации технического состояния.

Выпускная работа содержит рекомендации для ГРС-1 Кемеровского ЛПУМГ, ООО "Газпром трансгаз Томск".

## 1 Обзор существующих решений

В работе [1] представлено изобретение, которое относится к числу устройств противоаварийной защиты и автоматики. Основным предназначением рассматриваемого оборудования является применение в аппаратных средствах автоматизации с целью создания систем безопасности предприятий промышленных отраслей. На сегодняшний день одной из наиболее эффективных систем противоаварийной защиты являются аппаратные средства автоматизации от компании Siemens. Разработанная данной организацией система включает в себя сенсоры и датчики, отслеживающие технологические характеристики объекта контроля. К числу основных недостатков отмеченной системы можно отнести следующее:

- наличие сигналов в одном многоканальном модуле ввода или вывод;
- отсутствие возможности верификации функции безопасности на ложное срабатывание защиты;
- аппаратная зависимость функции безопасности друг от друга.

В работе [2] рассматривается архитектура 2003 и определяется устоявшееся значение  $PFD_{avg}$  при учете вторичного проявления опасных отказов и выявления их системой контроля для базисных значений входных параметров. Также устанавливается, что рассматриваемая система удовлетворяет требованиям SIL3 в течении первых 8000 часов работы при значении интенсивности опасных отказов  $= 2.5e^{-5}$  (1/час).

В работе [3] представлен системный подход для расчета значения среднего времени наработки на отказ (MTTF), которое является важным параметром для исследовательской области систем безопасности, на основе Марковских моделей. Данный коэффициент был определен для архитектур 1001 и 1002.

В работе [4] анализируются и рассчитываются показатели безопасности и надежности трех видов режимов работы в рамках архитектуры 2003.

В работе [5] была проанализирована связь между надежностью SIS и частотой запроса, а также продолжительность запроса на систему 1001. Кроме этого, проведен расчет среднего времени восстановления работоспособности (MTTR), интенсивности ложных отказов (STR) и вероятности безопасных отказов (PFS).

В работе [6] используются модели Маркова и динамическое дерево отказов (DFT) для анализа безопасности RCIS. Затем проводится сравнение индексов безопасности RCIS между подходами Маркова и DFT.

Стоит отметить, что в данных работах был рассмотрен расчёт различных показателей безопасности для архитектур 1001, 1002 и 2003, но при этом вопросы деградации архитектур не были рассмотрены. В связи с этим была поставлена задача исследовать данный процесс.

Центром автоматизированных систем является контроллер. Исходя из этого, в качестве объекта исследования перспективным будет выбрать именно данный элемент.

## **2 Описание технологического процесса ГРС**

В качестве исследуемого объекта рассмотрим ГРС-1 Кемеровского ЛПУМГ. Технологическая схема газораспределительной станции представлена в приложении А.

Газ высокого давления направляет в специальный блок переключения, включающий в себя следующие составные части:

- узел предохранительных клапанов с трехходовым краном;
- манометры;
- шаровые краны с ручным приводом и т.д.

Распределение объема газа при подаче на промышленный объект производится при помощи байпасной линии. Для этого предусмотрен вентиль с ручным приводом.

После блока переключения газ поступает в специальный узел очистки (пылеуловители), из газа убираются механические примеси. Далее газ поступает в основной узел – это узел редуцирования. На ГРС-1 подогреватель газа отсутствует.

Узел редуцирования включает в себя несколько редуцирующих нитей, оснащенных регулятором давления модели РДУ-50, мультипликатор и узлы управления к ним и т.д. После блока редуцирования газ передается в узел учета газа камерными диафрагмами модели ДК-200. Здесь регистрируется расход газа посредством дифманометров и расходомеров. Далее газ поступает в блок одоризации, там находится одоризатор типа УОГ-1.

ГРС оснащена системой дистанционной аварийной сигнализации для осуществления контроля над функционированием основных узлов станции. Режимом блоков контролируют датчики, которые связаны кабельными линиями с передающим блоком дистанционной аварийной сигнализации, установленной в блоке КИП [7].

### **3 Выбор оборудования**

Системы, которые правильно спроектированы для решения критических задач безопасности находят баланс между надежностью и безопасностью путём выбора адекватного резервирования и высокого уровня программируемых логических устройств и диагностики полевого оборудования. Правильный выбор глубины и частоты тестирования обеспечивает целостность системы после запуска.

Ведущие фирмы – производители систем ПАЗ:

- 1) ABB;
- 2) HIMA;
- 3) Honeywell;
- 4) Siemens Energy & Automation;
- 5) Yokogawa;
- 6) GE-Fanuc;
- 7) ICS;
- 8) Triconex.

#### **3.1 Контроллерное оборудование**

Для разработки системы противоаварийной защиты на ГРС необходимо выбрать контроллерное оборудование. На рынке систем противоаварийной защиты предлагаются различные варианты таких контроллеров как: Schneider Electric Triconex Tricon, Siemens Simatic S7-400H, FOXBORO FCP270 и др. Выбран был резервируемый контроллер Schneider Electric Triconex Tricon (рисунок 1) [8].



Рисунок 1 – Резервированный контроллер Schneider Electric Triconex Tricon

Таблица 1 – Сравнение резервируемых контроллеров

Резервированный контроллеры	Simatic S7-400FH	FOXBORO FCP270	Schneider Electric Triconex Tricon
Температура окружающей среды,	минус 25 – 60	минус 20 – 60	минус 40 – 60
Напряжения питания	24В постоянного тока	24В постоянного тока	24В постоянного тока
Наработка на отказ, ч	170 000	105 120	750 000
Интерфейсы	Ethernet, RS-232, RS-485	Ethernet, RS-232, RS-485	Ethernet, RS-232, RS-422 и RS-485
Протокол передачи данных	PROFIBUS DP	PROFIBUS DP	PROFIBUS DP, Modbus TCP
Дискретный ввод/вывод	24/10	32/12	64/32
Аналоговый ввод/вывод	15/8	12/8	64/8
Уровень полноты безопасности	SIL2	SIL2	SIL3
Резервирование	+	-	+

Контроллеры отказоустойчивые программируемые Tricon предназначены для измерений и измерительных преобразований стандартизованных аналоговых выходных сигналов датчиков в виде напряжения и силы постоянного тока, сигналов от термопар, частоты периодических сигналов, а также для регистрации и хранения измеренных

значений, приема и обработки дискретных сигналов, формирования управляющих и аварийных аналоговых и дискретных сигналов.

Преимущества:

- a) Высокий уровень защиты людей и производственных процессов;
- b) Обеспечение безопасности для непрерывных процессов и сокращение времени простоя;
- c) Безопасность на протяжении всего жизненного цикла;
- d) Снижение эксплуатационного риска;
- e) Максимизация совокупной ценности владения;

Компоненты Tricon:

1. Шасси:

- 1) Главное Шасси – содержит батарейную поддержку памяти, процессоры, модули ввода/выводы (в/в), а также коммуникационные модули.
- 2) Шасси расширения – служит для дополнительного числа модулей в/в, которые располагаются на удалении до 30 метров от главного шасси.
- 3) Шасси RXM – используется для модулей в/в, которые находятся на расстоянии до 12 км от главного шасси.
- 4) Механические направляющие ключи – каждый слот в Tricon содержит механические направляющие ключи, которые соответствуют конкретному типу модуля. В связи с этим модули невозможно установить в ненадлежащие слоты.

2. Модули питания:

Обеспечивают питание логических схем модулей, расположенных на шасси расширения, шасси RXM и главном шасси.

3. Главные процессоры:

Главные процессоры выполняют написанную пользователем программу управления, а также диагностику системы.

4. Коммуникационные модули:

- 1) Коммуникационный модуль Tricon (TCM) – поддерживает написанные пользователем прикладные программы в сетях Ethernet (802.3),



включая TriStation, Modbus TCP, а также ряд протоколов и приложений Triconex.

2) Улучшенный интеллектуальный коммуникационный модуль (EICM) поддерживает последовательную связь RS-232, RS-422 и RS-485 с устройствами Modbus и TriStation.

3) Модуль безопасного управления (SMM) выполняет работу интерфейса между универсальной управляющей сетью (UCN) фирмы Honeywell и контроллером Tricon.

4) Интерфейсный модуль Hiway (HIM) выполняет работу интерфейса между контроллером Tricon и шлюзом Hiway распределённой системы управления TDC 3000 фирмы Honeywell и локальной сетью управления (LCN).

5) Усовершенствованный коммуникационный модуль (ACM) осуществляет взаимодействие контроллера Tricon с распределённой системой управления I/A Series фирмы Foxboro и с TriStation.

#### 5. Волоконно-оптические удалённые модули расширения (RXM):

Предназначены для работы шасси расширения на расстоянии до 12 км от главного шасси, с отсутствием чувствительности к электростатическим и электромагнитным помехам.

#### 6. Модули ввода/вывода:

1) Цифровые входные модули, для принятия дискретных сигналов, и входные модули для суммирования и измерения скорости.

2) Контролирующие цифровые выходные модули имеют диагностику полевых цепей и нагрузочного устройства, а также выдают дискретные выходные сигналы.

3) Аналоговые входные модули принимают аналоговые сигналы. Есть версии модулей: изолированные, связанные по постоянному току.

4) Аналоговые выходные модули управляют 8 аналоговыми выходными сигналами 4-20 мА.

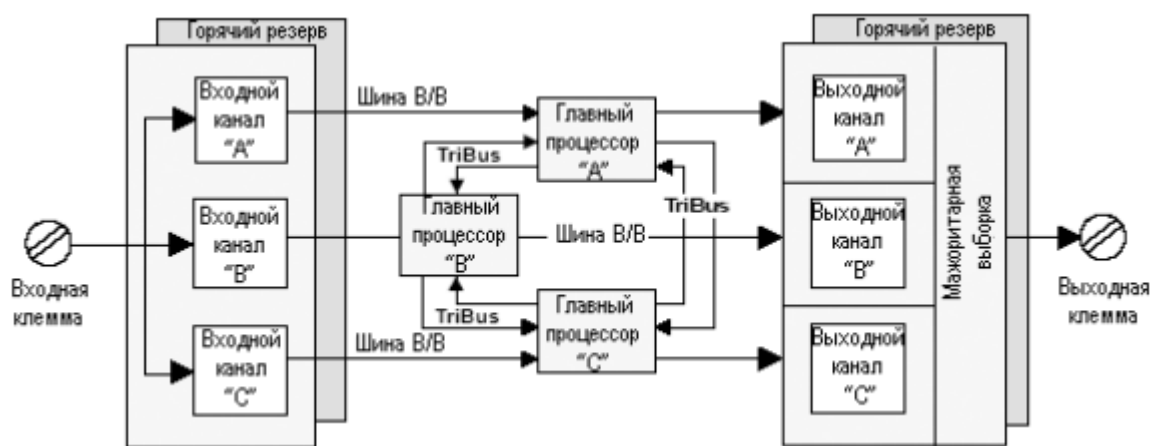


Рисунок 2 – Структурная схема контроллера Tricon

Для каждого модуля ввода/вывода контроллер может поддерживать дополнительный модуль, находящийся в режиме «горячего» резерва, т.е. при неисправности основного модуля управление передается на резервный.

Главные процессоры данными друг с другом, с помощью высокоскоростной запатентованной шины, которая называется TriBus. Один раз за цикл главные процессоры синхронизируются и производят обмен данными с двумя соседними процессорами по шине TriBus. TriBus осуществляет мажоритарную выборку цифровых входных данных, производит сравнение выходных данных и посылает копии аналоговых входных данных во все главные процессоры.

После того, как произошла передача данных по шине TriBus, и были выполнены корректировки начальных значений согласно мажоритарной выборке входных данных, скорректированные значения будут использованы главными процессорами для входа в написанную пользователем программу управления.

На всех шасси контроллера Tricon есть 2 модуля питания, которые подсоединены по схеме двойного резервирования. К каждому отдельно взятому модулю подается питание от задней панели. Все модули оснащены собственным стабилизатором питания. Каждый модуль питания передает напряжение отдельной шине на задней панели шасси. Модуль питания

оснащен встроенной схемой диагностики, которая отслеживает выход из температурного режима и скачки напряжения.

Программирование Triconex Tricon реализуется по стандарту МЭК 61131-3.

### **3.2 Датчик давления**

Измерение давления производится после регулирующего клапана для обеспечения подачи газа при стабильном давлении 0,12 МПа. Для измерения давления после клапана подходят датчики фирмы Honeywell, Метран 150, Метран 100. Датчики Метран серии 100 устарели, поэтому использование данных датчиков нецелесообразно для целей контроля состояния технологического процесса. Датчики Honeywell являются передовыми и обладают хорошими техническими характеристиками, но они имеют высокую стоимость по сравнению с датчиками Метран. Исходя из всего вышесказанного, выбор пал на интеллектуальные датчики Метран 150, которые имеют значительно меньшую стоимость и не уступают датчикам Honeywell, что делает их более целесообразными к использованию.

Интеллектуальные датчики давления серии Метран 150 предназначены для непрерывного преобразования в унифицированный токовый выходной сигнал и/или цифровой сигнал в стандарте протокола HART входных измеряемых величин: давления-разрежения, абсолютного давления, избыточного давления, гидростатического давления (уровня), разности давлений [9].

Состав датчика: электронный преобразователь и сенсорный модуль. Сенсор состоит из платы аналогоцифрового преобразователя (АЦП) и измерительного блока. Давление подается в камеру измерительного блока, далее преобразуется в изменение электрического сигнала и деформацию чувствительного элемента.

Учитывая диапазон измерения давления газа на выходе из агрегата (12 кгс/см<sup>2</sup>) целесообразно использование датчика избыточного давления Метран 150 CG4. Технические характеристики представлены в таблице 3.

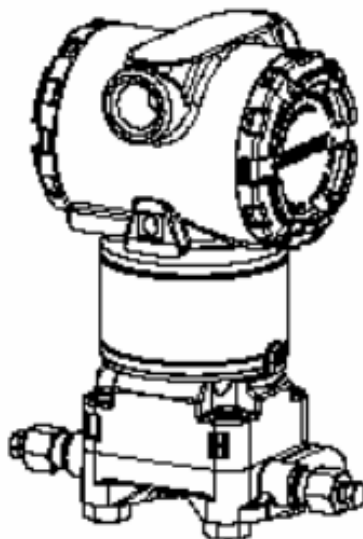


Рисунок 3 – Метран 150CG4

Таблица 2 – Технические характеристики

Техническая характеристика	Значение
Измеряемые среды	жидкость, газ, пар
Верхний предел измерения P <sub>max</sub> , кПа	1600
Диаметр условного прохода трубопровода Ду, мм	80
Основная относительная погрешность измерений расхода %, не более	±0,05
Температура окружающего воздуха, °С	Минус 55 – 80
Выходной сигнал	4 – 20 мА/HART
Расстояние передачи токового сигнала	до 1 км
Физические интерфейсы связи с компьютерной средой	Hart
Протоколы связи с компьютерной средой	HART
Взрывозащищенное исполнение	Есть
Средний срок службы расходомера	12 лет

Техническая характеристика	Значение
Средняя наработка на отказ	150000 часов
Межповерочный интервал	4 года

Допускается совместная прокладка в одном кабеле цепей питания датчика и выходного сигнала с использованием изолированных жил с сопротивлением изоляции не менее 50 МОм. Не требуется экранировка цепей выходного сигнала от цепей питания. Рекомендуется применение экранированного кабеля с изолирующей оболочкой при прокладке линии связи вблизи электроустановок мощностью более 0,5 кВт.

### 3.3 Регулирующий клапан

Исполнительное устройство - устройство в АСУ, реализующее управляющие воздействия с регулятора на объект управления, перемещающий регулируемый орган.

Для стабилизации регулируемой величины нужно менять процесс в требуемом направлении. С помощью регулирующего воздействия исполнительного устройства.

В роли исполнительного механизма будет использован регулирующий клапан с электроприводом из каталога продукции компании «Авангард».

Определив необходимые параметры, выбран следующий клапан: клапан регулируемый, односедельный с ЭИМ (электрический исполнительный механизм) DN15-300, PN1,6-4,0 МПа (рисунок 4) [10]:



Рисунок 4 – Клапан регулирующий односедельный с электроприводом

Технические характеристики представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Технические характеристики регулирующего клапана

Техническая характеристика	Значение
Корпус	Легированная сталь
Рабочее давление, МПа	До 4 МПа
Температура рабочей среды, °С	Минус 60 – 150
Температура окружающей среды, °С	Минус 60 – 50
Присоединение	Фланцевое

Для того, чтобы управлять клапаном был подобран электропривод Regada ST1 из того же каталога, что и регулирующий клапан. Технические характеристики электропривода представлены в таблице 4 [11].

Таблица 4 – Технические характеристики электропривода

Техническая характеристика	Значения
Рабочий ход, мм	8 – 80
Скорость управления, мм/мин	8 – 80
Напряжения питания	230В, 50Гц
Температура окружающей среды, °С	Минус 25 – 55
Степень защиты	IP67

Стандартное исполнение ЭИМ:

1. электрическое присоединение реализуется на клеммную колодку;
2. механическое подсоединение – фланец.

#### **4 Схема информационных потоков системы противоаварийной защиты ГРС**

Схема информационных потоков представлена в приложении Б.

Данная схема состоит из трех уровней:

1. Уровень оборудования (входов/выходов). Уровень измерительных устройств, которые контролируют управляемые параметры, датчиков, и исполнительных устройств, воздействующих на эти параметры процесса. На данном уровне производится согласование вырабатываемых команд с исполнительными устройствами, а также сигналов датчиков с входами устройства управления.

2. Уровень управления оборудованием. Это уровень контроллеров. ПЛК получает информацию с датчиков и контрольно-измерительного оборудования о состоянии технологического процесса. Далее контроллер отдаёт команды управления, в соответствии с запрограммированным алгоритмом управления на исполнительные механизмы.

В состав среднего уровня автоматизированной системы управления ГРС входит следующее оборудование:

- a) шкаф центрального процессора;
- b) шкаф системы ПАЗ (противоаварийной защиты);
- c) шкаф силовой;
- d) шкаф вспомогательных систем.

Распределенная система управления выполнена на базе микроконтроллера. РСУ обеспечивает выполнение всех основных функций по управлению, отображению, регистрации и отчетности по отношению к технологическому процессу, а именно:

- a) автоматическое регулирование;
- b) программное (логическое) управление;
- c) дистанционное управление (пуск, останов, изменение уставок);
- d) управление сигнализацией и оповещением;

- е) сбор и обработку информации о технологическом процессе и технологическом оборудовании;
- ф) графическое отображение информации о технологическом процессе и состоянии оборудования;
- г) ведение журнала событий;
- h) регистрацию и архивирование параметров процесса;
- i) формирование отчетов;
- j) обмен информацией с внешними системами.

Система ПАЗ обеспечивает приоритетное управление технологическим оборудованием для перевода процесса в безопасное состояние. Система обеспечивает выполнение следующих функций:

- а) сбор и обработку информации о параметрах технологического процесса, состоянии оборудования, относящихся к ПАЗ;
- б) распознавание и сигнализацию аварийных ситуаций и отклонений процесса от заданных пределов;
- с) автоматический останов технологического комплекса (или отдельного оборудования) в случае отклонения параметров от заданных пределов, а также останов по ручному вмешательству оператора;
- д) управление сигнализацией и оповещением;
- е) блокировку повторного запуска технологического комплекса (или отдельного оборудования) до устранения причин останова или принудительной деблокировки.

Система ПАЗ может быть реализована как технически выделенная система, которая интегрируется в РСУ на среднем уровне управления, или как функционально интегрированная в РСУ на нижнем уровне управления, обмен информацией с внешними системами.

3. Уровень сетевого оборудования, промышленного сервера, уровень диспетчерских и операторских станций. На данном уровне осуществляется контроль хода производства: обеспечивается связь с нижними уровнями,



откуда происходит сбор данных, диспетчеризация (мониторинг) и визуализация хода технологического процесса. Этот уровень HMI, SCADA.

На данном уровне задействован человек, т.е. оператор (диспетчер). Он производит локальный контроль технологического оборудования через человеко-машинный интерфейс (HMI). К нему относятся: графические панели, мониторы, устанавливаемые локально на шкафах автоматики и пультах управления. Для реализации контроля за газораспределительной станцией используется SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition-диспетчерское управление и сбор данных) система. Данная система представлено в виде программного обеспечения, настраиваемого и устанавливаемого на компьютерах диспетчеров. SCADA обеспечивает сбор, визуализацию и архивацию данных от ПЛК [12].

## **5 Исследование системы противоаварийной защиты с использованием Марковских процессов**

### **5.1 Основные задачи исследования**

1. Анализ процесса деградации системы противоаварийной защиты ГРС с использованием критериев Маркова;
2. Моделирование архитектуры 2003D и расчет PFD контроллера Triconex Tricon;
3. Расчет безопасности контроллера Tricon, деградировавшего до уровней 2002D и 1001D.

### **5.2 Введение в системы противоаварийной защиты**

Для ликвидации большого количества аварий на нефтегазовых производствах внедряют систему противоаварийной защиты.

Увеличение числа аварийных ситуаций на нефтегазовых предприятиях наносит существенный ущерб не только самим субъектам хозяйствования, но и всей окружающей среде в целом. С целью уменьшения количества аварийных ситуаций на объектах нефтегазовой отрасли необходимо использовать автоматическую систему противоаварийной защиты (ПАЗ). Указанная система дает возможность своевременно выявлять и причины возникновения аварийных ситуаций и предупреждать возникновение взрывоопасных сред в технологическом оборудовании, используемым всеми современными предприятиями нефтегазовой промышленности в случае нарушения нормативных характеристик, которые обуславливают состояние технологического процесса.

Уровни защиты технологических процессов нефтегазовой отрасли должны предотвращать их развитие аварий предупреждать их, а также смягчать последствия (рис. 5).



Рисунок 5 – Уровни защиты управлением безопасностью

На объектах повышенной опасности для предотвращения выброса опасных продуктов в окружающую среду, взрывов, а также выхода из строя оборудования применяют систему противоаварийной защиты.

Основной целью СПАЗ – является перевод ТП в безопасное состояние при возникновении нештатных ситуаций, таких как: отказ оборудования, загазованность, повышение и понижение давления. Самой надежной схемой системы противоаварийной защиты является «2oo3». Оператор не имеет станцию управления системой противоаварийной защиты. Оператор и диспетчер могут управлять только распределенной системой управления. Диспетчер и оператор обеспечивают круглосуточный контроль работы СПАЗ со станции PCY.

В процессе разработки и применении на практике систем ПАЗ на объектах нефтегазовой отрасли, необходимо четко придерживаться общих правил и норм управления комплексом работ [13,14].

Основным требованием функциональной безопасности любой существующей на сегодняшний день системы ПАЗ является её способность правильно работать и обеспечивать соответствующий норме уровень безопасности объекта автоматизации.

Основное предназначение любой из существующих в наше время систем ПАЗ заключается в обеспечении безопасности, что в свою очередь становится возможным благодаря автоматическому изменению состояния объекта на безопасное при возникновении какого-либо события, представляющего опасность. Отмеченная функция безопасности реализуется за счет осуществления контроля характеристик состояния, формирования и передачи и на объект управляющих воздействий, ориентированных на уменьшение вреда.

Помимо указанной выше функции система ПАЗ способна:

- а) обнаруживать отклонения в состоянии технологического объекта, представляющие опасность для него в автоматическом режиме;
- б) производить замеры технологических переменных, представляющих значимость для безопасного выполнения технологического процесса;
- в) в режиме реального времени выявлять отказы, которые появляются в системе противоаварийной защиты;
- г) обеспечивать защиту от несанкционированного проникновения в систему ПАЗ.

Внедрение и эксплуатация систем ПАЗ является, с нашей точки зрения, обязательной процедурой для всех объектов нефтегазовой отрасли без исключения. Исполнение приведенного выше ряда функций должно способствовать предупреждению формирования взрывоопасной среды, а также аварийных ситуаций, непосредственно взаимосвязанных с изменениями технологического процесса, обеспечивать в случае необходимости остановку объекта [15].

На рисунке 6 приведены многочисленные слои защиты (СЗ), зачастую применяющиеся для промышленных процессов. Каждый слой защиты – это комплекс технических средств и/или административных мер, работающих вместе с иными СЗ.

СЗ, выполняющие собственные функции с высокой степенью надежности, принято считать независимыми слоями защиты (НСЗ).

