



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

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Исследование влияния деградации контроллера противоаварийной автоматической защиты (ПАЗ) на показатели безопасности блока измерительных линий системы измерений количества и показателей качества нефти (СИКН)

УДК 621.3.049.77-027.45:622.323

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ТМ12	Васин Андрей Иванович		

Руководитель ВКР

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

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Былкова Татьяна Васильевна	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ООД ШБИП	Федорчук Юрий Митрофанович	д.т.н., профессор		

По разделу на иностранном языке

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИЯ ШБИП	Куимова Марина Валерьевна	к.п.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Курганов Василий Васильевич	к.т.н.		

Томск – 2023 г.

Результаты обучения по ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способность осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий
УК(У)-2	Способность управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способность организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способность применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном (-ых) языке (-ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способность анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Готовность к коммуникации в устной и письменной формах на русском и иностранном языках для решения задач профессиональной деятельности
ОПК(У)-2	Готовность руководить коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
ОПК(У)-3	Способность разрабатывать (на основе действующих стандартов) методические и нормативные документы, техническую документацию в области автоматизации технологических процессов и производств, в том числе жизненному циклу продукции и ее качеству, руководить их созданием
ОПК(У)-4	Способность руководить подготовкой заявок на изобретения и промышленные образцы в области автоматизированных технологий и производств, управления процессами, жизненным циклом продукции и ее качеством
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способность разрабатывать технические задания на модернизацию и автоматизацию действующих производственных и технологических процессов и производств, технических средств и систем автоматизации, управления, контроля, диагностики и испытаний, новые виды продукции, автоматизированные и автоматические технологии ее производства, средства и системы автоматизации, управления процессами, жизненным циклом продукции и ее качеством
ПК(У)-2	Способность проводить патентные исследования с целью обеспечения патентной чистоты и патентоспособности новых проектных решений и определения показателей технического уровня проектируемой продукции, автоматизированных и автоматических технологических процессов и производств, средств их технического и аппаратно-программного обеспечения
ПК(У)-3	Способность составлять описание принципов действия и конструкции устройств, проектируемых технических средств и систем

Код компетенции	Наименование компетенции
	автоматизации, управления, контроля, диагностики и испытаний технологических процессов и производств общепромышленного и специального назначения для различных отраслей национального хозяйства, проектировать их архитектурно-программные комплексы
ПК(У)-4	Способность разрабатывать эскизные, технические и рабочие проекты автоматизированных и автоматических производств различного технологического и отраслевого назначения, технических средств и систем автоматизации управления, контроля, диагностики и испытаний, систем управления жизненным циклом продукции и ее качеством с использованием современных средств автоматизации проектирования, отечественного и зарубежного опыта разработки конкурентоспособной продукции, проводить технические расчеты по проектам, технико-экономический и функционально-стоимостной анализ эффективности проектов, оценивать их инновационный потенциал и риски
ПК(У)-5	Способность разрабатывать функциональную, логическую и техническую организацию автоматизированных и автоматических производств, их элементов, технического, алгоритмического и программного обеспечения на базе современных методов, средств и технологий проектирования
ПК(У)-15	Способность разрабатывать теоретические модели, позволяющие исследовать качество выпускаемой продукции, производственных и технологических процессов, средств и систем автоматизации, контроля, диагностики, испытаний и управления, проводить анализ, синтез и оптимизацию процессов автоматизации, управления производством, жизненным циклом продукции и ее качеством на основе проблемно-ориентированных методов
ПК(У)-16	Способность проводить математическое моделирование процессов, оборудования, средств и систем автоматизации, контроля, диагностики, испытаний и управления с использованием современных технологий научных исследований, разрабатывать алгоритмическое и программное обеспечение средств и систем автоматизации и управления
ПК(У)-17	Способность разрабатывать методики, рабочие планы и программы проведения научных исследований и перспективных технических разработок, подготавливать отдельные задания для исполнителей, научно-технические отчеты, обзоры и публикации по результатам выполненных исследований
ПК(У)-18	Способность осуществлять управление результатами научно-исследовательской деятельности и коммерциализацией прав на объекты интеллектуальной собственности, осуществлять ее фиксацию и защиту

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки – 15.04.04 Автоматизация технологических процессов и производств
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ В.В. Курганов
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

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

Студенту:

Группа	ФИО
8ТМ12	Васину Андрею Ивановичу

Тема работы:

Исследование влияния деградации контроллера противоаварийной автоматической защиты (ПАЗ) на показатели безопасности блока измерительных линий системы измерений количества и показателей качества нефти (СИКН)	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	34-85/с от 03.02.2023

Срок сдачи студентом выполненной работы:	03.06.2023
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i>	Целью работы является исследование возможности использования на объекте повышенной опасности резервированного контроллера СПАЗ в процессе отказа его модулей
--	--

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p>	<p>1. Обзор метода анализа надежности, использующий основные теоремы теории вероятностей случайных событий; 2. Анализ процесса деградации системы противоаварийной защиты блока измерительных линий СИНК с помощью критериев Маркова; 3. Моделирование архитектуры 2oo3D и расчет PFD; 4. Расчет безопасности контроллера Tricon, деградировавшего до уровня 2oo2D; 5. Расчет безопасности контроллера Tricon, деградировавшего до уровня 1oo1D;</p>
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Былкова Татьяна Васильевна, доцент ОСГН ШБИП, к.э.н.</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Федорчук Юрий Митрофанович, профессор ООД ШБИП, д.т.н.</p>
<p>Раздел на иностранном языке</p>	<p>Куимова Марина Валерьевна, доцент ОИЯ ШБИП, к.п.н.</p>
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>	
<p>Анализ процесса деградации системы противоаварийной защиты БИЛ с использованием критериев Маркова</p>	

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	<p>03.02.2023</p>
--	-------------------

Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<p>Доцент ОАР ИШИТР</p>	<p>Громаков Евгений Иванович</p>	<p>к.т.н., доцент</p>		<p>03.02.2023</p>

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<p>8ТМ12</p>	<p>Васин Андрей Иванович</p>		<p>03.02.2023</p>

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки (ООП) – 15.04.04 Автоматизация технологических процессов и производств
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы	05.06.2023
---	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
27.05.2023 г.	Основная часть ВКР	60
30.05.2023 г.	Раздел «Социальная ответственность»	20
30.05.2023 г.	Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	20

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Громаков Евгений Иванович	к.т.н., доцент		03.02.2023

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Курганов Василий Васильевич	к.т.н.		03.02.2023

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

Студенту:

Группа	ФИО
8ТМ12	Васину Андрею Ивановичу

Школа	ИШИТР	Отделение школы (НОЦ)	ОАР
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	15.04.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Среднерыночные цены РФ для определения стоимости ресурсов. Нормативные документы НИ ТПУ
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Накладные расходы – 80% районный коэффициент –30%
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды – 30.2%.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	Провести предпроектный анализ
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	Представить Устав научного проекта магистерской работы
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	Разработать план управления НТИ
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Рассчитать сравнительную эффективность исследования

Перечень графического материала:

1. Сегментирование рынка 2. Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений 3. Матрица SWOT 4. Бланк оценки степени готовности научного проекта 5. Потенциальные заинтересованные стороны проекта 6. Цель и результаты проекта 7. Рабочая группа проекта 8. Календарный план проекта 9. Диаграмма Ганта 10. Группировка затрат по статьям 11. Сырье, материалы материала для трех видов исполнения 12. Специальное ПО и оборудование 13. Расчёт основной заработной платы и отчисления на социальные нужды 14. Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта 15. Сравнительная эффективность разработки.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Былкова Татьяна Васильевна	к.э.н.		03.02.2023

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ТМ12	Васин Андрей Иванович		03.02.2023

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
8ТМ12	Васину Андрею Ивановичу

Школа	ИШИТР	Отделение школы (НОЦ)	ОАР
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	15.04.04 Автоматизация технологических процессов и производств

Тема выпускной квалификационной работы:

Исследование влияния деградации контроллера противоаварийной автоматической защиты (ПАЗ) на показатели безопасности блока измерительных линий системы измерений количества и показателей качества нефти (СИКН)	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект исследования: система измерения количества и показателей качества нефти. Область применения: анализ показателей качества сырой нефти.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Производственная безопасность 1.1. Анализ выявленных вредных факторов Природа воздействия; Действие на организм человека; Нормы воздействия и нормативные документы (для вредных факторов); СИЗ коллективные и индивидуальные. 1.2. Анализ выявленных опасных факторов: Термические источники опасности; Электробезопасность; Пожаробезопасности.	Вредные факторы: – Недостаточная освещенность; – Нарушения микроклимата, оптимальные и допустимые параметры; – Шум, ПДУ, СКЗ, СИЗ; – Повышенный уровень электромагнитного излучения, ПДУ, СКЗ, СИЗ; – Наличие токсикантов, ПДК, класс опасности, СКЗ, СИЗ. Опасные факторы: – Электроопасность; класс электроопасности помещения, безопасные номиналы I, U, R _{заземления} , СКЗ, СИЗ; Проведен расчет освещения рабочего места; представлен рисунок размещения светильников на потолке с размерами в системе СИ; – Пожароопасность, категория пожароопасности помещения, марки огнетушителей, их назначение и ограничение применения.

<p>2. Экологическая безопасность:</p> <ul style="list-style-type: none"> – выбросы в окружающую среду; – решения по обеспечению экологической безопасности. 	<p>Наличие промышленных отходов (бумага-черновики, вторцвет и чермет, пластмасса, перегоревшие люминесцентные лампы, оргтехника, обрезки монтажных проводов, бракованная строительная продукция) и способы их утилизации.</p>
<p>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</p> <ul style="list-style-type: none"> – перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий. 	<p>Рассмотрены 2 ситуации ЧС:</p> <p>1) природная – сильные морозы зимой, (аварии на электро-, тепло-коммуникациях, водоканале, транспорте);</p> <p>2) техногенная – несанкционированное проникновение посторонних на рабочее место (возможны проявления вандализма, диверсии, промышленного шпионажа), представлены мероприятия по обеспечению устойчивой работы производства в том и другом случае.</p>
<p>4. Перечень нормативно-технической документации.</p>	<p>ГОСТы, СанПиНы, СНИПы</p>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	03.02.2023
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ООД ШБИП	Федорчук Юрий Митрофанович	д.т.н.		03.02.2023

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ТМ11	Васин Андрей Иванович		03.02.2023

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 155 с., 50 рис., 45 табл., 29 источников, 4 прил.

Ключевые слова: противоаварийная защита (ПАЗ), контроллер, деградация, мажоритарное резервирование, 2oo3, 2oo2, 1oo1, марковские процессы, уровень полноты безопасности (УПБ).

Объектом исследования является контроллер противоаварийной защиты блока измерительных линий СИКН.

Цель работы – исследование возможности использования на объекте повышенной опасности резервированного контроллера системы противоаварийной защиты в процессе последовательного отказа его модулей

В процессе исследования проводились: обзор метода анализа надежности, использующий основные теоремы теории вероятностей случайных событий; анализ переходов между различными состояниями контроллера ПАЗ блока измерительных линий СИКН с помощью критериев Маркова; моделирование архитектуры 2oo3D, 2oo2D и 1oo1D и расчет PFD для каждого состояния системы.

В результате исследования получены значения вероятности отказа по требованию для трех состояний контроллера с целью определения времени, которое оборудование может обходиться без ТО и его уровня SIL на разных этапах деградации.

Область применения: нефтегазовая промышленность, а именно нефтетранспортировка и нефтепереработка продукта.

Экономическая эффективность/значимость исправно функционирующего контроллера СПАЗ СИКН заключается в предотвращении потерь нефти за счет снижения количества опасных чрезвычайных ситуаций в СИКН. Также корректная работа ПАЗ влияет на оптимизацию производства и снижение затрат за счет дублирования сигналов с датчиков и повышения точности процесса измерения количества и качества нефти.

В будущем планируется провести тестовые испытания контроллера под нагрузкой и проверить теоретические расчёты на стенде.

Термины и определения

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

автоматизированная система: совокупность персонала и комплекса средств автоматизации его деятельности, которая реализует информационную технологию выполнения установленных функций.

противоаварийная автоматическая защита (ПАЗ): аппаратно-программный комплекс, который используется в критических приложениях для перевода системы в безопасное состояние. Средства противоаварийной защиты должны быть сертифицированы согласно МЭК — 61508 (IEC — 61508) и МЭК — 61511 (IEC — 61511).

уровень полноты безопасности: дискретный уровень, принимающий одно из четырех возможных значений, определяющий требования к полноте безопасности связанной с безопасностью системы.

резервирование: метод повышения надежности объекта введением дополнительных элементов и функциональных возможностей сверх минимально необходимых для нормального выполнения объектом заданных функций.

марковский процесс: случайный процесс, эволюция которого после любого заданного значения временного параметра t не зависит от эволюции, предшествовавшей t , при условии, что значение процесса в этот момент фиксировано

технологический процесс: идущие подряд технологические взаимосвязанные действия, требуемых для производства конкретного типа работ.

автоматизированное рабочее место: индивидуальная совокупность технических средств и программных продуктов, предназначенная для автоматизации профессионального труда специалиста.

автоматизированная система управления технологическим процессом: комплекс программных и технических средств, предназначенный для автоматизации управления технологическим оборудованием на предприятиях.

программируемый логический контроллер: 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 серьезного обслуживания, а также для работы в неблагоприятных условиях окружающей среды. ПЛК являются устройствами реального времени.

диагностический охват: часть опасных отказов, выявляемая автоматическими диагностическими тестами в неавтономном режиме. Эту часть опасных отказов вычисляют, как отношение интенсивности выявленных диагностическими тестами опасных отказов к общей интенсивности опасных отказов.

обнаруженный отказ: отказ по отношению к аппаратным средствам, установленный с помощью диагностических проверок, контрольных проверок, вмешательства оператора (например, физическим осмотром и ручной проверкой), либо в ходе нормальной работы.

необнаруженный отказ: отказ по отношению к аппаратным средствам, не выявленный с помощью диагностических проверок, контрольных проверок, вмешательства оператора (например, физическим осмотром и ручной проверкой), либо в ходе нормальной работы.

опасный отказ: отказ, приводящий связанную с безопасностью систему в опасное состояние или к ошибке при выполнении функции безопасности.

средняя вероятность опасного отказа по запросу (PFD_{avg}): средняя неготовность электрических и/или электронных, и/или программируемых электронных элементов системы, связанной с безопасностью, обеспечить безопасность, т.е. выполнить указанную функцию безопасности, когда происходит запрос от УО или системы управления УО.

Обозначения и сокращения

В данной работе применены следующие обозначения и сокращения:

АСУ – автоматизированная система управления;

АРМ – автоматизированное рабочее место;

СИКН – система измерения количества и показателей качества нефти;

БИК – блок измерения параметров качества нефти;

БИЛ – блок измерительных линий;

БИР – блок измерений и регулирования;

ТП – технологический процесс;

КШ – кран шаровый;

ИЛ – измерительная линия;

ПЛК – программируемый логический контроллер;

СПАЗ – система противоаварийной автоматической защиты;

АСУ ТП – автоматизированная система управления технологическим процессом;

КИП – контрольно-измерительные приборы;

ПО – программное обеспечение;

ИМ – исполнительный механизм;

SIL – Safety Integrity Level;

УПБ – уровень полноты безопасности;

SIS – Safety Instrumented System (система безопасности);

PFD – Probability of Failure on Demand.

Оглавление

Введение.....	17
Обзор существующих решений.....	19
1 Участие СПАЗ в технологическом процессе функционирования СИКН.....	22
2 Разработка СПАЗ (HAZOP, SIL, оценка отказоустойчивости и отказобезопасности контура SIF, построение дерева отказов).....	23
2.1 HAZOP анализ.....	23
2.2 Дерево отказов.....	26
2.3 Технологические слои защиты.....	28
2.4 Определение требуемого уровня полноты безопасности.....	29
2.5 Уровень полноты безопасности текущего оснащения системы.....	31
3 Разработка алгоритмом обработки измерительных каналов.....	33
3.1 Алгоритм обработки измерительного канала для архитектуры 2003.....	33
3.2 Алгоритм обработки измерительного канала для архитектур 2002 и 1002.....	35
4 Подбор комплекса аппаратно-технических средств, удовлетворяющих требованию УПБ.....	38
4.1 Контроллерное оборудование.....	38
4.2 Датчик давления.....	43
4.3 Регулирующий клапан.....	45
4.4 Искробезопасный барьер.....	49
5 Исследование системы противоаварийной защиты с использованием Марковских процессов.....	50
5.1 Введение в системы противоаварийной защиты.....	50
6 Динамические модели надежности.....	56
6.1 Марковские случайные процессы.....	56
6.2 Уравнения Колмогорова-Чепмена. Марковская модель надежности восстанавливаемого элемента.....	58

7 Анализ процесса деградации системы противоаварийной защиты БИЛ с использованием критериев Маркова	62
7.1 Моделирование архитектуры 2oo3D Triconex Tricon	65
7.2 Расчет безопасности контроллера Tricon, деградировавшего до уровня 2oo2D	78
7.3 Расчет безопасности контроллера Tricon, деградировавшего до уровня 1oo1D	84
8 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	92
8.1 Предпроектный анализ.....	92
8.2 Инициация проекта.....	107
8.3 Планирование управления научно-техническим проектом	108
8.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой эффективности исследования	116
9 Социальная ответственность	119
9.1 Производственная безопасность	119
9.1.1 Вредные факторы.....	119
9.1.2 Опасные факторы.....	127
9.2 Экологическая безопасность	130
9.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	131
9.4 Перечень НТД	132
Заключение	134
Список использованных источников.....	136
Приложение А Структурная схема СИКН (обязательное).....	139
Приложение Б HAZOP-анализ СИКН (обязательное).....	140
Приложение В Частота и последствия событий в результате аварии (обязательное).....	142
Приложение Г Analysis of the process of degradation of the emergency protection system GDS using the Markov criteria (справочное)	143

Введение

В настоящее время автоматизированные системы широко используются в различных отраслях промышленности, энергетики, транспорта и других сферах деятельности. Опыт показывает, что внедрение АСУ ТП имеет значительный технико-экономический эффект благодаря оптимизации и интенсификации технологических процессов.

Одним из ключевых аспектов проектирования и эксплуатации таких систем является обеспечение безопасности при работе с ними. Противоаварийная защита (SIS) – один из важных элементов системы безопасности, который обеспечивает быстрое реагирование на аварийные ситуации и предотвращение опасных последствий. Системы аварийной защиты (САЗ) предназначены для мгновенной остановки или ограничения работы технических систем в случае возникновения опасной ситуации. Они являются неотъемлемой частью современных производственных блоков и обеспечивают защиту персонала, оборудования и окружающей среды.

Система измерения качества и количества нефти (СИКН) нуждается в системе противоаварийной защиты, так как нефть — это взрывоопасный материал, который может привести к серьезным последствиям при неправильной обработке или транспортировке. Если система измерения нефти не защищена от возможных аварий, то есть риски некорректного измерения количества нефти, которое может привести к несоответствию поставок нефти и ошибкам в расчете стоимости, что может иметь серьезные последствия для финансовой устойчивости компании и ее репутации.

Однако, как и любое другое оборудование, элементы ПАЗ подвержены деградации со временем. Это может привести к снижению эффективности их работы и увеличению рисков для безопасности производственных блоков.

В связи с этим **целью диссертации** является исследование деградации системы ПАЗ, а именно контроллера, и влияние данного процесса на защищенность от аварий блока измерительных линий СИКН.

Объект исследования: контроллер ПАЗ, обладающий мажоритарным резервированием 2oo3D.

Предмет исследования: процесс постепенной деградации контроллера ПАЗ.

Научная или практическая новизна заключается в анализе не только одного состояния контроллера, а полного процесса постепенного отказа модулей резервированного ПЛК.

Практическая значимость результатов заключается в использовании данного анализа процесса деградации работниками, обслуживающими объекты АСУ ТП нефтегазового промысла в процессе технического обслуживания и ремонта контроллерного оборудования с целью снизить риски полного отказа контуров защиты, связанных с контроллером ПАЗ.

Реализация и апробация работы: результаты данного исследования представлены комиссии Международной научно-практической конференции «НАУЧНЫЕ ЗНАНИЯ СОВРЕМЕННОСТИ» №1720 и по результатам рассмотрения включены в электронный сборник.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- выявить необходимый уровень полноты безопасности для надежного функционирования СИКН;
- провести модернизацию инструментальной части блока измерительных линий СИКН согласно выбранного уровня полноты безопасности;
- выполнить расчеты PFD для ремонтнопригодных систем с целью оценки эксплуатационной пригодности СПАЗ в условиях возможной деградации избыточности полевого инструментария.

Обзор существующих решений

Произведем аналитический обзор ряда статей на схожую тематику с целью выявления дальнейшего актуального направления исследования.

В работе [4] «Анализ надежности и безопасности системы двойного резервирования 2oo2» были предложены два типа стратегий для системы резервирования 2oo2. Надежность и безопасность данных вариантов были исследованы с использованием марковского процесса. С помощью моделирования в Matlab были проанализированы влияние различных уровней покрытия отказов и уровней обслуживаемости на надежность и безопасность системы. Сравнительное исследование с системой тройного резервирования и системы двойного резервирования с горячим резервом показало следующее: стратегия 1 обеспечивает наивысшую безопасность, но наименьшую надежность, однако стратегия 2 обладает наивысшей надежностью, превосходит систему тройного резервирования и систему двойного резерва с горячим резервом по безопасности при уровне обслуживаемости 0.9.

Предложенное изобретение в работе [1] относится к области противоаварийной защиты и автоматизации в промышленных объектах. Работа основана на системе противоаварийной защиты от компании Siemens.

В статье [2] «Исследование марковских моделей информационно-управляющей системы на основе самодиагностируемых программируемых платформ» рассматривается два подхода к определению модели 2oo3: с поглощающими состояниями и без данных состояний. Автор определяет устоявшееся значение PFD_{avg} при учете вторичного проявления опасных отказов и выявления их системой контроля для базисных значений входных параметров. Применение этих моделей позволило определить границы областей третьего уровня полноты безопасности (SIL3) в двумерном пространстве изменения входных параметров и времени эксплуатации системы.

В работе [3] был проведен расчет MTTF для архитектур 1oo1 и 1oo2. Архитектура 1oo1 представляет собой систему с одним рабочим компонентом

и одним резервным компонентом, которые работают параллельно. Архитектура 1002 представляет собой систему с одним рабочим компонентом и двумя резервными компонентами, где один из них находится в режиме горячего резерва. Расчет МТТФ позволяет сравнить надежность и длительность безотказной работы этих архитектур. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и оптимизации систем безопасности для достижения требуемого уровня надежности и безотказности.

В работе [5] были проанализированы связи между надежностью системы безопасности и частотой запросов, а также продолжительностью спроса для системы 1001. В итоге сделан вывод, что модель Маркова предоставляет лучшие способы для анализа данной связи, чем блок-схема. Следовательно, можно сказать, что нельзя всегда использовать общую формулу расчета надежности для всех систем. Также в результате исследования был произведен расчёт таких показателей, как вероятность безопасных отказов (PFS), среднее время восстановления работоспособности (MTTR), интенсивность ложных отказов (STR).

В другой работе [6] для решения поставленной проблемы была установлена динамическая модель дерева отказов (DFT) системы RCIS с точки зрения отказов системы, и для определения вероятности безопасности (PFS) и вероятности опасности (PFD) был использован метод вероятностной аппроксимации. В конечном итоге было проведено сравнение между методом вероятностной аппроксимации DFT и методом Маркова. Проведенные исследования показывают, что метод вероятностной аппроксимации DFT дает примерно те же результаты, что и метод Маркова, и имеет тенденцию быть более консервативным при расчете вероятностных показателей, что предоставляет новое решение для анализа безопасности сложных систем динамической избыточности.

Во всех приведенных примерах были рассмотрены архитектуры 1001, 1002 и 2003 в разрезе марковских моделей, однако не был изучен вопрос деградации контроллера СПАЗ и влияние данного события на

технологических процесс. Следовательно, исследование, представленное в диссертации, позволяет более полно понять влияние деградации контроллера СПАЗ на функционирование блока измерительных линий и принять соответствующие меры по обеспечению безопасности технологического процесса.

1 Участие СПАЗ в технологическом процессе функционирования СИКН

Система противоаварийной защиты, встроенная в блок измерительных линий системы измерения качества и количества нефти (СИКН), предназначена для обеспечения безопасности и надежности процесса измерения нефти. Она играет важную роль в предотвращении аварийных ситуаций и защите оборудования от неблагоприятных воздействий.

Принцип работы системы противоаварийной защиты основан на непрерывном мониторинге параметров и сигналов, связанных с измерением качества и количества нефти. Это включает в себя контроль таких параметров, как давление, температура, расход, плотность и состав нефти.

В случае обнаружения нежелательных отклонений от установленных норм или предельных значений, система противоаварийной защиты автоматически активирует соответствующие меры безопасности. Это может включать предупреждения операторов, автоматическое отключение определенных участков или оборудования, изменение параметров работы или вызов экстренных мероприятий.

Технологический процесс работы системы противоаварийной защиты в блоке измерительных линий СИКН направлен на минимизацию рисков и обеспечение надежности измерений. Путем постоянного мониторинга и контроля система обеспечивает безопасность процесса эксплуатации, предотвращает возможные аварии и помогает поддерживать стабильность и точность измерений качества и количества нефти.

Функционал СПАЗ в данном случае не ограничен лишь аварийным остановом. Задачами данной системы являются автоматическое измерение параметров температуры, давления и расхода, предаварийная сигнализация оператору в случае обнаружения отклонения данных технологических параметров. В случае принятия оператором решения об активации процесса аварийного срабатывания, СПАЗ активирует алгоритм предотвращения аварийной ситуации, зачастую включающий в себя аварийный останов блока

измерительных линий, либо смену линии и включения резервного оборудования. Включение процесса аварийного реагирования может происходить и без участия оператора, в случае если оператором не принято решение о включении за отведенный промежуток времени или в случае немедленного реагирования (например, срабатывания средств диагностики ПАЭ электрических схем, от конечных выключателей клапанов или от реле). Также СПАЗ несет ответственность за предотвращение ошибочных действий персонала, таких как перекрытие задвижек при большом давлении. Перед вводом в работу установки СИКН после останова система защиты обязана провести контроль соответствия предпусковых условий и параметров, а в ходе работы необходимы средства самодиагностики контроллерного оборудования. В ходе работы установки необходимо производить непрерывную автоматическую регистрацию последовательности событий (SOE), для того чтобы знать изменения какого технологического параметра или какие команды оператора повлияли на возникновение аварийного события, также в ходе защиты установки требуется предпринять меры борьбы с несанкционированным доступом. В случае возникновения протечек нефти требуется СПАЗ необходимо активировать приточно-вытяжную вентиляцию, основываясь на показания газодетекторов, а в случае пожара необходимо активировать средства пожаротушения.

2 Разработка СПАЗ (HAZOP, SIL, оценка отказоустойчивости и отказобезопасности контура SIF, построение дерева отказов)

2.1 HAZOP анализ

Для определения наиболее опасных контуров системы автоматического управления (САУ) следует произвести анализ опасности и работоспособности (HAZOP) согласно ГОСТ Р 27.012-2019 (МЭК 61882:2016). Основная идея метода состоит в моделировании возмущений. Один элемент системы является источником возмущения, а другой приемником. В первом рассматриваются причины возникновения отклонения,

а во втором – последствия, к которым это возмущение/отклонение приводит, и как это влияет на поставленные цели. На рисунке 1 представлена схема метода составления анализа HAZOP.



Рисунок 1 – Принцип метода HAZOP

Шаги выполнения HAZOP-анализа обычно включают следующее:

1. Составление команды. Команда должна состоять из специалистов, включающих операторов, проектировщиков, технологов и других экспертов, которые могут принести ценные знания о системе.
2. Определение целевого процесса. Целевой процесс системы должен быть определен и описан для обеспечения понимания процесса всеми членами команды.
3. Разделение процесса на элементы. Целевой процесс системы разделяется на отдельные элементы, такие как трубопроводы, насосы, клапаны и т.д.
4. Идентификация возможных опасностей. Каждый элемент системы анализируется на предмет возможных опасностей и отклонений от нормы, которые могут привести к несчастным случаям или некачественной продукции.

5. Оценка рисков. Каждый выявленный риск оценивается по уровню серьезности и вероятности его возникновения. Также определяются дополнительные меры безопасности для снижения рисков.

6. Планирование улучшений. Результаты анализа используются для разработки планов улучшений системы и реализации необходимых мер безопасности.

Важно отметить, что HAZOP-анализ является сложным процессом и может потребовать значительного количества времени и ресурсов, поэтому данная работа не преследует за собой цели выполнить полноценный анализ опасности и работоспособности СИКН, а лишь включает наиболее вероятные события, связанные в большинстве своем с контурами САУ, состоящими из полевого устройства – контроллерного оборудования – станции управления.

Для блока измерительных линий, представленного в Приложении А, была разработана таблица HAZOP (Приложение Б) с учетом управляющих слов (таблица 1).

Таблица 1 – Пример основных управляющих слов и их общие значения

Управляющее слово	Смысл
НЕ или НЕТ	Полное отрицание целей проекта
БОЛЬШЕ	Увеличение количества
МЕНЬШЕ	Уменьшение количества
ТАК ЖЕ, КАК	Качественное изменение/увеличение
ЧАСТЬ	Качественное изменение/уменьшение
ЗАМЕНА	Логическая противоположность целям проекта
ДРУГОЙ, ЧЕМ	Полная замена

Исходя из данного анализа были выбраны два случая для расчета двух контуров защиты, а именно: превышение предельного давления в трубопроводе и отсутствие (НЕТ) открытия регулирующего клапана PCV1.

В качестве выходных данных в ходе анализа получаем:

- наглядное представление путей возникновения конечного события и взаимодействующих путей в ситуации, когда одновременно могут произойти два или более событий;
- набор минимальных сечений (возникновения путей отказа системы) и оценка вероятности отказа системы для каждого сечения;
- оценка вероятности конечного события.

2.2 Дерево отказов

Следующим этапом построим «дерево» отказов. Термин "дерево отказов" (или "функциональное дерево отказов") является инструментом, используемым в области анализа надежности и безопасности систем. Оно представляет собой графическую модель, которая описывает логические связи между различными событиями отказов в системе и их влияние на безопасность и надежность системы.

Дерево отказов начинается с верхнего уровня, где указывается нежелательное событие или состояние системы, которое требует анализа. Затем на следующих уровнях представлены возможные отказы или события, которые могут привести к данному нежелательному событию. Каждое событие далее разделяется на более низкие уровни, пока не достигнуты конечные отказы, которые могут быть описаны конкретными причинами отказов или комбинациями отказов в компонентах или системе.

Дерево отказов позволяет проводить анализ вероятности отказа системы, определять основные источники отказов, оценивать влияние каждого отказа на безопасность и надежность системы, а также разрабатывать стратегии предотвращения и устранения отказов.

Дерево отказов является важным инструментом для инженеров и специалистов по надежности и безопасности при проектировании, анализе и улучшении систем с целью обеспечения их надежной и безопасной работы (рисунок 2).

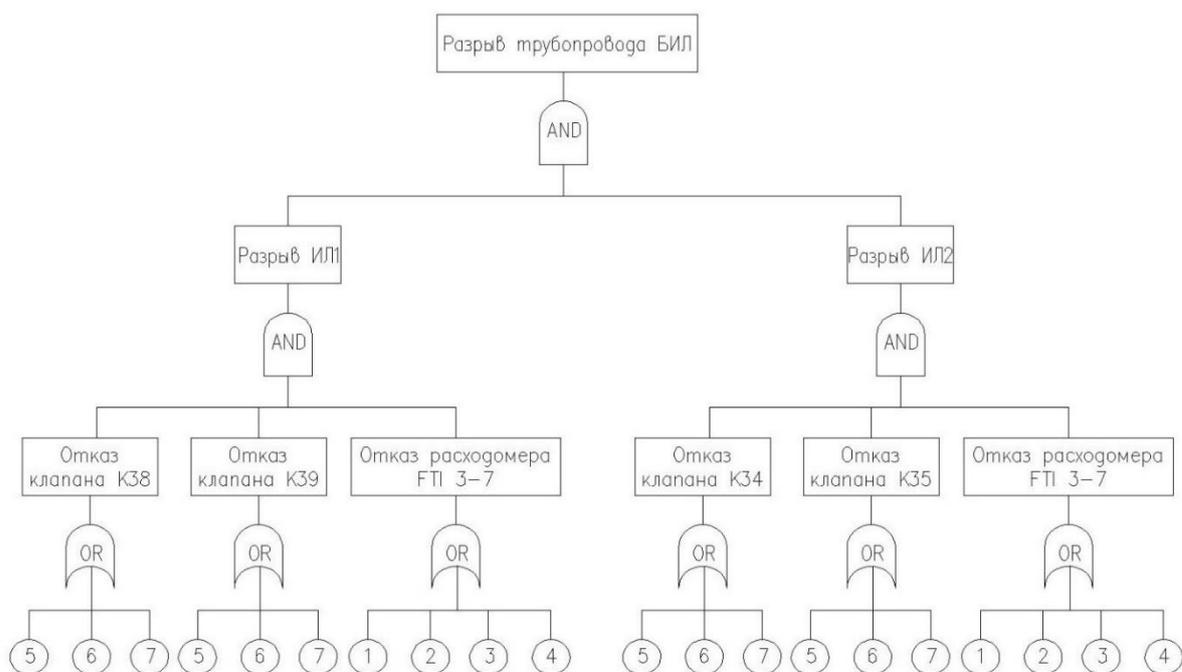


Рисунок 2 – Дерево отказов для разрыва трубопровода БИЛ

Каждому выделенному в круге номеру соответствует определенное аварийное событие (таблица 2).

Таблица 2 – Виды отказов оборудования

№	События
1	Игнорирование требований инструкции или действия вопреки требованиям инструкции
2	Отсутствие ТО или нечастое ТО
3	Наличие в измеряемой жидкости механических загрязнений
4	Долгий простой с измеряемой жидкостью в измерительной камере
5	Заклинивание подвижных частей, не вызванное поломкой деталей
6	Неустранимые дополнительной подтяжкой пропуски среды через места соединений и сальниковое уплотнение
7	Нарушение параметров регулирования
8	Короткое замыкание в блоке прибора
9	Поломка концевых выключателей и пускателей
10	Загрязнение поверхности чувствительного элемента
11	Нарушение целостности корпуса

Инцидентом в такой диаграмме будет разрыв газопровода БИЛ. Это событие может произойти, если заклинит шток клапана К38; стерлись прокладки, из-за чего образовались утечки среды; были нарушены параметры регулирования. Таким же образом должны выйти из строя клапан К39 и расходомер на ИЛ1. В случае трех этих событий произойдет отказ измерительной линии 1. Однако возможна работа СИКН через контрольную измерительную линию 2, но в случае отказа ИЛ2 и ИЛ1 произойдет разрыв трубопровода БИЛ.

Все эти источники аварий наблюдаемы и могут быть предотвращены, если есть соответствующие средства мониторинга, побуждающие оператора к принятию по их устранению.

Выделяем цепочки опасных событий, которые могут быть устранены с использованием программно-аппаратных средств (*E/E/PE*) и слоев защиты: Системы обнаружения утечек и контроля активности (СОУиКА), действий оператора, Системы автоматического перекрытия потока флюида (отсечка участка), системы ПВВ. Частота и последствия событий в результате аварии представлены в приложении В.

2.3 Технологические слои защиты

Проведем анализ возможностей снижения риска с помощью технологических слоев защиты. При изучении применения технологических ограждений и других средств пассивной защиты становится ясно, что заданный уровень безопасности не может быть достигнут в случае возникновения отказа. Эти средства, скорее, ограничивают распространение опасности, но не предотвращают ее полностью. Безопасность, связанная с соблюдением правил технической эксплуатации, также не гарантирует технологическую безопасность в случае изменения внутренних характеристик управляемого объекта, например, регулирующего клапана. Поэтому для снижения риска таких опасностей необходимо использовать специальные дополнительные приборные контуры, связанные с контролем давления.

2.4 Определение требуемого уровня полноты безопасности

Для определения уровней полноты безопасности используется метод графа рисков (ГОСТ Р МЭК 61508-5-2012).

Граф рисков представлен на рисунке 3.

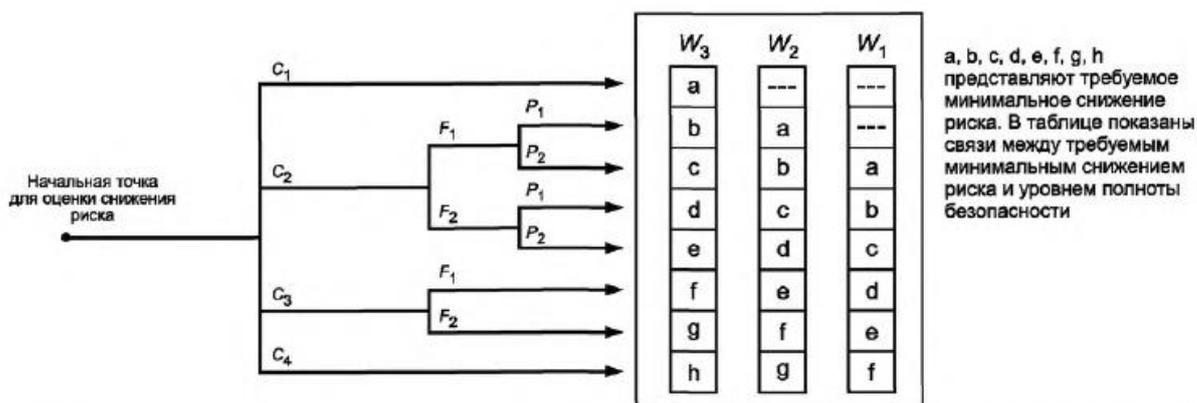


Рисунок 3 – Граф рисков

На рисунке 2 представлены следующие обозначения:

C – параметр последствия риска;

F – параметр частоты и времени действия риска;

P – параметр риска, связанный с возможностью избежать опасности;

W – вероятность нежелательного события;

a, b, c, ..., h – оценки требуемого снижения риска для Э/Э/ПЭ систем, связанных с безопасностью

--- – нет требований безопасности;

На рисунке 4 показано то, как выбирается один из четырех SIL.

Требуемое минимальное снижение риска	Уровень полноты безопасности
–	Нет требований к безопасности
a	Нет специальных требований к безопасности
b, c	1
d	2
e, f	3
g	4
h	Э/Э/ПЭ системы, связанной с безопасностью, недостаточно

Рисунок 4 – Соответствие требуемого снижения риска уровню полноты безопасности

На основе графа рисков (рисунок 3) определим УПБ для выбранных контуров.

– рассмотрим превышение предельного давления в трубопроводе. Начнем с вероятностью нежелательного события. Исходя из HAZOP анализа вероятность нежелательного события примем W_2 – небольшая вероятность нежелательного события, возможно небольшое число таких событий.

Последствия опасного события примем C_2 , так как превышение давления может вести к разгерметизации и разрыву трубопровода, и как следствие, к серьёзной травме одного или нескольких работников.

Частота и продолжительность пребывания в опасной зоне F_2 , так как работники часто появляются в данной зоне, выполняя обходы, техническое обслуживание трубопровода и снятие проб.

Вероятность возможного избежания опасности примем P_2 .

Исходя из вышеописанного и рисунка 2 следует, что требуемое минимальное снижение риска соответствует d (рисунок 4). Тогда УПБ равен SIL2, для контура превышение предельного давления в трубопроводе.

– рассмотрим отсутствие открытия регулирующего клапана PCV1. Данное событие может произойти по ряду факторов, включающих в себя, как неисправность механической части клапана, так и неисправность электрической части блока управления, поэтому исходя из HAZOP анализа вероятность нежелательного события примем W_3 .

Последствия опасного события примем C_2 , так как длительное воздействие потока флюида, находящегося под действием давления, на закрытый клапан приводит к возрастанию нагрузки на механическую часть и к гидроудару в трубопроводе. Данные события могут привести к серьёзной травме одного или нескольких работников.

Частота и время пребывания в опасной зоне примем F_2 , так как работники часто появляются в данной зоне, совершая обходы и снимая пробы нефти из пробоотборника.

Вероятность возможного избежания опасности примем P_1 .

Исходя из вышеописанного следует, что требуемое минимальное снижение риска соответствует d (рисунок 4). Следовательно, УПБ для второго контура требуется не менее SIL2.

2.5 Уровень полноты безопасности текущего оснащения системы

Для подтверждения заявленного уровня полноты безопасности SIF контура определяется интегральный уровень безопасности, покажем данную связь между SIL (уровнем полноты безопасности) средней вероятностью опасного отказа (PFD_{avg}) в таблице 3. Будем использовать данные соотношения в дальнейшем, чтобы находить УПБ, зная вероятность отказа той или иной модели.

Таблица 3 – Интегральные уровни безопасности

SIL Интегральный уровень безопасности	PFD_{avg} Средняя вероятность отказа на запрос (низкая интенсивность запросов)
SIL4	$\geq 10^{-5} \dots < 10^{-4}$
SIL3	$\geq 10^{-4} \dots < 10^{-3}$
SIL2	$\geq 10^{-3} \dots < 10^{-2}$
SIL1	$\geq 10^{-2} \dots < 10^{-1}$

Результирующая вероятность отказа при запросе $PFD_{avg\Sigma}$ контура безопасности вычисляется следующим образом

$$PFD_{avg\Sigma} = \sum_{i=0}^n PFD_{avg i}, \quad (1)$$

где PFD_{avg} – вероятность отказа при запросе i -го компонента контура безопасности;

n – количество компонентов в контуре безопасности.

Произведем расчет текущего уровня SIL для оборудования, расположенного в БИЛ на ПСП «Лугинецкое» для того, чтобы проверить соответствие УПБ требуемому уровню. На рисунке 5 показана структура рассматриваемого контура.

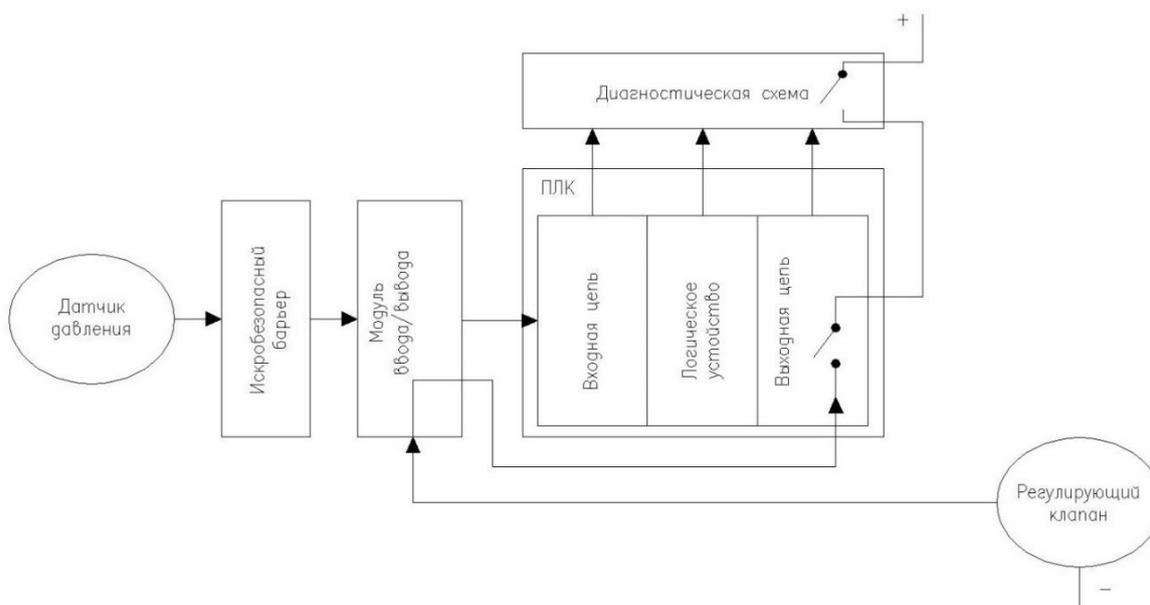


Рисунок 5 – Структура контура регулирования давления (1oo1D)

Найдем в документации к компонентам значения средней вероятности отказа при запросе и определим общий SIL исходя из таблицы 3. В таблице 4 приведено оборудование, задействованное в контуре регулирования давления на выходе СИКН.

Таблица 4 – Расчетные данные для контура регулирования давления

Элементы SIF	PFD_{avg}	Допустимый SIL
Датчик давления	0,142E-03	SIL2
ПЛК	2,50E-03	SIL2
Аналоговый модуль вывода	3,52E-03	SIL2
Аналоговый модуль ввода	4,04E-03	SIL2
Искробезопасный барьер	2,36E-04*2	SIL3
Источник постоянного тока	1,30E-03	SIL1
Общий SIF	1,19E-02	SIL1

Текущее оборудование, установленное в блок-боксе СИКН, не соответствует данным требованиям уровня полноты безопасности и составляет лишь SIL1, поэтому необходимо произвести модернизацию, как оборудования контроллерного уровня, так и полевого, а после рассмотреть деградацию

3 Разработка алгоритмов обработки измерительных каналов

3.1 Алгоритм обработки измерительного канала для архитектуры 2003

Для того, чтобы перейти от системы архитектуры 1001 к архитектуре 2003 необходимо разработать алгоритм, позволяющий обрабатывать несколько каналов, отсеивая недостоверные данные. Алгоритм для мажоритарной выборки каналов представлен на рисунке 6.

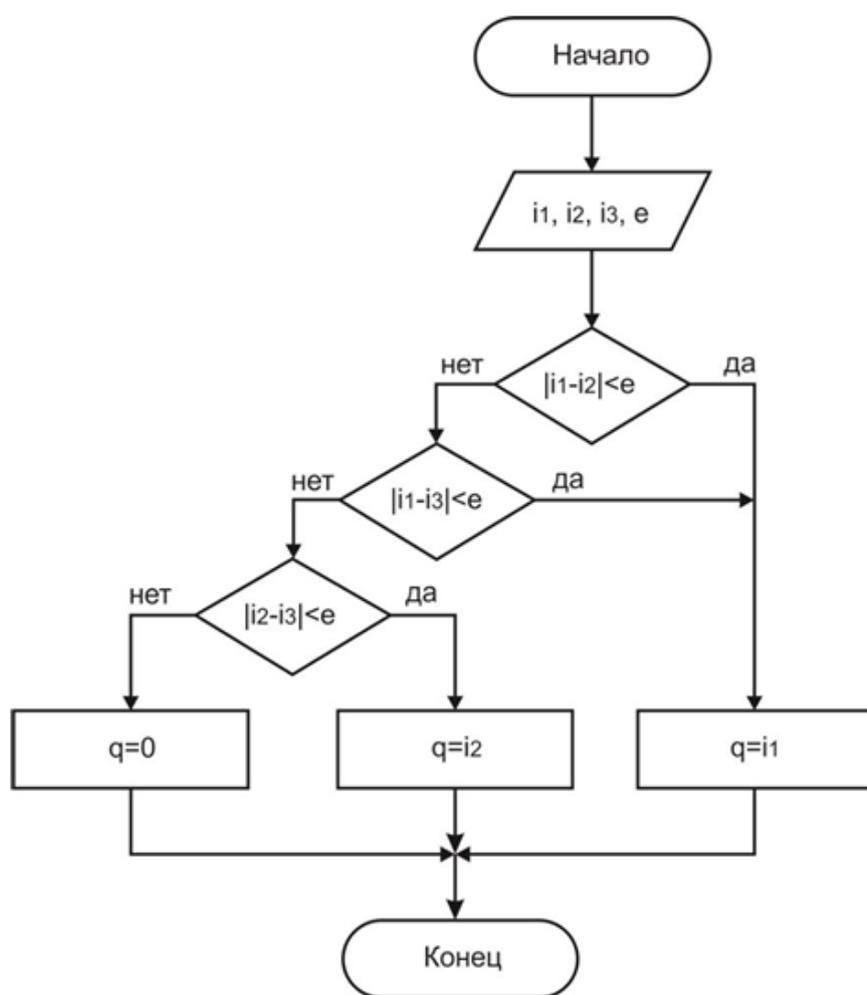


Рисунок 6 – Алгоритм мажоритарного выбора 2003

Рассмотрим принцип работы алгоритма. В ходе каждого цикла работы процессора контроллера, в который загружена программа, сигналы с датчиков сравниваются друг с другом, если разность между двумя сигналами не

превышает заранее заданной ошибки, то выходному значению алгоритма присваивается одно из сравниваемых значений. Когда не было обнаружено совпадений, то на выходе алгоритма присваиваем ноль. При равенстве двух значений на выходе алгоритма подаем среднее значение.

Для реализации алгоритмов выберем язык CFC, который базируется на языке FBD стандарта МЭК 61131. Реализация алгоритма в программном пакете Codesys представлена на рисунке 7.

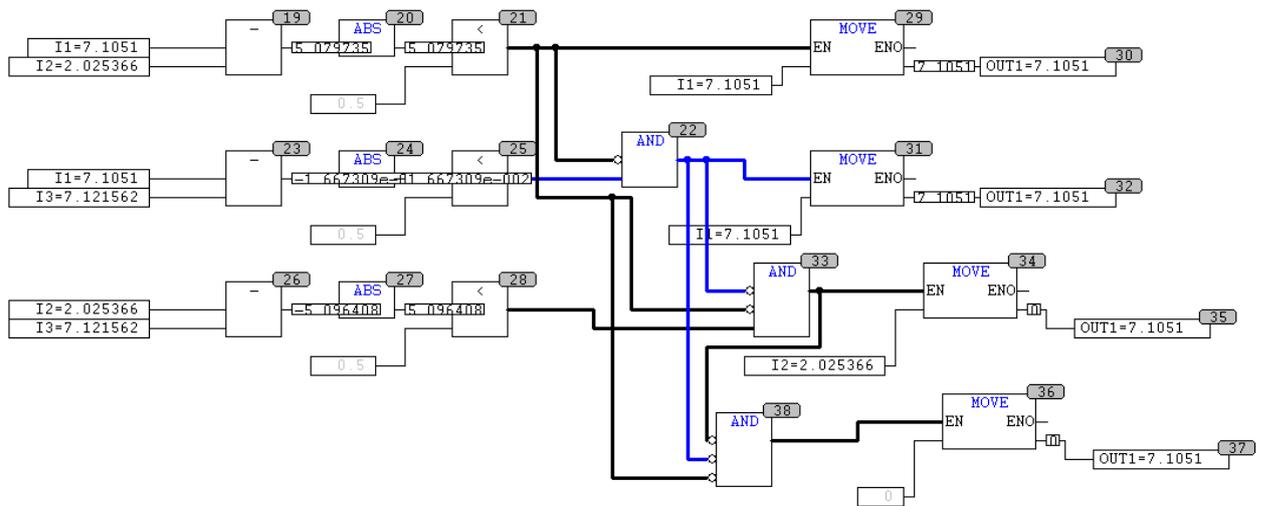


Рисунок 7 – Работа алгоритма выбора 2003 (I_2 неверен)

На рисунке 7 видим, как алгоритм отсеивает неверный сигнал со второго датчика и подает на выход значение тока первого. Проверим алгоритм при подаче трех различных сигналов (рисунок 8).

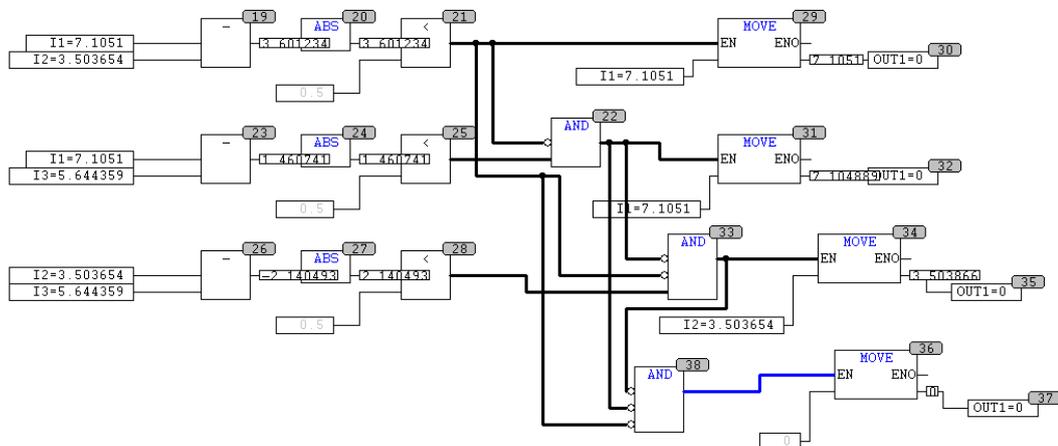


Рисунок 8 – Работа алгоритма выбора 2003 (все сигналы неверны)

Исходя из рисунка делаем вывод, что алгоритм обрабатывает верно, ведь на выходе системы получаем ноль, так как все сигналы отличаются на слишком большое значение, что говорит о том, что скорее всего ни один из данных токовых сигналов неверен.

3.2 Алгоритм обработки измерительного канала для архитектур 2002 и 1002

При деградации контроллера происходит постепенный отказ модулей. Соответственно требуется переключение программы контроллера ПАЗ на алгоритм 2002 или 1002.

Для алгоритма 1002 выбор будем осуществлять по трем критериям: скорости изменения первого сигнала (I_1), скорости изменения второго сигнала (I_2) и разницы между ними. Изменение скорости сигнала можно отслеживать несколькими путями, один из них – нахождение производной от самого сигнала ($U_{I1} = \dot{I}_1$). Зная скорость, можно определить, какой из сигналов вдруг резко начал менять свое значение, как следствие – данный сигнал неверен и его нужно отключить. Реализацию алгоритма для сигналов I_1 и I_2 поместим в макросы (рисунок 9).

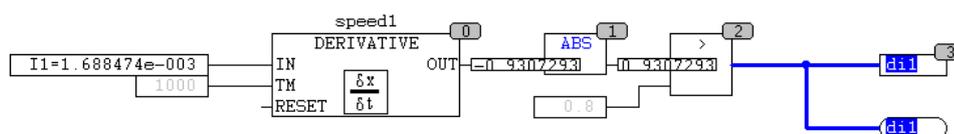


Рисунок 9 – Алгоритм нахождения скорости изменения сигнала I_1

Из рисунка работы программы можно заметить, что сигналы уменьшались, так как значение производной отрицательно.

Важно также находить разницу двух сигналов, так как в случае, когда разница велика точно можно сказать, что один сигнал неверен. Разницу между сигналами будем находить в другом макросе (рисунок 10).

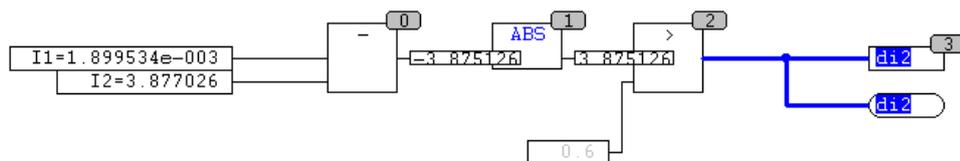


Рисунок 10 – Алгоритм нахождения разницы между I_1 и I_2

Для того, чтобы поддерживать единицу на выходе каждого из представленных выше алгоритмов, введем триггер переднего фронта R_TRIG и SR_TRIGGER (рисунок 11). На входы R_TRIG будем подавать сигналы с макросов, а выходы OI1, OI2, OI3 будем дальше использовать в программе выбора верного сигнала.

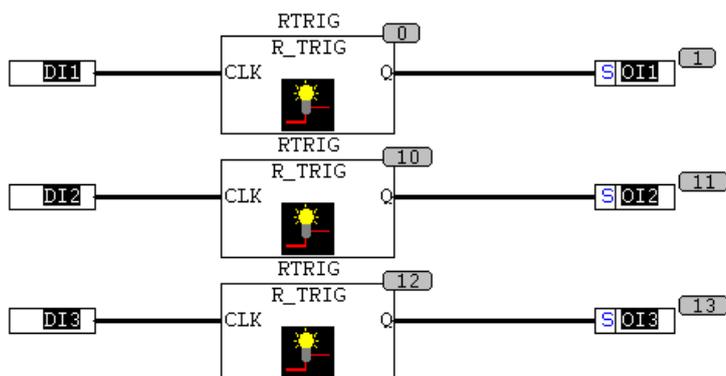


Рисунок 11 – Поддержание значений на выходе макросов DI1, DI2 и DI3

Выбор верного сигнала осуществляется по следующим принципам:

1. если верны оба сигнала (макросы в состоянии 0), то подаем на выход out значение сигнала I_1 ;
2. если неверен первый сигнал (макрос DI1 в состоянии 1) и разница между сигналами слишком большая (макрос DI2 в состоянии 1), то на выход подаем на out сигнал I_2 ;
3. если неверным становится второй сигнал (макрос DI2 в состоянии 1) и разница между сигналами слишком большая (макрос DI2 в состоянии 1), то подаем на выход сигнал I_1 ;

1) если после отключения первого сигнала, второй также стал неверным сигналом (макросы DI1 и DI2 в состоянии 1), тогда обнуляем значение выхода.

Полная реализация алгоритма представлена на рисунке 12.

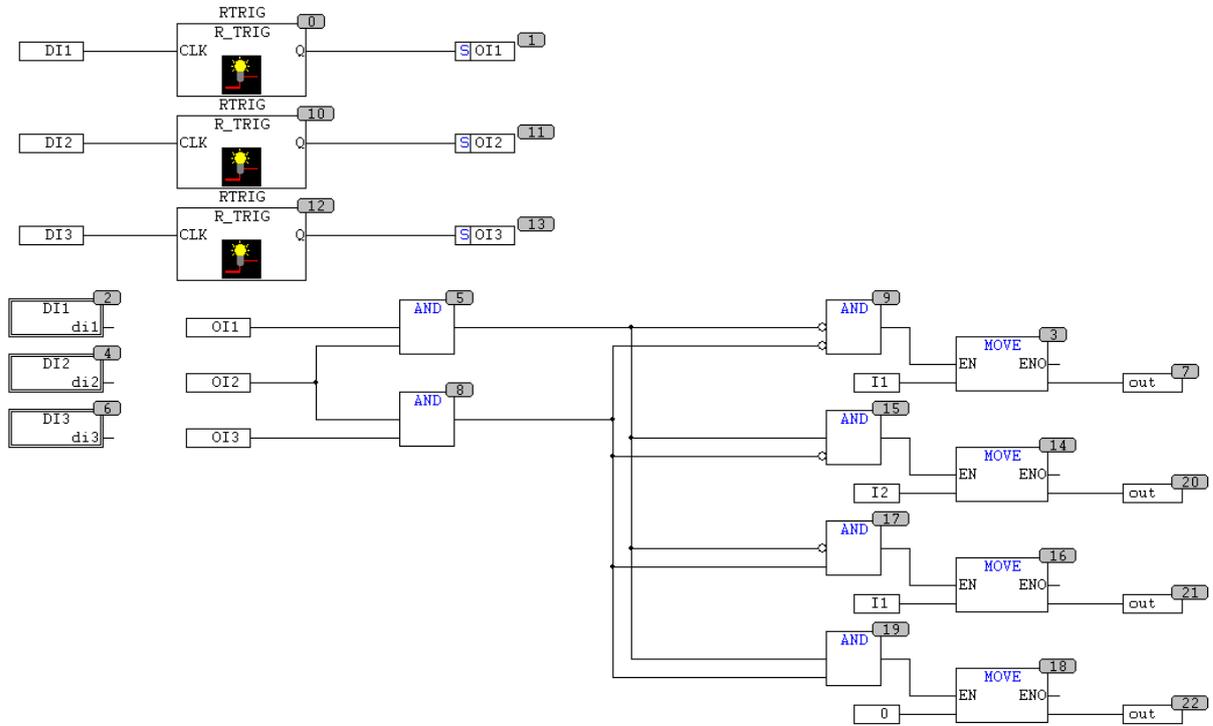


Рисунок 12 – Программа работы алгоритма выбора 1002

Для алгоритма 2002 следует отслеживать выход разницы сигналов I_1 и I_2 за пределы ошибки, так как тут возможны два случая:

- два сигнала верны, тогда на выход подается их среднее значение;
- какой-либо из сигналов выдает неверное значение, тогда обнуляем выход программы.