Для того, чтобы достигнуть нужный уровень промышленной безопасности нефтегазового производства, используется не только СПАЗ. Также необходимы системы оповещения, пожарные сигнализации, системы загазованности, сбросные пружинные предохранительные клапаны, система автоматического пожаротушения. Все вышеперечисленные системы должны совершать работу параллельно работе системе противоаварийной защиты.



Рисунок 6 – Типовые способы снижения риска, встречающихся на технологических объектах (модель слоев защиты)

Для ввода системы ПАЗ на технологический объект необходимо учитывать ниже представленные обстоятельства и факты:

1. По признакам, регламентированным Федеральным законом №116-ФЗ от 05.05.2014 года [15], многие из нефтегазовых предприятий относятся к

группе опасных промышленных объектов. На таких предприятиях могут случаться аварии, которые способны нанести не только большой ущерб субъекту хозяйствования, но и причинить вред здоровью его работников. Следовательно, можно констатировать, что задачи обеспечения промышленной безопасности за счет использования систем ПАЗ представляют огромную важность. Реализация данных задач становится возможной лишь при условии полного соблюдения требований, предъявляемых к безопасности.

2. Производственные процессы, протекающие на нефтегазовых предприятиях, относятся к числу непрерывных процессов, что в свою очередь говорит о том, что должно обеспечиваться бесперебойная работа технологического оборудования.

3. Важность наличия систем ПАЗ обусловлено также высокой степенью изношенности технологического оборудования.

Несмотря на все положительные стороны применения систем ПАЗ, нужно знать, что в некоторых случаях системы ПАЗ могут способствовать появлению опасных ситуаций.

### **5.3 Роль и место систем ПАЗ в средствах автоматизации объектов нефтегазового производства**

Для начала разберемся какие средства автоматизации сегодня эксплуатируются на предприятиях нефтегазовой промышленности. К числу таковых относятся следующие:

- 1) АСУТП;
- 2) РСУ;
- 3) ПАЗ.

РСУ представляет собой средство автоматизации, которое используется сегодня на предприятиях нефтегазовой отрасли для организации управления технологиями. Также РСУ включают в свой состав системы противоаварийной защиты, что позволяет им решать задачи, связанные с обеспечением безопасности промышленного объекта автоматизации.

Наиболее широкое распространение РСУ получили при организации хода управления производственными процессами, которые носят непрерывный характер, то есть даже кратковременная остановка таких процессов является недопустимой. Объясняется это тем, что процессы непрерывного характера, могут стать основной причиной прекращения подачи газа на промышленный объект, вывода из функционирующего состояния технологических устройств и т.д. Также к числу непрерывных процессов, по нашему мнению, целесообразно отнести все процессы, остановка которых приводит предприятие к большим финансовым затратам.

Архитектура средств автоматизации АСУТП/РСУ/ПАЗ представлена на рисунке 7.

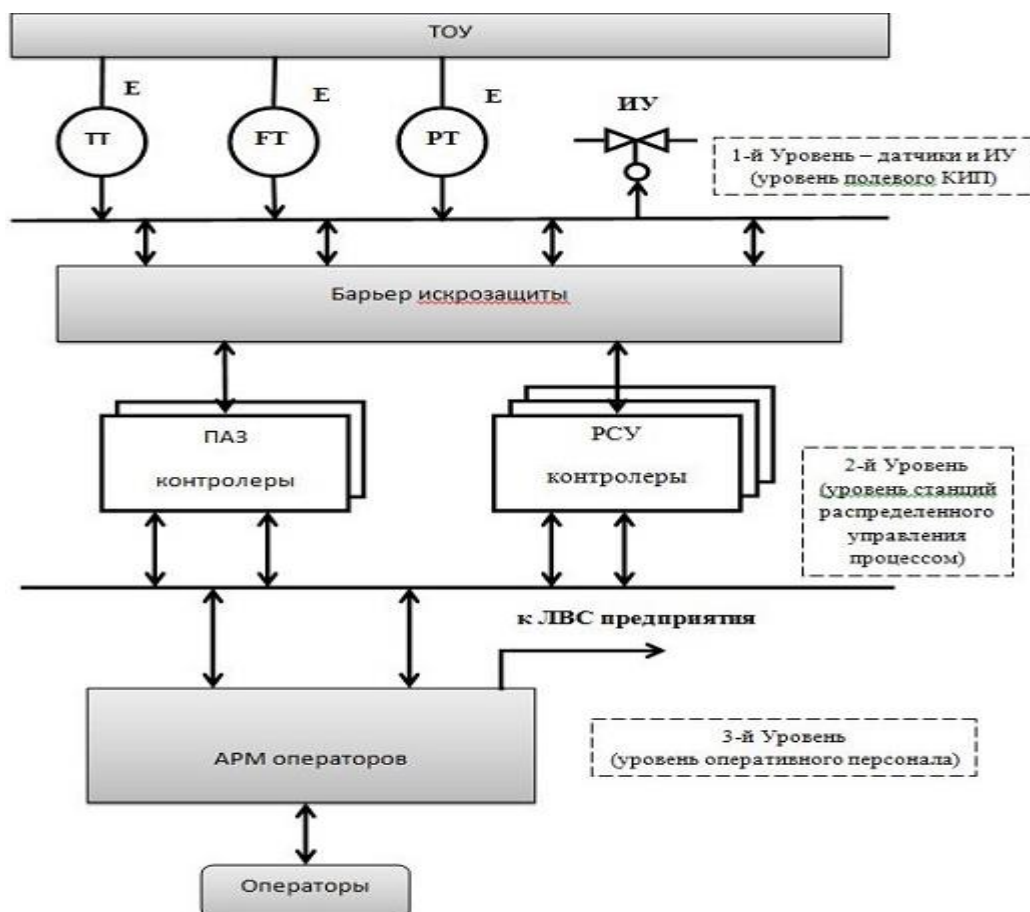


Рисунок 7 – Архитектура средств АСУТП/РСУ/ПАЗ

Все сказанное выше позволяет констатировать, что основным требованием современных РСУ выступает, прежде всего, высокая устойчивость к отказам и остановкам, поскольку, как было сказано ранее, они

являются недопустимыми для технологических процессов, протекающих на нефтегазовых предприятиях. Высокая устойчивость к остановкам и отказам может быть достигнута лишь в случае резервирования аппаратных и программных составляющих системы, внедрения и активного использования передовых средств диагностики, а также осуществления постоянного контроля со стороны специально обученного персонала.

Также необходимо отметить, что РСУ, используемые на предприятиях нефтегазовой отрасли, должны быть много функциональными и способными увеличивать свою производительность пропорционально имеющимся ресурсам.

Итак, в качестве основных требований к РСУ можно выделить следующее:

1. Способность увеличивать собственную производительность пропорционально имеющимся ресурсам.

2. Возможность использования как для автоматизации конкретного оборудования, так и для всего производственного объекта управления (ПОУ) в целом. Необходимо отметить, что РСУ при этом должна с легкостью расширяться, тем самым позволяя охватывать целый ряд производственных участков.

3. Простота разработки и отладки. Современная РСУ включать в свой состав целый комплекс предподготовленных программных элементов и средств разработки.

Следовательно, можно прийти к выводу, что РСУ должны обладать возможностью охватывать огромное количество различных технологических объектов (цехов). При этом расстояние между данными объектами в некоторых случаях может варьироваться от нескольких метров до нескольких километров. [13,14].



## **6 Обзор метода анализа надежности, использующей основные теоремы теории вероятностей случайных событий**

### **6.1 Анализ надежности последовательно-параллельных невосстанавливаемых систем**

Анализ начнем с интерпретации основных терминов [16].

Основной элемент представляет собой компонент системы, необходимый для исполнения системой основных задач.

Общее резервирование – резервирование всей системы в целом.

Раздельное резервирование представляет собой одну из разновидностей общего резервирования. Данный вид резервирования предусматривает резерв отдельно взятых компонентов системы.

Нагруженный резерв – компонент, который находится в таком же режиме, что и основной элемент системы.

Ознакомившись с основными терминами, можем перейти к обзор самых простых схем нагруженного резервирования. Последние принято именовать последовательно-параллельными структурами.

Наиболее простым и удобным способом расчета характеристик надежности систем наружного резервирования является сложение и умножение вероятностей.

Далее предлагаем рассмотреть один из показательных случаев. Ключевые показатели безотказности для одного из компонентов выражения сведены в таблицу 5.

Таблица 5 – Ключевые показатели безотказности элемента с экспоненциально распределенной наработкой до отказа

Название показателя	Аналитическое выражение
Вероятность безотказного функционирования на интервале (0,t)	$e^{-\lambda t}$
Вероятность отказа на интервале (0,t)	$1 - e^{-\lambda t}$
Плотность распределения случайной наработки до отказа	$\lambda e^{-\lambda t}$
Интенсивность отказов	$\lambda$
Средняя наработка до отказа	$1/\lambda$

Пошаговое соединение всех составляющих одной системы образует избыточную структуру без исполнения предварительного резервирования. Выход из строя какого-либо из имеющихся в системе компонентов приводит к ее сбою. Для более детального понимания представим наглядно блок-схему надежности пошагового соединения  $n$  компонентов в виде схемы (рисунок 8).



Рисунок 8 – Блок-схема надежности последовательного соединения

Расчет вероятности бесперебойного действия  $P(t)$  для создания последовательного соединения производится по следующей формуле:

$$P(t) = p_1(t) * p_2(t) \dots p_n(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t) \quad (1)$$

Для расчета экспоненциального случая используется следующее выражение:

$$P(t) = e^{-\lambda_1 t} \cdot e^{-\lambda_2 t} \cdot \dots \cdot e^{-\lambda_n t} = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n)t} \quad (2)$$

Расчет частоты отказов компонентов системы производится по следующей формуле:

$$\lambda(t) = \frac{P'(t)}{P(t)} = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = \lambda_{\Sigma} \quad (3)$$

Расчет средней наработки до момента отказа имеет вид следующего выражения:

$$T = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda_{\Sigma} t} dt = -\frac{1}{\lambda_{\Sigma}} e^{-\lambda_{\Sigma} t} \Big|_0^{\infty} = \frac{1}{\lambda_{\Sigma}} \quad (4)$$

#### 1. Параллельное соединение компонентов системы.

Под параллельным соединением, входящих в состав одной системы компонентов, принято понимать избыточную структуру с задействованными резервными компонентами (рисунок 9).

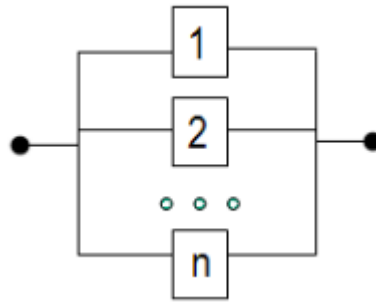


Рисунок 9 – Параллельное соединение компонентов

При этом одновременно задействованы все  $n$  компоненты системы. Ее работоспособность обеспечивается до того момента, пока задействован хотя бы 1 из  $n$  компонентов. Отказ системы  $Q(t)$  будет равняться:

$$Q(t) = \prod_{i=1}^n q_i(t) \quad (5)$$

Расчет вероятности бесперебойной работы производится по следующей формуле:

$$P(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i(t)) \quad (6)$$

Для компонентов, обладающих равной степенью надежности, используется выражение вида:

$$P(t) = 1 - (1 - p(t))^n = 1 - (q(t))^n \quad (7)$$

## 2. Дублированная схема.

Для расчета вероятности бесперебойной работы дублированной схемы используется выражение типа:

$$P(t) = 1 - (1 - p_1(t))(1 - p_2(t)) \quad (8)$$

Для расчета совокупности вероятностей совместных событий их исправной работы используется следующая формула:

$$P(t) = p_1(t) + p_2(t) - p_1(t)p_2(t) \quad (9)$$

Для экспоненциального случая:

$$P(t) = e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t} \quad (10)$$

Расчет наработки до отказа производится по следующей формуле:

$$T = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} \quad (11)$$

При равнонадежных компонентах расчет будет производиться по следующим формулам:

$$P(t) = 2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t} \quad (12)$$

$$\lambda(t) = \frac{2\lambda e^{-\lambda t} - 2\lambda e^{-2\lambda t}}{2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}} = \frac{2\lambda - 2\lambda e^{-\lambda t}}{2 - e^{-\lambda t}} \quad (13)$$

$$T = \frac{3}{2\lambda} \quad (14)$$

### 3. Троированная схема.

Троированная схема обладает 3 параллельно функционирующими нагруженными компонентами. Отказ схемы происходит в случае отказа всех 3-х компонентов.

Вероятность безотказного функционирования будет равна:

$$P(t) = 1 - (1 - p_1(t))(1 - p_2(t))(1 - p_3(t)) \quad (15)$$

или

$$P(t) = p_1(t) + p_2(t) + p_3(t) - p_1(t)p_2(t) - p_1(t)p_3(t) - p_2(t)p_3(t) + p_1(t)p_2(t)p_3(t) \quad (16)$$

Для экспоненциального случая и равнонадежных компонентов:

$$P(t) = 3e^{-\lambda t} - 3e^{-2\lambda t} + e^{-3\lambda t} \quad (17)$$

Средняя наработка до отказа будет иметь следующий вид:

$$T = \frac{11}{6\lambda} \quad (18)$$

### 4. Мажоритарная схема «2 из 3».

В любом устройстве могут происходить сбои в его работе. Как правило, они возникают из-за появления неисправностей или воздействия помех. Одним из способов повышения надежности работы цифровых систем выступает выявление и ликвидация возникающих ошибок. Но в некоторых случаях их появление является недопустимым, что требует использования резервирования узлов и отдельных компонентов аппаратуры.

Одним из способов решения данной является использование мажоритарных компонентов. Чаще всего используется конфигурация типа «2 из 3» (рис. 10).

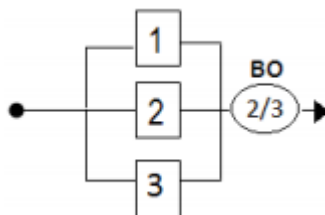


Рисунок 10 – Блок-схема надежности мажоритарной структуры «2 из 3»

Представленная на рисунке выше схема включает в свой состав специальное устройство – восстанавливающий орган (ВО). Последний осуществляет поиск параметра выходного сигнала схемы. Расчет вероятности бесперебойной работы необходимо производить по следующей формуле:

$$P(t) = 3e^{-2\lambda t} - 2e^{-3\lambda t} \quad (19)$$

Обслуживающий персонал может выполнять техническое обслуживание и перезапуск модуля неисправности в режиме онлайн без ущерба для нормальной работы системы. Схема голосования показана на рисунке 11.

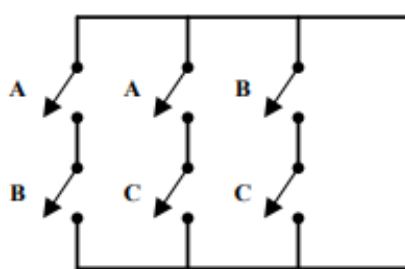


Рисунок 11 – Схема голосования

Можно обнаружить, что система выбирает любой из двух режимов отказа посредством исследования логики голосования, представленной на рисунке 11. Когда в ячейке возникает опасность или сбой короткого замыкания, система осуществляет деградацию и затем переходит в режим 2oo2. С другой стороны, когда ячейка показывает безопасный или

разомкнутый контур, система деградирует до архитектуры 1002. В двух режимах система может продолжать нормальную работу все время. Система будет разрушена только тогда, когда две произвольные ячейки одновременно вызовут опасный сбой. Этот результат обусловлен четырьмя типами отказов по общей причине, например, отказ ветви АВ, сбой ветви АС, сбой ветви ВС, а также сочетание трех независимых отказов.

Вероятность отказа более двух ветвей может игнорироваться относительно одной ветви. Степень охвата программы самодиагностики необходимо учитывать, когда модель безопасности установлена для системы на рисунке 11, система в целом генерирует восемь типов режимов отказа.

Если программа самодиагностики обнаруживает и выдает ошибку, ее можно сразу же исправить. Иногда один сбой можно обнаружить, до его происхождения. Для возможности обнаружения неисправностей необходимо производить регулярный ремонт и техническое обслуживание оборудования. Регулярное техническое обслуживание осуществляется профессиональным и техническим персоналом, который вручную проверяет каждую часть оборудования, чтобы определить, корректно ли они работают. Существует также оперативный уровень обслуживания, который реализуется, когда диагностические программы обнаруживают и выявляют возникновение сбоя, а другой – регулярный уровень обслуживания, происходит во время периодического технического обслуживания, и включает время тестирования и время ремонта.

Расчет средней наработки до отказа осуществляется по следующей формуле:

$$T = \frac{5}{6} \lambda \quad (20)$$

На базе приведенных выше уравнений, можно констатировать, что показатель средней наработки до момента выхода из строя мажоритарной схемы оказался значительно хуже в сравнении с другими, приведенными

выше схемами. Выходит, что использовать мажоритарные структуры без возможности их дальнейшего восстановления не совсем целесообразно.

#### 5. Расчет средней наработки до отказа.

Далее предлагаем в качестве наглядного примера рассмотреть резервированные структуры «1 из n», включающих в свой состав одинаковой степени надежности экспоненциально распределенные компоненты:

$$T = \int_0^{\infty} P(t)dt = \int_0^{\infty} [1 - (1 - e^{-\lambda t})^n]dt \quad (21)$$

Следовательно, с нашей точки зрения, целесообразно применить процедуру, которая описана в уравнении 7, но с заменой переменных. Получим уравнение следующего вида:

$$1 - e^{-\lambda t} = x; t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{1}{1-x}; dt = \frac{dx}{\lambda(1-x)} \quad (22)$$

Из выше сказанного приходим к выводу, что средняя наработка до выхода из строя схем типа «1 из n» будет иметь вид следующего выражения:

$$T = \frac{1}{\lambda} \int_0^1 \frac{1-x^n}{1-x} dx = \frac{1}{\lambda} \int_0^1 (1 + x + \dots + x^{n-1}) dx = \frac{1}{\lambda} (1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{n}) \quad (23)$$

При этом расчет средней наработки до выхода из строя схем «m из n» будет производиться по следующей формуле:

$$T = \frac{1}{\lambda} \left( \frac{1}{n} + \frac{1}{n-1} + \frac{1}{n-2} + \dots + \frac{1}{m} \right) \quad (24)$$

Традиционный алгоритм мажоритарного подбора наделен одним достаточно значительным недостатком. Так, при выходе из строя большей части задействованных каналов, в нашем случае отказали 2 канала, на выходе получаем значения вышедших из строя каналов. Теоретически вероятность выхода их из строя крайне мала, но практически отключили питание на 2-х преобразователях и данные перестали передаваться сразу по 2-м каналам.

Вывод: каналы исправны, но при этом данные перестали передаваться в систему [17, 18, 19, 20, 21, 22].

## **7 Динамические модели надежности**

В основе динамических моделей надежности заложено предположение, в соответствии с которым частота ошибок прямо пропорциональна как числу ошибок в программах, так и времени обнаружения ошибок. В данных моделях наблюдаемым событием выступает количество ошибок, выявляемых в заданном временном интервале, а не время ожидания каждой ошибки.

К числу динамических моделей относится и модель Муса. Согласно данной модели в процессе тестирования осуществляется фиксация времени функционирования программы до очередного отказа. считается, что не всякая ошибка ПС может вызвать отказ, поэтому допускается обнаружение более одной ошибки при функционировании программы до момента появления очередного отказа.

Сложность систем, с точки зрения анализа их надежности, определяется:

- а) реализацией различных вариантов резервирования (структурного, временного, алгоритмического);
- б) применением разных стратегий восстановления;
- с) отказами по общей причине.

Следует отметить, что учет данного ряда факторов возможен только лишь в пределах динамических моделей надежности.

К числу наиболее распространенных динамических моделей «надежностного» поведения систем относятся марковские случайные процессы [23].

### **7.1 Марковские случайные процессы**

При рассмотрении сложных систем со стохастическим характером работы, с нашей точки зрения, наиболее полезной математической моделью выступает случайный процесс. Объясняется это тем, что развитие последнего зависит от множества случайных факторов.



Хорошими примерами случайных процессов могут выступать процессы поступления и передачи информации в телекоммуникационной сети, обмена информацией с внешними устройствами в вычислительной системе и т.д. Многие модели дискретных систем, обладающие стохастическим характером действия, создаются на базе моделей масштабного обслуживания, где все процессы случайными. В связи с этим, для решения подобного рода задач может применяться математический аппарат теории марковских процессов.

Математическая интерпретация марковских процессов зачастую представляется в виде систем дифференциальных или алгебраических уравнений. Стоит отметить, что решение таких уравнений получить в явном виде не получается, что обуславливает необходимость использования численных способов решения систем дифференциальных или алгебраических уравнений.

Далее рассмотрим, как происходит построение марковских моделей надежности.

На базе имеющихся данных о структуре и принципах работы исследуемой системы устанавливается множество ее возможных состояний. Данное множество разделяется на 2 отдельных подмножества – функционирующих состояний и состояний отказа. Далее создается марковский граф переходов. На основании графа переходов образуется оптимальная система уравнений, позволяющая получить формульные выражения заданных показателей надежности. В случае, если решение системы производится посредством использования численных методов, то численные показатели необходимо получить непосредственно их характеристик надежности в заданные промежутки времени.

## **8 Анализ процесса деградации системы противоаварийной защиты ГРС с использованием критериев Маркова**

Среди различных структур резервирования контуров СПАЗ выделяют MooND. Особенностью этих структур является то, в процессе эксплуатации при выполнении СПАЗ функционала N из M выполняется встроенное диагностирование его компонентов. В процессе эксплуатации СПАЗ возможны детектируемые отказы отдельных модулей или компонентов СПАЗ. Для резервируемых СПАЗ устанавливаются требования по времени (периоду) их ТО с последующим восстановлением, с остановкой или без остановки ГРС и перевода оборудования (технологического процесса), в безопасное состояния, командой с пульта управления диспетчера. И если диагностика обнаруживает опасный или безопасный отказы СПАЗ, то активизируется сигнализация и выполняется подготовка к переводу в безопасное состояние или остановка ГРС.

В процессе детектируемых отказов возникает и развивается деградация СПАЗ (SIS). Несмотря на то, что, контур СПАЗ включает в себя различные компоненты, наиболее важным является логический блок. Это объясняется тем, что при проектировании СПАЗ в соответствии с интегрированной или общей архитектурой совместной эксплуатации СПАЗ и РСУ, логический блок может отвечать за обработку не только аварийно- значимых сигналов, но и сигналов РСУ критически важных объектов.

Исследование проводилось с использованием контроллера Tricon. Контроллеры Tricon являются современными программируемыми логическими контроллерами, обеспечивающими отказобезопасность с помощью архитектуры с тройным модульным резервированием (Triple-Modular Redundant, TMR).

В контроллере объединены три параллельных процессорных блоков и выполняется расширенная диагностика компонентов контроллера. При выполнении логических и вычислительных операций в контроллере

выполняется мажоритарная выборка не отказавших блоков "двух-из-трех". Каждый канал TMR независимо выполняет программу управления, параллельно с другими двумя каналами. Расширенная диагностика каждого канала, модуля и функциональной цепи немедленно обнаруживает эксплуатационные неисправности и сообщает о них с помощью индикаторов или аварийных сигналов. Диагностика TMR выполняется в on-line режиме.

Вся информация о диагностике неисправностей ПЛК доступна как программе управления, так и оператору, диспетчеру. Эти диагностические данные могут использоваться для корректировки управляющих действий или для выполнения процедур технического обслуживания.

Специализированные механизмы аппаратной/программной мажоритарной выборки квалифицируют и проверяют все цифровые входные и выходные сигналы, поступающие от полевых устройств, в то время как аналоговые входные сигналы подвергаются процессу оценки среднего значения. Так как каждый канал изолирован от других, никакой одиночный отказ в любом из каналов не может передаваться в другой канал. Если аппаратный отказ произойдет в одном канале, два других канала отвергают его сигнал. При этом неисправный модуль можно легко заменить, не отключая контроллер и не прерывая технологический процесс.

На рисунке 12 представлена схема последовательной деградации Tricon.

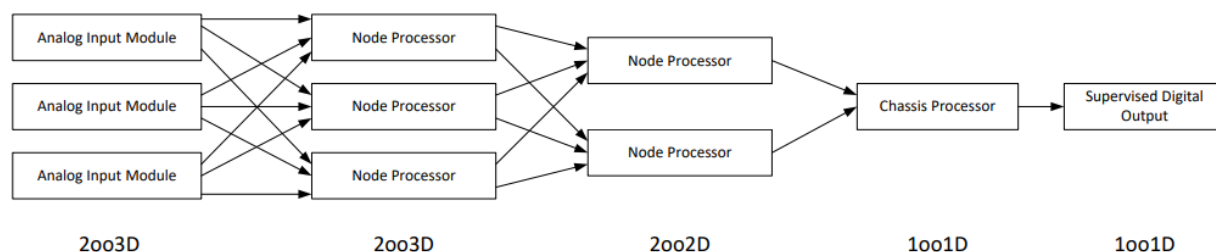


Рисунок 12 – Схема последовательной деградации Tricon

Далее предлагаем рассмотреть резервирование, осуществляемое способом голосования. Сразу стоит отметить, что указанный метод значительно проще, нежели резервирование, осуществляемое замещением.

Объясняется это тем, что данный метод не нуждается в постоянной синхронизации состояний процессоров. Помимо этого, рассматриваемый метод дает возможность осуществлять непрерывное управление во время перехода на резервный компонент. Но для того, чтобы голосование было безотказным, система должна включать в себя не менее 3-х процессоров, а это в свою очередь весьма дорого [26].

Для наглядности система с голосованием, созданная на базе схемы «2003» представлена на рисунке 13. Она состоит из 3-х процессорных модулей А, В и С. Данные модули выполняют одну и ту же программу пользователя, так как они получают одну и ту же информацию от датчиков за счет использования модуля ввода АІ. Любой из процессорных модулей обладает несколькими сетевыми контроллерами. При этом последние отвечают за исполнение протокола обмена по сети.

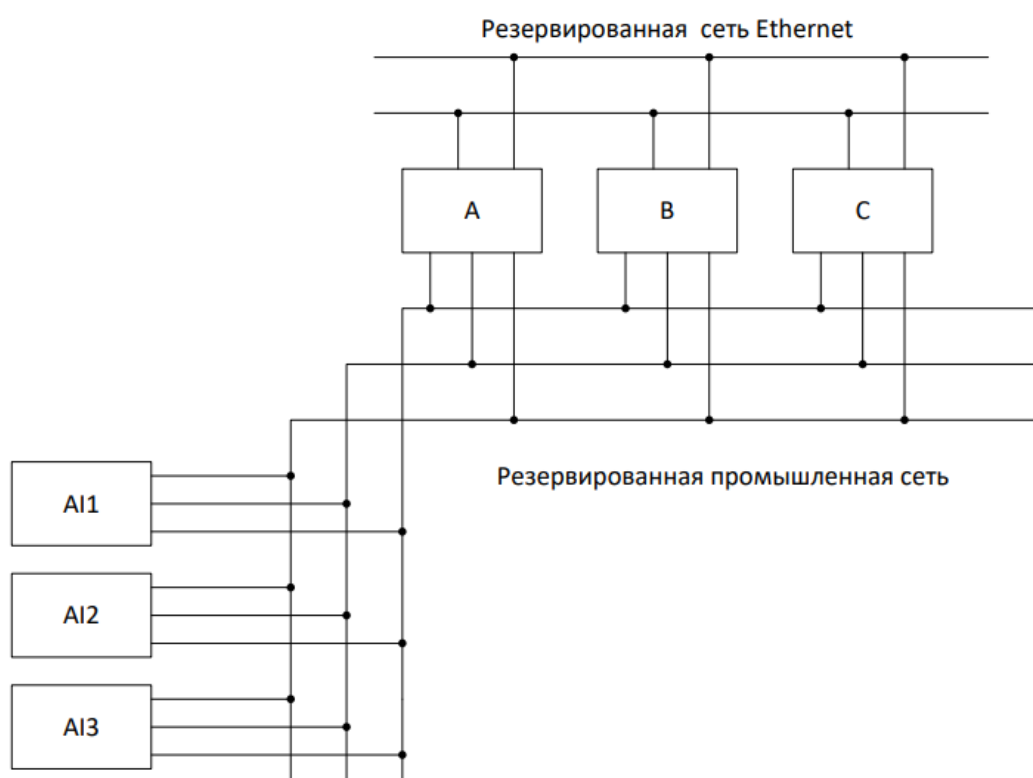


Рисунок 13 – Резервирование методом голосования

Принцип действия рассматриваемой системы заключается в следующем. Любой из 3-х параллельно функционирующих процессора (А, В и

С) отправляет в модули ввода определенную команду. После этого каждый модуль ввода получает эти 3 команды и осуществляет голосование по принципу «2oo3D». На основании результатов голосования выбирается одно значение, применяемое для дачи ответа на команду. Так как в системе три модуля, то в процессе, соответственно, отправляется и 3 ответа, на поступившую к нему команду. Однако из процессор в соответствии с принципом действия схемы «2oo3D» выбирает только 1 процессор, который непосредственно и используется в процессе функционирования прикладной программы.

Аналогичным образом осуществляется и процедура вывода. Каждый отдельно взятый процессор самостоятельно посылает в модули вывода команду вывода. При этом каждый из модулей вывода может принять всего 3 команды. После получения команд в каждом модуле вывода осуществляется голосование в соответствии со схемой 2oo3D. На основании результатов, полученных в ходе голосования, подбирается только 1 команда из 3-х. Именно она и будет использоваться для запуска и отключения исполнительного устройств.

Следовательно, голосование исполняется не каким-то конкретным блоком резервирования, а каждым компонентом системы в отдельности. В связи с этим, отказ любого блока голосования будет являться причиной выхода из строя всей системы.

## **8.1 Моделирование архитектуры 2oo3D и расчет PFD контроллера Triconex Tricon**

Исходя из спецификации системы, одно из состояний – состояние с тремя обнаруженными опасными каналами, является абстрактным, так как после обнаружения двух отказавших каналов система останавливается до выхода из ремонта хотя бы одного из них. Структурная схема надежности, учитывающая мажоритарный контроль представлена на рисунке 14 [27].



Рисунок 14 – Структурная схема надежности в режиме нормальной эксплуатации

Размеченный граф модели функционирования Tricon в условиях проявления опасных отказов представлен на рисунке 15. Данный граф содержит поглощающее состояние с необнаруженными опасными отказами S8.

Часть опасных отказов, выявляемая автоматическими диагностическими тестами определяется как диагностический охват (DC, diagnostic coverage), рассчитываемый по формуле 32:

$$DC = \sum \lambda_{DD} / \sum \lambda_{Dtotal} \quad (32)$$

где  $\sum \lambda_{DD}$  – суммарная интенсивность выявленных опасных отказов;

$\sum \lambda_{Dtotal}$  – общая суммарная интенсивность опасных отказов.

Для модели используются следующие допущения:

а) опасные отказы распознаются с вероятностью выявления, равной DC;

б) отказы, не выявленные диагностикой, возникают с вероятностью, равной дополнению величины диагностического охвата до единицы ( $1 - DC$ );

с) после проявления отказов, не выявленных отказов, система в дальнейшем может перейти либо в состояние отказа, выявленного диагностикой, (после его проявления) либо в состояние технического обслуживания;

д) техническое обслуживание проводится с периодичностью  $T_{\Pi}=1/\lambda_{\Pi}$  и с длительностью  $T_{\text{ТО}} = 1/\mu_{\Pi}$ .

Для изучения показателей надежности и обеспечения безопасности воспользуемся методом моделей Маркова. Модель Маркова без восстановительных работ для архитектуры 2oo3D представлена на рисунке 15.

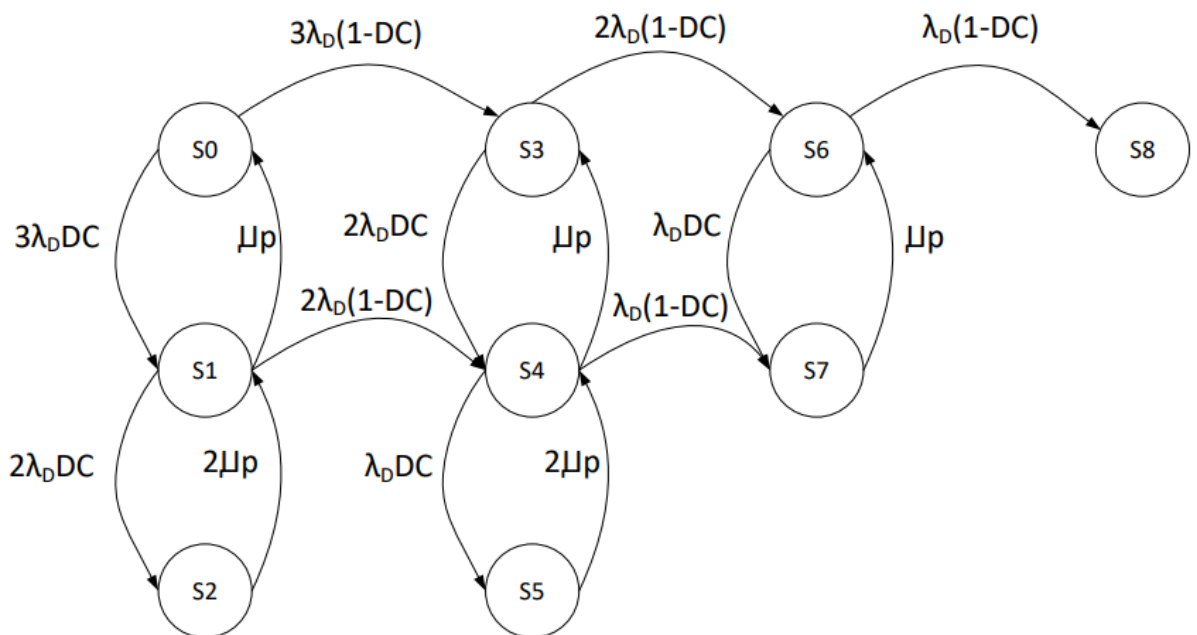


Рисунок 15 – Модель Маркова 2oo3D без восстановительных работ

Граф модели содержит:

а) работоспособные состояния: S0 (все каналы исправны), S1 (в одном из каналов проявился и обнаружен опасный отказ) и S3 (в одном из каналов проявился, но не обнаружен опасный отказ);

б) неработоспособные состояния: S2 (в двух каналах проявились и обнаружены опасные отказы), S4 (в одном из каналов проявился и обнаружен опасный отказ, в другом - проявился, но не обнаружен опасный отказ) и S5 (в двух каналах проявились и обнаружены опасные отказы, в третьем проявился, но не обнаружен опасный отказ);

с) состояния с необнаруженными опасными отказами, которые неспособен парировать мажоритарный орган: S6 (в двух каналах проявились, но не обнаружены опасные отказы), S7 (в одном из каналов проявился и обнаружен опасный отказ, в двух каналах проявились, но не обнаружены опасные отказы), S8 (в трех каналах проявились, но не обнаружены опасные отказы).

После обнаружения проявления опасного отказа, неработоспособный канал отключается и восстанавливается с интенсивностью  $\mu_p$ , это моделируется соответствующими переходами  $S1 \rightarrow S0$ ,  $S2 \rightarrow S1$ ,  $S4 \rightarrow S3$ ,  $S5 \rightarrow S4$ ,  $S7 \rightarrow S6$ .

Использование таких контроллеров показывает, что аппаратный канал с проявившимся необнаруженным опасным дефектом продолжает использоваться. В процессе его использования вероятно проявление других дефектов, которые могут быть выявлены системой контроля.

Соответственно, СПАЗ, после проявления необнаруженного опасного отказа и последующего проявления нового дефекта (обнаруженного опасного отказа) может перейти в состояние ремонта канала.

Составим систему дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена для графа на рисунке 15 в программном пакете Mathcad. Результат представлен на рисунке 16.



$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} P_0(t) &= -[3 \lambda_D \cdot DC + 3 \lambda_D \cdot (1 - DC)] P_0(t) + \mu_P \cdot P_1(t) \\
\frac{d}{dt} P_1(t) &= -[2 \cdot \lambda_D \cdot DC + \mu_P + 2 \cdot \lambda_D \cdot (1 - DC)] \cdot P_1(t) + 3 \cdot \lambda_D \cdot DC \cdot P_0(t) + 2 \cdot \mu_P \cdot P_2(t) \\
\frac{d}{dt} P_2(t) &= -2 \cdot \mu_P \cdot P_2(t) + 2 \cdot \lambda_D \cdot DC \cdot P_1(t) \\
\frac{d}{dt} P_3(t) &= -[2 \cdot \lambda_D \cdot (1 - DC) + 2 \cdot \lambda_D \cdot DC] \cdot P_3(t) + 3 \cdot \lambda_D \cdot (1 - DC) \cdot P_0(t) + \mu_P \cdot P_6(t) \\
\frac{d}{dt} P_4(t) &= -[\lambda_D \cdot DC + \lambda_D \cdot (1 - DC) + \mu_P] \cdot P_4(t) + 2 \cdot \lambda_D \cdot DC \cdot P_3(t) + 2 \cdot \lambda_D \cdot (1 - DC) \cdot P_1(t) + 2 \cdot \mu_P \cdot P_5(t) \\
\frac{d}{dt} P_5(t) &= -2 \cdot \mu_P \cdot P_5(t) + \lambda_D \cdot DC \cdot P_4(t) \\
\frac{d}{dt} P_6(t) &= -[\lambda_D \cdot (1 - DC) + \lambda_D \cdot DC] \cdot P_6(t) + 2 \cdot \lambda_D \cdot (1 - DC) \cdot P_3(t) + \mu_P \cdot P_7(t) \\
\frac{d}{dt} P_7(t) &= -\mu_P \cdot P_7(t) + \lambda_D \cdot DC \cdot P_6(t) + \lambda_D \cdot (1 - DC) \cdot P_4(t) \\
\frac{d}{dt} P_8(t) &= \lambda_D \cdot (1 - DC) \cdot P_6(t)
\end{aligned}$$

Рисунок 16 – Система дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена

Решим систему, представленную на рисунке 16. Запишем начальные условия:

$$P_0(0) = 1 \quad P_1(0) = 0, P_2(0) = 0 \quad P_3(0) = 0 \quad P_4(0) = 0 \quad P_5(0) = 0 \quad \left| \quad P_6(0) = 0 \quad P_7(0) = 0 \quad P_8(0) = 0 \right.$$

Для дальнейшего решения задачи воспользуемся преобразованием Лапласа:

$$s = \frac{d}{dt} \quad (33)$$

Исходя из условий, запишем уравнения (рис. 17).

$$\begin{aligned}
s \cdot p_0(s) &= -[3 \lambda_D \cdot DC + 3 \lambda_D \cdot (1 - DC)] P_0(s) + \mu_P \cdot P_1(s) + 1 \\
s \cdot p_1(s) &= -[2 \cdot \lambda_D \cdot DC + \mu_P + 2 \cdot \lambda_D \cdot (1 - DC)] \cdot P_1(s) + 3 \cdot \lambda_D \cdot DC \cdot P_0(s) + 2 \cdot \mu_P \cdot P_2(s) \\
s \cdot p_2(s) &= -2 \cdot \mu_P \cdot P_2(s) + 2 \cdot \lambda_D \cdot DC \cdot P_1(s) \\
s \cdot p_3(s) &= -[2 \cdot \lambda_D \cdot (1 - DC) + 2 \cdot \lambda_D \cdot DC] \cdot P_3(s) + 3 \cdot \lambda_D \cdot (1 - DC) \cdot P_0(s) + \mu_P \cdot P_6(s) \\
s \cdot p_4(s) &= -[\lambda_D \cdot DC + \lambda_D \cdot (1 - DC) + \mu_P] \cdot P_4(s) + 2 \cdot \lambda_D \cdot DC \cdot P_3(s) + 2 \cdot \lambda_D \cdot (1 - DC) \cdot P_1(s) + 2 \cdot \mu_P \cdot P_5(s) \\
s \cdot p_5(s) &= -2 \cdot \mu_P \cdot P_5(s) + \lambda_D \cdot DC \cdot P_4(s) \\
s \cdot p_6(s) &= -[\lambda_D \cdot (1 - DC) + \lambda_D \cdot DC] \cdot P_6(s) + 2 \cdot \lambda_D \cdot (1 - DC) \cdot P_3(s) + \mu_P \cdot P_7(s) \\
s \cdot p_7(s) &= -\mu_P \cdot P_7(s) + \lambda_D \cdot DC \cdot P_6(s) + \lambda_D \cdot (1 - DC) \cdot P_4(s) \\
s \cdot p_8(s) &= \lambda_D \cdot (1 - DC) \cdot P_6(s)
\end{aligned}$$

Рисунок 17 – Система уравнений в форме Лапласа

Добавим еще одно уравнение:

$$1 = P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8$$

В результате получилось 9 уравнений и 8 неизвестные переменные. Уберем уравнение, находящееся в первой строчке на рисунке 16.

Решим систему уравнений с помощью пакета Mathcad (рис. 18). Примем все интенсивности отказов равными  $2,5 \cdot 10^{-5}$  1/час (данные интенсивности отказа были взяты из таблицы базовых значений входных параметров моделей функциональной безопасности SIL3), интенсивность отказа – 1/8 1/час, а коэффициент диагностического охвата – 1.

$$\text{Find}(P_0, P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8) \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{8.0e8 \cdot s^2 + 3.0004e8 \cdot s + 2.5e7}{8.0e8 \cdot s^2 + 3.001e8 \cdot s + 2.5015003e7} \\ \frac{60000.0 \cdot s + 15000.0}{8.0e8 \cdot s^2 + 3.001e8 \cdot s + 2.5015003e7} \\ \frac{3.0}{8.0e8 \cdot s^2 + 3.001e8 \cdot s + 2.5015003e7} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} ;$$

Рисунок 18 – Решение системы уравнений при DC = 1

Построим график вероятности нахождения системы в работоспособном состоянии (0-состояние) в среде Matlab при DC = 1.

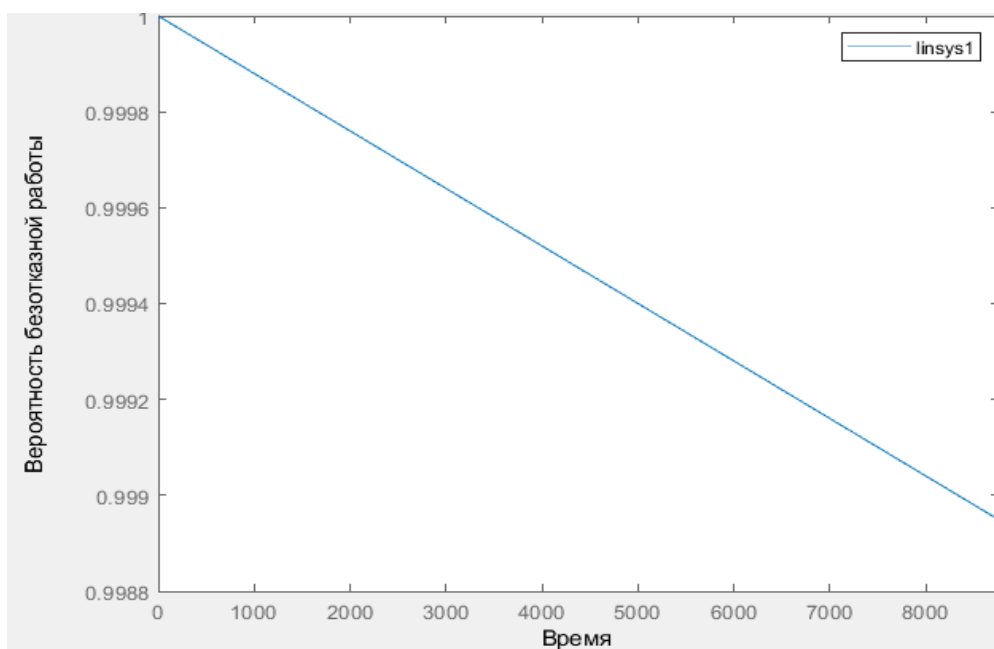


Рисунок 19 – График вероятности нахождения системы в работоспособном состоянии

При коэффициенте диагностического охвата равного 1, СПАЗ может на протяжении года иметь вероятность работоспособности 0,99.

На рисунке 20 показана зависимость функциональной безопасности  $PFD_{avg}$  от значений входного параметра  $DC = 1$ . При выявлении всех опасных отказов ( $DC = 1$ ) модель без восстановительных работ показывает асимптотическое стремление к устоявшемуся значению.

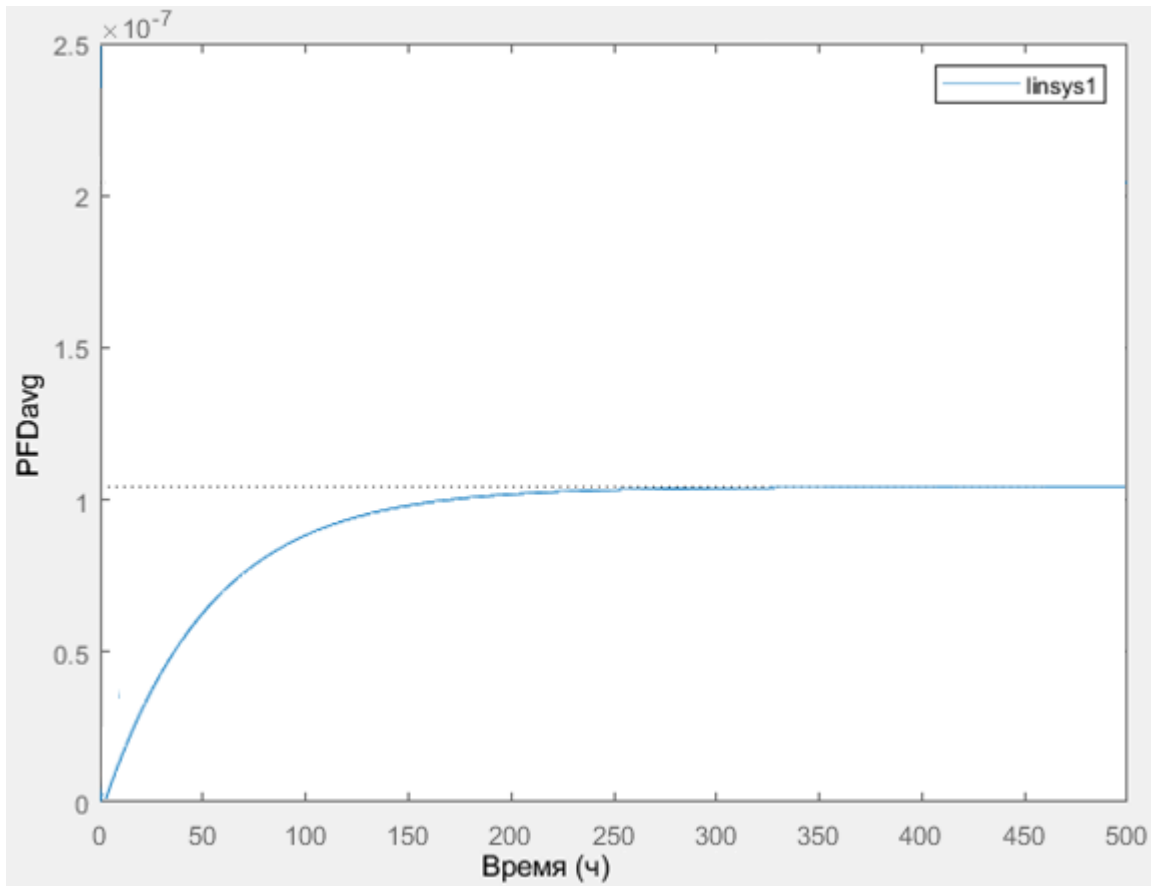


Рисунок 20 – Зависимость PFDavg от входного параметра (DC = 1)

Далее по формуле 34 определим эквивалентное среднее время простоя канала для архитектуры 2oo3D без восстановительных работ:

$$t_{CE}(T) = \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \cdot \left( \frac{T}{2} + MTTR \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} \cdot MTTR \quad (34)$$

Определим эквивалентное среднее время простоя голосующей группы для архитектуры 2oo3D без восстановительных работ по формуле 35:

$$t_{GE}(T) = \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \cdot \left( \frac{T}{3} + MTTR \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} \cdot MTTR \quad (35)$$

Рассчитаем среднюю вероятность опасного отказа по запросу для функции безопасности (PFDavg):

$$\begin{aligned} PFD_{avg}(T) = & 6 \cdot (1 - \beta_D) \cdot \lambda_{DD} + (1 - \beta) \cdot \lambda_{DU}^2 \cdot t_{CE}(T) \cdot t_{GE}(T) \\ & + \beta_D \cdot \lambda_{DD} \cdot MTTR + \beta \cdot \lambda_{DU} \cdot \left( \frac{T}{2} + MTTR \right) \end{aligned} \quad (36)$$

На рисунке 21 представлен график решений системы дифференциальных уравнений (СДУ) Колмогорова-Чепмена зависимости показателя  $PFD_{avg}$  от времени без восстановительных работ.