Полученный код представлен на рисунке 13.

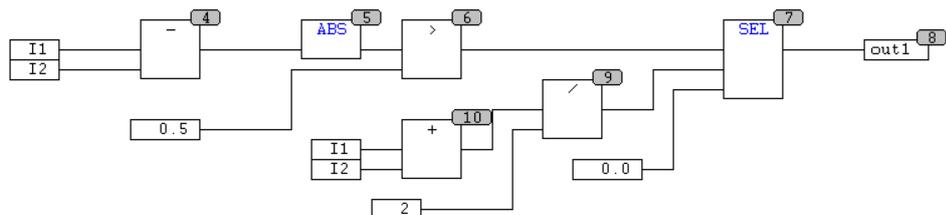


Рисунок 13 – Программа работы алгоритма выбора 2002

Промоделируем работу программы, на рисунке 14 представим результат в случае, когда все сигналы работают исправно, а на рисунке 15 – один из сигналов неверный.

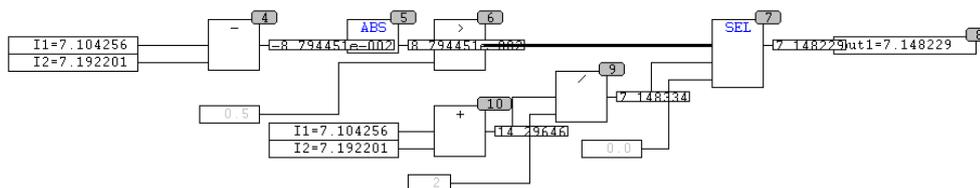


Рисунок 14 – Оба сигнала исправны

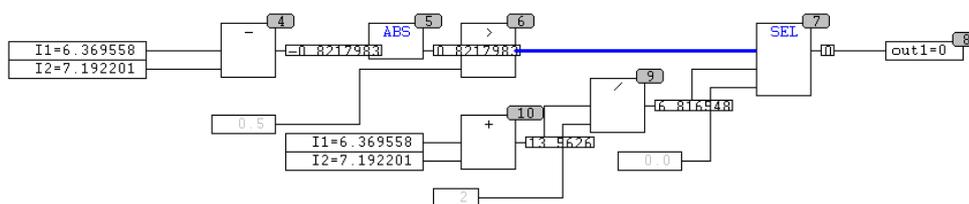


Рисунок 15 – Один из сигналов неверный

4 Подбор комплекса аппаратно-технических средств, удовлетворяющих требованию УПБ

4.1 Контроллерное оборудование

Для разработки системы противоаварийной защиты СИКН необходимо выбрать контроллерное оборудование. Контроллер в системе противоаварийной защиты (СПАЗ) СИКН выполняет важную роль в обеспечении безопасности и надежности технологического процесса. Он является центральным устройством, отвечающим за обработку и анализ информации от датчиков и других компонентов системы. Роль контроллера включает следующие функции:

Мониторинг: Контроллер непрерывно контролирует параметры и состояние системы, анализируя данные от датчиков. Он отслеживает работу оборудования, параметры процесса и другие важные показатели, чтобы обнаружить любые отклонения от заданных норм и предотвратить возможные аварийные ситуации.

– принятие решений: основываясь на полученной информации, контроллер принимает решения о действиях, необходимых для обеспечения безопасности системы. Это может включать активацию защитных механизмов, аварийное отключение оборудования или ввод аварийных режимов работы;

– управление исполнительными механизмами: контроллер управляет исполнительными механизмами, такими как клапаны, отсекатели или приводы, для выполнения требуемых действий по предотвращению аварийных ситуаций. Он осуществляет управление на основе принятых решений и заданных алгоритмов;

– связь с оператором: контроллер обеспечивает связь с оператором системы через интерфейс пользователя. Он передает информацию об обнаруженных событиях, состоянии системы и принятых решениях оператору, чтобы обеспечить оперативное реагирование на возникающие ситуации.

Роль контроллера в системе противоаварийной защиты СИКН заключается в надежном контроле и управлении процессом, обеспечении безопасности и предотвращении возможных аварийных ситуаций.

В сфере систем противоаварийной защиты предлагается широкий выбор контроллеров, включая Schneider Electric Triconex Tricon, Siemens Simatic S7-400H, FOXBORO FCP270 и другие. В данном случае для построения системы защиты БИЛ был выбран резервируемый контроллер Triconex Tricon от компании Schneider Electric (рисунок 16) [8].



Рисунок 16 – Резервированный контроллер Schneider Electric Triconex Tricon

Таблица 5 – Сравнение резервируемых контроллеров

Резервированный контроллеры	Simatic S7-400FH	FOXBORO FCP270	Schneider Electric Triconex Tricon
Температура окружающей среды, °С	(-25 ... 60)	(-20 ... 60)	(-40 ... 60)
Напряжения питания, В	24	24	24
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	+	-	+

Отказоустойчивые программируемые контроллеры Tricon разработаны для выполнения широкого спектра измерений и преобразований сигналов в различных форматах. Они предназначены для обработки стандартизованных аналоговых выходных сигналов от датчиков, таких как напряжение и сила постоянного тока, сигналы от термопар, а также для обработки сигналов с периодической частотой.

Использование контроллеров Tricon позволяет надежно и точно выполнять измерения, преобразования и обработку сигналов, что является важным для различных промышленных и автоматизированных систем. Благодаря своей отказоустойчивой архитектуре и программной настройке, эти контроллеры способны обеспечить стабильную и надежную работу в широком диапазоне условий эксплуатации.

Благодаря своим многофункциональным возможностям, контроллеры Tricon предоставляют гибкое решение для множества приложений, где

требуется точное измерение, преобразование и обработка сигналов. Эти контроллеры обладают высокой производительностью и надежностью, что позволяет им эффективно функционировать в различных отраслях, включая промышленность, энергетику, нефтегазовую отрасль и другие.

Tricon (Triconex) – это высоконадежный контроллер, используемый в системах противоаварийной защиты (ПАЗ) и автоматизации процессов. Он разработан компанией Schneider Electric и предназначен для обеспечения безопасности, надежности и эффективности работы в различных отраслях, включая нефтегазовую промышленность, энергетику и химическую промышленность.

Контроллер ПАЗ Tricon обладает высокой отказоустойчивостью и имеет встроенные функции тройного резервирования (Triple Modular Redundancy - TMR). Он оснащен мощными процессорами, которые работают в тройном резерве, обеспечивая непрерывное функционирование системы даже в случае отказа одного из процессоров.

Данный контроллер предлагает широкий набор возможностей для программирования и настройки, позволяя создавать гибкие и настраиваемые системы противоаварийной защиты. Он обеспечивает мониторинг и контроль различных параметров и событий, позволяя операторам принимать быстрые и точные решения в случае возникновения аварийных ситуаций.

Контроллер ПАЗ Tricon широко применяется в промышленных объектах, где надежность и безопасность играют решающую роль. Он обеспечивает защиту персонала, предотвращает аварии и минимизирует потенциальный ущерб для оборудования и окружающей среды. Структура рассматриваемого в данной работе контроллера ПАЗ представлена на рисунке 17.

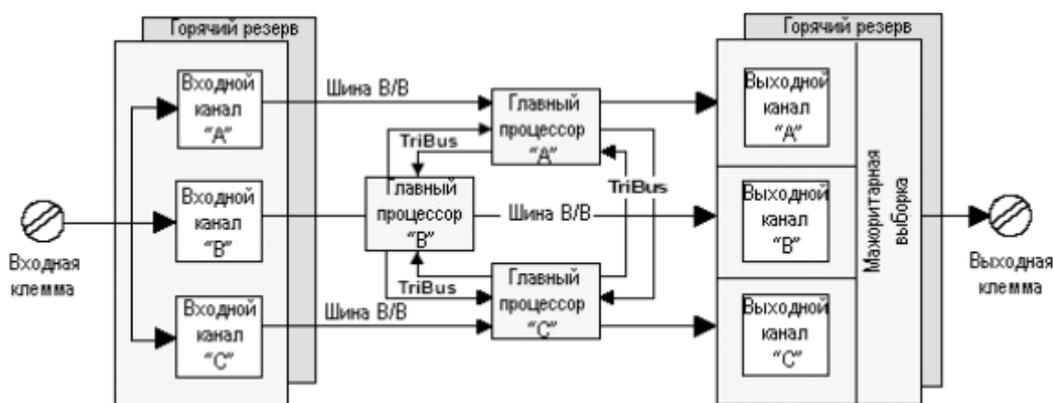


Рисунок 17 – Структурная схема контроллера Tricon

Контроллер ПАЗ Tricon имеет модульную структуру, которая позволяет гибко настраивать и расширять систему в зависимости от требований конкретного объекта. Основными компонентами контроллера Tricon являются:

- главные процессоры (Main Processors). Контроллер Tricon обычно имеет три главных процессора, работающих в тройном резерве для обеспечения высокой отказоустойчивости. Эти процессоры выполняют программы управления, обрабатывают данные и принимают решения на основе заданных логических алгоритмов. Три главных процессора обмениваются данными друг с другом, используя запатентованную высокоскоростную шину, называемую TriBus. Процесс синхронизации и обмена технической информацией между тремя процессорами обеспечивает надежное согласование и синхронизацию работы между модулями контроллера Tricon.
- вводно-выводные модули (Input/Output Modules). Эти модули предназначены для связи контроллера Tricon с внешними устройствами и сенсорами. Они принимают сигналы от датчиков и передают команды исполнительным устройствам. Вводно-выводные модули обеспечивают интерфейс между контроллером и технологическими процессами.
- модуль питания (Power Supply Module). Этот модуль обеспечивает питание всей системы контроллера Tricon. Он оснащен резервированными

источниками питания для обеспечения непрерывной работы даже при отказе одного из источников.

– модуль коммуникации (Communication Module). Данный модуль отвечает за связь между контроллером Tricon и другими системами или устройствами. Он поддерживает различные протоколы связи, такие как Ethernet, Modbus и другие, для обмена информацией с другими устройствами или системами.

Принцип работы контроллера ПАЗ Tricon основан на программном управлении и логической обработке данных. Главные процессоры выполняют программы управления, которые определяют логику работы системы противоаварийной защиты. Они обрабатывают входные данные от датчиков, принимают решения на основе заданных алгоритмов и выдают соответствующие команды на исполнительные устройства.

4.2 Датчик давления

Датчик давления, установленный в блоке измерительных линий системы противоаварийной защиты СИКН, выполняет важную функцию. Его основное назначение заключается в измерении давления в технологическом процессе и предоставлении соответствующей информации для обеспечения безопасной работы системы.

Роль датчика давления состоит в непрерывном мониторинге давления и передаче полученных данных в контроллер или другие устройства системы. Он предоставляет важную информацию о состоянии процесса и может использоваться для определения потенциальных опасностей или нештатных ситуаций.

Датчик давления является одним из ключевых элементов в системе противоаварийной защиты, так как его данные используются для принятия решений и активации защитных механизмов. Надежная работа датчика давления позволяет своевременно обнаруживать изменения давления и принимать соответствующие меры для предотвращения аварийных ситуаций

или минимизации их последствий. Например, в контуре защиты БИЛ датчик защищает трубопровод и в случае перепадов давления контроллер посылает сигнал о перекрытии трубопровода или отключения насосных агрегатов.

Для выбора оптимального датчика давления были проанализированы следующие преобразователи давления отечественного и зарубежного производства: ИВЭ-50-3, DMD 331-A-S и Cerabar M PMP41. Сравнение параметров приведено в таблице 6.

Таблица 6 – Сравнение характеристик датчиков давления

Датчик	ИВЭ-50-3	DMD 331-A-S	Cerabar M PMP41
Диапазон измерения, МПа	(0,25-10)	(0-32)	(0-40)
Базовая погрешность	До $\pm 0,5\%$	До $\pm 0,5\%$	До $\pm 0,2\%$
Выходные сигналы	(4-20) мА	(4-0) мА, HART 0-20 мА	(4-20) мА, HART (0-20) мА, Profibus PA
Степень пылевлагозащиты	IP67	IP65-68	IP65-68
Диапазон рабочих температур, °С	(-40...50)	(-40...125)	(-40...125)
Средний срок службы, лет	10	12	12

Остановим свой выбор на Cerabar M PMP41, который предназначен для измерения давления агрессивных сред (рисунок 18).



Рисунок 18 – Датчик давления Cerabar M PMP41

Преобразователь давления, о котором идет речь, обладает несколькими важными преимуществами, которые делают его предпочтительным выбором

для широкого спектра приложений. Вот основные преимущества данного преобразователя давления:

- Высокая точность: Данный преобразователь обеспечивает высокую точность измерения давления. Это позволяет получать достоверные данные и обеспечивает точное контролирование процессов.

- Устойчивость к перегрузкам и гидроударам: Сенсоры, используемые в этом преобразователе, способны выдерживать перегрузки и гидроудары, что является важным фактором для приложений, где возможны экстремальные условия.

- Аналоговая и цифровая электроника: Данный преобразователь давления оснащен как аналоговой, так и цифровой электроникой. Это позволяет выбрать наиболее удобный и подходящий способ обработки и передачи данных в зависимости от требований системы.

- Корпус из нержавеющей стали: Преобразователь имеет корпус, изготовленный из нержавеющей стали. Это обеспечивает прочность и долговечность устройства, а также защиту от коррозии и воздействия окружающей среды.

- Унифицированный способ подключения: Данный преобразователь давления имеет унифицированный способ подключения, что упрощает его интеграцию в различные системы и оборудование. Это экономит время и усилия при установке и настройке.

Также стоит учитывать, что данный датчик имеет уровень полноты безопасности не ниже SIL2, что удовлетворяет требованиям.

4.3 Регулирующий клапан

Регулирующий клапан – это устройство, используемое для регулирования потока жидкости или газа через систему путем изменения сопротивления в потоке. Он играет важную роль в поддержании и контроле давления в различных процессах и системах.

Принцип работы регулирующего клапана основан на изменении открытия или закрытия клапанного элемента, что влияет на проток среды. Путем изменения положения клапанного элемента можно контролировать объем и скорость потока, а следовательно, и давление в системе. Когда клапан открыт, жидкость или газ пропускается в большем объеме, что увеличивает давление. При закрытом положении клапана проток сокращается, и давление снижается.

Существует несколько видов регулирующих клапанов, включая:

- шаровые клапаны: они имеют шарообразный элемент, который вращается для регулирования потока;
- затворные клапаны: они состоят из плоского или конического элемента, который перемещается вдоль потока для изменения потока среды;
- дроссельные клапаны: они имеют узкое горловое сечение или отверстие, через которое проходит поток, что позволяет регулировать его скорость и давление;
- мембранные клапаны: они используют гибкую мембрану, которая изменяет свое положение под воздействием давления, регулируя проток среды.

Для безопасности технологического процесса выберем односедельный клапан DN15-300, PN1,6-4,0 МПа (рисунок 19).



Рисунок 19 – Регулирующий клапан для установки в контур управления давлением

Технические характеристики регулирующих клапанов разных производителей представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Сравнение характеристик регулирующих клапанов

Техническая характеристика	DN15-300 «Авангард»	25ч945нж	Broen M3FA-200
Корпус	Легированная сталь	Чугун	Серый чугун
Рабочее давление	До 6 МПа	До 1,6 МПа	До 4 МПа
Температура рабочей среды, °С	(-60...150)	(-50...150)	(-50...120)
Температура окружающей среды, °С	(-60...50)	(-15...50)	(-40...50)
Присоединение	Фланцевое	Фланцевое	Фланцевое
Уровень полноты безопасности	SIL2	SIL1	SIL1

Электроприводы используются для управления регулирующими клапанами и обеспечивают автоматическое и точное регулирование протока среды. Они работают на основе преобразования электрической энергии в механическую для управления движением клапанного элемента.

Принцип работы электропривода для регулирующих клапанов основан на использовании электродвигателя, который приводит в движение механизм передачи силы, перемещающий клапан. Электроприводы могут быть управляемыми и программными, что позволяет регулировать проток среды в соответствии с заданными параметрами и требованиями процесса.

Существуют различные виды электроприводов для управления регулирующими клапанами, включая:

- Ротационные электроприводы: они используются для управления клапанами с вращающимся элементом, такими как шаровые клапаны или затворные клапаны. Ротационный электропривод преобразует электрический сигнал в вращательное движение, передавая его на ось вращения клапана.

- Линейные электроприводы: они предназначены для управления клапанами с линейным движением элемента, такими как затворные клапаны или дроссельные клапаны. Линейный электропривод преобразует

электрический сигнал в линейное движение, перемещая клапан вперед или назад.

– Электрогидравлические электроприводы: они комбинируют электрический и гидравлический принципы работы. Электрический сигнал управляет работой гидравлической системы, которая перемещает клапан. Этот тип электропривода обеспечивает высокую мощность и точность управления.

– Электропневматические электроприводы: они используют электрический сигнал для управления пневматической системой, которая перемещает клапан. Этот тип электропривода сочетает электрическую и пневматическую энергию для обеспечения управления проток

Для управления регулирующим клапаном понадобится электропривод. Выберем прямоходный электропривод Regada ST1, его основные характеристики показаны в таблице 8 [11].

Таблица 8 – Технические характеристики электропривода

Технические характеристики	Значения
Рабочий ход, мм	8...80
Скорость управления, мм/мин	8...80
Напряжения питания	230В, 50Гц
Температура окружающей среды, °С	-25...+55
Степень защиты	IP67

Стандартное исполнение электропривода для управления регулирующим клапаном включает в себя следующие особенности:

– Электрическое присоединение осуществляется через удобную клеммную колодку, которая обеспечивает надежный контакт и легкую установку соединительных проводов. Это упрощает процесс монтажа и подключения электропривода к системе управления.

– Механическое подсоединение осуществляется при помощи специального фланца. Фланец обеспечивает прочное соединение между электроприводом и регулирующим клапаном, обеспечивая надежную передачу механической энергии и обеспечивая правильное функционирование клапана.

Эти характеристики стандартного исполнения электропривода обеспечивают простоту и надежность его установки, а также гарантируют эффективное и точное управление регулирующим клапаном.

4.4 Искробезопасный барьер

Произведем сравнение ряда искробезопасных барьеров. Для этого выберем барьеры компаний «ЭлеСи», «Phoenix Contact» и «Real Lab» (таблица 9)

Таблица 9 – Сравнение характеристик надежности искробезопасных барьеров

Марка барьера	ET-420 «ЭлеСи»	MACX MCR- EX-SL-RPSSI-I – «Phoenix Contact»	SL-485 «Real Lab»
Уровень полноты безопасности	SIL2	SIL2	SIL1
Средняя наработка на отказ, ч	120000	100000	100000
Диапазон рабочих температур, °С	-40...80	-20...60	-40...70
Класс защиты человека от поражения электрическим током (ГОСТ 12.2.007.0-75)	02	01	01
Маркировка взрывозащиты	[Ex ia] IIС/IIВ/І	[Ex ia] IIС/IIВ/І	[Ex ia] IIС/IIВ/І
Степень защиты	IP20	IP20	IP20

Выберем преобразователь компании «ЭлеСи» так как он имеет большую наработку на отказ и соответствует заявленному уровню SIL.

Преобразователи измерительные разделительные ET-420 (далее - преобразователи) предназначены для измерения, преобразования и гальванического разделения непрерывных сигналов, представленных величиной постоянного тока и напряжения постоянного тока.

Область применения преобразователей - системы измерения, контроля и управления технологическими процессами и объектами нефтяной и газовой промышленности, энергетики и других отраслей, в том числе с целью технического и коммерческого учета энергоносителей и создания систем обеспечения безопасности.

Преобразователи выполнены во взрывозащищенном исполнении с видом взрывозащиты "Искробезопасная электрическая цепь" по ГОСТ Р 51330.10-99 "Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 11. Искробезопасная электрическая цепь /" и маркировкой взрывозащиты [ExiaIIС Х, устанавливаются вне взрывоопасной зоны и применяются в соответствии с ГОСТ Р 51330.13-99 "Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 14. Электроустановки во взрывоопасных зонах (кроме подземных выработок)", гл.7.3 ПУЭ и другими нормативными документами, регламентирующими применение электрооборудования, связанного внешними искробезопасными цепями с электротехническими устройствами, установленными во взрывоопасной зоне (рисунок 9).



Рисунок 20 – Искробезопасный барьер ET-420

5 Исследование системы противоаварийной защиты с использованием Марковских процессов

5.1 Введение в системы противоаварийной защиты

Системы противоаварийной защиты (СПАЗ) представляют собой комплексные технические системы, которые применяются для предотвращения и снижения возможных аварий и опасных ситуаций в

различных промышленных и технологических процессах. Они играют важную роль в обеспечении безопасности и надежности работы таких систем.

Основная цель систем противоаварийной защиты - минимизировать риски возникновения аварийных ситуаций и связанных с ними потенциальных угроз для людей, оборудования и окружающей среды. СПАЗ обеспечивают:

- Обнаружение и предотвращение аварий: системы противоаварийной защиты непрерывно мониторят и контролируют параметры и состояния системы, чтобы обнаружить потенциальные отклонения и опасные ситуации. При обнаружении таких ситуаций они активируются и предпринимают соответствующие меры для предотвращения аварийного развития.

- Быструю реакцию и аварийное отключение: в случае обнаружения аварийных ситуаций, СПАЗ принимают меры для быстрой реакции и активации соответствующих аварийных сигналов. Они могут автоматически отключать определенные системы или процессы, чтобы предотвратить распространение аварийных последствий.

- Защиту оборудования и систем: системы противоаварийной защиты обеспечивают защиту оборудования и систем от перегрузок, аварийных условий, утечек, пожаров и других потенциально опасных ситуаций. Они могут включать системы аварийного отключения, системы пожаротушения, системы автоматического контроля и многое другое.

В зависимости от конкретных требований и характеристик системы, существует несколько видов систем противоаварийной защиты, включая:

- защитные системы автоматического отключения (ESD - Emergency Shutdown Systems), осуществляющие автоматическое отключение определенных систем или процессов в случае возникновения опасной ситуации;

- защитные системы предотвращения аварий (PSD - Process Safety Systems), которые предотвращают возникновение аварийных ситуаций путем

контроля и поддержания безопасных рабочих параметров процесса, PSD-системы включают в себя мониторинг параметров, регулирование, автоматическую диагностику и другие функции для обеспечения безопасности процессов;

- защитные системы пожаротушения, то есть системы, обеспечивающие обнаружение и тушение пожаров в промышленных объектах, они включают автоматические системы детектирования пожара, пожарные извещатели, системы подачи пенного или газового огнетушения и другие устройства для быстрого и эффективного тушения пожаров;

- защитные системы аварийного снижения давления (HIPPS - High-Integrity Pressure Protection Systems), которые предназначены для предотвращения аварийного повышения давления в системах трубопроводов и емкостях. HIPPS-системы контролируют и регулируют давление, чтобы предотвратить разрушение или повреждение оборудования;

- защитные системы отравления и утечек (EESD - Emergency Emissions Shutdown Systems), которые обеспечивают быстрое отключение систем или процессов при обнаружении утечек опасных химических веществ или газов, чтобы предотвратить их распространение и защитить окружающую среду и работников.

Это лишь некоторые из видов систем противоаварийной защиты, и выбор конкретной системы зависит от требований безопасности и характеристик конкретного процесса или промышленного объекта.

Совокупность данных систем и средств образует «многослойную» систему защиты (рисунок 21) персонала, окружающей среды и имущества предприятия от возможных неблагоприятных событий на производстве и от их последствий.



Рисунок 21 – Типичные слои защиты и функции безопасности, применяемые для снижения рисков на объектах нефтегазовой отрасли

Уровни технологической защиты используются для обеспечения безопасности и предотвращения аварийных ситуаций в различных процессных системах. Каждый уровень имеет свои задачи и выполняет определенные функции (рисунок 22).



Рисунок 22 – Управление безопасностью через уровни защиты

В случае нештатных ситуаций при функционировании технологического процесса на нефтегазовом промысле системы ПАЗ выступают в качестве последнего барьера. Они не допускают наступления разрушения объектов нефтегазового производства, предупреждают взрывы и возгорания легковоспламеняющихся веществ, что минимизирует вероятность возникновения человеческих жертв.

Система ПАЗ представляет собой компонент РСУ, которая включена в АСУТП нефтегазового промысла.

Основная задача систем противоаварийной защиты (СПАЗ) заключается в предотвращении аварийных ситуаций и минимизации последствий потенциальных опасностей в промышленных и технологических процессах с помощью своевременного останова процесса или его части. Структура системы противоаварийной защиты (СПАЗ) может включать несколько компонентов и подсистем, которые взаимодействуют для обеспечения надежной защиты технологических процессов.

Дублированные Датчики и измерительные приборы: они служат для непрерывного мониторинга параметров процесса, таких как давление, температура, расход, уровень и т.д. Датчики передают сигналы о состоянии процесса в систему управления СПАЗ.

Система управления СПАЗ: это ядро системы, которое принимает данные от датчиков, анализирует их, выявляет потенциально опасные ситуации и принимает соответствующие меры для предотвращения аварийных ситуаций. Система управления может быть основана на программируемых логических контроллерах (ПЛК) или других вычислительных устройствах.

Исполнительные устройства: они отвечают за реализацию мер предотвращения и управление процессом. Это могут быть клапаны аварийного отключения, насосы пожаротушения, предупредительные сигналы, аварийное освещение и другие устройства, которые активируются в случае необходимости.

Коммуникационные сети: они обеспечивают связь и передачу данных между компонентами СПАЗ. Это могут быть проводные или беспроводные сети связи, локальные или удаленные системы мониторинга и управления.

Функция безопасности системы противоаварийной защиты (СПАЗ) заключается в предотвращении и управлении аварийными ситуациями, а также минимизации возможных последствий отказов и нарушений в технологическом процессе. Основная задача СПАЗ состоит в обеспечении надежной защиты оборудования, персонала и окружающей среды. Также помимо основной функции СПАЗ может включать в себя ряд дополнительных функций:

1. автоматическое обнаружение потенциально опасных изменений состояния технологического объекта или системы его автоматизации;
2. автоматическое измерение технологических переменных, важных для безопасного ведения технологического процесса (например, измерение переменных, значения которых характеризуют близость объекта к границам безопасного режима ведения процесса);
3. автоматическая (в режиме on-line) диагностика отказов, возникающих в системе ПАЗ и/или в используемых ею средствах технического и программного обеспечения;
4. автоматическая предаварийная сигнализация, информирующая оператора технологического процесса о потенциально опасных изменениях, произошедших в объекте или в системе ПАЗ;
5. автоматическая защита от несанкционированного доступа к параметрам настройки и/или выбора режима работы системы ПАЗ.

Выполнение указанных функций должно предупреждать образование взрывоопасной среды и другие аварийные ситуации, связанные с отклонениями технологического процесса от предусмотренных технологическим регламентом предельно допустимых значений параметров во всех режимах работы объекта, и, при необходимости, обеспечивать остановку объекта или иной его перевод в безопасное состояние. [15]

В случае, если объект нефтегазового промысла принадлежит к ряду взрывоопасных, то наличие на нем систем, отвечающих за блокировку и останов процесса (выполняющих функцию ПАЗ) является необходимым требованием, без которого эксплуатация объекта невозможна.

6 Динамические модели надежности

6.1 Марковские случайные процессы

Марковские случайные процессы являются математическими моделями, используемыми для анализа систем, которые развиваются во времени и характеризуются свойством без памяти, известным как свойство Маркова. Они основаны на теории вероятностей и теории случайных процессов.

Марковский процесс определяется набором состояний, между которыми система может переходить в соответствии с определенными вероятностными правилами. Переход из одного состояния в другое происходит на основе текущего состояния и не зависит от истории предыдущих состояний. Это свойство без памяти называется свойством Маркова.

Марковские модели надежности используются для описания надежности систем во времени. Они позволяют анализировать вероятности переходов системы между различными состояниями, которые могут быть связаны с нормальной работой, отказами или восстановлением. Модель может включать различные компоненты системы, их состояния и вероятности переходов между ними.

Построение марковских моделей надежности включает определение состояний системы, их переходов и соответствующих вероятностей. Для этого может использоваться анализ структуры системы, данных о надежности компонентов, информация о восстановлении после отказа и другие факторы. На основе этих данных строятся математические модели, которые позволяют

оценить вероятности нахождения системы в различных состояниях и проводить анализ ее надежности.

Марковские модели надежности широко применяются в различных областях, включая инженерию, электронику, телекоммуникации, транспорт, финансы и другие. Они помогают предсказывать поведение системы во времени, оптимизировать ее надежность и разрабатывать стратегии обслуживания и восстановления после отказов.

Построение марковских моделей включает несколько этапов, которые обеспечивают корректное описание системы и анализ ее надежности. Вот основные этапы построения марковских моделей:

- определение состояний системы: Система разбивается на состояния, которые характеризуют ее работу, отказы или восстановление. Состояния могут быть связаны с физическими компонентами системы или с определенными режимами работы.

- определение переходов между состояниями: определяются возможные переходы между состояниями системы. Это могут быть переходы от работающего состояния к отказу, от отказа к восстановлению или между различными режимами работы. Интенсивности переходов определяются характеристиками безотказности и ремонтпригодности элементов системы.

- определение вероятностей переходов: определяются вероятности переходов между состояниями. Это может быть основано на данных о надежности компонентов системы, длительности восстановления после отказа, условиях работы и других факторах.

- математическое моделирование: на основе определенных состояний и вероятностей переходов строится математическая модель, которая описывает поведение системы во времени. Это может быть графическое представление (например, диаграмма переходов состояний) или математические уравнения (например, уравнения Колмогорова или уравнения Чепмена-Колмогорова).

– анализ модели: после нахождения решений модели следует провести анализ и интерпретацию полученных результатов. Это может включать оценку надежности системы, выявление узких мест, определение оптимальных стратегий обслуживания и восстановления, а также принятие решений на основе полученной информации.

6.2 Уравнения Колмогорова-Чепмена. Марковская модель надежности восстанавливаемого элемента

Уравнения Колмогорова-Чепмена являются важным инструментом в теории марковских процессов, включая модели надежности. Они используются для описания вероятностей перехода между состояниями во времени в рамках марковских моделей.

Марковская модель надежности восстанавливаемого элемента представляет собой систему состояний и вероятностей перехода между этими состояниями. В основе модели лежит предположение о том, что состояние элемента зависит только от его текущего состояния и не зависит от его предыдущих состояний.

Модель состоит из следующих элементов:

– состояния элемента. Элемент может находиться в различных состояниях, например, работоспособном, неисправном или восстановленном состоянии;

– вероятности перехода. Для каждой пары состояний определены вероятности перехода из одного состояния в другое. Например, вероятность перехода из работоспособного состояния в неисправное состояние или из неисправного состояния в восстановленное состояние;

– интенсивности отказов и восстановлений. Для каждого состояния определены интенсивности отказов (вероятность отказа в единицу времени) и интенсивности восстановлений (вероятность восстановления в единицу времени).

Уравнения Колмогорова-Чепмена связывают вероятности перехода между состояниями с интенсивностями отказов и восстановлений. Они представляют собой систему дифференциальных уравнений, описывающих динамику вероятностей состояний во времени.

Применение уравнений Колмогорова-Чепмена позволяет анализировать надежность восстанавливаемого элемента и оценивать вероятность его работоспособного состояния в различные моменты времени. Это помогает оптимизировать процессы восстановления и планировать техническое обслуживание элемента с целью обеспечения надежной работы системы в целом. Марковский граф переходов элемента между исправным состоянием и состоянием отказа показан на рисунке 23.

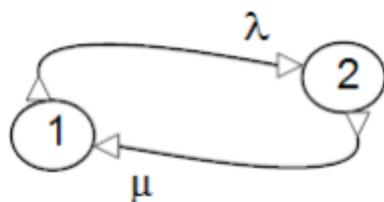


Рисунок 23 – Марковский граф переходов для восстанавливаемого элемента

Обозначим: $P_1(t)$ – вероятность нахождения элемента в момент времени t в состоянии 1. $P_2(t)$ – вероятность нахождения элемента в момент времени t в состоянии 2.

Рассмотрим событие A , которое означает работоспособность элемента в определенный момент времени $t+\Delta t$. Существуют два возможных способа, при которых это событие может произойти.

Первый способ связан с событием B . В этом случае, в момент времени t элемент уже находился в работоспособном состоянии 1, и за промежуток времени Δt не произошел никакой отказ. То есть, элемент оставался в состоянии 1 и продолжал функционировать без проблем. Второй способ связан с событием C . В этом случае, в момент времени t элемент находился в состоянии отказа 2, но за промежуток времени Δt произошло восстановление

его работоспособности, и он перешел в состояние 1. То есть, был успешно восстановлен и продолжил нормальное функционирование.

Эти два способа показывают разные сценарии работы элемента и его состояния на протяжении времени $t+\Delta t$. Причем, каждое из этих событий имеет свою значимость и может быть важным при анализе надежности и производительности системы.

Событие В свидетельствует о стабильной работе элемента без отказов и является желательным для обеспечения бесперебойной работы системы. Это означает, что элемент исправен и выполняет свои функции без проблем в течение времени Δt . Событие С, с другой стороны, указывает на процесс восстановления работоспособности элемента после отказа. Если элемент перешел из состояния отказа в работоспособное состояние за время Δt , это может свидетельствовать о действенности механизмов восстановления и ремонта системы. Это позволяет сократить простои и минимизировать негативные последствия отказов.

Определим вероятность события В, учитывая, что изменение данной вероятности происходит по экспоненциальному закону:

$$P(B) = P_1(t)e^{-\lambda\Delta t} \quad (25)$$

Разлагая экспоненту в ряд, получаем $e^{-\lambda\Delta t} = 1 - \lambda\Delta t + \frac{(\lambda\Delta t)^2}{2!} - \frac{(\lambda\Delta t)^3}{3!} + \dots = 1 - \lambda\Delta t + o(\Delta t)$.

Или с точностью до величин высшего порядка малости:

$$P(B) \approx P_1(t)(1 - \lambda\Delta t) \quad (26)$$

Вероятность события С равна:

$$P(C) = P_2(1 - e^{-\mu\Delta t}) \approx P_2(t)\mu\Delta t \quad (27)$$

Тогда вероятность события А (работоспособности элемента в момент времени $t+\Delta t$), с учетом того, что события В и С несовместны, определяется как:

$$P(A) = P_1(t + \Delta t) = P_1(1 - \lambda\Delta t) + P_2(t)\mu\Delta t \quad (28)$$

Если мы перенесем $P_1(t)$ в левую часть уравнения, разделим полученное приращение функции на приращение аргумента, устремив Δt к нулю, то получим дифференциальное уравнение относительно неизвестной вероятности $P_1(t)$:

$$P_1'(t) = P_1(t)(-\lambda) + \mu P_2(t) \quad (29)$$

Аналогично рассуждая, можно получить дифференциальное уравнение относительно вероятности $P_2(t)$. Таким образом, мы получили для вероятностей $P_1(t)$ и $P_2(t)$ систему обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} P_1'(t) = -\lambda P_1(t) + \mu P_2(t) \\ P_2'(t) = \lambda P_1(t) - \mu P_2(t) \end{cases} \quad (30)$$

Полученную систему дифференциальных уравнений решают при начальных условиях $P_1(0)$, $P_2(0)$, задающих распределение вероятностей состояний в начальный момент времени $t=0$. Так как для любого момента времени события нахождения элемента в одном из своих возможных состояний составляют полную группу, то выполняется нормировочное условие $P_1(t) + P_2(t) = 1$.

Если мы будем строить марковские модели надежности систем, состоящих из нескольких элементов, учитывать дополнительные факторы, то очевидно, что пространство состояний модели будет увеличиваться. Система дифференциальных уравнений относительно $P_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) в общем виде записывается как:

$$P_n' = -P_n(t) \sum_{i \notin G_n} \lambda_{ni} + \sum_{i \in G_n} P_i(t) \lambda_{in} \quad (31)$$

где G_k – множество состояний, в которые возможен непосредственный переход из данного состояния k ;

G_k – множество состояний, из которых возможен непосредственный переход в состояние k .

Уравнения вида (31) для вероятностей состояний марковского процесса с непрерывным временем и дискретным множеством состояний называются уравнениями Колмогорова-Чепмена.

7 Анализ процесса деградации системы противоаварийной защиты БИЛ с использованием критериев Маркова

Структура MooND является одной из различных структур резервирования, применяемых в контурах СПАЗ. Она отличается тем, что в процессе эксплуатации СПАЗ и выполнения его функционала, N из M компонентов системы подвергаются встроенной диагностике. Это означает, что система способна обнаруживать отказы отдельных модулей или компонентов во время работы. При использовании резервируемых СПАЗ, устанавливаются определенные требования по времени технического обслуживания. Это включает периодические проверки и восстановление системы после обнаружения отказов. В зависимости от ситуации, это может включать остановку или непрерывную работу системы измерения качества и количества нефти (СИКН) и перевод оборудования или технологического процесса в безопасное состояние по команде оператора или диспетчера. Когда диагностика обнаруживает опасные или безопасные отказы в компонентах СПАЗ, система активирует сигнализацию и выполняет необходимые действия для подготовки к переводу в безопасное состояние или остановке СИКН. Это позволяет предотвратить возможные аварийные ситуации и обеспечить безопасность процесса.

В итоге, структура MooND обеспечивает надежность и безопасность контуров СПАЗ, позволяя выявлять и обрабатывать отказы компонентов в реальном времени и предпринимать необходимые меры для поддержания стабильной работы системы.

В ходе исследования было обнаружено, что в процессе детектирования отказов может возникать и развиваться деградация системы безопасности (СПАЗ). Одним из ключевых компонентов СПАЗ является логический блок,

который играет важную роль не только в обработке аварийно-значимых сигналов, но и в обработке сигналов от критически важных объектов системы управления.

Для проведения исследования был выбран контроллер Tricon. Контроллеры Tricon представляют собой современные программируемые логические контроллеры, обладающие высоким уровнем отказоустойчивости благодаря тройной модульной резервированности (Triple-Modular Redundant, TMR).

Контроллер Tricon объединяет три параллельных процессорных блока и осуществляет расширенную диагностику компонентов контроллера. При выполнении логических и вычислительных операций происходит мажоритарная выборка неотказавших блоков в режиме "два из трех". Каждый канал TMR независимо выполняет программу управления параллельно с двумя другими каналами. Расширенная диагностика каждого канала, модуля и функциональной цепи позволяет немедленно обнаруживать эксплуатационные неисправности и сообщать о них с помощью индикаторов или аварийных сигналов. Диагностика TMR происходит в режиме онлайн.

Вся информация о диагностике неисправностей контроллера доступна программе управления, оператору и диспетчеру. Эти диагностические данные могут быть использованы для корректировки управляющих действий или выполнения процедур технического обслуживания.

Контроллер Tricon также обладает специализированными механизмами аппаратной и программной мажоритарной выборки. Они проверяют все цифровые входные и выходные сигналы, поступающие от полевых устройств, а также выполняют оценку среднего значения аналоговых входных сигналов. Благодаря изоляции каждого канала от остальных, отказ в одном канале не может передаваться на другие. Если происходит аппаратный отказ в одном канале, два других канала отвергают его сигнал. Таким образом, неисправный модуль может быть легко заменен без отключения контроллера и прерывания технологического процесса.

На рисунке 24 представлена схема последовательной деградации Tricon.

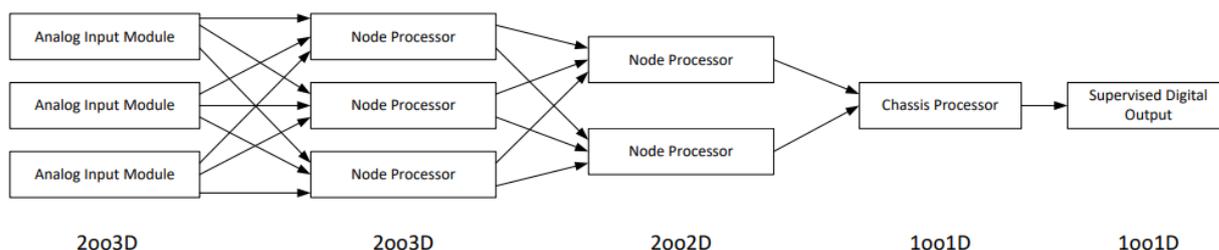


Рисунок 24 – Схема последовательной деградации Tricon

Типовая система с голосованием по схеме 2003 показана на рисунке 25. На вход системы поступает одни и те же технологические параметры от полевых датчиков через модули ввода. Полученные данные записываются в программу исполняемую тремя процессорами (А, В и С). Обработанные параметры и результаты выполнения передаются по сети через коммуникационные модули, которые также дублируются.

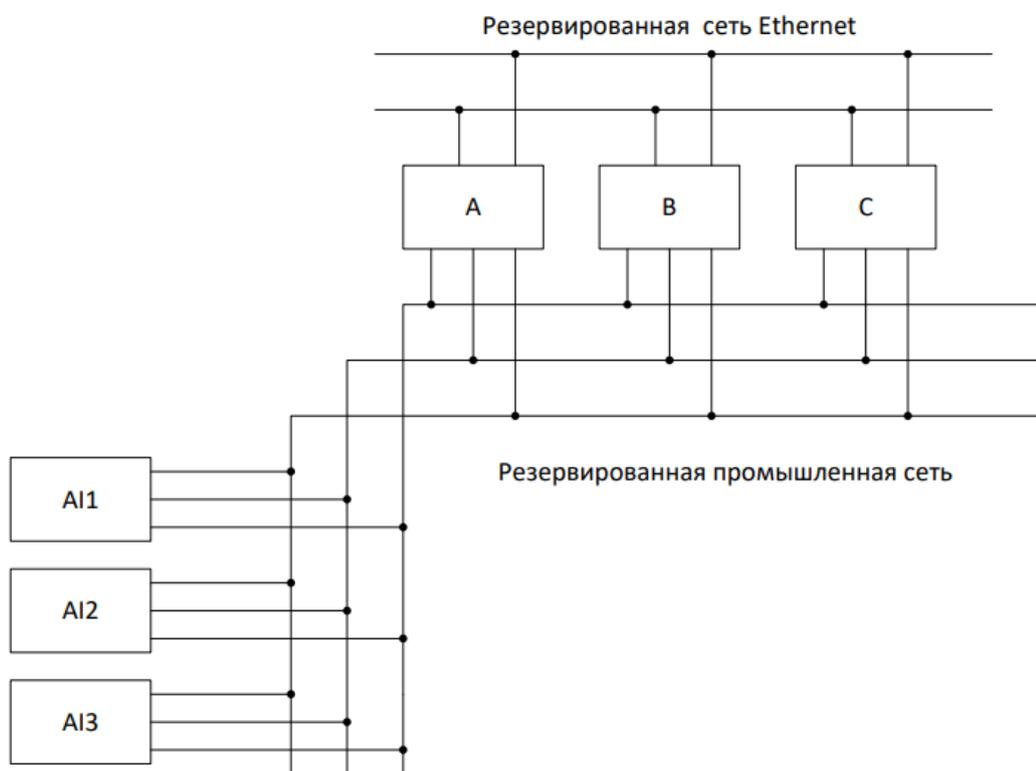


Рисунок 25 – Резервирование методом голосования

Каждый из трех параллельно работающих процессоров - А, В и С - играет ключевую роль в функционировании системы. Они отправляют свои запросы или команды в модули ввода. Затем каждый модуль ввода получает эти три команды и производит голосование по схеме 2oo3D. Это означает, что система выбирает одно из трех входных значений, представляющих команду, и использует его для генерации ответа.

С помощью трех модулей ввода каждый процессор получает три ответа на свою команду. Затем каждый процессор применяет схему голосования 2oo3D, чтобы выбрать один ответ из трех. Этот выбранный ответ будет использоваться в дальнейшей работе прикладной программы. Аналогичная процедура осуществляется и для модулей вывода.

Эта система обладает преимуществами по сравнению с централизованным блоком резервирования. В случае сбоя в блоке голосования, каждый элемент системы может продолжать работу независимо, что предотвращает отказ всей системы.

Еще одно преимущество этой системы заключается в ее способности продолжать работу без прерываний при отказе одного из процессоров. Благодаря мажоритарному голосованию, схема голосования дает правильный результат и обеспечивает непрерывность работы системы. Однако, после отказа двух процессоров, система переходит в состояние отказа, а после отказа третьего процессора выходы системы переводятся в безопасное состояние.

Более того, в системах с голосованием результаты тестирования могут быть использованы в качестве дополнительных условий при голосовании. Это означает, что передача сигнала управления исполнитель.

7.1 Моделирование архитектуры 2oo3D Triconex Tricon

Контроллер, имеющий архитектуру 2oo3D, представляет собой систему, состоящую из трех параллельных каналов, работающих независимо друг от друга. Принцип работы такого контроллера основан на применении избыточности и сравнительного анализа результатов работы каждого из каналов.

Процесс работы контроллера 2oo3D выглядит следующим образом:

- На вход контроллера поступают входные сигналы или данные, которые требуется обработать или проверить.
- Входные сигналы дублируются на все три канала контроллера.
- Каждый из трех каналов независимо обрабатывает полученные данные и принимает решение о дальнейших действиях на основе своей логики и программного обеспечения.
- Результаты работы каждого канала сравниваются между собой.
- Если результаты согласованы и совпадают, то контроллер принимает решение на основе этих результатов.
- Если результаты не согласуются, то контроллер может применить механизм резервного голосования или логического устранения несоответствий для выбора правильного результата или принятия соответствующего решения.
- Контроллер может также предоставлять информацию о состоянии каждого канала, отслеживать его надежность и производить диагностику возможных отказов.

Преимущество архитектуры 2oo3D заключается в повышенной надежности и отказоустойчивости системы. При отказе одного из каналов, оставшиеся два канала могут продолжать работу и обеспечивать нужную функциональность. Это позволяет улучшить безопасность и надежность системы, особенно в критических приложениях, где отказы могут иметь серьезные последствия.

Структурная схема модели надежности для архитектуры, учитывающей мажоритарное резервирование 2oo3D, представлена на рисунке 26.

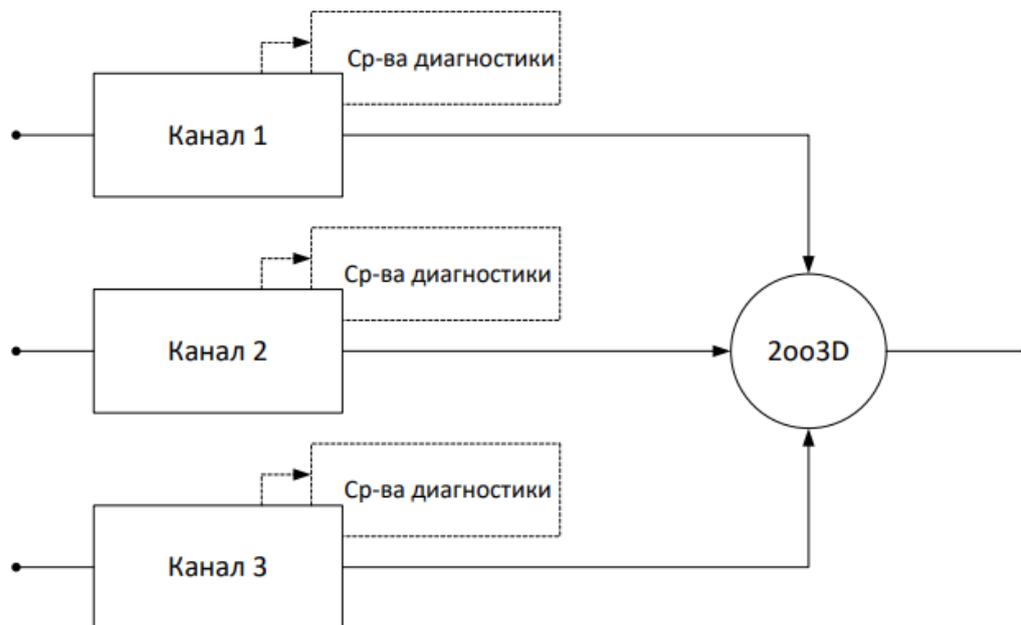


Рисунок 26 – Структурная схема надежности в режиме нормальной эксплуатации

Размеченный граф модели функционирования Tricon в условиях проявления опасных отказов представлен на рисунке 6. 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:

$$DC = \sum \lambda_{DD} / \sum \lambda_{Dtotal} \quad (1)$$

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

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

Для модели используются следующие допущения:

1. опасные отказы распознаются с вероятностью выявления, равной DC;
2. отказы, не выявленные диагностикой, возникают с вероятностью, равной дополнению величины диагностического охвата до единицы ($1 - DC$);

3. 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;

4. техническое обслуживание проводится с периодичностью $T_{\Pi} = 1 / \lambda_{\Pi}$ и с длительностью $T_{TO} = 1 / \mu_{\Pi}$.

Для изучения показателей надежности и обеспечения безопасности воспользуемся методом моделей Маркова. Модель Маркова с поглощающими состояниями для архитектуры 2oo3D представлена на рисунке 27.

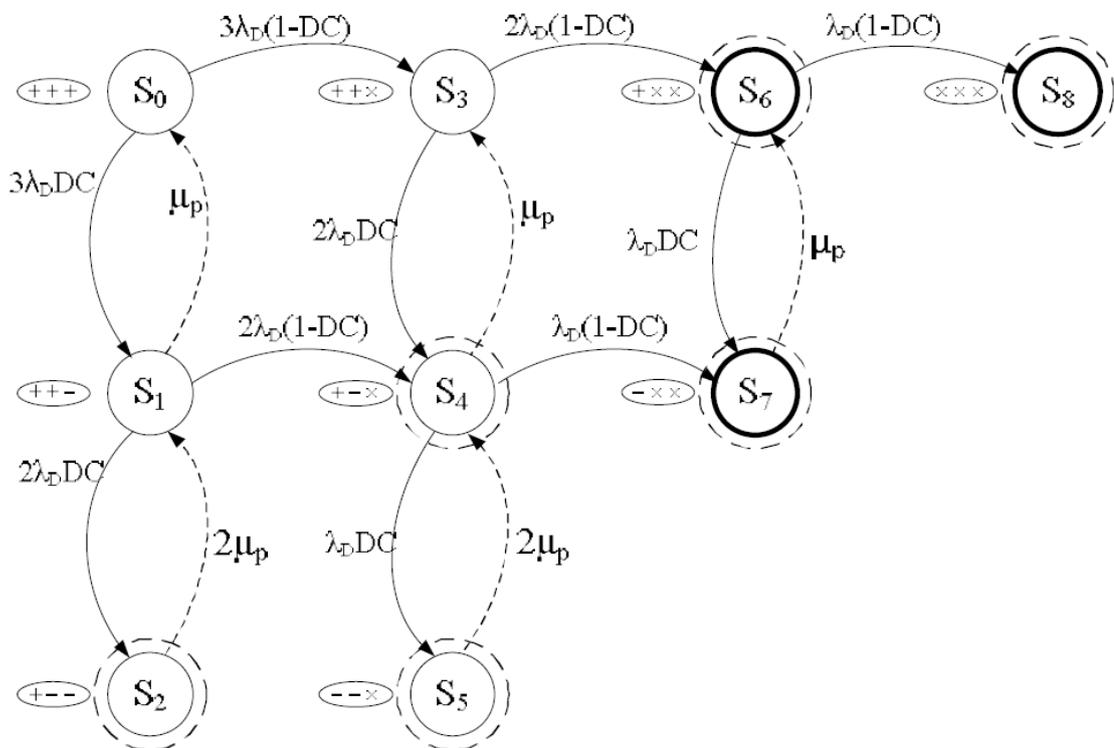


Рисунок 27 – Модель Маркова 2oo3D с поглощающими состояниями

Рассмотрим подробно каждое состояние, представленное в графе на рисунке 22 модели 2oo3D:

1. состояние S₀: соответствует начальному состоянию, когда все каналы контроллера исправно выполняют свою функцию;
2. состояние S₁: в процессе работы произошел опасный отказ одного из трех каналов, который был выявлен системой диагностики контроллера

(возможен переход $S_0 \rightarrow S_1$). При выводе канала из эксплуатации и немедленном ремонте возможно перейти обратно в состояние S_0 ;

3. состояние S_2 : в процессе работы произошел опасный отказ двух из трех каналов (возможен переход $S_1 \rightarrow S_2$), причем оба отказа были диагностированы. Контроллер не может продолжать свою работу, так как состояние является неработоспособным, ведь для работы программы заложенной данной архитектурой необходимо минимум два канала. Также возможно возвращение в предыдущее состоянии S_1 при ремонте одного канала;

4. состояние S_3 : в процессе работы произошел опасный отказ в одном из каналов, который не был обнаружен (возможен переход $S_0 \rightarrow S_3$). В данном случае невозможно перейти в предыдущее состояние;

5. состояние S_4 : контроллер не может продолжать надежное выполнение своих функций, так как один канал находится в обнаруженном опасном отказе, а другой канал содержит необнаруженный опасный отказ (возможен переход $S_3 \rightarrow S_4$, $S_1 \rightarrow S_4$);

6. состояние S_5 : в процессе работы системы произошел отказ двух каналов, которые удалось выявить и отказ одного канала, который не был обнаружен (возможен переход $S_4 \rightarrow S_5$ и обратно при проведении восстановительных работ);

7. состояние S_6 : исправен лишь один канал, а остальные два канала имеют не выявленные каналы (возможен переход $S_3 \rightarrow S_6$). В данном случае невозможно перейти в предыдущее состояние;

8. состояние S_7 : в ходе работы отказали все три канала модулей, но выявлен был лишь один отказ (возможен переход $S_4 \rightarrow S_7$ и $S_6 \rightarrow S_7$) При этом возможно восстановление в состояние S_6 после ремонта выявленного отказа;

9. состояние S_8 : характеризует конечное из которого невозможно вернуться из-за отсутствия системы диагностики не выявленных отказов. В ходе работы вышли из строя все каналы, но их отказ так и не был обнаружен.

Отказавший канал может быть восстановлен с интенсивностью μ_r .
 Переход в предыдущее состояние происходит при отключении вышедшего из строя модуля и описывается следующими вершинами графа модели 2oo3D: $S1 \rightarrow S0$, $S2 \rightarrow S1$, $S4 \rightarrow S3$, $S5 \rightarrow S4$, $S7 \rightarrow S6$.

На основе графа (рисунок 27) составим систему дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена, учитывая что для каждого состояния производная будет равняться производным «пришедших» состояний умноженных на интенсивности восстановления взятых со знаком плюс и производным «ушедших» состояний умноженных на интенсивности восстановления взятых со знаком минус:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} P_0(t) = -((3\lambda_D \cdot DC + 3\lambda_D(1-DC))P_0(t) + \mu_p P_1(t); \\ \frac{d}{dt} P_1(t) = -(2\lambda_D DC + \mu_p + 2\lambda_D(1-DC))P_1(t) + 3\lambda_D DC \cdot P_0(t) + 2\mu_p P_2(t); \\ \frac{d}{dt} P_2(t) = -2\mu_p P_2(t) + 3\lambda_D DC \cdot P_1(t); \\ \frac{d}{dt} P_3(t) = -(2\lambda_D(1-DC) + 2\lambda_D DC)P_3(t) + 3\lambda_D(1-DC)P_0(t) + \mu_p P_6(t); \\ \frac{d}{dt} P_4(t) = -(\lambda_D DC + \lambda_D(1-DC) + \mu_p)P_4(t) + 2\lambda_D DC \cdot P_3(t) + 2\lambda_D(1-DC)P_1(t) + 2\mu_p P_5(t); \quad (2) \\ \frac{d}{dt} P_5(t) = -2\mu_p P_5(t) + \lambda_D DC \cdot P_4(t); \\ \frac{d}{dt} P_6(t) = -(\lambda_D(1-DC) + \lambda_D DC)P_6(t) + 2\lambda_D(1-DC)P_3(t) + \mu_p P_7(t); \\ \frac{d}{dt} P_7(t) = -\mu_p P_7(t) + \lambda_D DC \cdot P_6(t) + \lambda_D(1-DC)P_4(t); \\ \frac{d}{dt} P_8(t) = \lambda_D(1-DC)P_6(t). \end{array} \right.$$

Решим систему, представленную выше, учитывая, что при вводе в эксплуатацию системы контроллер находится в состоянии 0 с максимальной вероятностью. Запишем начальные условия:

$$\begin{array}{l} P_0(0) = 1; \quad P_1(0) = 0; \quad P_2(0) = 0; \quad P_3(0) = 0; \quad P_4(0) = 0; \\ P_5(0) = 0; \quad P_6(0) = 0; \quad P_7(0) = 0; \quad P_8(0) = 0. \end{array} \quad (3)$$

Для дальнейшего решения задачи воспользуемся преобразованием Лапласа: $s = d / dt$. Исходя из условий перейдем в лапласову область и запишем уравнения:

$$\left\{ \begin{array}{l} s \cdot p_0(s) = -((3\lambda_D \cdot DC + 3\lambda_D(1-DC))p_0(s) + \mu_p p_1(s) + 1; \\ s \cdot p_1(s) = -(2\lambda_D DC + \mu_p + 2\lambda_D(1-DC))p_1(s) + 3\lambda_D DC \cdot p_0(s) + 2\mu_p p_2(s); \\ s \cdot p_2(s) = -2\mu_p p_2(s) + 3\lambda_D DC \cdot p_1(s); \\ s \cdot p_3(s) = -(2\lambda_D(1-DC) + 2\lambda_D DC)p_3(s) + 3\lambda_D(1-DC)p_0(s) + \mu_p p_6(s); \\ s \cdot p_4(s) = -(\lambda_D DC + \lambda_D(1-DC) + \mu_p)p_4(s) + 2\lambda_D DC \cdot p_3(s) + 2\lambda_D(1-DC)p_1(s) + 2\mu_p p_5(s); \\ s \cdot p_5(s) = -2\mu_p p_5(s) + \lambda_D DC \cdot p_4(s); \\ s \cdot p_6(s) = -(\lambda_D(1-DC) + \lambda_D DC)p_6(s) + 2\lambda_D(1-DC)p_3(s) + \mu_p p_7(s); \\ s \cdot p_7(s) = -\mu_p p_7(s) + \lambda_D DC \cdot p_6(s) + \lambda_D(1-DC)p_4(s); \\ s \cdot p_8(s) = \lambda_D(1-DC)p_6(s). \end{array} \right.$$

В таблице 10 представлены базовые значения входных параметров модели функциональной безопасности.