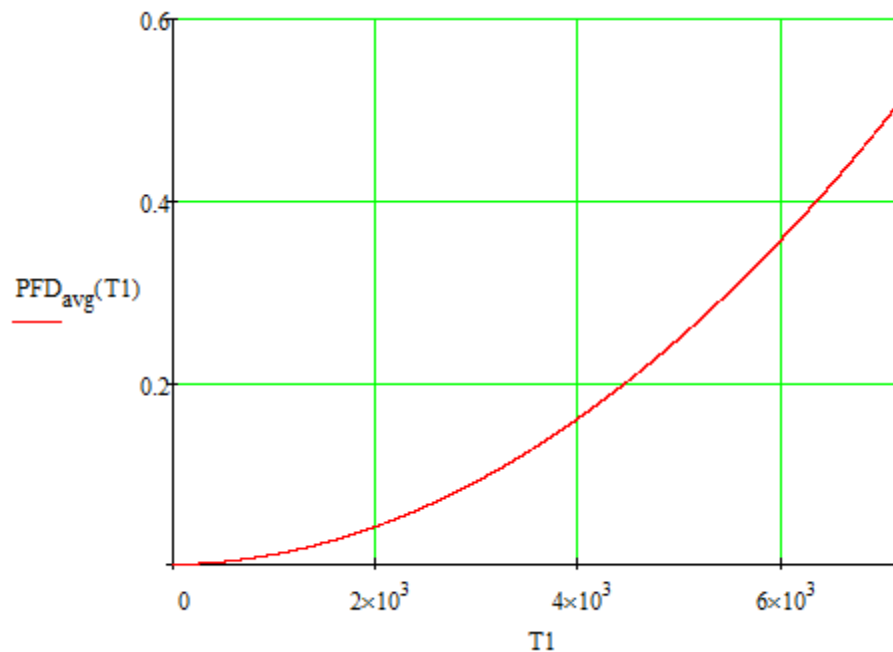


Рисунок 21 – Зависимость PFD от времени архитектуры 2oo3D без восстановительных работ

Исследуем модель Маркова с восстановительными работами для архитектуры 2oo3D (рис. 22).

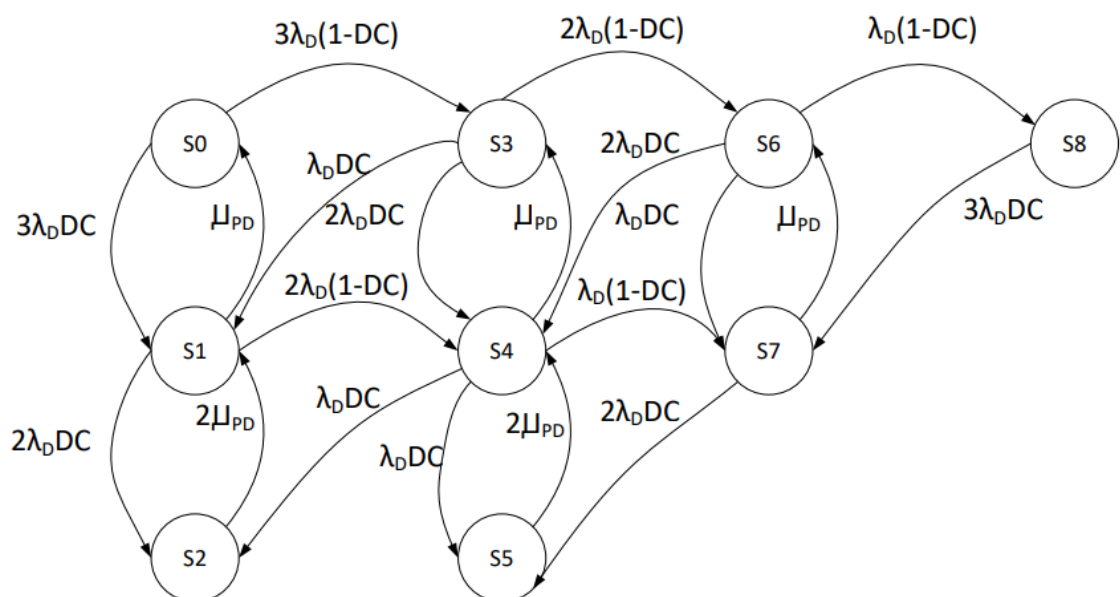


Рисунок 22 – Модель Маркова 2oo3D с восстановительными работами

В ходе восстановительных операций проводится полная диагностика канала с устранением всех (обнаруженных и необнаруженных) дефектов.

Также это влияет на длительность восстановления, соответственно  $\mu_{PD} = 1/(MRT + TD) < \mu_P$ .

Где MRT – средняя длительность ремонта одного канала СПАЗ;

TD – дополнительное время диагностирования не выявленных отказов.

Аналогично составим систему дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена для графа на рисунке 22 в программном пакете Mathcad. Результат представлен на рисунке 23.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}P_0(t) &= -3 \cdot \lambda_D \cdot P_0(t) + \mu_{PD} \cdot P_1(t) \\ \frac{d}{dt}P_1(t) &= -(2 \cdot \lambda_D + \mu_{PD}) \cdot P_1(t) + 3 \cdot \lambda_D \cdot DC \cdot P_0(t) + 2 \cdot \mu_{PD} \cdot P_2(t) + \lambda_D \cdot DC \cdot P_3(t) \\ \frac{d}{dt}P_2(t) &= -2 \cdot \mu_{PD} \cdot P_2(t) + 2 \cdot \lambda_D \cdot DC \cdot P_1(t) + \lambda_D \cdot DC \cdot P_4(t) \\ \frac{d}{dt}P_3(t) &= -(2 \cdot \lambda_D + \lambda_D \cdot DC) \cdot P_3(t) + 3 \cdot \lambda_D \cdot (1 - DC) \cdot P_0(t) + \mu_{PD} \cdot P_6(t) \\ \frac{d}{dt}P_4(t) &= -[\lambda_D \cdot (DC + 1) + \mu_{PD}] \cdot P_4(t) + 2 \cdot \lambda_D \cdot DC \cdot (P_3(t) + P_6(t)) + 2 \cdot \lambda_D \cdot (1 - DC) \cdot P_1(t) + 2 \cdot \lambda_D \cdot P_5(t) \\ \frac{d}{dt}P_5(t) &= -2 \cdot \mu_{PD} \cdot P_5(t) + \lambda_D \cdot DC \cdot P_4(t) + 2 \cdot \lambda_D \cdot DC \cdot P_7(t) \\ \frac{d}{dt}P_6(t) &= -(\lambda_D + 2\lambda_D \cdot DC) \cdot P_6(t) + 2 \cdot \lambda_D \cdot (1 - DC) \cdot P_3(t) + \mu_{PD} \cdot P_7(t) \\ \frac{d}{dt}P_7(t) &= -(\mu_{PD} + 2 \cdot \lambda_D \cdot DC) \cdot P_7(t) + \lambda_D \cdot DC \cdot P_6(t) + \lambda_D \cdot (1 - DC) \cdot P_4(t) + 3 \cdot \lambda_D \cdot DC \cdot P_8(t) \\ \frac{d}{dt}P_8(t) &= -3 \cdot \lambda_D \cdot DC \cdot P_8(t) + \lambda_D \cdot (1 - DC) \cdot P_6(t) \end{aligned}$$

Рисунок 23 – Система дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена

Решим систему уравнений с помощью пакета Mathcad (рис. 24).

$$\text{Find}(P_0, P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8) \rightarrow \left( \begin{array}{c} \frac{6.0e21 \cdot s^2 + 1.5003e21 \cdot s + 8.333333333333333e19}{6.0e21 \cdot s^2 + 1.50075e21 \cdot s + 8.340835583333333e19} \\ \frac{4.5e17 \cdot s + 7.5e16}{6.0e21 \cdot s^2 + 1.50075e21 \cdot s + 8.340835583333333e19} \\ \frac{2.25e13}{6.0e21 \cdot s^2 + 1.50075e21 \cdot s + 8.340835583333333e19} \\ 0 \\ ; \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right)$$

Рисунок 24 – Решение системы уравнений при DC = 1

На рисунке 25 показана зависимость функциональной безопасности PFDavg от значений входного параметра DC = 1 (модель с восстановительными работами).

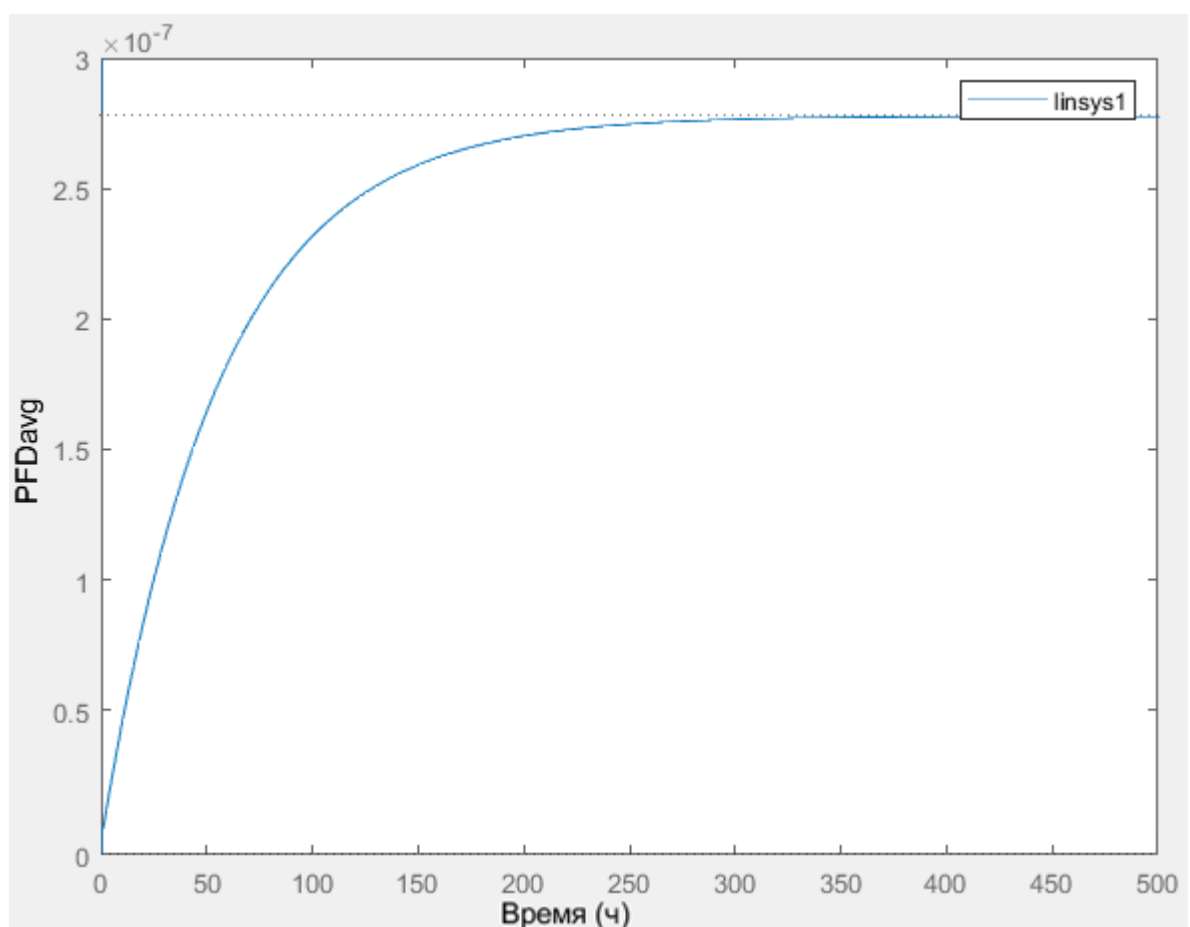


Рисунок 25 – Зависимость PFDavg от входного параметра (DC = 1)

Анализируя графики, представленные на рисунках 20 и 25 можно отметить, что при выявлении всех опасных отказов ( $DC = 1$ ) модели показывают одинаковое поведение функции  $PFD_{avg}$ , а именно асимптотическое стремление к устоявшемуся значению. При этом графики отличаются в силу разности входных параметров  $\mu_p$  и  $\mu_{pd}$ .

Аналогично рассчитаем среднюю вероятность опасного отказа по запросу для функции безопасности ( $PFD_{avg}$ ) архитектуры 2oo3D с восстановительными работами:

$$PFD_{avg}(T) = 6 \cdot (1 - \beta_D) \cdot \lambda_{DD} + (1 - \beta) \cdot \lambda_{DU}^2 \cdot t_{CE}(T) \cdot t_{GE}(T) + \beta_D \cdot \lambda_{DD} \cdot MTTR + \beta \cdot \lambda_{DU} \cdot \left( \frac{T}{2} + MTTR \right) \quad (37)$$

На рисунке 25 представлен график решений СДУ Колмогорова-Чепмена зависимости показателя PFD от времени с восстановительными работами.

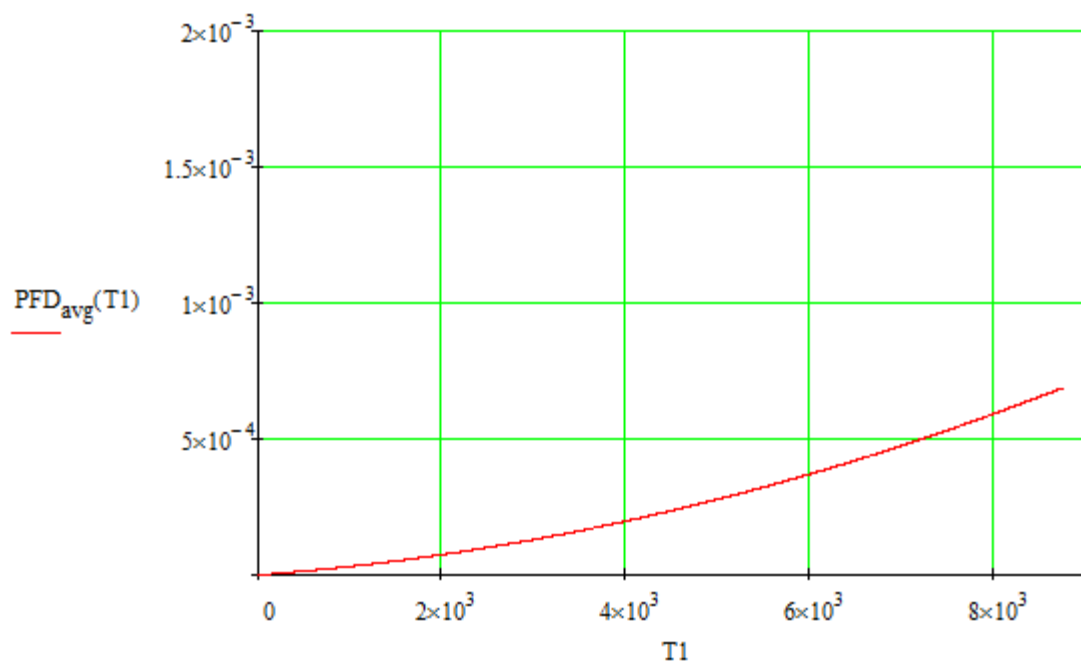


Рисунок 25 – Зависимость PFD от времени архитектуры 2oo3D с восстановительными работами

Из графика 21 видно, что хорошо видно, что наличие поглощающих состояний обуславливает непрерывный рост показателя  $PFD_{avg}$ . График 25



показывает, что модель без поглощающих состояний иллюстрирует асимптотическое стремление показателя функциональной безопасности к стационарному значению.

## 8.2 Расчет безопасности контроллера Tricon, деградировавшего до уровня 2oo2D

Архитектура 2oo2D представляет собой два канала, соединенных параллельно. При нормальной работе для выполнения функции безопасности необходимы оба канала. Кроме того, если диагностическое тестирование обнаруживает отказ в любом канале, то результаты анализа устанавливаются так, чтобы общее выходное состояние совпадало с результатом, выдаваемым другим каналом. Если диагностическое тестирование обнаруживает отказы в обоих каналах или несоответствие между ними, причина которого не может быть идентифицирована, то выходной сигнал переводит систему в безопасное состояние. Для обнаружения несоответствия между каналами каждый канал может определять состояние другого канала независимо от другого канала [28].

Структурная схема надежности архитектуры 2oo2D представлена на рисунке 26.



Рисунок 26 – Структурная схема архитектуры 2oo2D

Исследуем деградацию контроллера Tricon до состояния 2oo2D. Модель Маркова представлена на рис. 27.

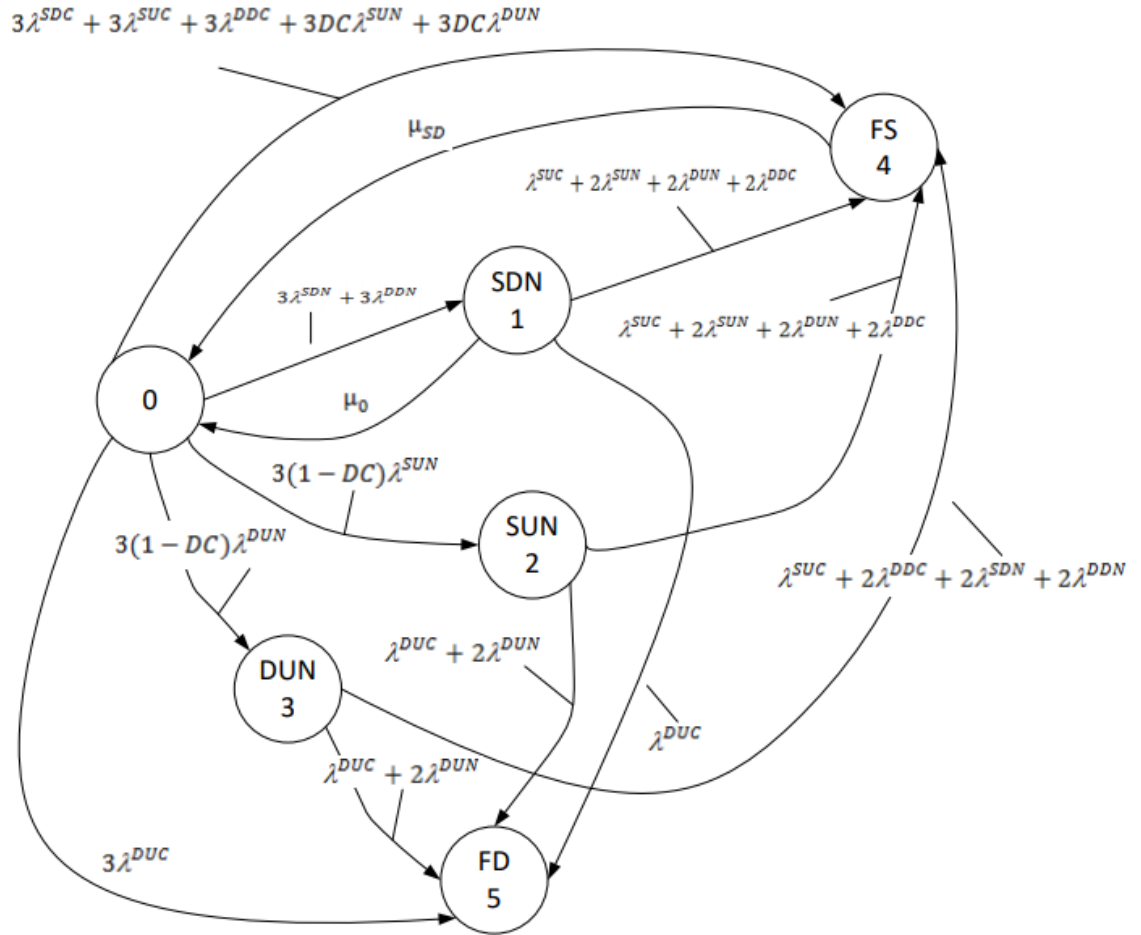


Рисунок 27 – Модель Маркова контроллера Tricon, деградировавшего до уровня 2oo2D

Пусть частота отказов одного модуля равна  $\lambda$ , частота отказов на стороне безопасности системы равна  $\lambda_S$ , а частота отказов -  $\lambda_D$  на стороне опасности, отсюда следует:

$$\lambda = \lambda_S + \lambda_D \quad (34)$$

Добавим уровень охвата диагностикой (DC):

$$\lambda_{SD} = DC \cdot \lambda_S \quad (35)$$

$$\lambda_{SU} = DC \cdot \lambda_S \quad (36)$$

$$\lambda_{DD} = DC \cdot \lambda_D \quad (37)$$

$$\lambda_{DU} = DC \cdot \lambda_D \quad (38)$$

где DD – опасные обнаруженные отказы; DU – опасные необнаруженные отказы; SD – безопасные обнаруженные отказы; SU – безопасные обнаруженные отказы.

Рассмотрим общий коэффициент отказа  $\beta$ :

$$\lambda_{SDC} = \beta \cdot \lambda_{SD} \quad (39)$$

$$\lambda_{SDN} = (1 - \beta) \cdot \lambda_{SD} \quad (40)$$

$$\lambda_{SUC} = \beta \cdot \lambda_{SU} \quad (41)$$

$$\lambda_{SUN} = (1 - \beta) \cdot \lambda_{SU} \quad (42)$$

$$\lambda_{DDC} = \beta \cdot \lambda_{DD} \quad (43)$$

$$\lambda_{DDN} = (1 - \beta) \cdot \lambda_{DD} \quad (44)$$

$$\lambda_{DUC} = \beta \cdot \lambda_{DU} \quad (45)$$

$$\lambda_{DUN} = (1 - \beta) \cdot \lambda_{DU} \quad (46)$$

где  $\lambda_{SDC}$  – безопасный обнаруженный сбой;  $\lambda_{SDN}$  – безопасный необнаруженный нормальный сбой;  $\lambda_{SUC}$  – безопасный обнаруженный сбой;  $\lambda_{SUN}$  – безопасный необнаруженный нормальный сбой;  $\lambda_{DDC}$  – опасный обнаруженный отказ;  $\lambda_{DDN}$  – опасный обнаруженный нормальный отказ;  $\lambda_{DUC}$  – опасный необнаруженный сбой;  $\lambda_{DUN}$  – опасный необнаруженный нормальный сбой.

Если программа самодиагностики обнаруживает и выдает ошибку, ее можно сразу же исправить. Чтобы можно было своевременно обнаруживать неисправности, необходимо регулярно выполнять техническое обслуживание оборудования. Регулярное ТО осуществляется техническим персоналом, который вручную проверяет каждую часть оборудования, чтобы определить, нормально ли они работают. Предположим, что при ручной проверке могут быть обнаружены все проблемы, и тогда произойдут две конкретные скорости обслуживания. Одним из них является оперативный уровень обслуживания,

который происходит, когда диагностические программы обнаруживают и выявляют возникновение сбоя, а другой - регулярный уровень обслуживания, который происходит во время периодического обнаружения и технического обслуживания, и включает время тестирования и время ремонта. По сравнению с уровнем оперативного технического обслуживания, уровень регулярного технического обслуживания ниже.

Составим систему дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена для графа на рисунке 27 в программном пакете Mathcad. Результат представлен на рисунке 28.