Таблица 10 – Базовые значения входных параметров

Параметр	Значение	Единица измерения
$\lambda_D = 0.5 \cdot \lambda$	2.5e-5	1/час
$\lambda_{DD} = DC \cdot \lambda_D$	2.52e-5	1/час
$\lambda_{DU} = (1-DC) \cdot \lambda_D$	2.5e-6	1/час
$\mu_p = 1 / MRT$	1/8	1/час
$\mu_{pD} = 1 / (MRT + T_D)$	1/12	1/час
DC	1	–

Решим систему уравнений с помощью пакета Mathcad (рисунок 28), подставив значения интенсивности отказов, восстановления и диагностического охвата из таблицы 11. Не забыв перед этим составить две матрицы (A – матрицу коэффициентов, B – матрицу начальных условий) и воспользоваться формулой $P(s) = A(s)^{-1} \cdot B$.

$$P(s) := A(s)^{-1} \cdot B$$

$$P(s) \text{ collect, s} \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{8.0e8 \cdot s^2 + 3.0004e8 \cdot s + 2.5e7}{8.0e8 \cdot s^3 + 3.001e8 \cdot s^2 + 2.5015003e7 \cdot s + 60000.0 \cdot s + 15000.0} \\ \frac{8.0e8 \cdot s^3 + 3.001e8 \cdot s^2 + 2.5015003e7 \cdot s}{3.0} \\ 8.0e8 \cdot s^3 + 3.001e8 \cdot s^2 + 2.5015003e7 \cdot s \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Рисунок 28 – Решение системы уравнений модели 2oo3D в лапласовой области (DC = 1)

Воспользуемся обратным преобразованием Лапласа и найдем решения системы по временной области, а после построим график вероятности нахождения системы в работоспособном состоянии (0-состояние) при DC = 1 (рисунок 29). Вероятность нахождения системы в работоспособном состоянии является мерой надежности системы и определяет вероятность того, что система будет функционировать без отказов или сбоев в определенный момент времени. Далее из состояния 0 модель может перейти только в более худшие состояния, в которых произошел отказ одного из модулей контроллера ПАЗ.

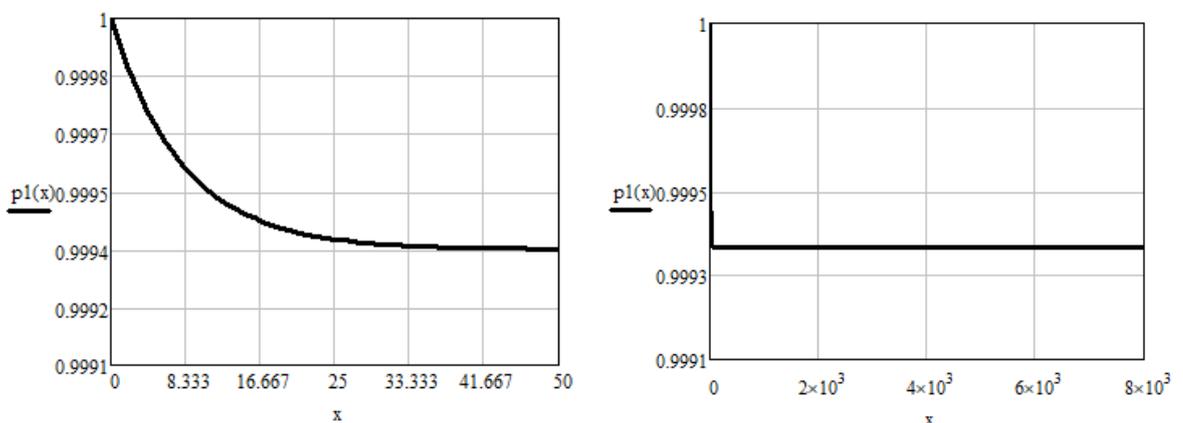


Рисунок 29 – График вероятности нахождения системы в работоспособном состоянии для модели с поглощающими состояниями при DC = 1

Решим систему ДУ Колмогорова с помощью пакета Matlab, используя метод ode45s. При этом будем вносить изменение параметра диагностического охвата (DC). Скрипт решения СДУ представлен в таблице 11.

Таблица 11 – Решение СДУ методов ode45s в Matlab

```

1. t_interval = [0 1000];
2. Start_cond = [1; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0];
3.
4. DC = 0.9;
5. [t, P] = ode45(@ (t,P) TwoOutOfTree(t,P,DC), t_interval, Start_cond);
6.
7. figure;
8. plot(t,P(:,1),'k','LineWidth',2);
9. hold on
10.
11. DC = 0.7;
12. [t, P] = ode45(@ (t,P) TwoOutOfTree(t,P,DC), t_interval, Start_cond);
13. plot(t,P(:,1),'k--','LineWidth',2);
14.
15.
16. DC = 0.5;
17. [t, P] = ode45(@ (t,P) TwoOutOfTree(t,P,DC), t_interval, Start_cond);
18. plot(t,P(:,1),'k-','LineWidth',2);
19.
20. DC = 0.2;
21. [t, P] = ode45(@ (t,P) TwoOutOfTree(t,P,DC), t_interval, Start_cond);
22. plot(t,P(:,1),'k:', 'LineWidth',2);
23.
24. grid on;
25. xlabel('t');
26. ylabel('P0(t)');
27. legend('ВБР при DC=0.9','ВБР при DC=0.7','ВБР при DC=0.5','ВБР при DC=0.2','Location','southwest','NumColumns',2);
28. hold off
29.
30. DC = 1;
31. [t, P] = ode45(@ (t,P) TwoOutOfTree(t,P,DC), t_interval, Start_cond);
32.
33. function dPdt = TwoOutOfTree(t,P,DC)
34.     ld = 2.5*10^(-5);
35.     mp = 0.125;
36.
37.     dp1 = -(3*ld*DC+3*ld*(1-DC))*P(1)+mp*P(2);
38.     dp2 = -(2*ld*DC+mp+2*ld*(1-DC))*P(2)+3*ld*DC*P(1)+2*mp*P(3);
39.     dp3 = -2*mp*P(3)+3*ld*DC*P(2);
40.     dp4 = -(2*ld*(1-DC)+2*ld*DC)*P(4)+3*ld*(1-DC)*P(1)+mp*P(7);
41.     dp5 = -(ld*DC+ld*(1-DC)+mp)*P(5)+2*ld*DC*P(4)+2*ld*(1-DC)*P(2)+2*mp*P(6);
42.     dp6 = -2*mp*P(6)+ld*DC*P(5);
43.     dp7 = -(ld*(1-DC)+ld*DC)*P(7)+2*ld*(1-DC)*P(4)+mp*P(8);
44.     dp8 = -mp*P(8)+ld*DC*P(7)+ld*(1-DC)*P(5);
45.     dp9 = ld*(1-DC)*P(7);
46.
47.     dPdt = [dp1; dp2; dp3; dp4; dp5; dp6; dp7; dp8; dp9];
48. end

```

Тогда в нулевом состоянии вероятность безотказной работы системы при разных DC представлена на рисунке 30.

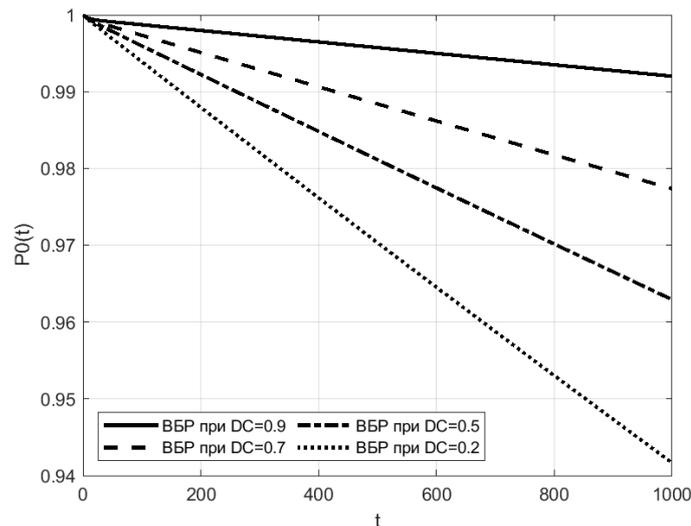


Рисунок 30 – График вероятности нахождения системы в работоспособном состоянии при разных значениях диагностического охвата

Найдем показатель средней вероятности отказа системы, учитывая, что для этого необходимо из единицы вычесть вероятность безотказной работы (ВБР) исправных состояний (в которых не менее двух модулей контроллера выполняют заданные функции):

$$PFD_{avg} = 1 - P_0(t) - P_1(t) - P_3(t) \quad (34)$$

На рисунке 31 показана зависимость функциональной безопасности PFDavg от значений входного параметра DC.

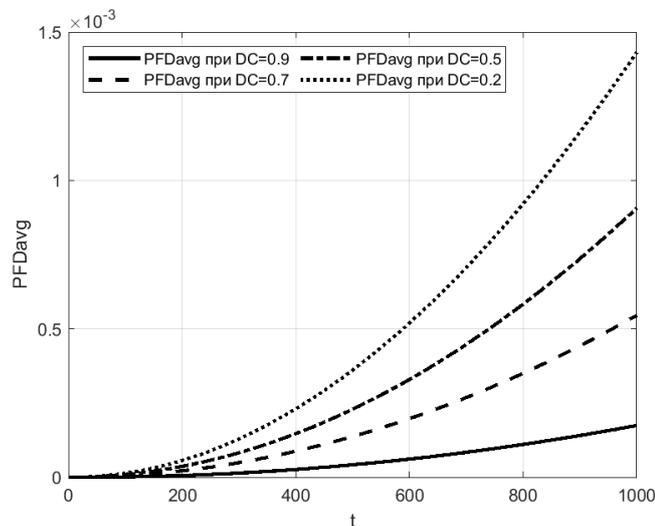


Рисунок 31 – Зависимость PFDavg от времени

Исследуем модель Маркова без поглощающих состояний для архитектуры 2oo3D (рисунок 32). В данной модели предусмотрен выход из состояния необнаруженного опасного отказа без проведения дополнительных мероприятий (например, периодических профилактик с повышенным DC).

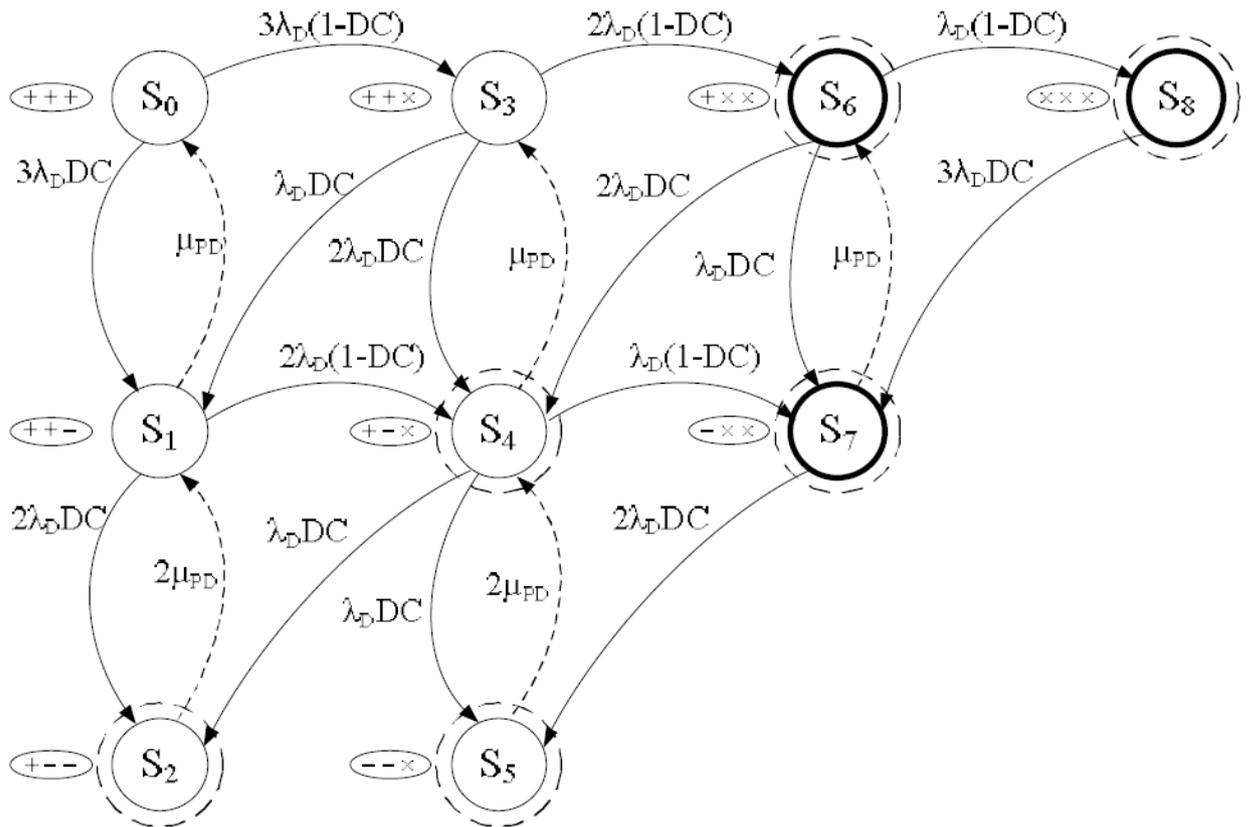


Рисунок 32 – Модель Маркова 2oo3D без поглощающих состояний

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

Граф на рисунке 32 отличается от графа на рисунке 27 не только отсутствием поглощающих состояний, также и интенсивностью восстановления:

$$\mu_{PD} = 1 / (MRT + TD) < \mu_p \quad (34)$$

где MRT – средняя длительность ремонта одного канала СПАЗ;

TD – дополнительное время диагностирования не выявленных отказов.

Воспользовавшись все тем же правилом найдем систему дифференциальных уравнений для данной архитектуры:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} P_0(t) = -3\lambda_D P_0(t) + \mu_{pd} P_1(t); \\ \frac{d}{dt} P_1(t) = -(2\lambda_D + \mu_{pd}) P_1(t) + 3\lambda_D DC \cdot P_0(t) + 2\mu_{pd} P_2(t) + \lambda_D DC \cdot P_3(t); \\ \frac{d}{dt} P_2(t) = -2\mu_{pd} P_2(t) + 2\lambda_D DC \cdot P_1(t) + \lambda_D DC \cdot P_4(t); \\ \frac{d}{dt} P_3(t) = -(2\lambda_D + \lambda_D DC) P_3(t) + 3\lambda_D (1 - DC) P_0(t) + \mu_{pd} P_6(t); \\ \frac{d}{dt} P_4(t) = -(\lambda_D (DC + 1) + \mu_{pd}) P_4(t) + 2\lambda_D DC \cdot (P_3(t) + P_6(t)) + 2\lambda_D (1 - DC) P_1(t) + 2\lambda_D P_5(t); \\ \frac{d}{dt} P_5(t) = -2\mu_{pd} P_5(t) + \lambda_D DC \cdot P_4(t) + 2\lambda_D DC \cdot P_7(t); \\ \frac{d}{dt} P_6(t) = -(\lambda_D + 2\lambda_D DC) P_6(t) + 2\lambda_D (1 - DC) P_3(t) + \mu_{pd} P_7(t); \\ \frac{d}{dt} P_7(t) = -(\mu_{pd} + 2\lambda_D DC) P_7(t) + \lambda_D DC \cdot P_6(t) + \lambda_D (1 - DC) P_4(t) + 3\lambda_D DC \cdot P_8(t); \\ \frac{d}{dt} P_8(t) = -3\lambda_D DC \cdot P_8(t) + \lambda_D (1 - DC) P_6(t). \end{array} \right.$$

Как и в прошлом примере перейдем в область Лапласа, только теперь опустим это действие и сразу перенесем коэффициенты, стоящие перед вероятностями СДУ в Mathcad. Воспользуемся встроенной функцией collect (рисунок 33).

$$P(s) \text{ collect, } s \rightarrow \left(\begin{array}{l} \frac{6.4e30s^3 + 2.1341333333333333e30s^2 + 1.3349335733333333e29s + 1.0e25}{6.4e30s^4 + 2.1346133333333333e30s^3 + 1.3361341733333333e29s^2 + 1.00090018e25s - 3.0} \\ \frac{1.2e22s + 3.0e21}{1.6e26s^3 + 5.3353333333333333e25s^2 + 3.3363339333333333e24s - 1.0} \\ \frac{6.0e17}{1.6e26s^3 + 5.3353333333333333e25s^2 + 3.3363339333333333e24s - 1.0} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right)$$

Рисунок 33 – Решение системы уравнений при DC = 1

Аналогично построим график вероятности нахождения системы в работоспособном состоянии (0-состояние) при $DC = 1$ (рисунок 34).

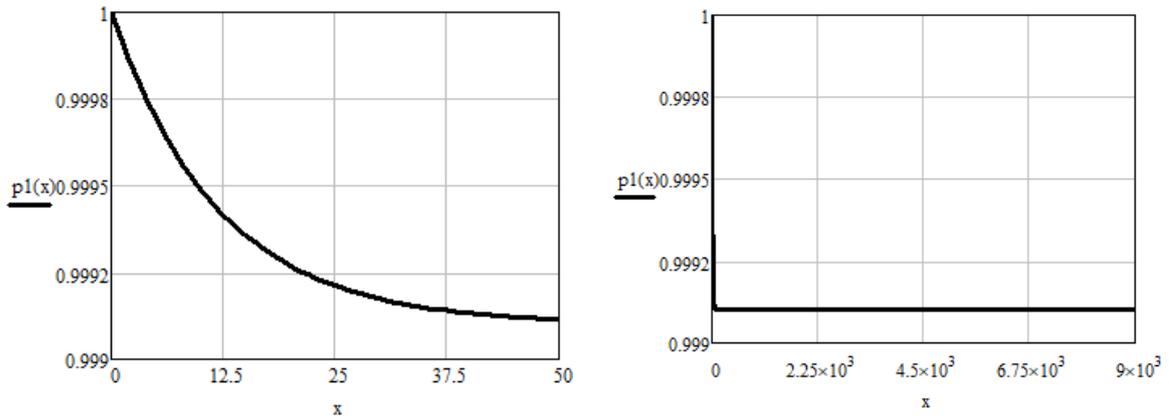


Рисунок 35 – График вероятности нахождения системы в работоспособном состоянии для модели без поглощающих состояний при $DC = 1$

На рисунке 36 показана зависимость функциональной безопасности PFD_{avg} от значений входного параметра $DC = 1$ (модель с поглощающими состояниями и модель без поглощающих состояний).

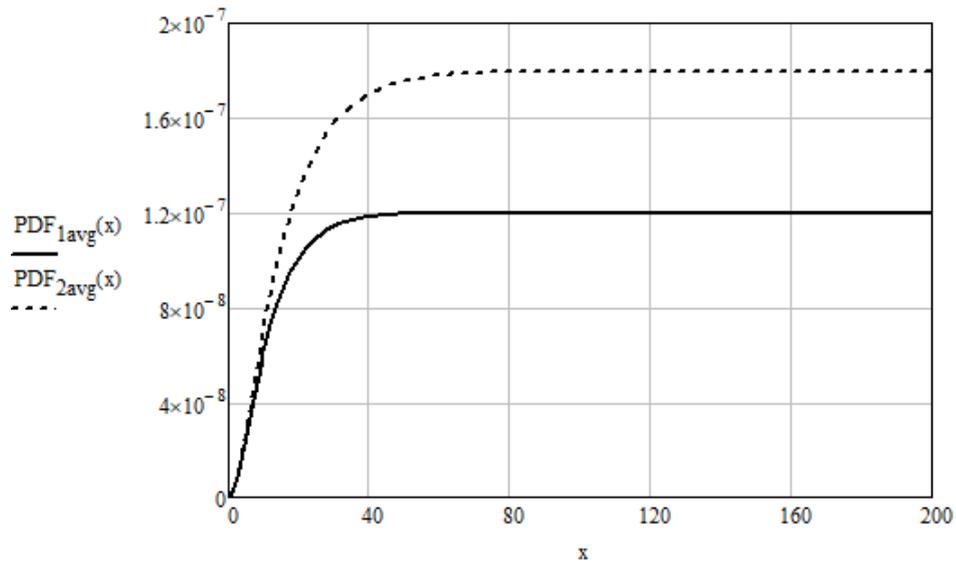


Рисунок 36 – Сравнение вероятностей отказа системы с поглощающими состояниями (PFD_{1avg}) и без поглощающих состояний (PFD_{2avg}) при $DC=1$

Рассматривая рисунок 36, можно сделать вывод, что при выявлении всех опасных отказов, то есть, когда диагностический охват равняется

единице, функции вероятности отказа демонстрируют стремление к устоявшемуся значению спустя примерно 40 часов. При этом можно заметить, что график первой модели уступает второй, так как вторая модель учитывает работы, направленные на диагностику не выявленных отказов.

7.2 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].

Составим структурную схему надежности для архитектуры 2oo2D, учитывая, что из определения схема должна два канала, проверяемые средствами диагностики (рисунок 37).



Рисунок 37 – Структурная схема архитектуры 2oo2D

Составим граф деградировавшего до уровня 2oo2D контроллера Tricon, используя марковские процессы (рисунок 38).

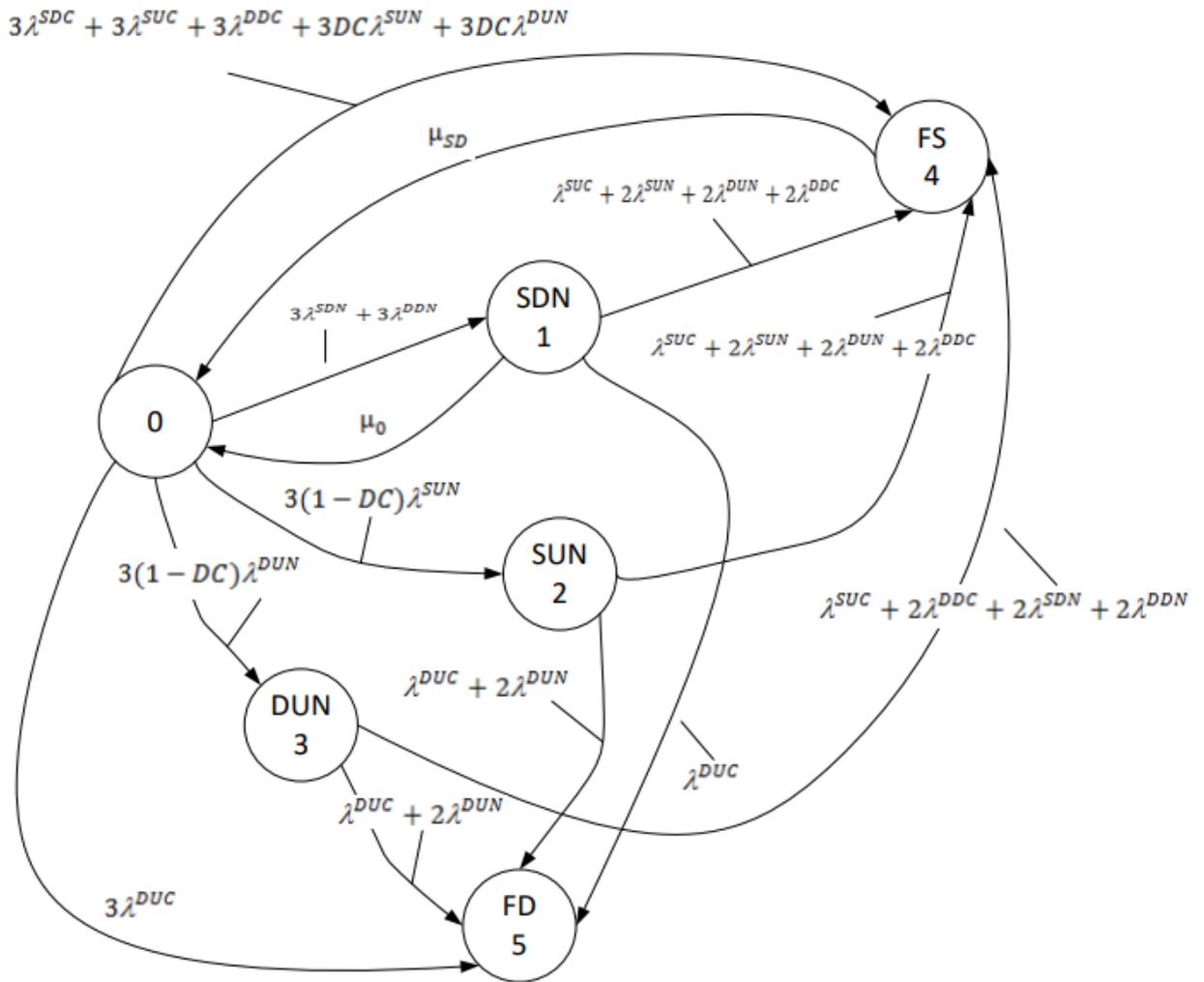


Рисунок 38 – Модель Маркова контроллера Tricon, деградировавшего до уровня 2oo2D

Пусть частота отказов одного модуля равна λ , частота отказов на стороне безопасности системы равна λ_S , а частота отказов - λ_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 β :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Охват самодиагностикой является важной особенностью системы, которая обеспечивает непрерывный контроль и реагирование на возможные ошибки в режиме реального времени. Как только ошибка обнаруживается, система сразу же сигнализирует об этом, что позволяет оперативно принять меры для ее устранения. Однако, для того чтобы система диагностики оставалась надежной и не выходила в состояние отказа, требуется регулярное

техническое обслуживание (ТО). В процессе ТО проводятся различные мероприятия, включающие проверку и обслуживание компонентов системы.

Предположим, что при ручной проверке можно обнаружить все проблемы, которые могут возникнуть в системе. Однако, результаты ручной проверки могут варьироваться в зависимости от квалификации и опыта технического персонала, а также от сложности системы и ее компонентов.

Это приводит нас к понятию двух конкретных скоростей обслуживания. Первая скорость обслуживания связана с ручной проверкой, которая может быть затратной по времени и зависеть от квалификации проверяющего. Однако, она может быть полезна в случаях, когда требуется детальный осмотр или решение сложных проблем.

Вторая скорость обслуживания связана с автоматизированными методами диагностики и самодиагностическими системами. Они способны проводить быструю и точную диагностику, определять проблемы в реальном времени и моментально информировать операторов о возникших сбоях или неисправностях.

Оперативный уровень технического обслуживания относится к непосредственным действиям и мерам, которые выполняются в случае возникновения проблем, отказов или сбоев в работе системы. Он включает в себя быстрые реакции на нештатные ситуации, исправление проблем и восстановление работоспособности системы. Оперативное обслуживание может включать такие действия, как диагностика и анализ неисправностей, ремонт или замена компонентов, настройка и перенастройка системы, а также восстановление нормальной работы. Регулярный уровень технического обслуживания относится к плановым и периодическим мероприятиям, которые выполняются регулярно для поддержания работоспособности и надежности системы. Это включает в себя запланированные профилактические меры, регулярные проверки, обслуживание и технические осмотры системы. Регулярное обслуживание направлено на предотвращение возникновения проблем, обнаружение и устранение потенциальных

неисправностей, обновление компонентов и оборудования, а также обеспечение оптимальной работоспособности системы на протяжении всего ее срока службы. По сравнению с уровнем оперативного технического обслуживания, уровень регулярного технического обслуживания ниже.

Составим систему дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена для графа:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} P_0(t) = -(3\lambda_{SDC} + 3\lambda_{SUC} + 3\lambda_{DDC} + 3DC\lambda_{SUN} + 3DC\lambda_{DUN} + 3\lambda_{SND} + 3\lambda_{DDN} + 3\lambda_{SUN}(1 - DC) + \\ + 3\lambda_{DUN}(1 - DC) + 3\lambda_{DUC})P_0(t) + \mu_0 P_1(t) + \mu_{SD} P_4(t); \\ \frac{d}{dt} P_1(t) = (3\lambda_{SDN} + 3\lambda_{DDN})P_0(t) - (\mu_0 + \lambda_{DUC} + \lambda_{SUC} + 2\lambda_{SUN} + 2\lambda_{DUN} + 2\lambda_{DDC})P_1(t); \\ \frac{d}{dt} P_2(t) = (3\lambda_{SUN}(1 - DC))P_0(t) + (\lambda_{DUC} + 2\lambda_{DUN} + \lambda_{SUC} + 2\lambda_{SUN} + 2\lambda_{DUN} + 2\lambda_{DDC})P_2(t); \\ \frac{d}{dt} P_3(t) = (3\lambda_{DUN}(1 - DC))P_0(t) - (\lambda_{DUC} + 2\lambda_{DUN} + \lambda_{SUC} + 2\lambda_{DDC} + 2\lambda_{SDN} + 2\lambda_{DDN})P_3(t); \\ \frac{d}{dt} P_4(t) = (3\lambda_{SDC} + 3\lambda_{SUC} + 3\lambda_{DDC} + 3DC\lambda_{SUN} + 3DC\lambda_{DUN})P_0(t) + \\ + (\lambda_{SUC} + 2\lambda_{SUN} + 2\lambda_{DUN} + 2\lambda_{DDC})P_1(t) + (\lambda_{SUC} + 2\lambda_{DDC} + 2\lambda_{SDN} + 2\lambda_{DDN})P_3(t) - \mu_{SD} P_4(t); \\ \frac{d}{dt} P_5(t) = 3\lambda_{DUC} P_0(t) + \lambda_{DUC} P_1(t) + (\lambda_{DUC} + 2\lambda_{DUN})P_2(t) + (\lambda_{DUC} + 2\lambda_{DUN})P_3(t); \end{array} \right.$$

Согласно модели Маркова контроллера Trison, которая представлена на рисунке 38, запишем матрицу перехода состояний. Результат представлен на рисунке 39.

$$A(s) := \left[\begin{array}{ccc|ccc} s + 3\lambda_{SDC} + 3\lambda_{SUC} + 3\lambda_{DDC} + 3DC\lambda_{SUN} + 3DC\lambda_{DUN} + 3\lambda_{SDN} + 3\lambda_{DDN} + 3\lambda_{SUN}(1 - DC) + 3\lambda_{DUN}(1 - DC) + 3\lambda_{DUC} & & & -\mu_0 & & \\ & -(3\lambda_{SDN} + 3\lambda_{DDN}) & & & s + \mu_0 + 2\lambda_{SUN} + 2\lambda_{DUN} + 2\lambda_{DDC} + \lambda_{DUC} & \\ & -3\lambda_{SUN}(1 - DC) & & & 0 & \\ & -3\lambda_{DUN}(1 - DC) & & & 0 & \\ & & -(3\lambda_{SDC} + 3\lambda_{SUC} + 3\lambda_{DDC} + 3\lambda_{SUN}DC + 3\lambda_{DUN}DC) & & & -(\lambda_{SUC} + 2\lambda_{SUN} + 2\lambda_{DUN} + 2\lambda_{DDC}) \\ & & -3\lambda_{DUC} & & & -\lambda_{DUC} \\ \hline & 0 & & 0 & & -\mu_{SD} & 0 \\ & 0 & & 0 & & 0 & 0 \\ s + \lambda_{SUC} + 2\lambda_{SUN} + 2\lambda_{DUN} + 2\lambda_{DDC} + \lambda_{DUC} + 2\lambda_{DUN} & & & 0 & & 0 & 0 \\ & 0 & & s + \lambda_{SUC} + 2\lambda_{DDC} + 2\lambda_{SDN} + 2\lambda_{DDN} + \lambda_{DUC} + 2\lambda_{DUN} & & 0 & 0 \\ & -(\lambda_{SUC} + 2\lambda_{SUN} + 2\lambda_{DUN} + 2\lambda_{DDC}) & & 0 & & \mu_{SD} & 0 \\ & -(\lambda_{DUC} + 2\lambda_{DUN}) & & -(\lambda_{DUC} + 2\lambda_{DUN}) & & 0 & s \end{array} \right]$$

Рисунок 39 – Матрица перехода состояний

Решим систему уравнений с помощью пакета Mathcad (рисунок 40).

Find($P_0, P_1, P_2, P_3, P_4, P_5$) →

$$\left(\begin{array}{l} \frac{8.0e15 \cdot s^4 + 3.2745e16 \cdot s^3 + 2.4173138035e16 \cdot s^2 + 4.952241940485375e15 \cdot s}{8.0e15 \cdot s^4 + 7.7145e16 \cdot s^3 + 1.87095363835e17 \cdot s^2 + 7.7082523976520375e16 \cdot s + 2.534288799454809e15} \\ \frac{3.6963e16 \cdot s^3 + 1.3628442915e17 \cdot s^2 + 5.6347263081376875e16 \cdot s}{8.0e15 \cdot s^4 + 7.7145e16 \cdot s^3 + 1.87095363835e17 \cdot s^2 + 7.7082523976520375e16 \cdot s + 2.534288799454809e15} \\ \frac{3.2856e15 \cdot s^3 + 1.188927216e16 \cdot s^2 + 4.2861509192505e15 \cdot s}{8.0e15 \cdot s^4 + 7.7145e16 \cdot s^3 + 1.87095363835e17 \cdot s^2 + 7.7082523976520375e16 \cdot s + 2.534288799454809e15} \\ \frac{8.214e14 \cdot s^3 + 7.2332484e14 \cdot s^2 + 1.58277816122625e14 \cdot s}{8.0e15 \cdot s^4 + 7.7145e16 \cdot s^3 + 1.87095363835e17 \cdot s^2 + 7.7082523976520375e16 \cdot s + 2.534288799454809e15} \\ \frac{1.044288e18 \cdot s^3 + 4.27440132e18 \cdot s^2 + 3.15546474653676e18 \cdot s + 6.46445853943198911e17}{2.56e18 \cdot s^4 + 2.46864e19 \cdot s^3 + 5.98705164272e19 \cdot s^2 + 2.466640767248652e19 \cdot s + 8.1097241582553888e17} \\ \frac{2.1312e16 \cdot s^3 + 2.13662568e17 \cdot s^2 + 4.7288412363444e17 \cdot s + 1.64526561882339969e17}{2.56e18 \cdot s^4 + 2.46864e19 \cdot s^3 + 5.98705164272e19 \cdot s^2 + 2.466640767248652e19 \cdot s + 8.1097241582553888e17} \end{array} \right)$$

Рисунок 40 – Решение системы уравнений при DC = 1

Найдем вероятность безотказной работы системы 2oo2D, то есть вероятность нахождения системы в изначальном состоянии. Построим данную зависимость от времени (рисунок 41).

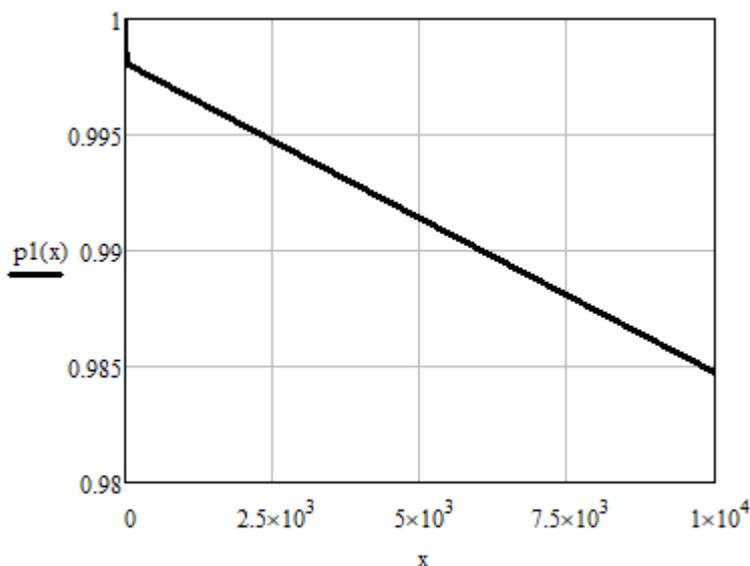


Рисунок 42 – Вероятность нахождения системы в нулевом состоянии (DC=1)

На рисунке 43 показана зависимость функциональной безопасности PFDavg от значений входного параметра DC = 1. При выявлении всех опасных

отказов ($DC = 1$) модель показывает асимптотическое стремление к устойчивому значению.

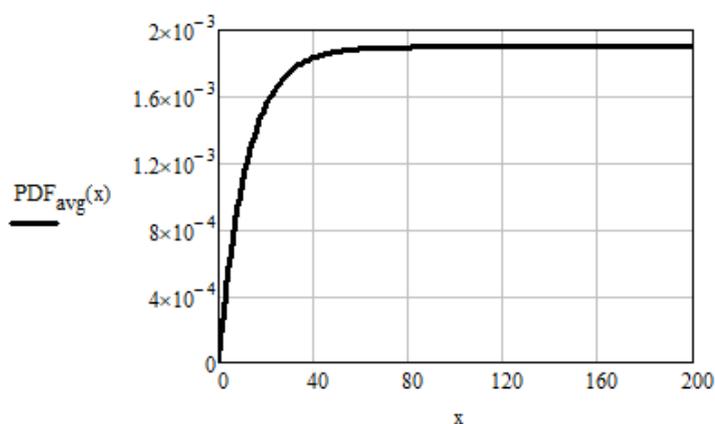


Рисунок 43 – Зависимость PFD_{avg} от входного параметра ($DC = 1$)

Результаты исследования показывают, что при деградации система уже соответствует уровню SIL2 вместо уровня SIL3 (для архитектуры 2oo3D).

7.3 Расчет безопасности контроллера Tricon, деградировавшего до уровня 1oo1D

При полной деградации контроллера Tricon 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.

Одноканальные системы противоаварийной защиты обычно включают в себя датчики, контроллеры и исполнительные устройства. Датчики служат для непрерывного мониторинга параметров процесса и обнаружения отклонений от нормального состояния. Контроллеры анализируют данные от датчиков и принимают решения о необходимости вмешательства. Исполнительные устройства выполняют команды контроллера, например, отключают опасное оборудование или активируют аварийные системы.

Одноканальные системы противоаварийной защиты обладают простой архитектурой и низкой стоимостью в сравнении с многоканальными системами. Однако, они не обеспечивают высокий уровень надежности и безотказности, поскольку отказ одного элемента может привести к отключению всей системы и потенциальному возникновению аварии. Поэтому для повышения надежности ОКСПЗ часто используются дополнительные меры, такие как резервирование или использование автоматической самодиагностики.

Выбор между одноканальными и многоканальными системами противоаварийной защиты зависит от конкретных требований безопасности и рисков, связанных с процессом. В случаях, где допустимы некритические отказы или система имеет ограниченное воздействие на окружающую среду и персонал, одноканальные системы могут быть экономически оправданы. Однако, в более критических и сложных процессах, где высокая надежность и безотказность являются приоритетом, предпочтение отдается многоканальным системам, способным обеспечить резервирование и параллельную обработку данных для повышения надежности.

Применения структуры 1oo1D – это контур защиты, сертифицируемый TUV по уровню безопасности RC6/SIL3, который в концептуальном виде показан на рисунке 44. [1]

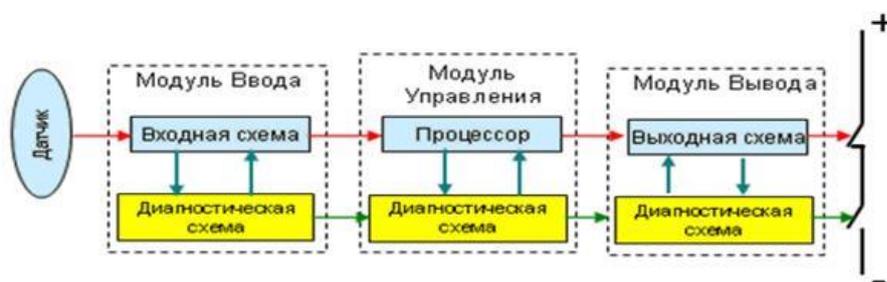


Рисунок 44 – Резервирование 1oo1D

Модуль ввода служит для приема информации о состоянии процесса. Он подключается к различным датчикам и сенсорам, которые постоянно мониторят параметры процесса, такие как давление, температура, уровень и

другие важные переменные. Модуль ввода собирает данные от этих датчиков и передает их на обработку процессору.

Процессор является центральным элементом контроллера и выполняет обработку собранных данных. Он осуществляет анализ и контроль параметров процесса, принимает решения на основе предварительно заданных правил и логики работы системы. Процессор также отвечает за выполнение необходимых команд и управляющих сигналов, направленных на модуль вывода.

Модуль вывода является ответственным за выполнение действий, необходимых для реагирования на изменения в процессе. Он контролирует и управляет исполнительными устройствами, такими как клапаны, насосы, моторы и другое оборудование, чтобы поддерживать желаемые условия процесса. Модуль вывода принимает указания от процессора и активирует соответствующие устройства для реализации необходимых действий. Высокий уровень безопасности технологического процесса достигается на всех стадиях процесса деградации за счёт развитых функций самодиагностики, включающих, например, измерения тока и напряжения, временных параметров, параметров синхронизации сигналов, проверку целостности передаваемых и обрабатываемых данных.

Составим граф модели Маркова для архитектуры 1001D, учитывая, что система будет иметь четыре состояния (рисунок 45).

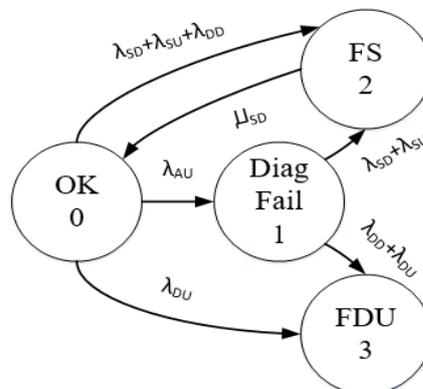


Рисунок 45 – Модель Маркова контроллера Tricon, деградировавшего до уровня 1001D

В ходе функционирования схемы 1oo1D могут произойти следующие виды отказов:

- опасные обнаруженные отказы (λ_{DD});
- опасные необнаруженные отказы (λ_{DU});
- безопасные обнаруженные отказы (λ_{SD});
- безопасные необнаруженные отказы (λ_{SU});
- безопасный отказ диагностической системы (λ_{AU}).

Стоит понимать разницу, что безопасный отказ (или безопасная ситуация отказа) происходит, когда система или компонент перестает функционировать или выполнять свою предназначенную задачу, но не представляет непосредственной угрозы для безопасности людей, оборудования или окружающей среды. В таких случаях система обычно активизирует предусмотренные меры безопасности или переходит в безопасное состояние, чтобы предотвратить возможные аварийные ситуации. Опасный отказ (или опасная ситуация отказа), напротив, представляет непосредственную угрозу для безопасности и может привести к аварийным ситуациям, повреждению оборудования или даже потенциальным повреждениям людей. Такой отказ может привести к нарушению нормального функционирования системы и вызвать нежелательные последствия.

Рассмотрим состояния, характеризующие работоспособность канала, показанные на рисунке 45:

- состояние 0 является желаемым состоянием, представляющим собой работоспособное состояние канала без отказов. В этом состоянии канал выполняет свои функции надежно и без каких-либо проблем;
- состояние 1 описывает ситуацию, когда диагностическая система не обнаруживает потери определенной функциональности. Хотя эта потеря не оказывает прямого влияния на безопасность системы, она может влиять на способность системы обнаружить будущие возможные отказы, такие как отказ самой диагностической схемы. Важно отметить, что переход в состояние 1 не может быть обнаружен средствами внутренней диагностики;

– состояние 2 представляет собой аварийное состояние контроллера с диагностируемой системой. В этом состоянии диагностическая система обнаруживает наличие отказа, и система переходит в безопасное состояние отказа. Это позволяет предотвратить возможные опасные ситуации и обеспечить безопасность системы и ее окружающей среды.;

– состояние 3 характеризуется опасными и диагностируемыми отказами. В этом состоянии система сталкивается с серьезными проблемами, которые представляют опасность и не могут быть самодиагностированы. Распознавание и обнаружение отказов СПАЗ требует внешних методов и инструментов, так как сама система не способна справиться с этой задачей внутренними средствами.

Добавим в модель Маркова, представленную на рисунке 46, диагностический охват DC.

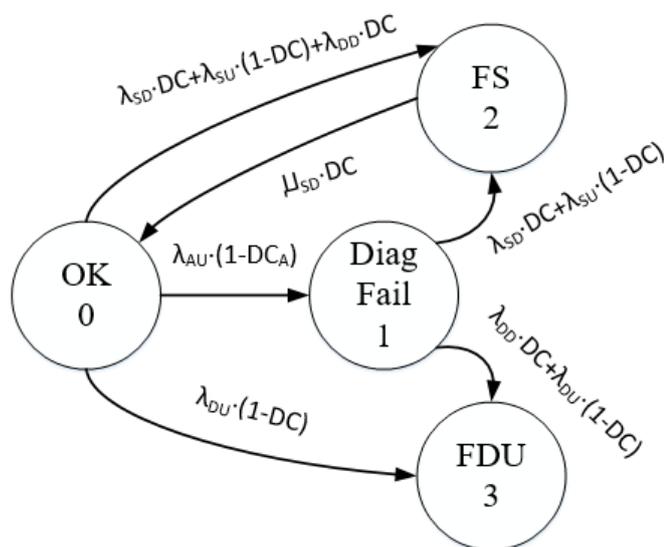


Рисунок 46 – Модель Маркова контроллера Tricon с добавленным диагностическим охватом

Составим систему, содержащую 4 дифференциальных уравнений, каждое из которых соответствует одному из состояний, представленных на рисунке 46:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} P_0(t) = -(\lambda_{SD}DC + \lambda_{SU}(1-DC) + \lambda_{DD}DC + \lambda_{DU}(1-DC) + \lambda_{AU}(1-DC_A))P_0(t) + \mu_{SD}DC \cdot P_2(t); \\ \frac{d}{dt} P_1(t) = -(\lambda_{SD}DC + \lambda_{SU}(1-DC) + \lambda_{DD}DC + \lambda_{DU}(1-DC))P_1(t) + \lambda_{AU}(1-DC_A)P_0(t); \\ \frac{d}{dt} P_2(t) = (\lambda_{SD}DC + \lambda_{SU}(1-DC) + \lambda_{DD}DC)P_0(t) - \mu_{SD}DC \cdot P_2(t) + (\lambda_{SD}DC + \lambda_{SU}(1-DC))P_1(t); \\ \frac{d}{dt} P_3(t) = (\lambda_{DU}(1-DC))P_0(t) + (\lambda_{DD}DC + \lambda_{DU}(1-DC))P_1(t). \end{array} \right.$$

Перейдем в область Лапласа, используя преобразование Лапласа:

$$\left\{ \begin{array}{l} s \cdot p_0(s) = -(\lambda_{SD}DC + \lambda_{SU}(1-DC) + \lambda_{DD}DC + \lambda_{DU}(1-DC) + \lambda_{AU}(1-DC_A))p_0(s) + \mu_{SD}DC \cdot p_2(s) + 1; \\ s \cdot p_1(s) = -(\lambda_{SD}DC + \lambda_{SU}(1-DC) + \lambda_{DD}DC + \lambda_{DU}(1-DC))p_1(s) + \lambda_{AU}(1-DC_A)p_0(s); \\ s \cdot p_2(s) = (\lambda_{SD}DC + \lambda_{SU}(1-DC) + \lambda_{DD}DC)p_0(s) - \mu_{SD}DC \cdot p_2(s) + (\lambda_{SD}DC + \lambda_{SU}(1-DC))p_1(s); \\ s \cdot p_3(s) = (\lambda_{DU}(1-DC))p_0(s) + (\lambda_{DD}DC + \lambda_{DU}(1-DC))p_1(s). \end{array} \right.$$

Решим систему уравнений с помощью пакета Mathcad и построим графики вероятности нахождения системы в работоспособном состоянии (0-состояние) (рисунок 47).

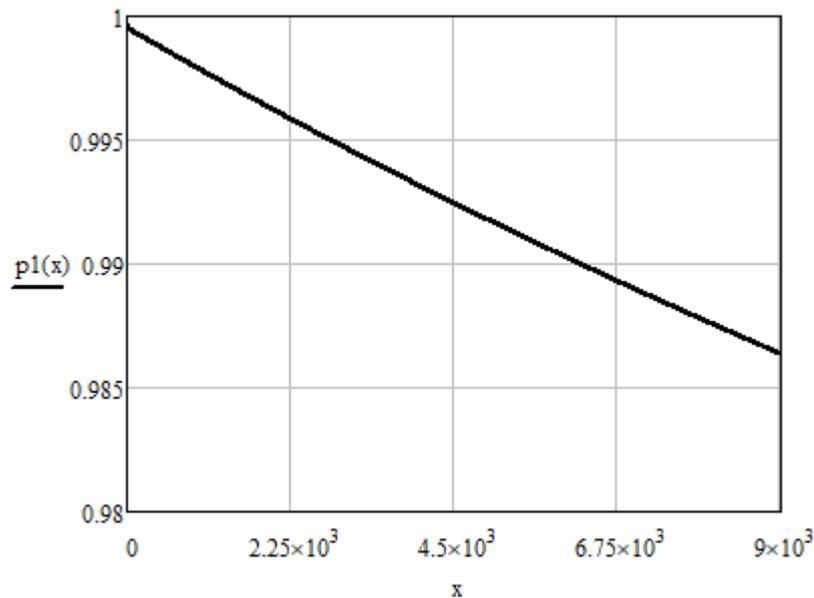


Рисунок 47 – График вероятности нахождения системы в работоспособном состоянии (DC=1)

Примем коэффициент диагностического охвата: 0.2, 0.5; 0.7; 0.9. Варьируя DC, построим снова график нахождения системы в состоянии 0 (рисунок 48).

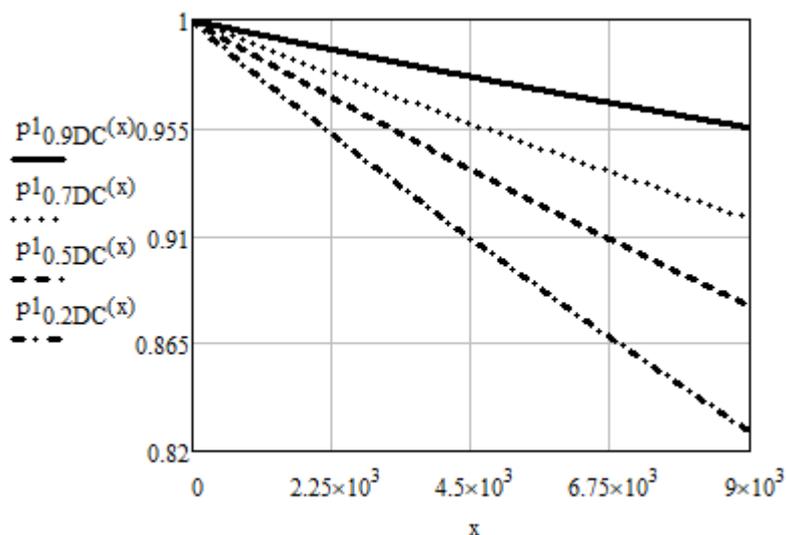


Рисунок 48 – График вероятности нахождения системы в работоспособном состоянии при изменении диагностического охвата

Согласно графикам выше, составим таблицу 12 с численными значениями ВБР и PFD.

Таблица 12 – Показатели безопасности модели 1oo1D через 1 год при различных значениях диагностического охвата

Значение DC	Вероятность нахождения системы в работоспособном состоянии год работы	PFD _{avg} через год работы
0.9	0.955	0.045
0.7	0.917	0.083
0.5	0.881	0.119
0.2	0.823	0.177

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о влиянии диагностического охвата на вероятность отказа (PDF) для архитектуры 1oo1D. Вариант архитектуры 1oo1D представляет собой систему с двумя параллельными контроллерами, где каждый контроллер имеет свою собственную диагностическую систему.

Исследование показало, что при достаточно широком диагностическом охвате, когда обе диагностические системы способны обнаружить отказы с

высокой надежностью, вероятность отказа системы сокращается значительно, исходя из таблицы 12 можно сделать вывод, что в течении года данная архитектура может прослужить без останова процесса.

Таким образом, чем шире диагностический охват и чем надежнее диагностические системы в каждом контроллере, тем ниже вероятность отказа системы в целом. Это подтверждает важность применения достаточно надежных и эффективных диагностических систем в архитектуре 1oo1D для обеспечения высокой надежности и безопасности операций.

8 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности научно-исследовательского проекта, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации.

Достижение цели обеспечивается путем решения следующих задач:

- разработка общей экономической идеи проекта, формирование концепции проекта;
- организация работ по научно-исследовательскому проекту;
- определение возможных альтернатив проведения научных исследований;
- планирование научно-исследовательских работ;
- оценки коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

8.1 Предпроектный анализ

Потенциальные потребители результатов исследования.

Система измерений количества и показателей качества нефти позволяет нефтедобывающей или нефтеперерабатывающей организации производить автоматизированный коммерческий и качественный учет товарной или сырой нефти, поэтому потенциальными потребителями разработки могут быть компании, задействованные в нефтегазовой отрасли, в частности нефтеперерабатывающие заводы и приемо-сдаточные пункты, находящиеся на границе разделения сфер влияния нескольких компаний.

Для более точного определения первичного целевого рынка следует произвести разделение по основным характеристикам. Произведем исследование сегментов рынка по следующим критериям: размер предприятия и его виды деятельности. Сокращенные названия компаний: «НГИ» - ООО «Нефтегазинжиниринг», «НИПИ» - ОАО «ТомскНИПИнефть», «ЭЛ» - ЗАО «ЭлеСи». Результаты сегментирования рынка представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Карта сегментирования рынка

Размер предприятия	Направление деятельности			
	Программирование логических контроллеров для АСУ ТП	Разработка проектной и эксплуатационной документации	Разработка и внедрение SCADA-систем	Разработка СПАЗ
Крупная	А, Б, В	А, Б	А, Б	А
Средняя	А, Б, В	А, Б, В	А, Б	А
Мелкая	А, В	А, В, Б	А, В, Б	А, В

Исходя из карты сегментирования, лучше всего отдать предпочтение сегментам крупных и средних предприятий-заказчиков для разработки и внедрения системы противоаварийной защиты СИКН.

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Данный анализ целесообразно проводить с помощью оценочной карты для сравнения конкурентных технических решений. Сравнение проводится между разрабатываемой системой и системами сторонних компаний. В качестве систем аналогов можно привести АСУ ТП СИКН, разрабатываемую подрядчиком ООО «Системы нефть и газ» и АСУ ТП СИКН ООО «Прософт Системы». Оценочная карта анализа представлена в таблице 14.

В представленной таблице 14 B_{ϕ} , K_{ϕ} – баллы и конкурентоспособность текущей разработки, B_{k1} , K_{k1} – баллы и конкурентоспособность существующего технического решения ООО «Системы нефть и газ», а B_{k2} , K_{k2} – баллы и конкурентоспособность проекта компании ООО «Прософт Системы».

Таблица 14 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1. Экономичность	0,17	8	4	8	1,36	0,68	1,36
2. Надежность	0,14	9	8	7	1,26	1,12	0,98
3. Простота монтажа	0,19	7	6	6	1,33	1,14	1,14
4. Простота в эксплуатации	0,08	8	9	9	0,64	0,72	0,72
5. Функциональная мощность	0,20	10	2	10	2,00	0,40	2,00
6. Безопасность	0,06	8	6	10	0,48	0,36	0,6
7. Удобство в эксплуатации	0,16	9	5	8	1,44	0,80	1,28
Итого	1	59	40	58	8,51	5,22	8,08
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Цена	0,34	6	9	5	2,04	3,06	1,70
2. Предполагаемый срок эксплуатации	0,25	8	7	8	2,00	1,75	2,00
3. Послепродажное обслуживание	0,12	9	4	5	1,08	0,48	0,60
4. Уровень проникновения на рынок	0,18	7	10	3	0,84	1,20	0,36
5. Конкурентоспособность продукта	0,11	7	8	6	0,77	0,88	0,66
Итого	1	37	38	26	6,73	7,37	5,32

Анализируя оценочную карту, можно прийти к заключению, что текущий проект хоть и уступает в экономической эффективности проекту ООО «Системы нефть и газ», однако превосходит своих конкурентов по техническим характеристикам. Можно выделить следующие конкурентные преимущества разработки: удобство в эксплуатации, надежность и предполагаемый срок эксплуатации.

FAST-анализ.

FAST-анализ выступает как синоним функционально-стоимостного анализа. Суть этого метода базируется на том, что затраты, связанные с созданием и использованием любого объекта, выполняющего заданные функции, состоят из необходимых для его изготовления и эксплуатации и дополнительных, функционально неоправданных, излишних затрат, которые

возникают из-за введения ненужных функций, не имеющих прямого отношения к назначению объекта, или связаны с несовершенством конструкции, технологических процессов, применяемых материалов методов организации труда и т.д.

Проведение FAST-анализа включает в себя шесть стадий, приведенных ниже.

Стадия 1 – выбор объекта FAST-анализа. В качестве объекта FAST-анализа выберем систему противоаварийной защиты (СПАЗ) системы измерения количества и показателей качества нефти (СИКН). Данная система представляет собой совокупность средств измерения, исполнительных механизмов и контроллерного оборудования, позволяющих повысить надежность и безопасность установки. Стоит также отметить, что в работе рассматривается лишь часть СИКН, а именно блок измерительных линий (БИЛ), выполняющий функцию вычисления погрешности количества нефти.

Стадия 2 – описание главной, основных и вспомогательных функций, выполняемых объектом. В рамках данной стадии FAST-анализа объект исследования рассматривается с точки зрения его функционального устройства. Классификация функций, выполняемых объектом исследования, представлена в таблице 15.

Таблица 15 – Классификация функций, выполняемых объектом исследования

Наименование детали (узла, процесса)	Количество деталей на узел	Выполняемая функция	Ранг функции		
			Главная	Основная	Вспомогательная
Регулирующий клапан с электроприводом и блоком управления	1	Обеспечивает управление расходом нефти в трубопроводе	X		
Преобразователь давления	3	Обеспечивает контроль давления нефти		X	
Преобразователь температуры	3	Обеспечивает контроль температуры нефти		X	

Продолжение таблицы 15

Наименование детали (узла, процесса)	Количество деталей на узел	Выполняемая функция	Ранг функции		
			Главная	Основная	Вспомогательная
Кориолисов преобразователь расхода	2	Обеспечивает контроль количества нефти		X	
Кран шаровый	10	Перекрытие потока нефти в трубопроводе		X	
Термометр	3	Отображение температуры нефти			X
Манометр	3	Отображение давления нефти			X

Стадия 3 – определение значимости выполняемых функций объектом. Для проведения оценки значимости функций необходимо воспользоваться методом расстановки приоритетов, в основу которого положено расчетно-экспертное определение значимости каждой функции. На первом этапе построим матрицу смежности функций (таблица 16). Примечание для таблицы 4: «<» – менее значимая; «=» – одинаковые функции по значимости; «>» – более значимая.