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} P_0(t) &= -[3 \cdot \lambda_{SDC} + 3 \cdot \lambda_{SUC} + 3 \cdot \lambda_{DDC} + 3 \cdot DC \cdot \lambda_{SDN} + 3 \cdot DC \cdot \lambda_{SDN} + 3 \cdot \lambda_{DDN} + 3 \cdot (1 - DC) \cdot \lambda_{SDN} + 3 \cdot (1 - DC) \cdot \lambda_{DDN}] \cdot P_0(t) + \mu_{SD} \cdot DC \cdot P_4(t) + \mu_0 \cdot DC \cdot P_1(t) \\
 \frac{d}{dt} P_1(t) &= (\lambda_{SUC} + 2 \cdot \lambda_{SDN} + 2 \cdot \lambda_{DDN} + 2 \cdot \lambda_{DDC} + \lambda_{DDC}) \cdot P_1(t) + P_0(t) \cdot (3 \cdot \lambda_{SDN} + 3 \cdot \lambda_{DDN}) + \mu_0 \cdot DC \cdot P_0(t) \\
 \frac{d}{dt} P_2(t) &= (\lambda_{SUC} + 2 \cdot \lambda_{SDN} + 2 \cdot \lambda_{DDN} + 2 \cdot \lambda_{DDC} + \lambda_{DDC} + 2 \cdot \lambda_{DDN}) \cdot P_2(t) + P_0(t) \cdot 3 \cdot (1 - DC) \cdot \lambda_{SDN} \\
 \frac{d}{dt} P_3(t) &= (\lambda_{SUC} + 2 \cdot \lambda_{DDC} + 2 \cdot \lambda_{SDN} + 2 \cdot \lambda_{DDN} + \lambda_{DDC} + 2 \cdot \lambda_{DDN}) \cdot P_3(t) + P_0(t) \cdot 3 \cdot (1 - DC) \cdot \lambda_{DDN} \\
 \frac{d}{dt} P_4(t) &= (3 \cdot \lambda_{SDC} + 3 \cdot \lambda_{SUC} + 3 \cdot \lambda_{DDC} + 3 \cdot DC \cdot \lambda_{SDN} + 3 \cdot DC \cdot \lambda_{DDN}) \cdot P_4(t) - \mu_{SD} \cdot DC \cdot P_4(t) \cdot P_1(t) \cdot (\lambda_{SUC} + 2 \cdot \lambda_{SDN} + 2 \cdot \lambda_{DDN} + 2 \cdot \lambda_{DDC}) + P_2(t) \cdot (\lambda_{SUC} + 2 \cdot \lambda_{SDN} + 2 \cdot \lambda_{DDN} + 2 \cdot \lambda_{DDC}) \cdot P_3(t) \cdot (\lambda_{SUC} + 2 \cdot \lambda_{DDC} + 2 \cdot \lambda_{SDN} + 2 \cdot \lambda_{DDN}) \\
 \frac{d}{dt} P_5(t) &= P_3(t) \cdot (\lambda_{DDC} + 2 \cdot \lambda_{DDN}) + P_2(t) \cdot (\lambda_{DDC} + 2 \cdot \lambda_{DDN}) + P_1(t) \cdot \lambda_{DDC} + P_0(t) \cdot 3 \cdot \lambda_{DDC}
 \end{aligned}$$

Рисунок 28 – Система дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена

Согласно модели Маркова контроллера Tricon, которая представлена на рисунке 27, запишем матрицу перехода состояний. Результат представлен на рис. 29.

$$P = \begin{vmatrix} 1 - \Sigma & 3\lambda^{SDN} + 3\lambda^{DDN} & 3(1 - C_1)\lambda^{SUN} & 3(1 - C_1)\lambda^{DUN} & 3\lambda^{SDC} + 3\lambda^{SUC} + 3C_1\lambda^{SUN} + 3C_1\lambda^{DUN} + 3\lambda^{DDC} & 3\lambda^{DUC} \\ \mu_0 & 1 - \Sigma & 0 & 0 & \lambda^{SC} + 2\lambda^{SN} + 2\lambda^{DN} + \lambda^{DDC} & \lambda^{DUC} \\ 0 & 0 & 1 - \Sigma & 0 & \lambda^{SC} + 2\lambda^{SN} + 2\lambda^{DDN} + \lambda^{DDC} & \lambda^{DUC} + 2\lambda^{DUN} \\ 0 & 0 & 0 & 1 - \Sigma & \lambda^{SC} + \lambda^{DDC} + 2\lambda^{DN} & \lambda^{DUC} + 2\lambda^{UN} \\ \mu_{SD} & 0 & 0 & 0 & 1 - \Sigma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Рисунок 29 – Матрица перехода состояний

Решим систему уравнений с помощью пакета Mathcad (рис. 30).

$$\text{Find}(P_0, P_1, P_2, P_3, P_4, P_5) \rightarrow \left( \begin{array}{l} \frac{8.0e15 \cdot s^4 + 3.2745e16 \cdot s^3 + 2.4173138035e16 \cdot s^2 + 4.952241940485375e15 \cdot s}{8.0e15 \cdot s^4 + 7.7145e16 \cdot s^3 + 1.87095363835e17 \cdot s^2 + 7.7082523976520375e16 \cdot s + 2.534288799454809e15} \\ \frac{3.6963e16 \cdot s^3 + 1.3628442915e17 \cdot s^2 + 5.6347263081376875e16 \cdot s}{8.0e15 \cdot s^4 + 7.7145e16 \cdot s^3 + 1.87095363835e17 \cdot s^2 + 7.7082523976520375e16 \cdot s + 2.534288799454809e15} \\ \frac{3.2856e15 \cdot s^3 + 1.188927216e16 \cdot s^2 + 4.2861509192505e15 \cdot s}{8.0e15 \cdot s^4 + 7.7145e16 \cdot s^3 + 1.87095363835e17 \cdot s^2 + 7.7082523976520375e16 \cdot s + 2.534288799454809e15} \\ \frac{8.214e14 \cdot s^3 + 7.2332484e14 \cdot s^2 + 1.58277816122625e14 \cdot s}{8.0e15 \cdot s^4 + 7.7145e16 \cdot s^3 + 1.87095363835e17 \cdot s^2 + 7.7082523976520375e16 \cdot s + 2.534288799454809e15} \\ \frac{1.044288e18 \cdot s^3 + 4.27440132e18 \cdot s^2 + 3.15546474653676e18 \cdot s + 6.4644585394319891e17}{2.56e18 \cdot s^4 + 2.46864e19 \cdot s^3 + 5.98705164272e19 \cdot s^2 + 2.466640767248652e19 \cdot s + 8.1097241582553888e17} \\ \frac{2.1312e16 \cdot s^3 + 2.13662568e17 \cdot s^2 + 4.7288412363444e17 \cdot s + 1.64526561882339969e17}{2.56e18 \cdot s^4 + 2.46864e19 \cdot s^3 + 5.98705164272e19 \cdot s^2 + 2.466640767248652e19 \cdot s + 8.1097241582553888e17} \end{array} \right)$$

Рисунок 30 – Решение системы уравнений при DC = 1

На рисунке 31 показана зависимость функциональной безопасности PFDavg от значений входного параметра DC = 1. При выявлении всех опасных отказов (DC = 1) модель показывает асимптотическое стремление к устоявшемуся значению.

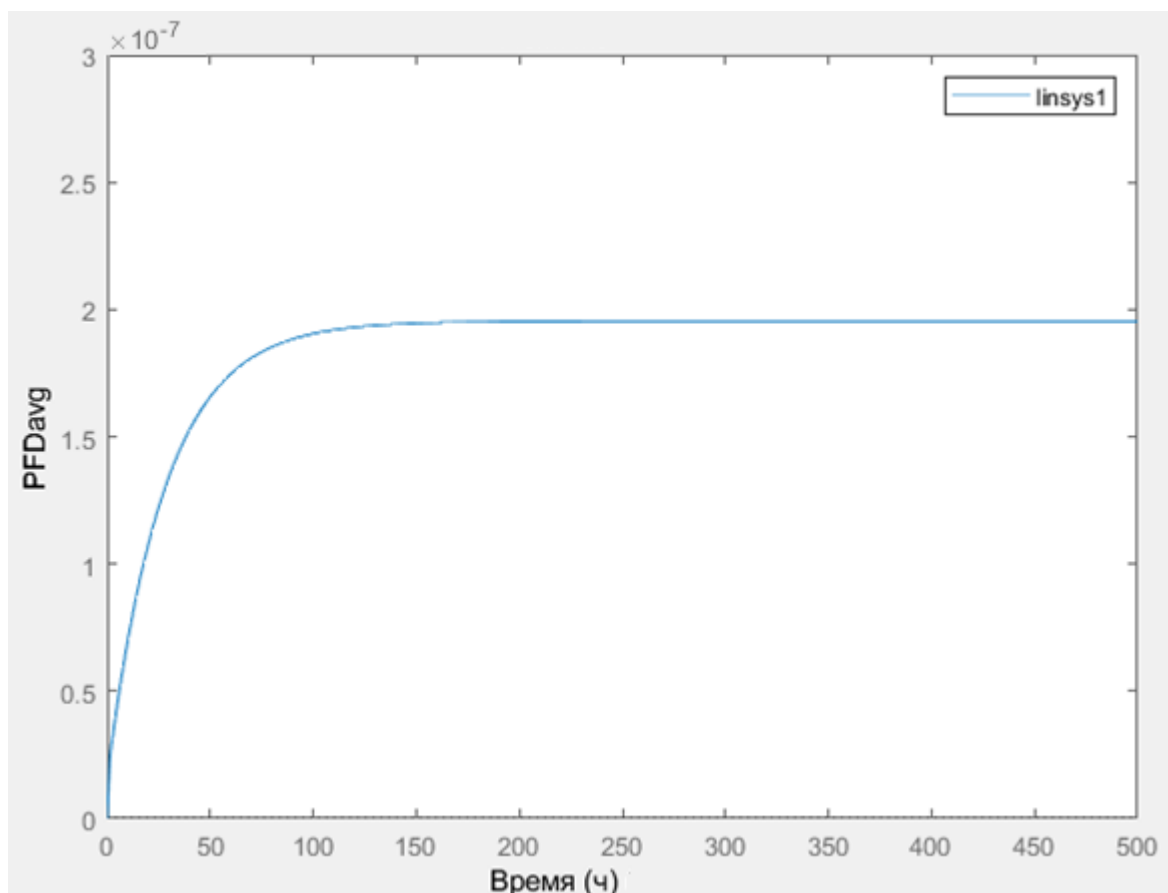


Рисунок 31 – Зависимость PFDavg от входного параметра (DC = 1)

По формуле 47 определим эквивалентное среднее время простоя канала для архитектуры 2oo2D:

$$t_{CE}(T) = \frac{\lambda_{DU} \cdot \left(\frac{T}{2} + MTTR\right) + (\lambda_{DD} + \lambda_{SD}) \cdot MTTR}{\lambda_{DU} + \lambda_{DD} + \lambda_{SD}} \quad (47)$$

Определим эквивалентное среднее время простоя голосующей группы для архитектуры 2oo3D без восстановительных работ по формуле 48:

$$t_{GE}(T) = \frac{\lambda_{DU} \cdot \left(\frac{T}{3} + MTTR\right) + (\lambda_{DD} + \lambda_{SD}) \cdot MTTR}{\lambda_{DU} + \lambda_{DD} + \lambda_{SD}} \quad (48)$$

Рассчитаем среднюю вероятность опасного отказа по запросу для функции безопасности (PFDavg):

$$\begin{aligned} PFD_{avg}(T) = & 2 \cdot (1 - \beta) \cdot \lambda_{DU} + (1 - \beta_D) \cdot \lambda_{DD} + \lambda_{SD} \cdot t_{CE}(T) \cdot t_{GE}(T) \\ & + \beta_D \cdot \lambda_{DD} \cdot MTTR + \beta \cdot \lambda_{DU} \cdot \left(\frac{T}{2} + MTTR\right) \end{aligned} \quad (49)$$

На рисунке 32 представлен график решений СДУ Колмогорова-Чепмена зависимости показателя PFD от времени.

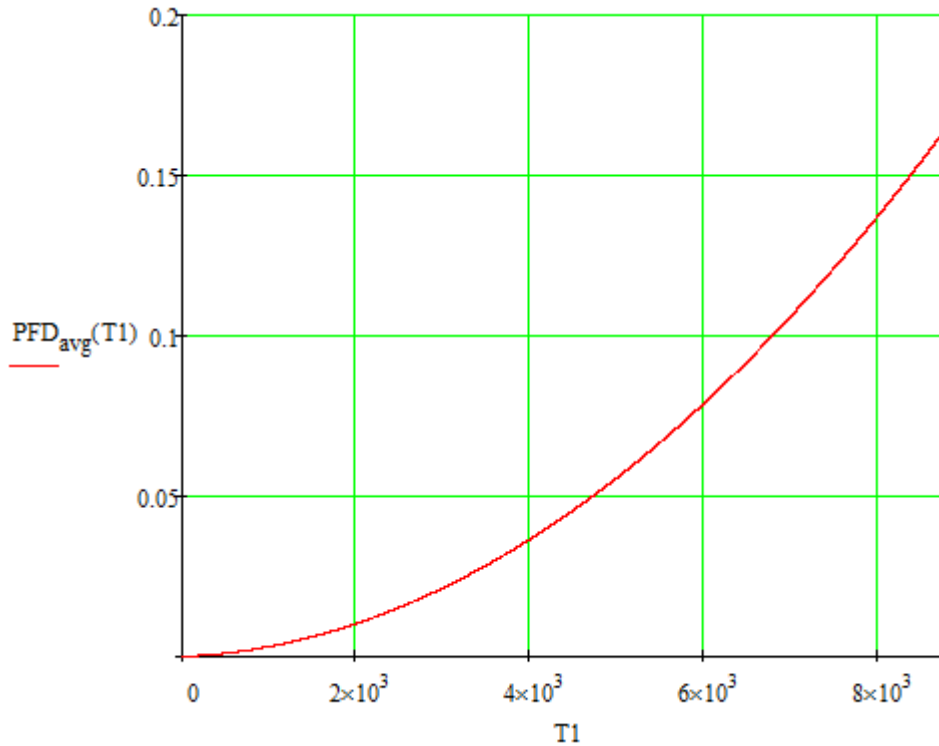


Рисунок 32 – Зависимость PFD от времени архитектуры 2oo2D

Результаты исследования показывают, что результаты без учета вторичной деградации имеют тенденцию к консервативности и систему легко реализовать. Кроме того, исследования показывают, что влияние на показатели безопасности системы не очень велико, но относительно больше на надежность системы в режиме 2oo2D, и результаты имеют тенденцию к более консервативному подходу, и система легче реализуется. Таким образом, после синтетического рассмотрения вопроса о надежности, безопасности и простоте реализации режим 2oo2D получил широкое применение.

### 8.3 Расчет безопасности контроллера Tricon, деградировавшего до уровня 1oo1D

Как видно из рисунка 12, состояние 1oo1D является последним, предельным рубежом выполнения СПАЗ функций защиты. Одноканальные системы 1oo1 ненадежны и небезопасны. Промышленный вариант этой категории, сертифицируемый по классу SIL3 – это система 1oo1D.

Применения структуры 1oo1D – это контур защиты, сертифицируемый TUV по уровню безопасности RC6/SIL3, который в концептуальном виде показан на рисунке 33. [29]

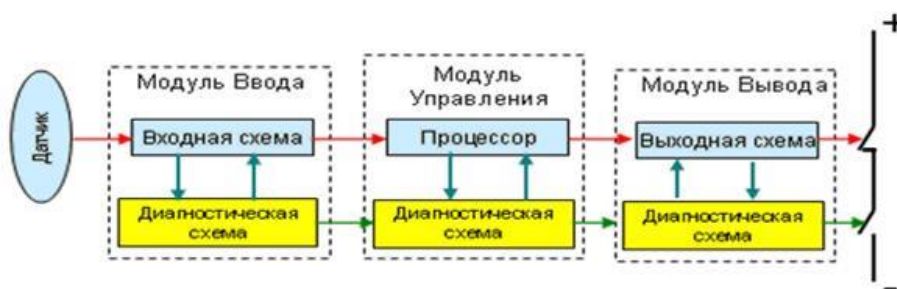


Рисунок 33 – Резервирование 1oo1D

Как следует из рисунка 33, выходной сигнал проходит через двойной переключатель, дублирующие компоненты которого выполнены по различным технологиям. Через электронный ключ подаётся нормальный выходной сигнал контроллера; в то же время реле, управляемое встроенной схемой диагностики, обеспечивает (через цепь нормально открытых

контактов) дополнительный ключ, контролирующий подачу выходного сигнала.

Описание ПЛК, деградировавшей до 1oolD, в нотации модели Маркова представлено на рисунке 34.

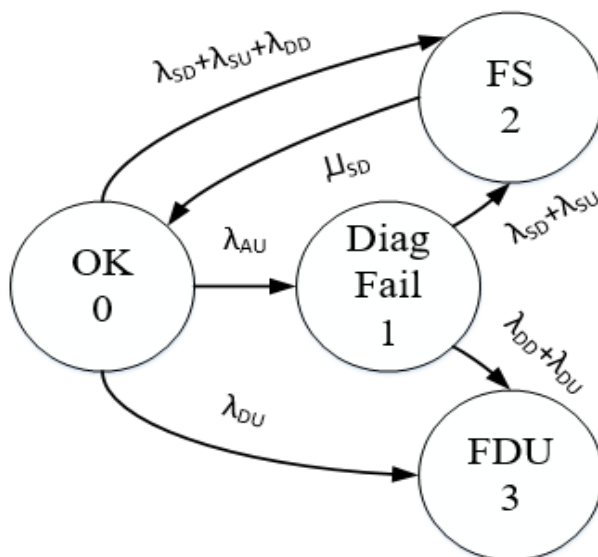


Рисунок 34 – Модель Маркова контроллера Tricon, деградировавшего до уровня 1oolD

Здесь принято:

1. DD, опасные обнаруженные отказы;
2. DU, опасные необнаруженные отказы;
3. SD, безопасные обнаруженные отказы;
4. SU, безопасные обнаруженные отказы;
5. AU, безопасный отказ диагностической системы.

Состояние 0 соответствует условию отсутствия каких-либо отказов в оставшейся работоспособной части Tricon (одноканальный остаток контроллера с диагностикой). Из этого состояния последний работающий канал, обеспечивающий безопасность ТП может перейти лишь в три другие худшие состояния.

Состояние 1 представляет условие, когда диагностическая система не обнаруживает потери той части функциональности, которая не влияет на безопасность, но оказывает влияние на способность деградировавшей СПАЗ



обнаруживать будущие возможные отказы (например, отказа самой диагностической схемы), причем переход в это состояние не обнаруживается средствами внутренней диагностики.

Состояние 2 характеризуется аварийным состоянием контроллера с диагностируемой системой, находящейся в безопасном отказе.

Состояние 3 характеризуется опасными и диагностируемыми отказами, и состояние СПАЗ не самодиагностируется.

Добавим в модель Маркова, представленную на рисунке 35, диагностический охват DC.

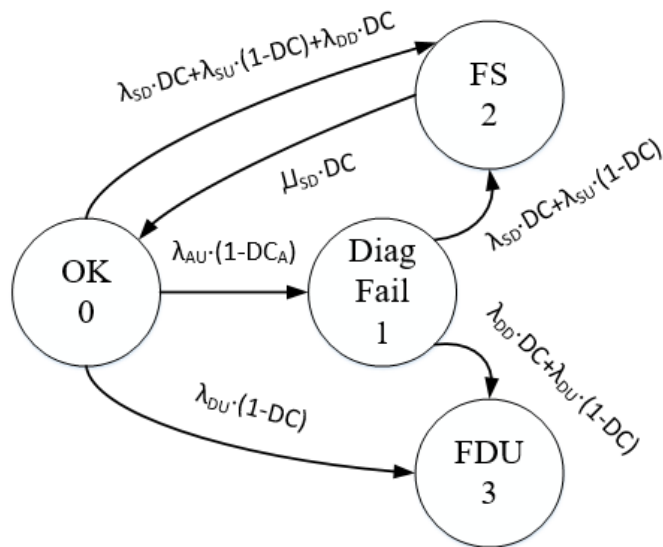


Рисунок 35 – Модель Маркова контроллера Tricon с добавленным диагностическим охватом

Составим систему дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена для графа на рис.35. Результат представлен на рисунке 36.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} P_0(t) &= -[\lambda_{SD} \cdot DC + \lambda_{SU} \cdot (1 - DC) + \lambda_{DD} \cdot DC + \lambda_{DU} \cdot (1 - DC) + \lambda_{AU} \cdot (1 - DC_A)] \cdot P_0(t) + \mu_{SD} \cdot DC \cdot P_2(t) \\ \frac{d}{dt} P_1(t) &= -[\lambda_{SD} \cdot DC + \lambda_{SU} \cdot (1 - DC) + \lambda_{DD} \cdot DC + \lambda_{DU} \cdot (1 - DC)] \cdot P_1(t) + P_0(t) \cdot \lambda_{AU} \cdot (1 - DC_A) \\ \frac{d}{dt} P_2(t) &= [\lambda_{SD} \cdot DC + \lambda_{SU} \cdot (1 - DC) + \lambda_{DD} \cdot DC] \cdot P_0(t) - \mu_{SD} \cdot DC \cdot P_2(t) + P_1(t) \cdot [\lambda_{SD} \cdot DC + \lambda_{SU} \cdot (1 - DC)] \\ \frac{d}{dt} P_3(t) &= P_0(t) \cdot [\lambda_{DU} \cdot (1 - DC)] + P_1(t) \cdot [\lambda_{DD} \cdot DC + \lambda_{DU} \cdot (1 - DC)] \end{aligned}$$

Рисунок 36 – Система дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена

Решим систему уравнений с помощью пакета Mathcad (рис. 37, 38, 39). Примем коэффициент диагностического охвата – 0,5; 0,7; 0,9.

$$\text{Find}(p_0, p_1, p_2, p_3) \rightarrow \left( \begin{array}{l} \frac{5.12e10 \cdot s^3 + 3.20256e9 \cdot s^2 + 160000.0 \cdot s}{5.12e10 \cdot s^3 + 3.20576e9 \cdot s^2 + 240160.0 \cdot s + 3.0} \\ \frac{640000.0 \cdot s^2 + 40000.0 \cdot s}{5.12e10 \cdot s^3 + 3.20576e9 \cdot s^2 + 240160.0 \cdot s + 3.0} \\ \frac{1.92e6 \cdot s^2 + 112.0 \cdot s}{5.12e10 \cdot s^3 + 3.20576e9 \cdot s^2 + 240160.0 \cdot s + 3.0} \\ \frac{640000.0 \cdot s^2 + 40048.0 \cdot s + 3.0}{5.12e10 \cdot s^3 + 3.20576e9 \cdot s^2 + 240160.0 \cdot s + 3.0} \end{array} \right)$$

Рисунок 37 – Решение системы уравнений при DC = 0,5

$$\text{Find}(p_0, p_1, p_2, p_3) \rightarrow \left( \begin{array}{l} \frac{1.28e12 \cdot s^3 + 1.12064e11 \cdot s^2 + 5.6e6 \cdot s}{1.28e12 \cdot s^3 + 1.121376e11 \cdot s^2 + 7.28368e6 \cdot s + 63.0} \\ \frac{9.6e6 \cdot s^2 + 840000.0 \cdot s}{1.28e12 \cdot s^3 + 1.121376e11 \cdot s^2 + 7.28368e6 \cdot s + 63.0} \\ \frac{5.44e7 \cdot s^2 + 2960.0 \cdot s}{1.28e12 \cdot s^3 + 1.121376e11 \cdot s^2 + 7.28368e6 \cdot s + 63.0} \\ \frac{9.6e6 \cdot s^2 + 840720.0 \cdot s + 63.0}{1.28e12 \cdot s^3 + 1.121376e11 \cdot s^2 + 7.28368e6 \cdot s + 63.0} \end{array} \right)$$

Рисунок 38 – Решение системы уравнений при DC = 0,7

$$\text{Find}(p_0, p_1, p_2, p_3) \rightarrow \left( \begin{array}{l} \frac{1.28e12 \cdot s^3 + 1.44064e11 \cdot s^2 + 7.2e6 \cdot s}{1.28e12 \cdot s^3 + 1.441312e11 \cdot s^2 + 7.92336e6 \cdot s + 27.0} \\ \frac{3.2e6 \cdot s^2 + 360000.0 \cdot s}{1.28e12 \cdot s^3 + 1.441312e11 \cdot s^2 + 7.92336e6 \cdot s + 27.0} \\ \frac{6.08e7 \cdot s^2 + 3120.0 \cdot s}{1.28e12 \cdot s^3 + 1.441312e11 \cdot s^2 + 7.92336e6 \cdot s + 27.0} \\ \frac{3.2e6 \cdot s^2 + 360240.0 \cdot s + 27.0}{1.28e12 \cdot s^3 + 1.441312e11 \cdot s^2 + 7.92336e6 \cdot s + 27.0} \end{array} \right)$$

Рисунок 39 – Решение системы уравнений при DC = 0,9

Построим графики вероятности нахождения системы в работоспособном состоянии (0-состояние) в среде Matlab при DC = 0,5; 0,7; 0,9 (рис. 40).

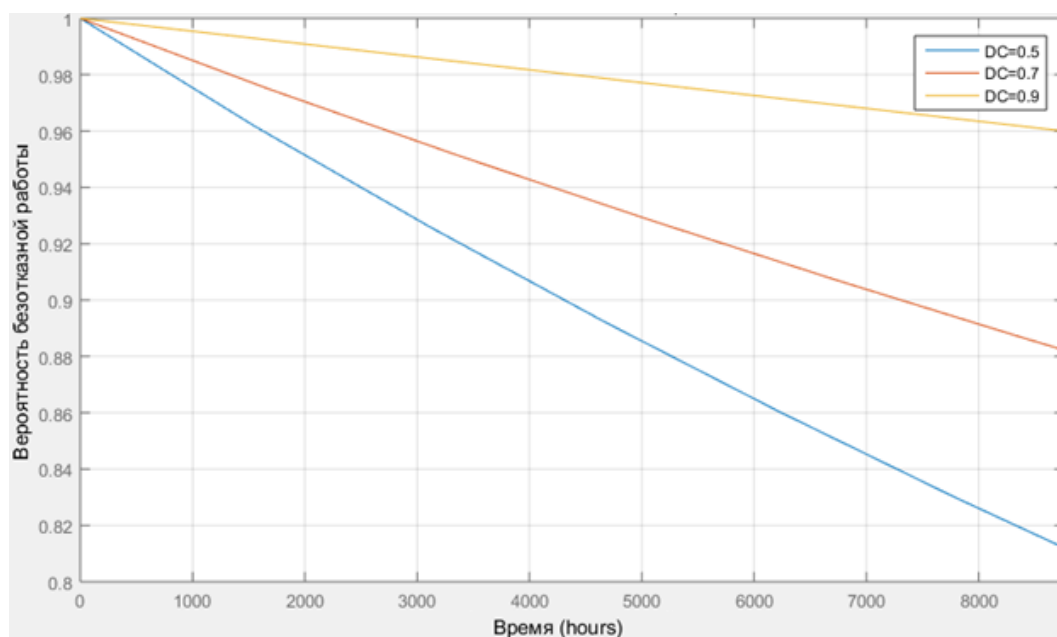


Рисунок 40 – Графики вероятности нахождения системы в работоспособном состоянии

Период исследования вероятности нахождения системы в работоспособном состоянии представлен на графике в течение 1 года.

Проанализировав график, представленный на рисунке 40, составим таблицу 6 с численными значениями вероятности.

Таблица 6 – Численные значения вероятности нахождения системы в работоспособном состоянии через 1 год

Значение DC	Вероятность нахождения системы в работоспособном состоянии через год обслуживания	$PFD_{avg}$ через год обслуживания
0,5	0,812	0,188
0,7	0,882	0,118
0,9	0,96	0,04

Как видно из таблицы 6 при большом коэффициенте диагностического охвата СПАЗ в деградированном состоянии может находится на протяжении года с вероятностью работоспособности 0,96; при небольшой глубине DC система требует немедленной остановки и проведения комплекса восстановительных работ.

Согласно проведенному исследованию, было выяснено, что при достаточно большом диагностическом охвате не требуется моментально отключать данный контроллер от сети и производить над ним комплекс восстановительных работ. Вероятность отказобезопасности будет достаточно высокой при последующей эксплуатации на протяжении 6 месяцев (1 года) работы. Этот интервал времени может оказаться достаточным для выполнения восстановительных работ даже при проблемной логистике бизнеса предприятия.

## 9 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

### 9.1 Планирование научно-исследовательских работ

Трудоемкость выполнения ВКР оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для реализации проекта необходимы два исполнителя – научный руководитель (НР) и инженер (И). Разделим выполнение дипломной работы на этапы, представленные в таблице 7.

Таблица 7 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Этапы работы	Содержание работ	Должность исполнителя	Загрузка (занятость исполнителей)
Разработка технического задания	Выбор направления научного исследования	И	И – 100%
	Составление и утверждение технического задания	НР И	НР – 50% И – 50%
Анализ предметной области	Календарное планирование работ по теме	И	И – 100%
	Подбор и изучение материалов по теме	И	И – 100%
	Анализ отобранного материала	И НР	И – 100% НР – 30%
Разработка системы	Описание технологического процесса	И	И – 100%
	Описание требований к системе	И	И – 100%
	Описание применяемого программного обеспечения	И	И – 100%

Продолжение таблицы 7 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Этапы работы	Содержание работ	Должность исполнителя	Загрузка (занятость исполнителей)
Разработка системы	Разработка архитектуры системы	И	И – 100%
	Расчет PFD для ремонтнопригодных систем	И	И – 100%
	Написание раздела «финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	И	И – 100%
	Написание раздела «социальной ответственности»	И	И – 100%
	Проверка работы с руководителем	И НР	И – 30% НР – 70%
Разработка системы	Составление пояснительной записки	И	И – 100%
	Подготовка презентации дипломного проекта	И	И – 100%

## 9.2 Продолжительность этапов работ

Для определения трудоемкости работ будем использовать такие показатели как ожидаемое значение трудоемкости, продолжительность каждой работы, продолжительность выполнения  $i$  – ой работы в календарных днях, коэффициент календарности.

Для расчета ожидаемого значения продолжительности работ  $t_{ож}$  применяется следующая формула 50:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{\min} + 2 \cdot t_{\max}}{5}, \quad (50)$$

где  $t_{\min}$  – минимальная продолжительность работы, дн.;

$t_{\max}$  – максимальная продолжительность работы, 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:

$$T_{РД} = t_{ож} \cdot K_{ВН} \cdot K_{Д} \quad (51)$$

где  $t_{ож}$  – продолжительность работы, дн.;

$K_{ВН}$  – коэффициент выполнения работ, учитывающий влияние внешних факторов на соблюдение предварительно определенных длительностей;

$K_{Д}$  – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсацию непредвиденных задержек и согласование работ ( $K_{Д} = 1-1,2$ ; в этих границах конкретное значение принимает сам исполнитель).

Расчет продолжительности этапа в календарных днях ведется по формуле:

$$T_{КД} = T_{РД} \cdot T_{К} \quad (52)$$

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 53:

$$T_{К} = \frac{T_{КАЛ}}{T_{КАЛ} - T_{ВД} - T_{ПД}} \quad (53)$$

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

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

$T_{ПД}$  – количество праздничных дней.

Коэффициент календарности:  $T_{кал} = 365 / (365 - 118) = 1,478$ .

Расчеты по трудозатратам выполнения работ приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Расчеты по трудозатратам выполнения работ

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
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Выбор направления научного исследования	И	7	12	9	–	10,8	–	15,96
Составление и утверждение технического задания	НР, И	5	12	7,8	4,56	4,8	6,74	7,1
Календарное планирование работ по теме	И	1	4	2,2	–	2,64	–	3,9
Подбор и изучение материалов по теме	И	15	20	17	–	20,4	–	30,2
Анализ отобранного материала	НР, И	8	25	14,8	5,04	12,72	7,45	18,8
Описание технологического процесса	И	2	4	2,8	-	3,36	-	4,97
Описание требований к системе	И	6	12	8,4	–	10,08	–	14,9
Описание применяемого программного обеспечения	И	3	6	4,2	–	5,04	–	7,45
Разработка архитектуры системы	И	2	4	2,8	–	3,36	–	4,97
Расчет PFD для ремонтнопригодных систем	И	5	10	7	–	8,4	–	12,42
Написание раздела «финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	И	3	8	5	–	6	–	8,87



Продолжение таблицы 8 – Расчеты по трудозатратам выполнения работ

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Трудоемкость работ по исполнителям чел.- дн.			
					$T_{\text{рд}}$		$T_{\text{кд}}$	
		$t_{\min}$	$t_{\max}$	$t_{\text{ож}}$	НР	И	НР	И
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
Составление пояснительной записки	И	12	16	13,6	–	16,32	–	24,12
Подготовка презентации дипломного проекта	И	2	4	2,8	–	3,36	–	4,97
<b>Итого:</b>				<b>119,8</b>	<b>17,04</b>	<b>126,24</b>	<b>25,19</b>	<b>186,65</b>

На основе таблицы 8 построим диаграмму Ганта, представляющую из себя горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ (таблица 9).

Таблица 9 – Линейный график работ

Этап	НР	И	Декабрь		Январь		Февраль		Март		Апрель		Май		Июнь	
			15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195	210
1	-	15,96														
2	6,74	7,1														
3	-	3,9														
4	-	30,2														
5	7,45	18,8														
6	-	4,97														
7	-	14,9														
8	—	7,45														
9	—	4,97														
10	—	12,42														
11	-	8,87														
12	-	13,12														

Продолжение таблицы 9 – Линейный график работ

Этап	НР	И	Декабрь		Январь		Февраль		Март		Апрель		Май		Июнь	
			15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195	210
13	11	14,9														
14	-	24,12														
15	-	4,97														



– Инженер



– Научный руководитель

### **9.3 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) расходы.

Если расходы, по каким-либо из перечисленных статей отсутствуют, например арендная плата или командировочные расходы, то соответствующие пункты сметы следует опустить без пояснений.

#### **9.3.1 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. Сюда же относятся специально приобретенное оборудование, инструменты и прочие объекты, относимые к основным средствам, стоимостью до 40000 рублей, включительно. Цена материальных ресурсов определяется по соответствующим ценникам или договорам поставки. Кроме того, статья включает так называемые транспортно-заготовительные расходы, связанные с транспортировкой от поставщика к

потребителю, хранением и прочими процессами, обеспечивающими движение (доставку) материальных ресурсов от поставщиков к потребителю. Сюда же включаются расходы на совершение сделки купли-продажи. Приблизительно они оцениваются в процентах к отпускной цене закупаемых материалов, как правило, это 5 – 20 %. В таблице 10 представлен расчет затрат на материалы.

Таблица 10 – Расчет затрат на материалы

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Количество	Сумма, руб.
Бумага для принтера формата А4	200	1 уп.	200
Картридж для принтера	1500	1 шт.	1500
Лицензия <i>Microsoft Office</i> 2013	2000	1 экз.	2000
Итого:			3700

Транспортно-заготовительные расходы составляют 5 % от отпускной цены материалов, следовательно, расходы на материалы с учетом транспортно-заготовительных расходов равны:

$$C_{\text{мат}} = 3700 * 1,05 = 3885 \text{ руб.} \quad (54)$$

### 9.3.2 Расчет заработной платы

Данная статья расходов включает заработную плату научного руководителя и студента, 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:

$$ЗП_{\text{дн-т}} = MO/25,083, \quad (55)$$

учитывающей, что в году 301 рабочий день и, следовательно, в месяце в среднем 25,083 рабочих дня (при шестидневной рабочей неделе).

Затраты времени по каждому исполнителю в рабочих днях с округлением до целого взяты из таблицы ?. Для учета в ее составе премий, дополнительной зарплаты и районной надбавки используется следующий ряд коэффициентов:  $K_{\text{ПР}} = 1,1$ ;  $K_{\text{доп.ЗП}} = 1,188$ ;  $K_{\text{р}} = 1,3$ . Таким образом, для перехода от тарифной (базовой) суммы заработка исполнителя к соответствующему полному заработку (зарплатной части сметы) необходимо первую умножить на интегральный коэффициент  $K_{\text{и}} = 1,1 * 1,188 * 1,3 = 1,699$ .

Затраты на заработную плату представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Затраты на заработную плату

Исполнитель	Оклад, руб./мес.	Среднедневная ставка, руб./раб.день	Затраты времени, раб.дни	Коэффициент	Фонд з/платы, руб.
НР	33664	1342,09	17,04	1,699	38854,8
И	15470	616,75	126,24	1,699	132281,63
Итого:					171136,43

### 9.3.3 Расчет затрат на социальный налог

Затраты на единый социальный налог, включающий в себя отчисления в пенсионный фонд, на социальное и медицинское страхование, составляют 30 % от полной заработной платы по проекту:

$$C_{\text{соц}} = C_{\text{зп}} * 0,3 = 171136,43 * 0,3 = 51340,93 \text{ руб.} \quad (56)$$

### 9.3.4 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:

$$C_{\text{эл.об}} = P_{\text{об}} * t_{\text{об}} * Ц_{\text{э}}, \quad (57)$$

где  $P_{\text{об}}$  – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;

$Ц_{\text{э}}$  – тариф на 1 кВт·час;

$t_{об}$  – время работы оборудования, час.

Для ТПУ ЦЭ = 6,59 руб./кВт·час (с НДС).

Время работы оборудования вычисляется на основе итоговых данных таблицы 7 для студента ( $T_{рд}$ ) из расчета, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов вычисляется по формуле:

$$t_{об} = T_{рд} * K_t, \quad (58)$$

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

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{об} = P_{ном} * K_c, \quad (59)$$

где  $P_{ном}$  – номинальная мощность оборудования, кВт;

$K_c \leq 1$  – коэффициент загрузки, зависящий от средней степени использования номинальной мощности. Для технологического оборудования малой мощности  $K_c = 1$ .

Пример расчета затраты на электроэнергию для технологических целей приведен в таблице 12.

Таблица 12 – Затраты на электроэнергию

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{об}$ , час	Потребляемая мощность $P_{об}$ , кВт	Затраты $З_{эл}$ , руб
Персональный компьютер	1009,92	0,3	1996,61
Струйный принтер	20	0,1	13,18
Итого:			2009,79

### 9.3.5 Расчет амортизационных расходов

В данной статье рассчитывается амортизация используемого оборудования за время выполнения проекта по формуле:

$$C_{ам} = \frac{H_A * Ц_{об} * t_{рф} * n}{F_d}, \quad (60)$$



где  $H_A$  – годовая норма амортизации единицы оборудования, равная 2,5 года;

$\Pi_{об}$  – балансовая стоимость единицы оборудования, равная 30000 руб;

$F_d$  – действительный годовой фонд времени работы соответствующего оборудования, равный  $298 * 8 = 2384$  часа;

$t_{рф}$  – фактическое время работы оборудования в ходе выполнения работы, равное 1009,92 часа;

$n$  – число задействованных однотипных единиц оборудования.

Расчет амортизационных расходов представлен в таблице 13.

Таблица 13 – Расчет амортизационных расходов

Наименование оборудования	Значение срока амортизации оборудования $C_A$ , год	$H_A = 1/C_A$	$\Pi_{об}$ , руб	$F_d$ , час	$t_{рф}$ , час	$n$	$C_{ам}$ , руб
Персональный компьютер	2,5	0,4	48000	2384	1009,92	1	8133,58
Струйный принтер	2	0,5	5000	500	20	1	100
Итого:							8233,58

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

К данной статье относятся:

- командировочные расходы, в т.ч. расходы по оплате суточных, транспортные расходы, компенсация стоимости жилья;
- арендная плата за пользование имуществом;
- оплата услуг связи;
- услуги сторонних организаций.

Норма оплаты суточных – 100 руб./день. Время пребывания в командировке составило 50 календарных дней (с учетом дней приезда и отъезда); оплата проживания в общежитии 50 руб./день \* 45 дней = 2250 руб.; оплата проезда по ж/д в обе стороны – 4720 руб.; аренда специальных

приборов – 4200 руб.; почтовые расходы – 240 руб.; консалтинговые услуги – 1500 руб. Итого по данному пункту:

$$C_{\text{нп}} = (50 - 1) * 100 + 2250 + 4720 + 4200 + 240 + 1500 = 17810 \text{ руб.} \quad (61)$$

### 9.3.7 Расчет прочих расходов

В данной статье отражены расходы на выполнение работы, которые не учтены в предыдущих статьях, их следует принять равными 10 % от суммы всех предыдущих расходов:

$$C_{\text{проч}} = (C_{\text{мат}} + C_{\text{зп}} + C_{\text{соц}} + C_{\text{эл.об.}} + C_{\text{ам}} + C_{\text{нп}}) * 0,1 = (3885 + 171136,43 + 51340,93 + 2009,79 + 8233,58 + 17810) * 0,1 = 25441,57 \text{ руб.} \quad (62)$$

### 9.3.8 Расчет общей себестоимости разработки

Проведя расчет по всем статьям сметы затрат на разработку, можно определить общую себестоимость работы. Определение бюджета затрат по каждому варианту исполнения приведен в таблице 14.

Таблица 14 – Смета затрат на разработку проекта

Наименование статьи	Условное обозначение	Сумма, руб
Материалы и покупные изделия	$C_{\text{мат}}$	3885
Основная заработная плата	$C_{\text{зп}}$	171136,43
Отчисления в социальные фонды	$C_{\text{соц}}$	51340,93
Расходы на электроэнергию	$C_{\text{эл.}}$	2009,79
Амортизационные отчисления	$C_{\text{ам}}$	8233,58
Непосредственно учитываемые расходы	$C_{\text{нр}}$	17810
Прочие расходы	$C_{\text{проч}}$	25441,57
Итого:		279857,3

Таким образом, затраты на разработку составили  $C = 279857,3$  рублей.

### 9.3.9 Расчет прибыли

Прибыль примем в размере 20 % от полной себестоимости проекта. Таким образом, прибыль составит  $279857,3 * 0,2 = 55971,46$  рублей.

### **9.3.10 Расчет НДС**

НДС составляет 20 % от суммы затрат на разработку и прибыли. Таким образом, НДС составит  $(279857,3 + 55971,46) * 0,2 = 67165,75$  рублей.

### **9.3.11 Цена разработки магистерской диссертации**

Цена равна сумме полной себестоимости, прибыли и НДС. Таким образом, цена разработки магистерской диссертации составит:

$$C_{\text{мд}} = 279857,3 + 55971,46 + 67165,75 = 402994,51 \text{ руб.} \quad (63)$$

### **9.3.12 Определение срока окупаемости инвестиций (PP – payback period)**

Данный показатель определяет продолжительность того периода, через который инвестиции будут возвращены полученной благодаря им прибылью. Чем меньше PP, тем эффективнее проект. Использование показателя предполагает установление для него приемлемого значения как меры эффективности инвестиций.

На этапе разработки магистерской диссертации невозможно корректно определить срок окупаемости инвестиций, в связи с тем, что на данный момент работа не готова к реализации на реальном объекте, а значит не были учтены затраты на конечных стадиях проектирования. В связи с этим, оценка экономической эффективности на данном этапе некорректна.

## **9.4 Выводы по разделу**

В ходе выполнения данного раздела были определены трудозатраты по выполнению этапов работ, как для инженера, так и для научного руководителя, на основе получившихся данных был построен линейный график работ. Далее был произведён расчёт сметы затрат на выполнение проекта, в который вошли: расчёт затрат на материалы, расчёт заработной платы, расчёт затрат на социальный налог, расчёт затрат на электроэнергию, расчёт амортизационных расходов, расчёт расходов на основе платёжных

документов, расчёт прочих доходов. А также определена цена разработки магистерской диссертации. Определить срока окупаемости инвестиций не удалось, так как данный момент работа не готова к реализации на реальном объекте, а значит не были учтены затраты на конечных стадиях проектирования.

В результате внедрения системы противоаварийной защиты на газораспределительную станцию №1 Кемеровского ЛПУМГ будет обеспечена бесперебойная подача газа без повышения/понижения давления, что крайне важно для завода «Азот», так как технологическое оборудование, используемое на заводе, должно непрерывно находиться в работоспособном состоянии. Из чего можно сделать вывод, что данная система, уменьшит количество сбоев технологического оборудования и число аварий на производстве. Следовательно, уменьшит и расходы на восстановление оборудования и ликвидацию аварий.

## 10 Социальная ответственность

Целями разработки данного раздела магистерской диссертации являются обнаружение и изучение опасных и вредных производственных факторов, сопутствующих работе диспетчера при работе с ПЭВМ, отрицательно влияющих на здоровье человека; оценка условий труда, микроклимата рабочей среды; ослабление действия этих факторов до безопасных пределов или исключение их, если это возможно. Также рассматриваются вопросы техники безопасности, пожарной безопасности и охраны окружающей среды.

Объектом исследования данного раздела дипломной работы является работа диспетчера Кемеровского ЛПУМГ.

Рассмотрим характеристики помещения, где находится рабочее место диспетчера: длина комнаты  $a = 4$  м, ширина  $b = 3$  м, высота  $h = 2,3$  м. Тогда площадь помещения будет составлять  $S = ab = 12$  м<sup>2</sup>, объем равен 27,6 м<sup>3</sup>. В данном помещении одновременно работает только один сотрудник (диспетчер). По СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 [30] санитарные нормы составляют не менее 4,5 м<sup>2</sup> площади рабочего места на одного человека при работе с ПЭВМ на базе дискретных экранов. Исходя из приведенных выше данных, можно сказать, что количество рабочих мест соответствует размерам помещения по санитарным нормам.

Количество окон: одно, с параметрами: ширина 1,4 м, высота 1,5 м. Количество рабочих мест, оснащённых компьютером,  $n = 1$ . В помещении отсутствует принудительная вентиляция, т.е. воздух поступает и удаляется через дверь и окно, вентиляция является естественной. В зимнее время помещение отапливается, что обеспечивает достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещении используется комбинированное освещение – искусственное и естественное. Искусственное освещение создается люминесцентными лампами типа ЛД. Рабочая поверхность имеет высоту 0,75 м. Электроснабжение сети переменного

напряжения 220В. Помещение без повышенной опасности в отношении поражения человека электрическим током по ГОСТ 12.1.013-78 [31].

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

### **10.1.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства**

а) В данном разделе рассмотрены основные нормативные документы, выполнение которых необходимо для безопасного исполнения рабочих обязанностей диспетчером Кемеровского ЛПУМГ, который проводит большую часть времени за компьютером.

б) СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 [30] регулируют порядок организации рабочего процесса для лиц, труд которых связан с компьютерной техникой. Требования документа распространяются на персональные компьютеры, периферийные устройства (клавиатуры, принтеры, модемы, блоки бесперебойного питания и т.д.), а также на видеодисплейные терминалы всех типов.

в) Типовая инструкция ТОИ Р-45-084-01 [32] более детально регламентирует данный вопрос. Согласно данному документу, без перерыва работник может находиться за монитором компьютера не более двух часов.

г) ППБ 01-93 [33] «Правила пожарной безопасности в Российской Федерации» устанавливает необходимые требования по пожарной безопасности ко всем системам и оборудованию, находящемуся в помещениях Кемеровского ЛПУМГ – электроустановки, системы отопления и вентиляции, противопожарное оборудование и т.д.

### **10.1.2 Эргономические требования к рабочему месту**

Для минимизации вредных психофизиологических факторов, которыми являются монотонность труда, эмоциональное и умственное

напряжение, статические нагрузки, следует организовать рабочие места согласно требованиям СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 [30]:

- а) расстояние между рабочими столами с видеомониторами должно быть не менее 2,0 м, а расстояние между боковыми поверхностями видеомониторов – не менее 1,2 м;
- б) экран видеомонитора должен находиться от глаз пользователя на расстоянии от 600 до 700 мм, но не ближе 500 мм с учетом размеров алфавитно-цифровых знаков и символов;
- с) конструкция рабочего стола должна обеспечивать оптимальное размещение используемого оборудования с учетом характера выполняемой работы; – поверхность рабочего стола должна иметь коэффициент отражения от 0,5 до 0,7;
- д) конструкция рабочего стула должна обеспечивать поддержание рациональной рабочей позы при работе на ПК, позволять изменять позу с целью снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и спины; тип рабочего стула выбирается с учетом роста пользователя, характера и продолжительности работы с ПК.

## **10.2 Анализ опасных и вредных производственных факторов**

Для выбора факторов необходимо использовать ГОСТ 12.0.003-74 [34] «Опасные и вредные факторы. Классификация». Перечень опасных и вредных факторов, характерных для проектируемой производственной среды представлен в таблице 15.

Таблица 15 – Возможные опасные и вредные факторы при работе диспетчера

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
Отклонение показателей микроклимата	+	-	+	СанПиН 2.2.4.548-96 [6]
Недостаточная освещенность рабочей зоны	+	-	+	СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 [7]
Превышение уровня шума	+	+	+	ГОСТ 12.1.003–83 ССБТ [8]
Электромагнитные и электрические поля	+	-	+	ГОСТ 12.1.006–84.ССБТ [9] ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ [10]

Далее в работе будут более подробно рассматриваться опасные и вредные факторы, возникающие в связи с выполнением выпускной квалификационной работы.

### 10.2.1 Отклонение показателей микроклимата

На рабочем месте необходимо также учитывать воздействие вредных факторов, так или иначе влияющих на человека.

Далее оценим уровень воздействия этих факторов на организм и, если требуется, разработаем ряд мероприятий для улучшения производственной гигиены.

#### 1) Микроклимат

Состояние воздушной среды помещений определяют следующие параметры:

##### а) Температура воздуха в помещении;



- b) Температура поверхностей оборудования, материалов;
- c) Относительная влажность воздуха;
- d) Скорость движения воздуха;
- e) Уровень запыленности или загазованности воздуха.