Таблица 16 – Матрица смежности

	Функция 1	Функция 2	Функция 3	Функция 4	Функция 5	Функция 6	Функция 7
Функция 1	=	>	>	>	>	>	>
Функция 2	<	=	=	<	=	>	>
Функция 3	<	=	=	<	=	>	>
Функция 4	<	>	>	=	>	>	>
Функция 5	<	=	=	<	=	>	>
Функция 6	<	<	<	<	<	=	=
Функция 7	<	<	<	<	<	=	=

На втором этапе матрица смежности преобразуется в матрицу количественных соотношений функций (таблица 17). При этом происходит следующая замена символов на числовые значения: «<» – 0.5; «=» – 1; «>» – 1.5.

Таблица 17 – Матрица количественных соотношений функций

	Функция 1	Функция 2	Функция 3	Функция 4	Функция 5	Функция 6	Функция 7	Итого
Функция 1	1	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	10
Функция 2	0.5	1	1	0.5	1	1.5	1.5	7
Функция 3	0.5	1	1	0.5	1	1.5	1.5	7
Функция 4	0.5	1.5	1.5	1	1.5	1.5	1.5	9
Функция 5	0.5	1	1	0.5	1	1.5	1.5	7
Функция 6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1	1	4.5
Функция 7	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1	1	4.5
								$\Sigma=49$

В рамках третьего этапа определяются значимости функций путем деления балла каждой функции на сумму баллов по всем функциям, результаты расчета данных значений представлены в таблице 18.

Таблица 18 – Относительные значимости для каждой функции

Наименование функции	Относительная значимость функции
Функция 1	0.204
Функция 2	0.143
Функция 3	0.143
Функция 4	0.183
Функция 5	0.143
Функция 6	0.092
Функция 7	0.092
Итого	1

Стадия 4 – анализ стоимости функций, выполняемых объектом исследования. Данная стадия включает в себя применение методов оценки

уровня затрат на выполнение каждой функции. Расчет стоимости функций приведен в таблице 19.

Таблица 19 – Определение стоимости функций, выполняемых объектом

Наименование детали (узла, процесса)	Количество деталей на узел	Выполняемая функция	Себестоимость за ед., руб	Общая стоимость, руб
Регулирующий клапан с электроприводом и блоком управления	1	Обеспечивает управление расходом нефти в трубопроводе	240000	240000
Преобразователь давления	3	Обеспечивает контроль давления нефти	28500	85500
Преобразователь температуры	3	Обеспечивает контроль температуры нефти	27500	82500
Кориолисов преобразователь расхода	2	Обеспечивает контроль количества нефти	485000	970000
Кран шаровый	10	Перекрытие потока нефти в трубопроводе	20000	200000
Термометр	3	Отображение температуры нефти	6500	19500
Манометр	3	Отображение давления нефти	8300	24900

Суммарные затраты на функции составляют 1622400 руб. Из полученных выше данных определяются относительные затраты на функцию путем деления стоимостного значения каждой функции на общую сумму по всем функциям, результаты расчета данных значений представлены в таблице 20.

Таблица 20 – Значения относительных затрат для каждой функции

Наименование функции	Относительная стоимость функции
Функция 1	0.142
Функция 2	0.048
Функция 3	0.033
Функция 4	0.633
Функция 5	0.118
Функция 6	0.012
Функция 7	0.014
Итого	1

Стадия 5 – построение функционально-стоимостной диаграммы объекта и ее анализ. Информация, собранная в рамках предыдущих стадий, на данном этапе обобщается в виде функционально-стоимостной диаграммы (ФСД), она представлена на рисунке 49.

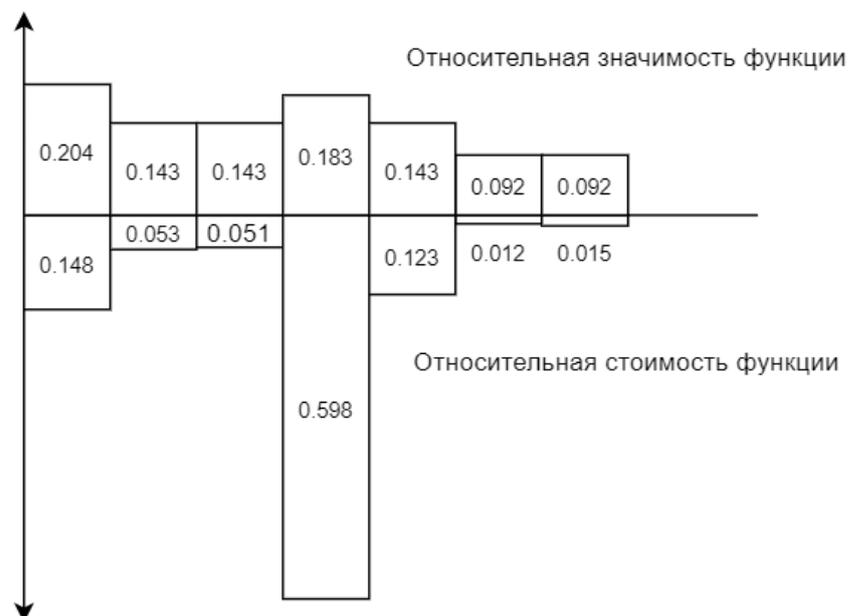


Рисунок 49 – Функционально-стоимостная диаграмма

Исходя из рисунка 1 можно сделать вывод, что имеется существенное рассогласование по функции 4, так как она занимает порядка 60% от всех затрат на функцию (из-за роста цен на зарубежное оборудование), при этом ее относительная стоимость в разы больше, чем значимость. Также можно заметить, что для остальных функций их относительные значимости имеют величины большие, чем их относительные стоимости, соответственно, данные диспропорции имеют положительный эффект и не требуют ликвидации. Соответственно, ликвидации диспропорций требует только функция 4.

Стадия 6 – оптимизация функций, выполняемых объектом. На данной стадии проводятся конкретные шаги, имеющие в себе цель получить экономию затрачиваемых на функцию средств. Функция 4 является основной для данной системы, при этом она отличаются повышенными относительными затратами ввиду своей высокой себестоимости, при этом, как было сказано ранее, остальные функции имеют, напротив, большую финансовую выгоду в

сравнении с собственной значимостью. Можно заметить, что в совокупности функции 1, 2, 3, 5, 6, 7 своими низкими затратами ликвидируют особо затратную функцию. Оптимизировать функцию 4 в данном случае не представляется возможно из-за конструкционных особенностей кориолисова массомера.

Проведение FAST-анализа показало, что для исследуемого объекта совокупность его функций по значимости и стоимости затрат находится в приемлемом состоянии, при этом наблюдаются как «положительные», так и «отрицательные» диспропорции, которые уравнивают друг друга при их сравнении. Оптимизация функций с диспропорциями в данном случае не может быть проведена по вышеуказанным причинам.

SWOT-анализ.

Для начала процесса SWOT-анализа на первом этапе требуется выделить сильные, слабые стороны проекта, возможности и угрозы, которые проявились или могут появиться в его внешней среде, и занести их в таблицу 21.

Таблица 21 – Упрощенная матрица SWOT

Сильные стороны научно-исследовательского проекта	Слабые стороны научно-исследовательского проекта
С1. Экономичность и энергоэффективность проекта С2. Экологичность технологии монтажа. С3. Наличие бюджетного финансирования С4. Квалифицированный инженерный персонал С5. Предоставление рассрочек	Сл1. Отсутствие у потребителей квалифицированных кадров Сл2. Отсутствие контроля поставок сырья. Сл3. Отсутствие прототипа разработки. Сл4. Отсутствие необходимого оборудования Сл5. Ограниченное финансирование
Возможности	Угрозы
В1. Привлечение потребителя за счет новшеств В2. Использование существующего программного обеспечения В3. Снижение таможенных пошлин на сырье и материалы, используемые при научных исследованиях В4. Использование специалистов ВУЗа по необходимым специальностям В5. Повышение стоимости конкурентных разработок.	У3. Уменьшение платежеспособности потребителей У2. Неожиданная отмена поставок сырья и материалов У3. Введения дополнительных государственных требований к сертификации продукции У4. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства У5. Наличие активных конкурентов на рынке

Найдем соответствие различных сторон между собой и выделить знаком «+» сильное соответствие, знаком «-» слабое, а «0» – если есть сомнения в том, что поставить. Результаты второго этапа занесем в таблицы 22-25.

Таблица 22 – Интерактивная матрица проекта (сильные стороны и возможности)

		Сильные стороны проекта				
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	B1	+	+	-	+	+
	B2	+	0	-	0	+
	B3	0	-	+	0	-
	B4	-	+	+	+	0
	B5	+	0	+	0	-

Сильно коррелирующие сильные стороны и возможности проекта: B1C1C2C4C5, B2C1C5, B3C3, B4C2C3C4, B5C3.

Таблица 23 – Интерактивная матрица проекта (слабые стороны и возможности)

		Слабые стороны проекта				
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
	B1	0	-	-	-	-
	B2	-	-	-	-	+
	B3	-	-	-	-	-
	B4	+	-	-	-	-
	B5	-	-	-	-	-

Сильно коррелирующие слабые стороны и возможности проекта: B2Сл5, B4Сл1.

Таблица 24 – Интерактивная матрица проекта (сильные стороны и угрозы)

		Сильные стороны проекта				
Угрозы проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	У1	-	-	+	-	+
	У2	-	-	+	-	-
	У3	+	+	0	+	-
	У4	-	-	-	-	-
	У5	+	+	0	+	+

Сильно коррелирующие сильные стороны и угрозы проекта: У1С3, У2С3С5, У3С1С2С4, У5С1С2С4С5.

Таблица 25– Интерактивная матрица проекта (слабые стороны и угрозы)

		Слабые стороны проекта				
		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
Угрозы проекта	У1	-	+	+	+	-
	У2	-	0	+	-	-
	У3	-	+	+	+	-
	У4	-	-	-	0	+
	У5	-	-	-	-	-

Сильно коррелирующие слабые стороны и угрозы проекта: У1Сл2Сл3Сл4, У2Сл3, У3Сл2Сл3Сл4, У4Сл5.

Для последнего этапа составим итоговую матрицу SWOT-анализа. Представим результаты в виде таблицы 26.

Таблица 26 – SWOT-анализ

		Сильные стороны	Слабые стороны
		<p>С1. Экономичность и энергоэффективность проекта</p> <p>С2. Экологичность технологии монтажа.</p> <p>С3. Наличие бюджетного финансирования</p> <p>С4. Квалифицированный инженерный персонал</p> <p>С5. Предоставление рассрочек</p>	<p>Сл1. Отсутствие у потребителей квалифицированных кадров</p> <p>Сл2. Отсутствие контроля поставок сырья.</p> <p>Сл3. Отсутствие прототипа разработки.</p> <p>Сл4. Отсутствие необходимого оборудования</p> <p>Сл5. Ограниченное финансирование</p>
Возможности	В1. Привлечение потребителя за счет новшеств	<p>В результате анализа выяснилось, что можно привлечь потребителя за счет новшеств, акцентируя внимание на экономичности и энергоэффективности проекта, экологичности технологии монтажа и тд. Использование существующего ПО поможет сэкономить на стоимости проекта и предоставлять рассрочку клиентам.</p>	<p>В результате анализа выяснилось, что можно использовать возможность В2 и В4 для того, чтобы нейтрализовать недостатки Сл5 и Сл1, например, использование существующего ПО даст возможность не тратить лишних средств при ограниченном финансировании.</p>
	В2. Использование существующего программного обеспечения		

Продолжение таблицы 26

		Сильные стороны	Слабые стороны
		<p>С1. Экономичность и энергоэффективность проекта</p> <p>С2. Экологичность технологии монтажа.</p> <p>С3. Наличие бюджетного финансирования</p> <p>С4. Квалифицированный инженерный персонал</p> <p>С5. Предоставление рассрочек</p>	<p>Сл1. Отсутствие у потребителей квалифицированных кадров</p> <p>Сл2. Отсутствие контроля поставок сырья.</p> <p>Сл3. Отсутствие прототипа разработки.</p> <p>Сл4. Отсутствие необходимого оборудования</p> <p>Сл5. Ограниченное финансирование</p>
	В3. Снижение таможенных пошлин на сырье и материалы, используемые при научных исследованиях		
	В4. Использование специалистов ВУЗа по необходимым специальностям		
	В5. Повышение стоимости конкурентных разработок		
Угрозы	У1. Уменьшение платежеспособности потребителей	<p>В результате анализа выяснилось, что таких угроз, как уменьшение платежеспособности населения или наличие конкурентов на рынке можно в первое время избегать, благодаря наличию бюджетного финансирования и предоставлению рассрочек потребителю.</p>	<p>В результате анализа выяснилось, что введение дополнительных государственных требований может привести к дополнительным закупкам приборов и оборудования, которого может не оказаться у поставщиков, а несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования может привести к нехватке финансов.</p>
	У2. Неожиданная отмена поставок сырья и материалов		
	У3. Введение дополнительных государственных требований к сертификации продукции		

Продолжение таблицы 26

		Сильные стороны	Слабые стороны
		С1. Экономичность и энергоэффективность проекта С2. Экологичность технологии монтажа. С3. Наличие бюджетного финансирования С4. Квалифицированный инженерный персонал С5. Предоставление рассрочек	Сл1. Отсутствие у потребителей квалифицированных кадров Сл2. Отсутствие контроля поставок сырья. Сл3. Отсутствие прототипа разработки. Сл4. Отсутствие необходимого оборудования Сл5. Ограниченное финансирование
Угрозы	У4. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства		
	У5. Наличие активных конкурентов на рынке		

Оценка готовности проекта к коммерциализации.

Перечень вопросов приведен в таблице 27.

Таблица 27 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1	Определен имеющийся научно-технический задел	4	4
2	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	4	3
3	Определены отрасли и технологии для предложения на рынке	4	3
4	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	3	3

Продолжение таблицы 27

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
5	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	3	3
6	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	3	3
7	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	4	4
8	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	4	3
9	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	4	4
10	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	4	4
11	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	2	2
12	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	3	3
13	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	4	3
14	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	3	2
15	Проработан механизм реализации научного проекта	4	4
	ИТОГО БАЛЛОВ	53	48

Анализируя данные, представленные в таблице 26, можно заключить, что итоговые значения по обоим критериям попадают в диапазон от 45 до 59. Это указывает на то, что перспективность проекта и уровень знаний разработчика превышают среднее значение, следовательно, разработка имеет перспективы для получения инвестиций. Для улучшения показателей перспективности проекта можно привлечь специализированный персонал,

который будет заниматься реализацией и коммерциализацией научной разработки. Например, имеет смысл воспользоваться услугами бизнес-консультантов или экспертов по экспорту и импорту. Они занимаются разработкой и реализацией стратегий для компаний, которые хотят расширить свою деятельность за пределы своей страны. Эти специалисты обладают знаниями в области международного бизнеса, торговых принципов, международного права, маркетинга и логистики, и помогают организациям успешно проникнуть на зарубежные рынки и наладить международные партнерства.

Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования.

Выделяют ряд методов коммерциализации научных разработок:

- торговля патентными лицензиями;
- передача ноу-хау;
- инжиниринг;
- франчайзинг;
- организация собственного предприятия;
- передача интеллектуальной собственности;
- организация совместного предприятия;
- организация совместных предприятий.

Наиболее перспективным и подходящим методом коммерциализации результатов исследования, полученных в ходе выполнения данной работы, является организация собственного предприятия по производству систем противоаварийной защиты. Этот подход предусматривает создание самостоятельного предприятия, специализирующегося на разработке, производстве и поставке таких систем.

Организация собственного предприятия позволяет иметь полный контроль над всеми этапами процесса производства, начиная с исследования и разработки новых технологий до выпуска готовой продукции на рынок. Это позволяет обеспечить высокое качество и конкурентоспособность систем

противоаварийной защиты, а также гибкость в адаптации к требованиям клиентов и изменениям на рынке.

Также данный метод открывает возможности для расширения бизнеса и увеличения его масштабов. Вместе с производством систем противоаварийной защиты можно предоставлять связанные инженерно-технические услуги, включая установку, обслуживание и консультации по использованию этих систем.

В результате организации собственного предприятия по производству систем противоаварийной защиты достигается максимальная контролируемость и эффективность процесса коммерциализации исследовательских результатов, а также создаются условия для устойчивого развития и роста бизнеса.

8.2 Инициация проекта

Устав научного проекта магистерской работы имеет следующую структуру:

1. Цели и результат проекта

Данный раздел включает в себя информацию о заинтересованных сторонах проекта (таблица 28), иерархии целей проекта и критериях достижения целей (таблица 29).

Таблица 28 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Нефтяные и газовые компании: предприятия, занимающиеся добычей, транспортировкой и переработкой нефти	Системах противоаварийной защиты, чтобы обеспечить безопасность операций и предотвратить аварии, которые могут негативно сказаться на производстве и окружающей среде.
Инженерные компании: Компании, специализирующиеся на проектировании, разработке и установке систем противоаварийной защиты	Готовое техническое решение для внедрения в проект.
Регулирующие органы и органы надзора: Государственные организации и регулирующие органы, такие как государственные агентства по безопасности и охране окружающей среды	Заинтересованы в СПАЗ для обеспечения соблюдения нормативных требований и стандартов безопасности в нефтегазовой промышленности.

Таблица 29 – Цели и результат проекта

Цели проекта	Разработка системы противоаварийной защиты для автоматизированной системы управления системой измерения количества и показателей качества нефти
Ожидаемые результаты проекта	Основной результат проекта состоит в создании комплексной системы противоаварийной защиты для автоматизированной системы управления системой измерения количества и показателей качества нефти. Эта система должна быть способна обнаруживать потенциальные аварийные ситуации и принимать соответствующие меры для предотвращения аварий и минимизации возможных последствий.

Организационная структура проекта

В данном разделе определяются участники рабочей группы, их роли и функции в проекте, а также трудозатраты, результаты представлены в таблице 30.

Таблица 30 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, час
1	Громаков Евгений Иванович, доцент ОАР ИШИТР	Научный руководитель	Координация участников проекта, консультирование по вопросам проекта, предоставление необходимых материалов для реализации проекта	56
2	Васин Андрей Иванович, студент	Исполнитель (Инженер)	Выполнение отдельных видов работ по проекту	512
ИТОГО:				568

8.3 Планирование управления научно-техническим проектом

План проекта.

Определим этапы работ, их исполнителей и распределение нагрузки между исполнителями (таблица 31).

Таблица 31 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб.	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель проекта
Выбор направления исследования	2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
	3	Изучение существующих проектов	Инженер
	4	Календарное планирование работ	Руководитель, инженер
	5	Анализ отобранного материала	Инженер
Теоретическое и экспериментальное исследование	6	Описание технологического процесса	Инженер
	7	Описание требований к системе	Инженер
	8	Выбор программного обеспечения	Руководитель, инженер
	9	Разработка архитектуры системы	Инженер
	10	Расчет PFD для ремонтнопригодных систем	Инженер
	11	Выбор оборудования системы	Инженер
Разработка документации и оформление результатов	12	Написание раздела «финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Инженер
	13	Написание раздела «социальной ответственности»	Инженер
	14	Написание раздела на английском языке	Инженер
	15	Составление пояснительной записки	Инженер
	16	Подготовка презентации дипломного проекта	Инженер
	17	Проверка работы с руководителем	Руководитель, инженер
	18	Подведение итогов	Инженер

Для построения календарного плана графика необходимо найти трудоёмкость каждого этапа работы. Значения ожидаемой трудоёмкости выполнения каждого этапа, длительность работ в рабочих и календарных днях представлены в таблице 32.

Таблица 32 – Временные показатели проведения работ

Код работ	Название этапа работ	Трудоемкость работ			Исполнители	Длительность работ в рабочих днях	Длительность работ в календарных днях
		t _{min}	t _{max}	t _{ож}			
1	Составление и утверждение технического задания	1	2	1,4	1	1,4	2
2	Подбор и изучение материалов по теме	5	8	6,2	1	6,2	9
3	Изучение существующих проектов	2	5	3,2	1	3,2	5
4	Календарное планирование работ	1	2	1,4	2	0,7	1
5	Анализ отобранного материала	6	8	6,8	1	6,8	10
6	Описание технологического процесса	7	9	7,8	1	7,8	12
7	Описание требований к системе	3	4	3,4	1	3,4	5
8	Выбор программного обеспечения	1	2	1,4	2	0,7	1
9	Разработка архитектуры системы	2	3	2,4	1	2,4	4
10	Расчет PFD для ремонтнопригодных систем	2	4	2,8	1	2,8	4
11	Выбор оборудования системы	2	3	2,4	1	2,4	4
12	Написание раздела «финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	3	4	3,4	1	3,4	5
13	Написание раздела «социальной ответственности»	2	4	2,8	1	2,8	4
14	Написание раздела на английском языке	5	7	5,8	1	5,8	9
15	Составление пояснительной записки	2	3	2,4	1	2,4	4
16	Подготовка презентации дипломного проекта	4	7	5,2	1	5,2	8
17	Проверка работы с руководителем	7	10	8,2	2	4,1	6
18	Подведение итогов	2	5	3,2	1	3,2	5
Всего:							98

На основе таблицы 32 построим календарный график план (таблица 33), где штриховкой помечены дни работы руководителя проекта, а черным цветом – дни работы инженера (дипломника).

Таблица 33 – Календарный план-график выполнения проекта

№	Вид работ	Исполнители	Продолжительность выполнения работ														
			февраль			март			апрель			май			июнь		
			3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2			
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	■														
2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	■														
3	Изучение существующих проектов	Инженер		■													
4	Календарное планирование работ	Руководитель, инженер			■												
5	Проведение теоретических расчетов качества нефтепродукта	Инженер			■												
6	Описание технологического процесса	Инженер				■											
7	Описание требований к системе	Инженер					■										
8	Выбор программного обеспечения	Руководитель, инженер						■									
9	Разработка архитектуры системы	Инженер						■									
10	Расчет PFD для ремонтнопригодных систем	Инженер							■								
11	Выбор оборудования системы	Инженер								■							
12	Написание раздела «финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Инженер									■						
13	Написание раздела «социальной ответственности»	Инженер										■					
14	Написание раздела на английском языке	Инженер											■				
15	Составление пояснительной записки	Инженер												■			
16	Подготовка презентации дипломного проекта	Инженер													■		
17	Проверка работы с руководителем	Инженер, руководитель														■	
18	Подведение итогов	Инженер															■

■ – научный руководитель

■ – инженер

На выполнение указанных работ потребовалось 98 календарных дней. Для проведения научного исследования был разработан календарный план-график, включающий 18 этапов работ, которые последовательно выполнялись с февраля по июнь 2023 года.

Бюджет научного исследования.

В таблице 34 отражены все затраты по статьям для трех вариантов исполнения

Таблица 34 – Группировка затрат по статьям

Вид работ	Статьи					
	Сырьё, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты, руб.	Специальное оборудование для научных работ, руб.	Основная заработная плата, руб.	Отчисления на социальные нужды, руб.	Накладные расходы, руб.	Итого плановая стоимость, руб.
1	72316	15670	144990	43497	115992	392465
2	96330	15670	144990	43497	115992	416479
3	86683	15670	144990	43497	115992	406832

В таблице 35 приведены материальные затраты для текущего исполнения и сравнительных исполнений на основе подобранных аналогов.

Таблица 35 – Расчет материальных затрат для трех видов работ

Текущее исполнение				
Наименование	Марка, размер	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Электрический кабель	1 м	20	46,9	938
Кабель симметричный для промышленного интерфейса RS-485	1 м	20	137	2740
Кабель SIMATIC NET, Profibus	1 м	30	213	6390
ПО Simulink	Matlab	1	7520	7520
ПО Mathcad	-	1	13005	13005
Компьютер	Lenovo	1	31690	31690
Принтер	HP	1	6590	6590
Всего за материалы				68873
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)				3443
Итого по статье $Z_{мз}$				72316

Продолжение таблицы 35

Сравнительное исполнение 1				
Наименование	Марка, размер	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Электрический кабель	1 м	20	56,9	1138
Кабель симметричный для промышленного интерфейса RS-485	1 м	20	127	2540
Кабель SIMATIC NET, Profibus	1 м	30	245	7350
ПО Simulink	Matlab	1	7520	7520
ПО Mathcad	-	1	13005	13005
Компьютер	DELL	1	51690	51690
Принтер	Pantum	1	8500	8500
Всего за материалы				91743
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)				4587
Итого по статье З _{мз}				96330
Сравнительное исполнение 2				
Наименование	Марка, размер	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Электрический кабель	1 м	20	78	1560
Кабель симметричный для промышленного интерфейса RS-485	1 м	20	147	2940
Кабель SIMATIC NET, Profibus	1 м	30	201	6030
ПО Simulink	Matlab	1	7520	7520
ПО Mathcad	-	1	13005	13005
Компьютер	HP	1	41000	41000
Принтер	Canon	1	10500	10500
Всего за материалы				82555
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)				4128
Итого по статье З _{мз}				86683

Произведем необходимые расчеты расходов на оборудование, устанавливаемое на блок измерительных линий системы измерения количества и качества нефти (таблица 36). В общей стоимости оборудования стоит учесть как количество единиц оборудования, так и затраты на доставку и монтаж в размере 15 % от цены на оборудование.

Таблица 36 – Расчет затрат по статье «Спецоборудование для научных работ»

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, тыс.руб.	Общая стоимость оборудования, тыс.руб.
1.	Расходомер кориолисов KROHNE OPTIMAS7300 T 80	2	485,0	970,0
2.	Преобразователь давления измерительный, модель Serabar M PMP41- FE23U2P11MP	3	28,5	85,5
3.	Преобразователь сопротивления платиновый, серия TR 10	3	27,5	82,5
4.	Контроллер противоаварийной защиты Triconex Tri-gr	1	351,0	351,0
5.	Кран шаровый	10	20,0	200,0
6.	Регулирующий клапан с блоком управления Сократ-РЗ	1	240,0	240,0
7.	Манометр ТМ6	3	8,3	24,9
8.	Термометр	3	6,5	19,5
9.	Искробезопасный барьер ET-420	3	14,0	42,0
Всего за спецоборудование				2015.4
Расходы по доставке и монтажу (15%)				302.3
Итого по статье $Z_{\text{сп}}$				2317.7

Затраты на спецоборудование $Z_{\text{сп}}$ составляют 2317.7 тыс.руб. Стоимость оборудования, используемого при выполнении конкретного НТИ и имеющегося в данной научно-технической организации, учитывается в калькуляции в виде амортизационных отчислений (таблица 37).

Таблица 37 – Амортизация оборудования

№ оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, тыс.руб.	Срок полезного использования	Норма амортизации, %	Годовая амортизация	Ежемесячная амортизация	Амортизация с учетом количества оборудования
1.	2	485.0	10	10	48.5	4.04	8.08
2.	3	28.5	15	6.67	1.9	0.16	0.48
3.	3	27.5	15	6.67	1.83	0.15	0.45
4.	1	351.0	10	10	35.1	2.93	2.93
5.	10	20.0	20	5	1	0.08	0.8
6.	1	240.0	10	10	24	2.00	2.00
7.	3	8.3	8	12.5	1.04	0.09	0.27
8.	3	6.5	8	12.5	0.81	0.07	0.21
9.	3	14.0	8	12.5	1.75	0.15	0.45
Итого (тыс. руб.):							15.67

Тогда стоимость оборудования, исходя из амортизации составляет 15670 руб.

Для расчета среднедневной заработной платы понадобится величина действительного годового фонда рабочего времени персонала (таблица 38), при этом учитывается 5-дневная рабочая неделя.

Таблица 38 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	67	67
- праздничные дни		
Потери рабочего времени		
- отпуск	48	48
- невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	250	250

Для руководителя проекта от ТПУ основная заработная плата рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. В соответствии с приказом ректора ТПУ № 364-3 от 30.12.2021 базовый оклад доцента со

степенью кандидата наук составляет 37700 руб., а инженера-исследователя (исполнителя) – 23800 руб. Расчёт основной заработной платы руководителя, инженера приведён в таблице 39.

Таблица 39 – Расчёт основной заработной платы руководителя и инженеров и отчислений во внебюджетные фонды

Исполнитель и	$Z_{тс}$, руб.	k_p	k_d	$k_{пр}$	Z_m , руб.	$Z_{дн}$, руб.	Тр. раб. Дн.	$Z_{осн}$, руб.	Отчисления во внебюджетные фонды 30%
Руководитель	37700	1,3	0,2	0,3	73515	3058	7	21406	6421,8
Инженер	23800	1,3	0,2	0,3	46410	1931	64	123584	37075,2
Итого:								144990	43497

Накладные расходы примем равными 80 % от суммы основной и дополнительной заработной платы работников, непосредственно участвующих в выполнении проекта. Расчет накладных расходов представлен в таблице 40.

Таблица 40 – Расчет накладных расходов

Исполнитель	$Z_{зп}$, руб.	$k_{накл}$	$Z_{накл}$, руб.
Руководитель	21406	0,8	17124,8
Исполнитель	123584	0,8	98867,2
Итого $Z_{накл}$			115992

8.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой эффективности исследования

Оценка сравнительной эффективности исследования.

Проведем оценку сравнительной эффективности исследования, которая основана на расчете интегрального показателя эффективности научного исследования.

Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения системы приведена в таблице 41. Сравним три исполнения проекта по критериям: надежность, энергосбережение, материалоемкость, помехоустойчивость,

удобство в эксплуатации, гарантийный ремонт.