Оптимальные микроклиматические условия обеспечивают общее и локальное ощущение теплового комфорта в течении 12-часового рабочего дня, не вызывают отклонений в состоянии здоровья и создают предпосылки для высокого уровня работоспособности.

Все категории работ разграничиваются на основе интенсивности энергозатрат организма в ккал/ч (Вт). Работа диспетчера относится к категории  $I_a$  – работа с интенсивностью энергозатрат до 139 ккал/час, производимая сидя и сопровождающаяся незначительным физическим напряжением согласно СанПиН 2.2.4.548-96 [30] и СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 [31].

Для помещения без избытка выделения тепла для работ категории тяжести  $I_a$  оптимальные параметры микроклимата должны соответствовать требованиям таблицы 16.

Таблица 16 – Допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Сезон года		Холодный	Теплый
Категория тяжести выполняемых работ		$I_a$	$I_a$
Температура, °С	Фактическое значение	21-24	23-25
	Допустимое значение	20-25	21-28
Относительная влажность, %	Фактическое значение	60	60
	Допустимое значение	15-75	15-75
Скорость движения воздуха, м/с	Фактическое значение	0,1	0,1
	Допустимое значение	0,1	0,2

Из таблицы видно, что температура воздуха в рабочем помещении в холодное время года поддерживается в диапазоне от плюс 22 до плюс 24°C, в теплое – от плюс 23 до плюс 25°C. Влажность составляет 60%. Следовательно, в помещении соблюдаются допустимые микроклиматические условия.

Микроклимат кабинета поддерживается на оптимальном уровне системой водяного центрального отопления и естественной вентиляцией.

### **10.2.2 Недостаточная освещенность рабочей зоны**

Освещение рабочего места – важнейший фактор создания нормальных условий труда. Оценка освещенности рабочей зоны необходима для обеспечения нормативных условий работы в помещениях и проводится в соответствии с СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 [36]. Согласно санитарно-гигиеническим требованиям рабочее место диспетчера должно освещаться как естественным, так искусственным освещением. Естественное освещение проникает в помещение через одно окно в светлое время суток. Естественное освещение по своему спектральному составу является наиболее приемлемым. Искусственное же отличается относительной сложностью восприятия его зрительным органом человека.

Недостаточность освещения приводит к напряжению зрения, ослабляет внимание, приводит к наступлению преждевременной утомленности. Чрезмерно яркое освещение вызывает ослепление, раздражение и резь в глазах. Неправильное направление света на рабочем месте может создавать резкие тени, блики, дезориентировать работающего. Все эти причины могут привести к несчастному случаю или профзаболеваниям, поэтому столь важен правильный расчет освещенности.

Для расчета общего равномерного освещения при горизонтальной рабочей поверхности основным является метод светового потока (коэффициента использования), учитывающий световой поток, отраженный от потолка и стен. При работе с персональным компьютером в сочетании с

работой с нормативной и технической документацией согласно нормам СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 [36] регламентируется минимальная искусственная освещенность рабочих мест в 400 лк при общем освещении. В соответствие со СНиП 23-05-95 [41] разряд зрительной работы III-а.

Выполним расчет освещенности рабочего места [40], световой поток, создаваемый каждой из ламп, рассчитывается по формуле:

$$F = \frac{E \cdot S \cdot z \cdot k}{n \cdot \eta}, \quad (64)$$

где  $F$  – световой поток одной лампы, лк;

$E$  – минимальная освещенность, лк,  $E = 400$  лк;

$S$  – площадь помещения, м<sup>2</sup>,  $S = 12$  м<sup>2</sup>;

$z$  – коэффициент неравномерности освещения, для люминесцентных ламп при расчётах берётся равным  $z = 1,1$ ;

$k$  – коэффициент запаса,  $k = 1,5$ ;

$\eta$  – коэффициент использования осветителей, %;

$n$  – число светильников в помещении.

Коэффициент  $k$  для помещений, освещаемых люминесцентными лампами, при условии чистки светильников не реже двух раз в год, берется равным от 1,4 до 1,5.

Коэффициент использования может быть определен по известному индексу помещения ( $i$ ), рассчитываемому по выражению:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)}, \quad (65)$$

где  $A$  – длина помещения, м,  $A = 4$  м;

$B$  – ширина помещения, м,  $B = 3$  м.

Для соответствующих размеров аудитории со светлым потолком и стенами, оклеенными светлыми обоями, согласно методическим указаниям, примем коэффициенты отражения от стен  $\rho_c = 30$  % и потолка  $\rho_n = 50$  % [40].

По следующей формуле определим расчетную высоту подвеса светильников над рабочей поверхностью ( $h$ ):

$$h = H - h_p - h_c, \quad (66)$$

где  $H$  – высота потолка в помещении, м,  $H = 2,3$  м;

$h_p$  – расстояние от пола до рабочей поверхности стола, м,  $h_p = 0,75$  м;

$h_c$  – расстояние от потолка до светильника, м,  $h_c = 0$  м.

Из расчетов следует, что  $h = 1,55$  м, тогда согласно выражению:

$$i = \frac{4 \cdot 3}{1.55 \cdot (4 + 3)} = 1,11$$

По таблице коэффициентов использования светового потока для соответствующих значений  $i$ ,  $\rho_c$  и  $\rho_n$  примем  $\eta = 55\%$  [40].

Учитывая, что количество светильников равно 4, а число ламп в нем равно 4, определяем световой поток, который должна создавать каждая из ламп:

$$F = \frac{400 \cdot 12 \cdot 1.1 \cdot 1.5}{4 \cdot 4 \cdot 0.55} = 900 \text{ лм.}$$

Ближайшей стандартной лампой является ЛД 18 Вт со световым потоком 880 лм.

Делаем проверку выполнения условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{л.станд}} - \Phi_{\text{л.расч}}}{\Phi_{\text{л.станд}}} \cdot 100\% \leq +20\% \quad (67)$$

$$\Phi_{\text{л.станд}} = 880 \text{ лм}; \quad \Phi_{\text{л.расч}} = 900 \text{ лм.}$$

Получаем:

$$-10\% \leq 2,3\% \leq +20\%$$

Таким образом, люминесцентные лампочки дневного цвета (ЛД) в количестве 16 штук, мощностью 18 Вт, потребляющие ток 0,67 А при питании от сети 220 В, достаточны для обеспечения минимальной требуемой освещенности в анализируемом помещении.

### **10.2.3 Превышение уровня шума**

Шум является общебиологическим раздражителем и в определенных условиях может влиять на органы и системы организма человека. Шум ухудшает точность выполнения рабочих операций, затрудняет прием и восприятие информации. В помещениях с низким уровнем общего шума, каким является помещение, где работает диспетчер, источниками шумовых помех могут стать вентиляционные установки, кондиционеры или периферийное оборудование для ЭВМ.

В помещении рассматриваемого кабинета нет вентиляторов, кондиционеров и других дополнительных установок, поэтому основным источником шума являются компьютеры и периферийные устройства – принтер и мониторы.

В рассматриваемом помещении основным источником шума является шум вентилятора ПЭВМ. Кроме этого шум проникает извне через открытые проемы форточек и окон. Для снижения уровня шума необходимо регулярно проводить проверку технического состояния системного блока и принтера, и при необходимости осуществлять ремонт.

В результате неблагоприятного воздействия шума на работающего человека происходит снижение производительности труда, увеличивается брак в работе. В рассматриваемом помещении уровень шума не превышает 50 дБ, поэтому никаких мер защиты от шума в анализируемом помещении не предусмотрено [37].

### **10.2.4 Электромагнитное и электростатическое излучения**

Вредные проявления факторов рассматриваемой рабочей зоны выражаются в электромагнитном и электрическом излучениях (ЭМИ и ЭСИ). Объясняется это тем, что ПК оснащают сетевыми фильтрами, источниками бесперебойного питания и другим оборудованием, что в совокупности формирует сложную электромагнитную обстановку на рабочем месте пользователя. Техногенные ЭМП приводят к следующему: появление

головной боли, повышение температуры тела, ожоги, катаракты. Радиочастотное ЭМП влияет на нервную и сердечно – сосудистую системы.

Источником ЭСП является экран ПК и трение поверхности клавиатуры и компьютерной мыши. ЭСП может способствовать нарушению гормональной и иммунной систем.

Показатели ЭМИ и ЭСИ на рабочих местах с ПК представлены в таблице 17.

Таблица 17 – Временные допустимые уровни ЭМП, создаваемых ПК

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

Проведение организационных и инженерно – технических мероприятий является способом коллективной защиты персонала от воздействия ЭМИ. При этом под организационными мероприятиями понимается выбор рациональных режимов работы для устранения влияния на персонал облучения при уровнях, превышающих допустимые.

Под инженерно – техническим мероприятием понимают рациональное размещение оборудования, использование средств, ограничивающих электромагнитную энергию от рабочих мест персонала (поглотители мощности, отражающие и поглощающие экраны), использование средств индивидуальной защиты (СИЗ) – например очков со специальными фильтрами [38], [39].

### **10.3 Экологическая безопасность**

Охрана окружающей среды – это комплексная проблема и наиболее активная форма её решения – это сокращение вредных выбросов промышленных предприятий через полный переход к безотходным или малоотходным технологиям производства. Охрану природы можно представить как комплекс государственных, международных и общественных мероприятий, направленных на рациональное использование природы, восстановление, улучшение и охрану природных ресурсов.

Многие предприятия сейчас внедряют новейшие технологии в процесс эксплуатации, очистки и утилизации отходов производства. Так, внедрение электрооборудования, ПЭВМ, различных средств вычислительной техники значительно упрощают процесс проектирования, эксплуатации, а также утилизации и защиты природы от вредных воздействий человечества. Например, диспетчер, метролог, оператор и др. теперь используют электронные пакеты обработки и носители информации, что значительно сокращает применение бумаги, а значит и вырубку лесов. Но, с другой стороны, все большее внедрение и применение ПЭВМ приводит к увеличению затрат электроэнергии, количества электростанций и их мощностей. Соответственно, рост энергопотребления может привести к таким экологическим нарушениям, как глобальное потепление климата, загрязнение атмосферы и водного бассейна Земли вредными и ядовитыми веществами, авариям в ядерных реакторах, изменению ландшафта Земли. Целесообразным является разработка и внедрение систем с малым потреблением энергии.

Потребление электроэнергии является одной из наиболее серьезных проблем охраны окружающей среды. С увеличением компьютерных систем, внедряемых в производственную сферу, увеличивается и объем потребляемой ими электроэнергии, что влечет за собой увеличение

мощностей электростанций и их количества. И то и другое не обходится без нарушения экологической обстановки.

Рост энергопотребления влечет за собой такие экологические нарушения, как:

- а) изменение климата – накопление углекислого газа в атмосфере Земли (парниковый эффект);
- б) загрязнение воздушного бассейна другими вредными и ядовитыми веществами;
- с) загрязнение водного бассейна Земли.

#### **10.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

В соответствии с ГОСТ Р 22.0.02–94 [42], чрезвычайная ситуация – обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей.

Исходя из требований закона, определены обязанности и действия руководителя ГО – руководителя объекта по организации оповещения персонала и населения об угрозе опасностей военных действий и ЧС:

- а) В режиме повседневной деятельности создать объектовую систему оповещения персонала объекта.
- б) В случае угрозы опасностей ведения военных действий, угрозы возникновения или при возникновении ЧС на объекте – незамедлительно организовать оповещение персонала, населения прилегающих территорий через объектовую (локальную) систему оповещения. Одновременно об этом информировать органы ГОЧС, органы местного самоуправления. В дальнейшем информировать персонал, население, органы власти о всех изменениях обстановки.

В аварийных ситуациях необходимо:



а) при повреждении оборудования, кабелей, проводов, неисправности заземления, появления запаха гари, возникновении необычного шума и других неисправностей немедленно отключить электропитание оборудования от сети и сообщить о случившемся непосредственному руководителю и лицу, осуществляющему техническое обслуживание оборудования;

б) в случае сбоя в работе оборудования ПК или программного обеспечения вызвать специалиста по технологическому обслуживанию для устранения неполадок;

с) при возгорании электропроводки, оборудования немедленно отключить электропитание и принять меры по тушению пожара с помощью имеющихся первичных средств пожаротушения (углекислотные огнетушители), сообщить о происшедшем непосредственному руководителю. Применение воды и пенных огнетушителей находящегося под напряжением электрооборудования недопустимо;

д) в случае внезапного ухудшения здоровья (усилия сердцебиения, появления головной боли, рези в глазах, тошноты, появления боли в пальцах и кистях рук и др.) прекратить работу, выключить оборудование, сообщить руководителю и при необходимости обратиться к врачу.

Оценив условия труда кабинета диспетчера, в том числе, освещение и определение соответствия эргономическим требованиям рабочего места, и определив меры пожарной безопасности, можно сделать следующие выводы по производственной и экологической безопасности человека и работы, выполняемой им:

а) по занимаемой площади и объему помещение удовлетворяет нормативным требованиям;

б) микроклимат соответствует допустимым условиям;

с) шумовая обстановка на рабочем месте соответствует норме;

д) система освещения в помещении соответствует норме и создает нормальные условия для работы;

е) монитор компьютера служит источником ЭМП – вредного фактора, который отрицательно влияет на здоровье работника при непрерывной работе более 4 часов;

ф) рабочее место сотрудника удовлетворяет требованиям;

г) по состоянию пожаробезопасности помещение соответствует нормам.

При рассмотрении вопроса об охране окружающей среды можно сказать, что деятельность помещения не является экологически опасной.

### **10.5 Вывод по разделу «Социальная ответственность»**

В ходе работы по разделу «Социальная ответственность» были рассмотрены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.

Их суть заключалась в анализе основных нормативных документов, регулирующих и регламентирующих производственную деятельность диспетчера на рассматриваемом объекте.

Был выполнен анализ вредных факторов проектируемого решения, таких как микроклимат, шум, освещение, электромагнитное и электростатическое излучение.

Соблюдение норм и правил, описанных в данном разделе диссертации, поможет избежать случаев производственного травматизма, а также обеспечить здоровье персонала и сохранность окружающей среды.

## **Заключение**

В ходе выполнения магистерской диссертации был проведен анализ процесса деградации системы противоаварийной защиты ГРС с использованием критериев Маркова. В качестве перспективного направления было выбрано исследование применения промышленных логических контроллеров с тройным модульным резервированием на газораспределительной станции Кемеровского ЛПУМГ.

В данном исследовании был проведен выбор современного логического контроллера. Выбор сделан в пользу контроллера Schneider Electric Triconex Tricon, который является лидером на мировом рынке. Контроллеры Tricon являются современными программируемыми логическими контроллерами, обеспечивающими отказобезопасность с помощью архитектуры с тройным модульным резервированием.

Также было выполнено моделирование архитектуры 2oo3D и расчет PFDavg контроллера Triconex Tricon с использованием модели Маркова, а также расчеты безопасности контроллера, деградировавшего до уровней 2oo2D и 1oo1D.

В результате внедрения системы противоаварийной защиты на газораспределительную станцию №1 Кемеровского ЛПУМГ будет обеспечена бесперебойная подача газа без повышения/понижения давления, что крайне важно для завода «Азот», так как технологическое оборудование, используемое на заводе, должно непрерывно находиться в работоспособном состоянии. Из чего можно сделать вывод, что данная система, уменьшит количество сбоев технологического оборудования и число аварий на производстве. Следовательно, уменьшит и расходы на восстановление оборудования и ликвидацию аварий.

## Список литературы

1. Система противоаварийной защиты. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://patenton.ru/patent/RU2451377C1>.
2. В.В. Скляр. Исследование марковских моделей информационно-управляющей системы на основе самодиагностируемых программируемых платформ / Скляр В.В. и др. // Научные записки [Кировоградского государственного педагогического университета имени Владимира Винниченко]. Серия: Проблемы методики физико-математического и технологического образования. – 2015. – № 8 (1). – С. 31-37.
3. Börcsök, J. Calculation of MTTF values with Markov Models for Safety Instrumented Systems / J. Börcsök, E. Ugljesa, D. Machmur. // 7th WSEAS International Conference on applied computer science, Venice, Italy. – 2007. – P. 30-35.
4. Hongsheng, Su. Reliability and Security Analysis on 3-vote-2 Voting System / Su. Hongsheng. // International Journal of Security and Its Applications. – 2013. – № 4. – P. 327-342.
5. Dang Pham N. T. Evaluation of Spurious Trip Rate of SIS dependent on demand rate / Dang Pham N. T., Michael Schwarz, Josef Börcsök. // Mathematical Methods and Systems in Science and Engineering. – 2015. – P. 17-24.
6. Hongsheng Su. Safety Analysis on Regional Computer Interlocking System Based on Dynamic Fault Tree / Su Hongsheng, Wen Jun. // Wseas transactions on circuits and systems. – 2015. – № 14. – P. 414-426.
7. Автоматизированные системы управления технологическими процессами добычи – [Электронный ресурс]. URL: <https://samara-tr.gazprom.ru/d/textpage/8e/142/sto-gazprom-097-2011-avtomatizatsiya.-telemekhanizatsiya.-osnovn.pdf>.
8. Системы Tricon – [Электронный ресурс]. URL: [https://app2003.ru/doc/tricon\\_v9-v10\\_technical\\_product\\_guide.pdf](https://app2003.ru/doc/tricon_v9-v10_technical_product_guide.pdf).

9. Датчики давления Метран [Электронный ресурс]. URL: [https://metran.nt-rt.ru/images/showcase/Datchiki\\_davleniya2013.pdf](https://metran.nt-rt.ru/images/showcase/Datchiki_davleniya2013.pdf).
10. Регулирующий односедельный клапан [Электронный ресурс]. URL: [https://saz-avangard.ru/upload/files\\_katalog/katalog\\_saz\\_2018.pdf](https://saz-avangard.ru/upload/files_katalog/katalog_saz_2018.pdf).
11. Электропривод прямоходный [Электронный ресурс]. URL: [https://regada.nt-rt.ru/images/manuals/ST\\_0.1\\_ru-v02.pdf](https://regada.nt-rt.ru/images/manuals/ST_0.1_ru-v02.pdf).
12. Схема информационных потоков системы противоаварийной защиты [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/printsipy-vybora-tehnicheskikh-sredstv-srednego-urovnya-raspredelennyh-sistem-upravleniya>
13. ГОСТ Р МЭК 61508-2012. «Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью».
14. ГОСТ Р МЭК 61511-2011. «Безопасность функциональная. Системы безопасности приборные для промышленных процессов».
15. «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтегазовых производств». 2013.
16. Надежность технических систем: Справочник / Ю.К. Беляев, В.А. Богатырев, В.В. Болотин и др.; под ред. И.А. Ушакова. М.: Радио и связь, 1985. – 606 с.
17. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. – М.: Наука, 1965. – 524 с.
18. Пугачев В.С. Введение в теорию вероятностей. Издательство “Наука”. Главная редакция физико-математической литературы, 1968, с.368.
19. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969, с.576.
20. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. Изд. Академия, 2003, с.464.
21. Модели и методы расчета надежности технических систем [Электронный ресурс]. URL: [https://www.ipu.ru/sites/default/files/card\\_file/Viktoroova&Stepanyants.pdf](https://www.ipu.ru/sites/default/files/card_file/Viktoroova&Stepanyants.pdf)

22. Пугачев В.С. Введение в теорию вероятностей. Издательство “Наука”. Главная редакция физико-математической литературы, 1968, с.368.
23. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969, с.576.
24. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. Изд. Академия, 2003, с.464.
25. ГОСТ Р МЭК 61508 - 4 - 2012. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 4. Термины и определения. – Взамен ИУС 3 - 2014; введ. 2013 - 08 - 01. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 36с.
26. Модели и методы расчета надежности технических систем [Электронный ресурс]. URL: [https://studopedia.ru/7\\_69953\\_shemirezervirovaniy-a-looD-oo-oo-sravnitelnaya-otsenka.html](https://studopedia.ru/7_69953_shemirezervirovaniy-a-looD-oo-oo-sravnitelnaya-otsenka.html)
27. Поночовный, Ю.Л., Сиора, А.А., Харченко. В.С. Модели готовности двухканальной информационно-управляющей системы с учетом обновления программных средств [Текст] / Ю.Л. Поночовный, А.А. Сиора, В.С. Харченко // Радіоелектронні і комп’ютерні системи. – 2014. – № 6(70). – С.135-139.
28. B. Zhang, Y. Lu and J. Hang, “Reliability and security analysis of double 2-Vote-2 redundancy system”, Journal of System Simulation, vol. 21, no. 1, (2009), pp. 256-261.
29. Е.И. Громаков. Интегрированные компьютерные системы проектирования и управления / Громаков. Е.И., А.В.Лиепиньш. – Томск: Томский политехнический университет, 2013. – 218 с.
30. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 (2003). Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы». – М.: Госкомсанэпиднадзор.
31. ГОСТ 12.1.013-78 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Строительство. Электробезопасность. Общие требования.

32. ТОО Р-45-084-01. Типовая инструкция по охране труда при работе на персональном компьютере.
33. ППБ-01-93 Правила пожарной безопасности в РФ.
34. ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
35. СанПиН 2.2.4.548-96 (1996). Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
36. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 (2003). Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий. – М.: Госкомсанэпиднадзор.
37. ГОСТ 12.1.003-83 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности.
38. ГОСТ 12.1.006–84.ССБТ (1984). Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля.
39. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ (1982). Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.
40. Сапронов, Ю.Г. Аттестация рабочих мест по условиям освещённости: лабораторный практикум по дисциплине «Безопасность жизнедеятельности. – Шахты: ГОУ ВПО «ЮРГУЭС», 2010. – 64 с.
41. СНиП 23-05-95 Естественное и искусственное освещение.
42. ГОСТ Р 22.0.02-94 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Термины и определения основных понятий.

**Приложение А**  
(обязательное)  
Технологическая схема ГРС-1





## **Приложение Б**

(обязательное)

Схема информационных потоков



## Приложение В

(обязательное)

Architecture modeling and calculation of the triconex Tricon PFD controller

### Dynamic reliability models

#### Analysis of the process of degradation of the emergency protection system GDS using the Markov criteria

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ТМ81	Шадрин Дмитрий Владимирович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Громаков Евгений Иванович	К.Т.Н		

Консультант – лингвист отделения иностранных языков:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Пичугова Инна Леонидовна			

## **1 Dynamic reliability models**

From the viewpoint of reliability analysis, the complexity of systems is caused by the following factors:

1. The presence of several levels of functioning efficiency (productivity) in working States and gradual degradation in efficiency when malfunctions occur; States of inactivity may also differ in consequences; implementation of various methods of redundancy (structural, temporary, algorithmic);
2. the use of different restoration strategies;
3. application of algorithmic methods of fault processing (mainly for computing devices) with classification for failures;
4. the possibility of several incompatible types of failures of elements, resulting in a certain multiplicity and sequence of occurrence to different consequences at the system level; the presence of hidden and explicit failures;
5. common cause failures, induced failures.

These factors can be taken into account in the framework of dynamic reliability models that describe events and failures occurring in the system as processes that develop over time.

The most common dynamic models of “reliability” behavior of systems are Markov random processes.

### **1.1 Markov random processes**

In probability theory, the concept of a random function is introduced, i.e., a function whose value for each given value of an argument (or arguments) is a random variable. A random function can be considered as a collection of random variables that represent its values for different argument values. In the General case of a random function is equivalent to an infinite, uncountable set of random variables. Each specific function that can be registered with a single observation of a random function is called an implementation of this function.

A random time function characterizes the process of changing a random variable over time. Random functions of time are called random or stochastic processes.

In some system  $S$ , a random process occurs, if its States change randomly over time, then the process occurring in the system is called a Markov process or a process without aftereffect, if for each moment of time the probability of any future state of the system depends only on the state of the system at the moment and does not depend on how the system came to this state.

The space of possible system States can be either continuous or discrete, when the system States can be enumerated or numbered. When investigating the reliability of systems consisting of elements with specified reliability characteristics, the state space is always discrete.

The mathematical description of a Markov random process that occurs in a system with discrete States depends on the time points at which the system transitions from state to state. If transitions between States can only occur at pre-defined points in time, then this process is called a Markov process with discrete time. If transitions can occur at any random time, then this process is called a Markov process with continuous time. With exponential distribution of the random time of the system's stay in each of its States, the Markov process is homogeneous (the intensity of transitions between States does not depend on time). Homogeneous Markov processes with a discrete set of States and continuous time are the main instrument for studying the reliability of complex systems with recovery. This is because they allow you to get analytical expressions or computational schemes for calculating various reliability indicators. In addition, in the vast majority of cases, the source data for elements are either constant failure rates or average times to failure.

Markov models of reliability are constructed as follows. On the basis of information about the structure and principles of functioning of the system under study, a set of its possible States is determined. This set is divided into two subsets – health States and failure States. Next, we construct a Markov transition graph,

whose vertices are the States of the system, and whose edges are possible transitions between States. Transition rates are determined by the characteristics of reliability and maintainability of system elements. According to the transition graph, the necessary system of equations is compiled, the analytical solution of which allows you to obtain formula expressions for the required reliability indicators. If the solution of the system is possible only by numerical methods, then the numerical values of reliability indicators are obtained at the specified time points.

## **2 Analysis of the process of degradation of the emergency protection system GDS using the Markov criteria**

Among the various structures for reserving EPS contours, there are MooND. The peculiarity of these structures is that during operation, when performing EPS of the functional N of M, built-in diagnostics of its components is performed. During the operation of EPS, detectable failures of individual EPS modules or components are possible. For reserved EPS, requirements are set for the time (period) of their maintenance with subsequent restoration, with or without stopping the GDS and transferring the equipment (technological process) to a safe state, by a command from the dispatcher's control panel. And if the diagnostics detects a dangerous or safe failure of the EPS, the alarm is activated and preparations are made to transfer to a safe state or stop the GDS.

In accordance with [1], we present the necessary definitions used in this work.

Dangerous failure is a failure of an element and / or subsystem and / or system that affects the performance of a security function:

- to impede security functions if it must execute (in query mode) or causes the termination of execution of the safety function (in continuous mode), turning controlled equipment (TP) in a dangerous or potentially dangerous condition or reduces the likelihood of correct execution of security functions, if you need it.

Safe failure is a failure of an element and / or subsystem, and / or system that plays a role in the implementation of the security function, which:

- leads to a false execution of a security function that puts the CE (or part of it) in a safe state or maintains a safe state, or increases the probability of a false execution of a security function that puts the CE (or part of it) in a safe state or maintains a safe state.

Diagnostic coverage is the part of dangerous failures detected by automatic diagnostic tests in non-Autonomous mode. This part of dangerous failures is



calculated as the ratio of the intensity of dangerous failures detected by diagnostic tests to the total intensity of dangerous failures.

Detected failure is a failure with respect to hardware that was detected by diagnostic checks, control checks, operator intervention (for example, physical inspection and manual verification), or during normal operation.

Undetected failure is a failure in relation to hardware that was not detected by diagnostic checks, control checks, operator intervention (for example, physical inspection and manual verification), or during normal operation.

The average probability of a dangerous failure on request ( $PFD_{avg}$ ) is the average failure of electrical and/or electronic and/or programmable electronic elements of a safety – related system to provide safety, i.e. to perform the specified safety function when a request is made from the CE or the CE control system.

In the process of detected failures, EPS degradation (SIS) occurs and develops. Despite the fact that the EPS circuit includes various components, the most important is the logic block. This is due to the fact that when designing EPS in accordance with an integrated or shared architecture of joint operation of EPS and DCS, the logic block can be responsible for processing not only emergency signals, but also signals from DCS of critical objects.

The study was conducted using the Tricon controller. Tricon controllers are state-of-the-art programmable logic controllers that provide fault protection using a triple Modular Redundant (TMR) architecture.

The controller combines three parallel processor blocks and performs advanced diagnostics of the controller components. When performing logical and computational operations, the controller performs a majority selection of non-failed "two-out-of-three" blocks. Each TMR channel independently executes the control program, in parallel with the other two channels. Advanced diagnostics of each channel, module, and functional circuit immediately detects operational faults and reports on them using indicators or alarms. TMR diagnostics is performed in on-line mode.

All information about the PLC fault diagnosis is available to both the control program and the operator or dispatcher. This diagnostic data can be used to adjust control actions or to perform maintenance procedures.

Specialized hardware / software majority sampling mechanisms qualify and validate all digital input and output signals coming from field devices, while analog input signals are subjected to an average value estimation process. Since each channel is isolated from the others, no single failure in any of the channels can be transmitted to the other channel. If a hardware failure occurs in one channel, the other two channels reject its signal. In this case the faulty module can be easily replaced without switching off the controller and interrupting the technological process.

Figure 1 shows the scheme of sequential degradation of Tricon.

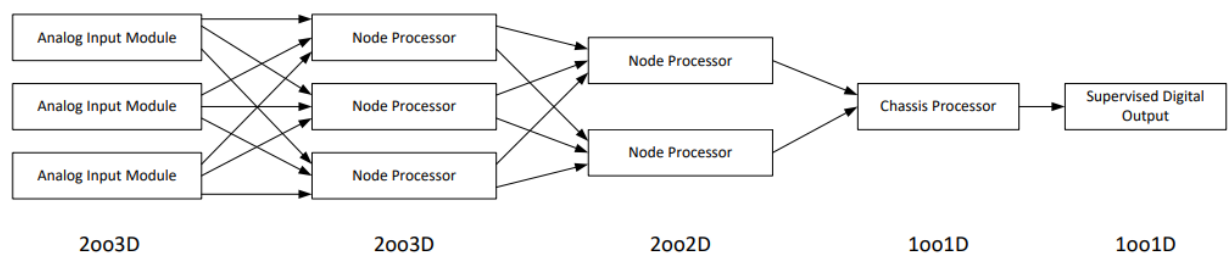


Figure 1. Diagram of the sequential degradation Tricon

Consider voting redundancy (2003d architecture). The voting method is simpler than redundancy by substitution, since it does not require constant synchronization of processor States. In addition, the voting method allows you to perform a management task without stopping during the transition to the reserve. However, voting to ensure reliability is only possible in a system consisting of at least three processors, which is quite expensive. The two processors included in the voting scheme can only be used in security systems [2].

A typical 2003 voting system is shown in Figure 2. Here, three processor modules A, B, and C execute the same user program, receiving the same data from sensors via AI input modules. Each processor module has three network controllers that execute the exchange Protocol over the network.

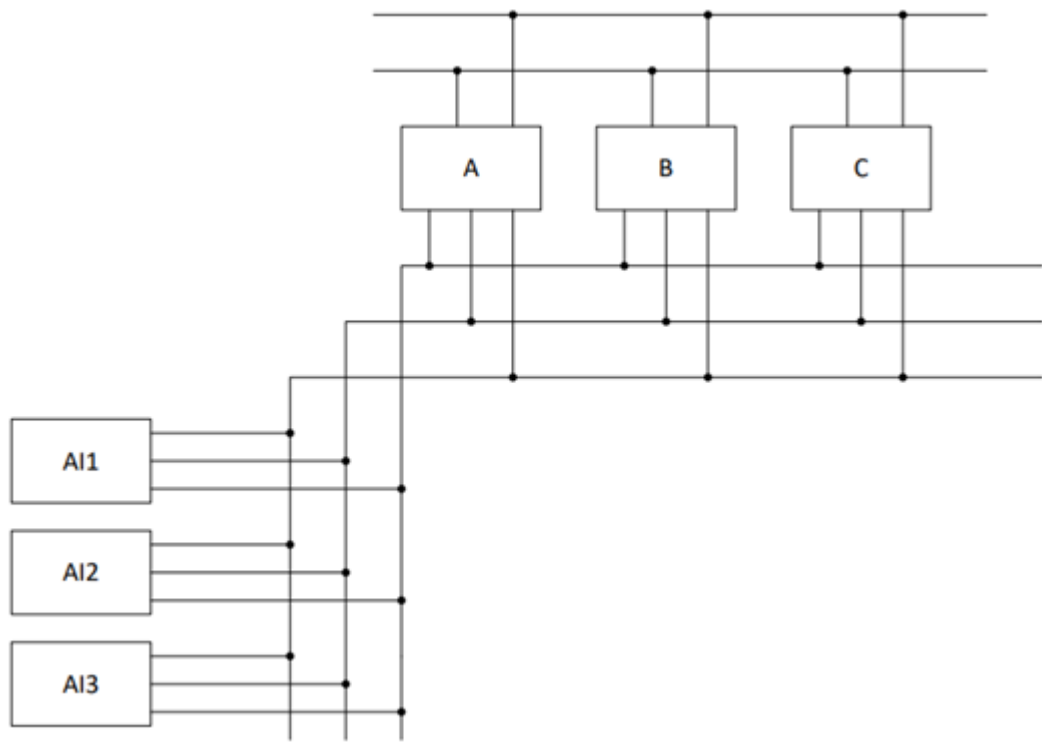


Figure 2. Reservation by voting method

The system works as follows. Each of the three parallel processors (A, B, and C) sends a request (command) to the input modules. Each of the three input modules receives these three commands and performs a 2oo3d vote, which results in selecting one of the three received input values that is used to generate a response to the command. Since there are three input modules, three responses to its command are also sent to the processor, from which each of the three processors selects one response according to the 2oo3d scheme, which is used in the further operation of the application program.

The output procedure is similar. Each processor sends an output command to the output modules, and each of the output modules receives three commands. Next, each output module is voted according to the 2oo3d scheme, as a result of which one of the three commands is selected for execution, which enables or disables the execution device.

Thus, voting is performed not by a separate reservation block, but by each element of the system separately, so the failure of any voting block does not lead to the failure of the entire system.

After the failure of one of the processors, the system continues to work continuously, since the voting scheme produces the correct result based on the results of the majority vote. When two processors fail, the system fails. Therefore, after the failure of one of the processors in the 2oo3d system, it can switch to the 2oo2d (or 1oo2D) mode, after the failure of the second processor – to the 1oo1D mode, and only after the failure of the third one can transfer its outputs to safe States.

In systems with voting, test results can be used as additional conditions for voting. For example, the output of a control signal to the actuator can only be allowed if the processor diagnostics did not reveal any errors or malfunctions. Otherwise, a failure degradation scheme is implemented.

## 2.1 Calculating the security of a Tricon controller degraded to level 1oo1D

The 1oo1D state is the last limit for performing EPS protection functions. Single-channel 1oo1 systems are unreliable and insecure. The industrial version of this category, certified for SIL3 class is the 1oo1D system.

Application of the 1oo1D structure is a protection circuit certified by TUV for the RC6/SIL3 security level, which is shown in the conceptual form in Figure 3. [3]

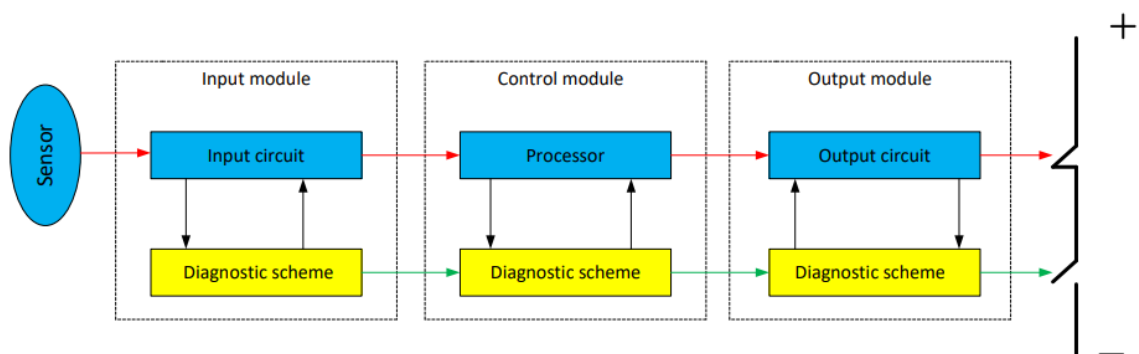


Figure 3. 1oo1D Redundancy

As it follows from Figure 3, the output signal passes through a double switch, the duplicate components of which are made according to different technologies. A normal output signal of the controller is transmitted via an

electronic key; at the same time, a relay controlled by the built-in diagnostic circuit provides (via a chain of normally open contacts) an additional key that controls the output signal.

A high level of process safety is achieved at all stages of the degradation process due to advanced self-diagnostics functions, including, for example, current and voltage measurements, time parameters, signal synchronization parameters, and verification of the integrity of transmitted and processed data.

The description of a PLC degraded to 1oo1D in the Markov model notation is shown in Figure 4.

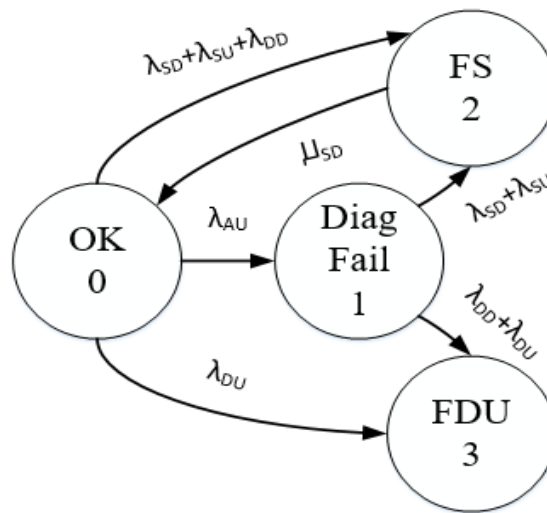


Figure 4. Markov Model of the Tricon controller degraded to the 1oo1D level

Here it is accepted:

1. DD, dangerous detected failures;
2. DU, dangerous undetected failures;
3. SD, safe detected failures;
4. SU, safe detected failures;
5. AU, safe failure of the diagnostic system.

State 0 corresponds to the condition that there are no failures in the remaining functional part of Tricon (the single-channel remainder of the controller with diagnostics). From this state, the last working channel that ensures the safety of the TA can only go to the other three worst States.

State 1 is a condition when the diagnostic system does not detect the loss of that part of the functionality that does not affect security, but affects the ability of the degraded EPS to detect future possible failures (for example, the failure of the diagnostic circuit itself), and the transition to this state is not detected by internal diagnostics [4].

State 2 is characterized by an emergency state of the controller with the system being diagnosed, which is in a safe failure.

State 3 is characterized by dangerous and diagnosable failures, and the EPS state is not self-diagnosed.

Add the DC diagnostic coverage to the Markov model shown in Figure 5.

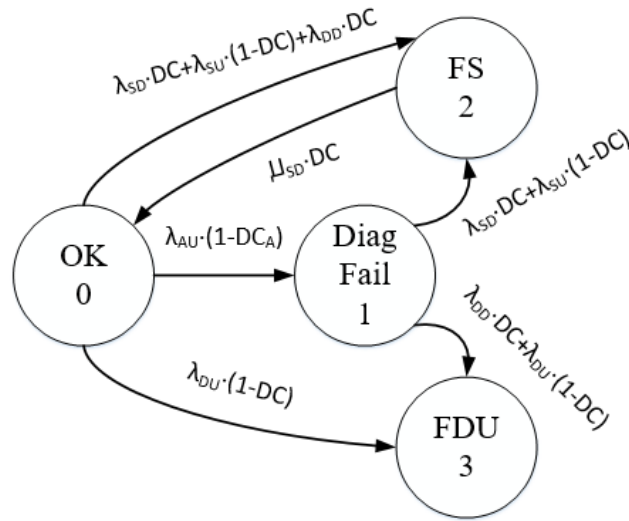


Figure 5. Markov Model of the Tricon controller with added diagnostic coverage

We construct a system of Kolmogorov-Chapman differential equations for the graph in Fig.5. The result is presented in Figure 6.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}P_0(t) &= -[\lambda_{SD} \cdot DC + \lambda_{SU} \cdot (1 - DC) + \lambda_{DD} \cdot DC + \lambda_{DU} \cdot (1 - DC) + \lambda_{AU} \cdot (1 - DC_A)] \cdot P_0(t) + \mu_{SD} \cdot DC \cdot P_2(t) \\ \frac{d}{dt}P_1(t) &= -[\lambda_{SD} \cdot DC + \lambda_{SU} \cdot (1 - DC) + \lambda_{DD} \cdot DC + \lambda_{DU} \cdot (1 - DC)] \cdot P_1(t) + P_0(t) \cdot \lambda_{AU} \cdot (1 - DC_A) \\ \frac{d}{dt}P_2(t) &= [\lambda_{SD} \cdot DC + \lambda_{SU} \cdot (1 - DC) + \lambda_{DD} \cdot DC] \cdot P_0(t) - \mu_{SD} \cdot DC \cdot P_2(t) + P_1(t) \cdot [\lambda_{SD} \cdot DC + \lambda_{SU} \cdot (1 - DC)] \\ \frac{d}{dt}P_3(t) &= P_0(t) \cdot [\lambda_{DU} \cdot (1 - DC)] + P_1(t) \cdot [\lambda_{DD} \cdot DC + \lambda_{DU} \cdot (1 - DC)] \end{aligned}$$

Figure 6. Kolmogorov-Chapman system of differential equations

The solution of the system of equations is shown in Figures 7 – 9. Coefficients of diagnostic coverage are 0.5; 0.7; 0.9.

$$\text{Find}(p_0, p_1, p_2, p_3) \rightarrow \left( \begin{array}{c} \frac{5.12e10 \cdot s^3 + 3.20256e9 \cdot s^2 + 160000.0 \cdot s}{5.12e10 \cdot s^3 + 3.20576e9 \cdot s^2 + 240160.0 \cdot s + 3.0} \\ \frac{640000.0 \cdot s^2 + 40000.0 \cdot s}{5.12e10 \cdot s^3 + 3.20576e9 \cdot s^2 + 240160.0 \cdot s + 3.0} \\ \frac{1.92e6 \cdot s^2 + 112.0 \cdot s}{5.12e10 \cdot s^3 + 3.20576e9 \cdot s^2 + 240160.0 \cdot s + 3.0} \\ \frac{640000.0 \cdot s^2 + 40048.0 \cdot s + 3.0}{5.12e10 \cdot s^3 + 3.20576e9 \cdot s^2 + 240160.0 \cdot s + 3.0} \end{array} \right)$$

Figure 7. Solution of a system of equations for DC = 0.5

$$\text{Find}(p_0, p_1, p_2, p_3) \rightarrow \left( \begin{array}{c} \frac{1.28e12 \cdot s^3 + 1.12064e11 \cdot s^2 + 5.6e6 \cdot s}{1.28e12 \cdot s^3 + 1.121376e11 \cdot s^2 + 7.28368e6 \cdot s + 63.0} \\ \frac{9.6e6 \cdot s^2 + 840000.0 \cdot s}{1.28e12 \cdot s^3 + 1.121376e11 \cdot s^2 + 7.28368e6 \cdot s + 63.0} \\ \frac{5.44e7 \cdot s^2 + 2960.0 \cdot s}{1.28e12 \cdot s^3 + 1.121376e11 \cdot s^2 + 7.28368e6 \cdot s + 63.0} \\ \frac{9.6e6 \cdot s^2 + 840720.0 \cdot s + 63.0}{1.28e12 \cdot s^3 + 1.121376e11 \cdot s^2 + 7.28368e6 \cdot s + 63.0} \end{array} \right)$$

Figure 8. Solution of a system of equations for DC = 0.7

$$\text{Find}(p_0, p_1, p_2, p_3) \rightarrow \left( \begin{array}{c} \frac{1.28e12 \cdot s^3 + 1.44064e11 \cdot s^2 + 7.2e6 \cdot s}{1.28e12 \cdot s^3 + 1.441312e11 \cdot s^2 + 7.92336e6 \cdot s + 27.0} \\ \frac{3.2e6 \cdot s^2 + 360000.0 \cdot s}{1.28e12 \cdot s^3 + 1.441312e11 \cdot s^2 + 7.92336e6 \cdot s + 27.0} \\ \frac{6.08e7 \cdot s^2 + 3120.0 \cdot s}{1.28e12 \cdot s^3 + 1.441312e11 \cdot s^2 + 7.92336e6 \cdot s + 27.0} \\ \frac{3.2e6 \cdot s^2 + 360240.0 \cdot s + 27.0}{1.28e12 \cdot s^3 + 1.441312e11 \cdot s^2 + 7.92336e6 \cdot s + 27.0} \end{array} \right)$$

Figure 9. Solution of a system of equations for DC = 0.9

Graphs of the probability of finding the system in a working state (0-state) in the Matlab environment at DC = 0.5; 0.7; 0.9 are shown in Figure 10.

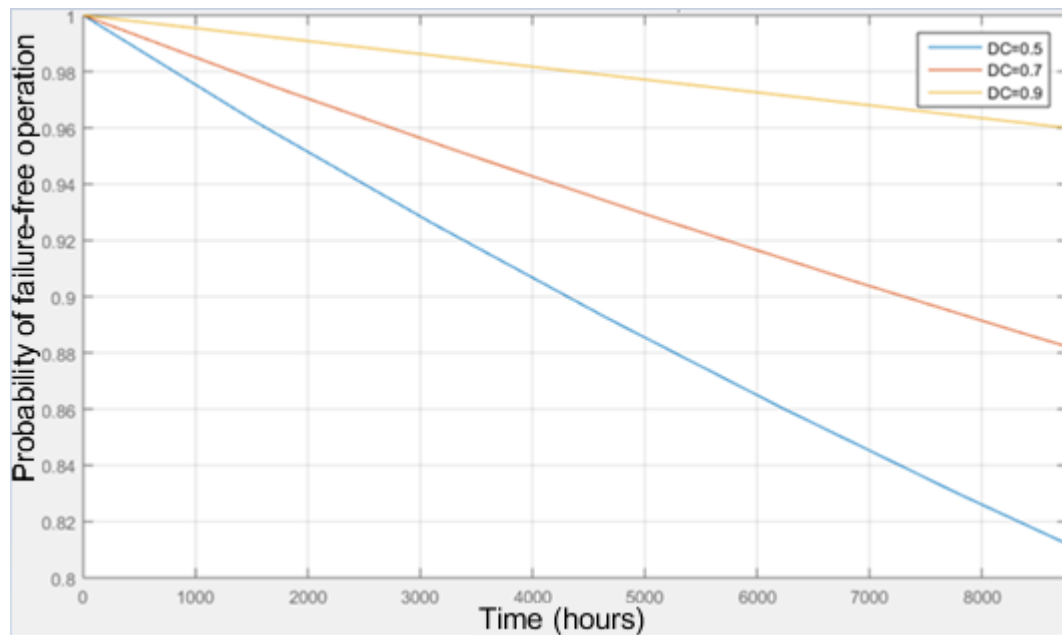


Figure 10. Graphs of the probability of finding the system in a working state

The period of investigation of the probability of finding the system in working condition is shown on the graph for 1 year.

After analyzing the graph shown in Figure 10, we will make a table 1 with numerical probability values [5].

Table 1. Numerical values of the probability of finding the system in working condition after 1 year

The value of DC	The probability of finding the system in working condition after a year of maintenance	PFDavg after a year of service
0,5	0,812	0,188
0,7	0,882	0,118
0,9	0,96	0,04

As it can be seen from Table 1, with a large coefficient of diagnostic coverage, EPS in a degraded state can remain for a year with a probability of working capacity of 0.96; with a small depth of DC, the system requires immediate stop and a complex of restoration works.



## **2.2 Conclusion:**

According to the research, it was found that with a sufficiently large diagnostic coverage, it is not necessary to immediately disconnect this controller from the network and perform a complex of restoration work on it. The probability of failure safety will be high enough for subsequent operation during 6 months (1 year) of operation. This time interval may be sufficient to perform restoration work even if the company's business logistics is problematic.

## **List of used literature**

1. GOST R IEC 61508 - 4 - 2012. Functional safety of electrical, electronic, programmable electronic systems related to safety. Part 4. Terms and definitions. - Instead of IUS 3-2014; introduced. 2013 - 08 - 01. - Moscow: Standardinform, 2014. – 36 P.
2. E. I. Gromakov. Integrated computer systems of design and management / Gromakov, E. I., A.V. Liepins – - Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 2013. - 218 P.
3. Börcsök, J. Calculation of MTTF values with Markov Models for Safety Instrumented Systems / J. Börcsök, E. Ugljesa, D. Machmur. // 7th WSEAS International Conference on applied computer science, Venice, Italy. – 2007. – P. 30-35.
4. Hongsheng, Su. Reliability and Security Analysis on 3-vote-2 Voting System / Su. Hongsheng. // International Journal of Security and Its Applications. – 2013. – № 4. – P. 327-342.
5. Dang Pham N. T. Evaluation of Spurious Trip Rate of SIS dependent on demand rate / Dang Pham N. T., Michael Schwarz, Josef Börcsök. // Mathematical Methods and Systems in Science and Engineering. – 2015. – P. 17-24 P.