Таблица 41 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения

Критерий \ Вариант	Весовой коэффициент	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1. Надежность	0.25	5	4	4
2. Энергосбережение	0.2	4	4	5
3. Материалоемкость	0.1	4	4	3
4. Помехоустойчивость	0.15	5	4	4
5. Удобство в эксплуатации	0.2	4	5	4
6. Гарантийный ремонт	0.1	4	4	4
Итого	1			

На основе таблицы 41 проведем расчет показателей ресурсоэффективности для трех вариантов исполнения системы. Результаты расчетов приведены в таблице 42.

Таблица 42 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Текущая разработка	Исполнение 1	Исполнение 2
1	Интегральный финансовый показатель	0.94	1	0.98
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности	4.4	4.2	4.1
3	Интегральный показатель эффективности	4,7	4,2	4,2
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	1.12	1.12

Исходя из таблицы 41 можно сделать вывод, что при анализе интегральных показателей эффективности текущее исполнение проекта лучшим выбором с позиции финансовой и ресурсной эффективности. Оценка сравнительной эффективности показала, что разработка в первом варианте исполнения эффективнее остальных предложенных вариантов на 12 %.

Также стоит отметить, что введение системы противоаварийной защиты на СИКН ПСП «Лугинецкое» обеспечит бесперебойную подачу продукта без повышения/понижения давления, что крайне важно для корпорации «Газпром Добыча», 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, в дальнейшем снизит или вовсе ликвидирует расходы на восстановление оборудования, ликвидацию простоев и аварий.

9 Социальная ответственность

Введение

Социальная ответственность – ответственность отдельного ученого и научного сообщества перед обществом. Первостепенное значение при этом имеет безопасность применения технологий, которые создаются на основе достижений науки, предотвращение или минимизация возможных негативных последствий их применения, обеспечение безопасного как для испытуемых, как и для окружающей среды проведения исследований.

В ходе данной работы производилось исследование возможности использования на объекте повышенной опасности резервированного контроллера СПАЗ в процессе отказа его модулей. Работа выполнялась в лаборатории НИИ ТПУ. Все работы выполнялись с использованием компьютера. Раздел также включает в себя оценку условий труда на рабочем месте, анализ вредных и опасных факторов труда, разработку мер защиты от них.

9.1 Производственная безопасность

9.1.1 Вредные факторы.

Отклонение показателей микроклимата в помещении

Проанализируем микроклимат в помещении, где находится рабочее место. Микроклимат производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Эти факторы влияют на организм человека, определяя его самочувствие.

Оптимальные и допустимые значения параметров микроклимата приведены в таблице 43 и 44.

Таблица 43 - Оптимальные нормы микроклимата

Период года	Температура воздуха, С°	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	(19-23)	(40-60)	0.1
Теплый	(23-25)		0.2

Таблица 44 - Допустимые нормы микроклимата

Период года	Температура воздуха, С°		Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
	Нижняя допустимая граница	Верхняя допустимая граница		
Холодный	15	24	(20-80)	<0.5
Теплый	22	28	(20-80)	<0.5

Общая площадь рабочего помещения составляет 42 м². В соответствии с пунктом № 249 СП 2.2.3670-20 установлена площадь на одно постоянное рабочее место пользователей персональных компьютеров, к примеру, с использованием компьютеров на базе плоских дискретных экранов площадь одного рабочего места должна быть не менее 4,5 м² [9.4.1]. Исходя из приведенных выше данных, можно сказать, что количество рабочих мест соответствует размерам помещения по санитарным нормам.

После анализа габаритных размеров рассмотрим микроклимат в этой комнате. В качестве параметров микроклимата рассмотрим температуру, влажность воздуха, скорость ветра.

В помещении осуществляется естественная вентиляция посредством наличия легко открываемого оконного проема (форточки), а также дверного проема. По зоне действия такая вентиляция является общеобменной. Основной недостаток - приточный воздух поступает в помещение без

предварительной очистки и нагревания. Параметры микроклимата поддерживаются в холодное время года за счет систем водяного отопления с нагревом воды до 100°C, а в теплое время года – за счет кондиционирования, с параметрами согласно [9.4.2]. Нормируемые параметры микроклимата, ионного состава воздуха, содержания вредных веществ должны соответствовать требованиям [9.4.3].

Превышение уровней шума

Одним из наиболее распространенных в производстве вредных факторов является шум. Он создается вентиляционным и рабочим оборудованием, преобразователями напряжения, рабочими лампами дневного света, а также проникает снаружи. Шум вызывает головную боль, усталость, бессонницу или сонливость, ослабляет внимание, память ухудшается, реакция уменьшается.

Основным источником шума в комнате являются компьютерные охлаждающие вентиляторы и. Уровень шума варьируется от 35 до 42 дБА. Согласно СанПиН 1.2.3685-21, при выполнении основных работ на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 82 дБА [9.4.4].

При значениях выше допустимого уровня необходимо предусмотреть средства индивидуальной защиты (СИЗ) и средства коллективной защиты (СКЗ) от шума.

Средства коллективной защиты:

1. устранение причин шума или существенное его ослабление в источнике образования;
2. изоляция источников шума от окружающей среды (применение глушителей, экранов, звукопоглощающих строительных материалов, например любой пористый материал – шамотный кирпич, микропористая резина, поролон и др.);
3. применение средств, снижающих шум и вибрацию на пути их распространения;

Средства индивидуальной защиты;

1. применение спецодежды и защитных средств органов слуха: наушники, беруши, антифоны [9.4.5].

Повышенный уровень электромагнитных излучений

Источником электромагнитных излучений в нашем случае являются дисплеи ПЭВМ. Монитор компьютера включает в себя излучения рентгеновской, ультрафиолетовой и инфракрасной области В ходе работы использовалась ПЭВМ типа Acer VN7-791 со следующими характеристиками: напряженность электромагнитного поля 2,5 В/м; поверхностный потенциал составляет 450 В.

При длительном постоянном воздействии электромагнитного поля (ЭМП) радиочастотного диапазона при работе на ПЭВМ у человеческого организма сердечно-сосудистые, респираторные и нервные расстройства, головные боли, усталость, ухудшение состояния здоровья, гипотония, изменения сердечной мышцы проводимости. Тепловой эффект ЭМП характеризуется увеличением температуры тела, локальным селективным нагревом тканей, органов, клеток за счет перехода ЭМП на теплую энергию. Предельно допустимые уровни (ПДУ) облучения (по ОСТ 54 30013-83):

а) до 10 мкВт/см², время работы (8 часов);

б) от 10 до 100 мкВт/см², время работы не более 2 часов;

в) от 100 до 1000 мкВт/см², время работы не более 20 мин. при условии пользования защитными очками;

г) для населения в целом ППМ не должен превышать 1 мкВт/см².

Защита человека от опасного воздействия электромагнитного излучения осуществляется следующими способами:

СКЗ

1. защита временем;

2. защита расстоянием;

3. снижение интенсивности излучения непосредственно в самом источнике излучения;

4. заземление экрана вокруг источника;

5. защита рабочего места от излучения;

СИЗ

1. Очки и специальная одежда, выполненная из металлизированной ткани (кольчуга). При этом следует отметить, что использование СИЗ возможно при кратковременных работах и является мерой аварийного характера. Ежедневная защита обслуживающего персонала должна обеспечиваться другими средствами.

2. Вместо обычных стекол используют стекла, покрытые тонким слоем золота или диоксида олова (SnO_2).

Недостаточная освещенность.

Для обеспечения требуемой освещенности необходимо использовать совмещенное освещение, создаваемое сочетанием естественного и искусственного освещения. При данном этапе развития осветительной техники целесообразно использовать люминесцентные лампы, которые по сравнению с лампами накаливания имеют большую светоотдачу на ватт потребляемой мощности и более естественный спектр.

Минимальный уровень средней освещенности на рабочих местах с постоянным пребыванием людей должен быть не менее 200 лк.

В расчётном задании должны быть решены следующие вопросы:

- выбор системы освещения;
- выбор источников света;
- выбор светильников и их размещение;
- выбор нормируемой освещённости;
- расчёт освещения методом светового потока.

В данном расчётном задании для всех помещений рассчитывается общее равномерное освещение (таблица 45).

Таблица 45 – Параметры помещения.

Параметр	Обозначение	Значение, м
Длина	A	14
Ширина	B	12
Высота помещения	H	2,5
Свес	h _с	0,4
Высота Р.П.	h _{рп}	0,8
Высота от светильника до Р.П.	h	H- h _р - h _с
Коэффициент отражения стен	ρ _{ст}	70 %
Коэффициент отражения потолка	ρ _п	70 %
Коэффициент запаса	K _з	1.3
Коэффициент неравномерности	Z	1.1

Расчёт общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока, учитывающим световой поток, отражённый от потолка и стен.

Световой поток лампы определяется по формуле:

$$\Phi_{\text{рас}} = E_{\text{н}} * S * K_3 * Z / N * \eta \quad (1.5.1)$$

где $E_{\text{н}}$ – нормируемая минимальная освещённость по СП 52.13330.2016, лк;

S – площадь освещаемого помещения, м²;

K_3 – коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника (источника света, свето- технической арматуры, стен и пр., т. е. отражающих поверхностей), наличие в атмосфере цеха дыма, пыли;

Z – коэффициент неравномерности освещения, отношение $E_{\text{ср}}/E_{\text{min}}$. Для люминесцентных ламп при расчётах берётся равным 1,1;

N – число ламп в помещении;

η – коэффициент использования светового потока.

Коэффициент использования светового потока показывает, какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность. Он зависит от индекса помещения i , типа светильника, высоты светильников над рабочей поверхностью h и коэффициентов отражения стен ρ_c и потолка ρ_n .

Индекс помещения определяется по формуле:

$$i = S / h(A + B) \quad (1.5.2)$$

Проведем расчет индекса помещения:

Площадь помещения:

$$S = A \cdot B = 14 \cdot 12 = 168 \text{ м}^2.$$

Индекс:

$$i = \frac{S}{h \cdot (A + B)} = \frac{168}{2.5 \cdot (14 + 12)} = 2.58.$$

Согласно этим данным коэффициент использования светового потока будет равен 58 % или в долях = 0,58.

Коэффициенты отражения оцениваются субъективно (табл. 4.10) [БЖД Практикум 2009-2020].

Согласно указанной методике выбираем тип источника света.

Наиболее подходящим вариантом является 40 ваттная лампа ЛБ, у которой $\Phi=2800$ лм. Для выбранного типа лампы подходит светильник ОД-2-40 с размерами: длина = 1230 мм, ширина = 266 мм.

Из уравнения 1.5.1 находим количество ламп для помещения

$$N = \frac{E_N \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{\Phi \cdot \eta} = \frac{200 \cdot 168 \cdot 1.3 \cdot 1.1}{2800 \cdot 0.56} = 30.64.$$

Принимаем $N=32$ лампы или 16 светильников.

Размещаем светильники в 4 ряда по 4 светильника в ряду с соблюдением условий: L – расстояние между соседними светильниками или рядами (если по длине (А) и ширине (В) помещения расстояния различны, то они обозначаются L_A и L_B),

L – расстояние между соседними светильниками или рядами (если по длине (А) и ширине (В) помещения расстояния различны, то они обозначаются L_A и L_B),

l – расстояние от крайних светильников или рядов до стены.

Оптимальное расстояние l от крайнего ряда светильников до стены рекомендуется принимать равным $L/3$.

Сначала определим световой поток расчетный:

$$\Phi = \frac{E_N \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{N \cdot \eta} = \frac{200 \cdot 168 \cdot 1.3 \cdot 1.1}{32 \cdot 0.56} = 2681 \text{ лм.}$$

Проведем проверку выполнения условия соответствия:

$$- 10 \% \leq ((\Phi_{\text{расч}} - \Phi_{\text{станд}}) / \Phi_{\text{расч}}) * 100 \% \leq + 20 \%$$

Подставляя численные значения получаем:

$$- 10 \% \leq (2800 - 2681) / 2681 * 100 \% \leq + 20 \%$$

$$\text{Итого: } - 10 \% \leq +4,4 \% \leq + 20 \%$$

Результат расчета укладывается в допустимые пределы.

Определим мощность осветительной установки:

$$P = N * P_i = 32 * 40 \text{ Вт} = 1280 \text{ Вт.}$$

Теперь определим расстояния между светильниками по длине и ширине помещения.

$$14000 = 3 * L_A + 4 * 1230 + 2/3 * L_A; L_A = (14000 - 4920) * 3/11 = 2476 \text{ мм};$$

$$L_A / 3 = 826 \text{ мм};$$

$$12000 = 3 * L_B + 4 * 266 + 2/3 * L_B; L_B = (12000 - 1064) * 3/11 = 2982 \text{ мм};$$

$$L_B / 3 = 994 \text{ мм.}$$

Рисуем схему размещения светильников на потолке для обеспечения общего равномерного освещения (рисунок 50).

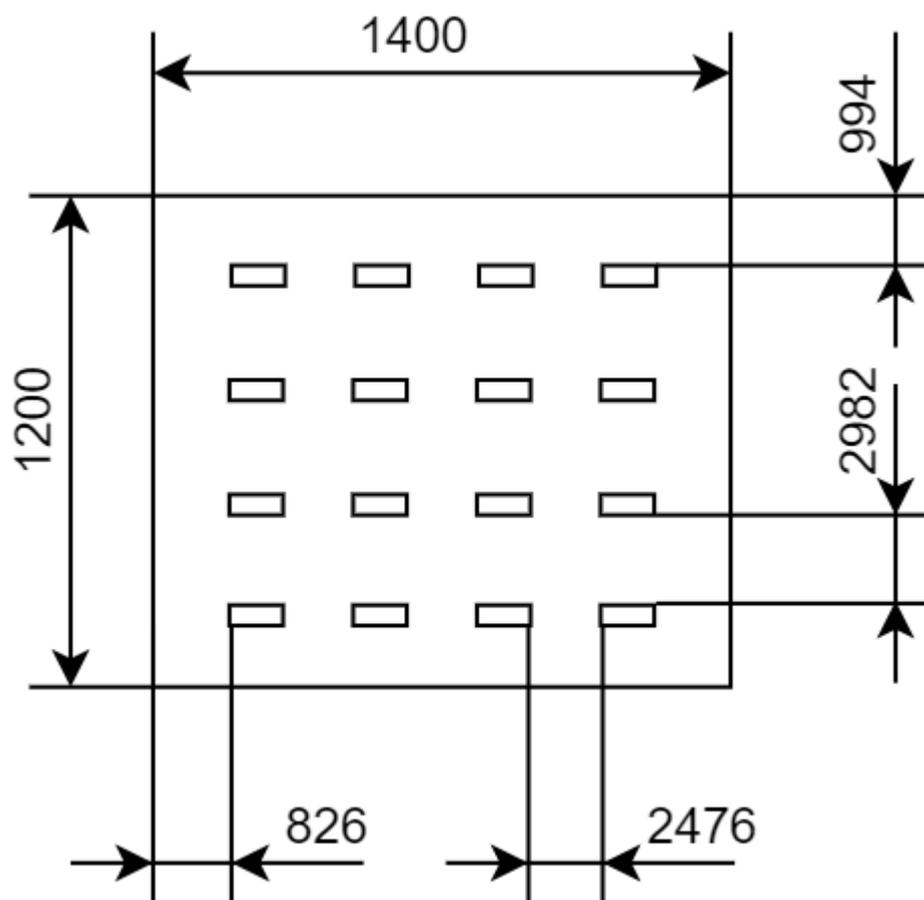


Рисунок 50 – План размещения светильников на потолке.

9.1.2 Опасные факторы

Электроопасность; класс электроопасности помещения, безопасные номиналы I, U, R_{заземления}, СКЗ, СИЗ;

Поражение электрическим током

К опасным факторам можно отнести наличие в помещении большого количества аппаратуры, использующей однофазный электрический ток напряжением 220 В и частотой 50Гц. По опасности электропоражения комната относится к помещениям без повышенной опасности, так как отсутствует повышенная влажность, высокая температура, токопроводящая пыль и возможность одновременного сприкосновения токоведущих элементов с заземленными металлическими корпусами оборудования [9.4.10].

Лаборатория относится к помещению без повышенной опасности поражения электрическим током. Безопасными номиналами являются: $I < 0,1$ А; $U < (2-36)$ В; $R_{\text{зазем}} < 4$ Ом.

Для защиты от поражения электрическим током используют СИЗ и СКЗ.

Средства коллективной защиты:

1. защитное заземление, зануление;
2. малое напряжение;
3. электрическое разделение сетей;
4. защитное отключение;
5. изоляция токоведущих частей;
6. оградительные устройства.
7. использование щитов, барьеров, клеток, ширм, а также заземляющих и шунтирующих штанг, специальных знаков и плакатов.

Средства индивидуальной защиты:

1. Использование диэлектрических перчаток, изолирующих клещей и штанг, слесарных инструментов с изолированными рукоятками, указатели величины напряжения, калоши, боты, подставки и коврики.

Пожароопасность, категория пожароопасности помещения, марки огнетушителей, их назначение и ограничение применения; Приведена схема эвакуации.

По взрывопожарной и пожарной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В1-В4, Г и Д.

Согласно НПБ 105-03 лаборатория относится к категории В– горючие и трудно горючие жидкости, твердые горючие и трудно горючие вещества и материалы, вещества и материалы, способные при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом только гореть, при условии, что помещения, в которых находится, не относятся к категории наиболее опасных А или Б [9.4.12].

По степени огнестойкости данное помещение относится к 1-й степени огнестойкости по СНиП 21-01-97 (выполнено из кирпича, которое относится к трудносгораемым материалам) [9.4.13].

Возникновение пожара при работе с электронной аппаратурой может быть по причинам как электрического, так и неэлектрического характера.

Причины возникновения пожара неэлектрического характера: халатное неосторожное обращение с огнем (курение, оставленные без присмотра нагревательные приборы, использование открытого огня);

Причины возникновения пожара электрического характера: короткое замыкание, перегрузки по току, искрение и электрические дуги, статическое электричество и т. п. [9.4.14].

Для локализации или ликвидации загорания на начальной стадии используются первичные средства пожаротушения. Первичные средства пожаротушения обычно применяют до прибытия пожарной команды.

Огнетушители водо-пенные (ОХВП-10) используют для тушения очагов пожара без наличия электроэнергии. Углекислотные (ОУ-2) и порошковые огнетушители предназначены для тушения электроустановок, находящихся под напряжением до 1000 В. Для тушения токоведущих частей и электроустановок применяется переносной порошковый огнетушитель, например ОП-5.

В общественных зданиях и сооружениях на каждом этаже должно размещаться не менее двух переносных огнетушителей. Огнетушители следует располагать на видных местах вблизи от выходов из помещений на высоте не более 1,35 м. Размещение первичных средств пожаротушения в коридорах, переходах не должно препятствовать безопасной эвакуации людей [9.4.15].

Для предупреждения пожара и взрыва необходимо предусмотреть:

1. специальные изолированные помещения для хранения и разлива легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ), оборудованные приточно-

вытяжной вентиляцией во взрывобезопасном исполнении - соответствии с [9.4.16] и [9.4.17];

2. специальные помещения (для хранения в таре пылеобразной канифоли), изолированные от нагревательных приборов и нагретых частей оборудования;

3. первичные средства пожаротушения на производственных участках (передвижные углекислые огнетушители [9.4.18], пенные огнетушители [5.4.19], ящики с песком, войлок, кошма или асбестовое полотно);

4. автоматические сигнализаторы (типа СВК-3 М 1) для сигнализации о присутствии в воздухе помещений предвзрывных концентраций горючих паров растворителей и их смесей.

Система измерения количества и показателей качества нефти полностью соответствует требованиям пожарной безопасности, а именно, наличие охранно-пожарной сигнализации, плана эвакуации, порошковых огнетушителей с поверенным клеймом, табличек с указанием направления к запасному (эвакуационному) выходу.\

9.2 Экологическая безопасность

В компьютерах огромное количество компонентов, которые содержат токсичные вещества и представляют угрозу, как для человека, так и для окружающей среды.

К таким веществам относятся:

- свинец (накапливается в организме, поражая почки, нервную систему);
- ртуть (поражает мозг и нервную систему);
- никель и цинк (могут вызывать дерматит);
- щелочи (прожигают слизистые оболочки и кожу);

Поэтому компьютер требует специальных комплексных методов утилизации.

Таким образом утилизацию компьютера можно провести следующим образом:

1. отделить металлические детали от неметаллов;
2. разделить углеродистые металлы от цветмета;
3. пластмассовые изделия (крупногабаритные) измельчить для уменьшения объема;
4. кофир-порошок упаковать в отдельную упаковку, точно также, как и все проклассифицированные и измельченные компоненты оргтехники, и после накопления на складе транспортных количеств отправить предприятиям и фирмам, специализирующимся по переработке отдельных видов материалов.

Люминесцентные лампы утилизируют следующим образом. Не работающие лампы немедленно после удаления из светильника должны быть упакованы в картонную коробку, бумагу или тонкий мягкий картон, предохраняющий лампы от взаимного соприкосновения и случайного механического повреждения. После накопления ламп объемом в 1 транспортную единицу их сдают на переработку на соответствующее предприятие. Недопустимо выбрасывать отработанные энергосберегающие лампы вместе с обычным мусором, превращая его в ртутьсодержащие отходы, которые загрязняют ртутными парами [5.4.20].

9.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Природная чрезвычайная ситуация – обстановка на определенной территории или акватории, сложившейся в результате возникновения источника природной чрезвычайной ситуации, который может повлечь или повлек за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей и (или) окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей.

Производство находится в городе Томске с континентально-циклоническим климатом. Природные явления (землетрясения, наводнения, засухи, ураганы и т. д.), в данном городе отсутствуют.

Возможными ЧС на объекте в данном случае, могут быть сильные морозы и диверсия.

Для Сибири в зимнее время года характерны морозы. Достижение критически низких температур приводит к авариям систем тепло- и водоснабжения, сантехнических коммуникаций и электроснабжения, приостановке работы. В этом случае при подготовке к зиме следует предусмотреть а) газобаллонные калориферы (запасные обогреватели), б) дизель или бензоэлектрогенераторы; в) запасы питьевой и технической воды на складе (не менее 30 л на 1 человека); г) теплый транспорт для доставки работников на работу и с работы домой в случае отказа муниципального транспорта. Их количества и мощности должно хватать для того, чтобы работа на производстве не прекратилась.

В лаборатории НИИ ТПУ наиболее вероятно возникновение чрезвычайных ситуаций (ЧС) техногенного характера.

Для предупреждения вероятности осуществления диверсии предприятие необходимо оборудовать системой видеонаблюдения, круглосуточной охраной, пропускной системой, надежной системой связи, а также исключения распространения информации о системе охраны объекта, расположении помещений и оборудования в помещениях, системах охраны, сигнализаторах, их местах установки и количестве. Должностные лица раз в полгода проводят тренировки по отработке действий на случай экстренной эвакуации.

9.4 Перечень НТД

9.4.1. СП 2.2.3670-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к условиям труда».

9.4.2. СанПиН 2.1.6.1032-01 «Гигиенические требования к качеству атмосферного воздуха».

9.4.3. СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений».

9.4.4. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

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

9.4.6. ГОСТ 54 30013-83 «Электромагнитные излучения СВЧ. Предельно допустимые уровни облучения. Требования безопасности».

9.4.7. ГОСТ 12.4.154-85 «ССБТ. Устройства экранирующие для защиты от электрических полей промышленной частоты».

9.4.8. ГОСТ 12.1.007-76 «Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности».

9.4.9. ГОСТ 12.4.123-83 «Средства коллективной защиты от инфракрасных излучений. Общие технические требования».

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

9.4.11. ГОСТ 12.1.030-81 «Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление».

9.4.12. НПБ 105-03 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности».

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

9.4.14. ГОСТ 12.1.004-91 «Пожарная безопасность. Общие требования».

Заключение

В рамках магистерской диссертации был проведен тщательный анализ процесса деградации системы противоаварийной защиты блока измерительных линий СИКН с применением критериев Маркова. Одним из перспективных направлений исследования было выбрано исследование применения промышленных логических контроллеров с тройным модульным резервированием на СИКН ПСП «Лугинецкое».

В ходе исследования был осуществлен подбор современного логического контроллера, и выбор был сделан в пользу контроллера Schneider Electric Triconex Tricon, который заслуженно признан лидером на мировом рынке. Контроллеры Tricon обладают современными функциями программирования и обеспечивают высокий уровень отказобезопасности благодаря своей архитектуре с тройным модульным резервированием.

Также было проведено моделирование архитектуры 2oo3D и расчет среднего значения PFD (вероятности первичного отказа) для контроллера Triconex Tricon с использованием модели Маркова. Дополнительно были выполнены расчеты безопасности для контроллера, функционирующего в состояниях деградации 2oo2D и 1oo1D. Для каждой из этих моделей была определена вероятность нахождения контроллера в неработоспособном состоянии. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что при диагностическом охвате 0,9 не требуется немедленное техническое обслуживание и остановка процесса работы блока измерительных линий.

Внедрение системы противоаварийной защиты на СИКН ПСП «Лугинецкое» приведет к непрерывной подаче флюида без изменения давления, что является критически важным для безаварийной работы завода. Технологическое оборудование, используемое на заводе, должно находиться в постоянной работоспособности, и внедрение данной системы будет способствовать сокращению сбоев технологического оборудования, снижению числа аварий на производстве и оптимизации процессов технического обслуживания. Это, в свою очередь, приведет к уменьшению

расходов на восстановление оборудования и устранение аварийных ситуаций, обеспечивая более эффективное функционирование предприятия в целом.

Список использованных источников

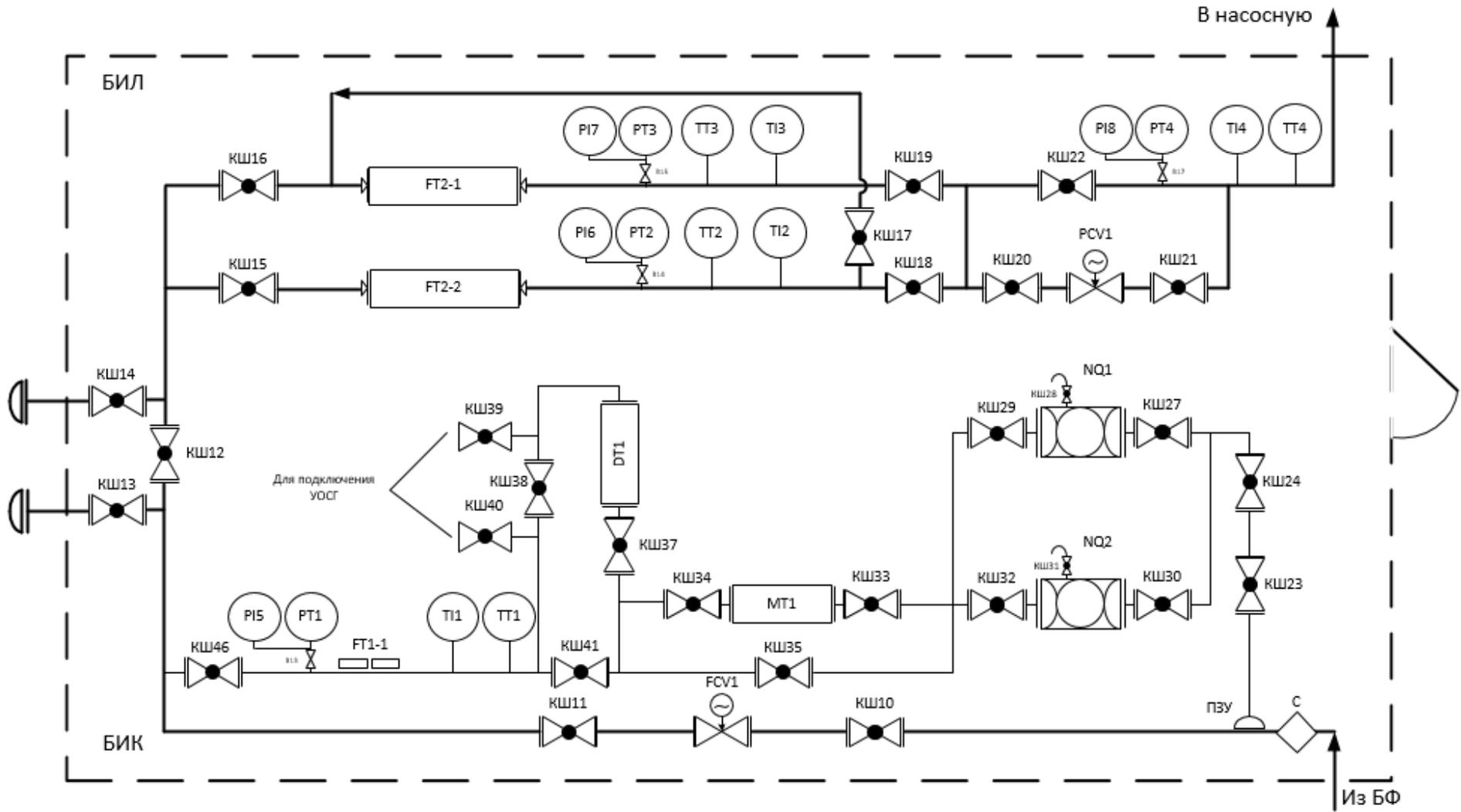
1. Система противоаварийной защиты. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://patenton.ru/patent/RU2451377C1>
2. В.В. Скляр. Исследование марковских моделей информационно-управляющей системы на основе самодиагностируемых программируемых платформ / Скляр В.В. и др. // Научные записки [Кировоградского государственного 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

9. Датчики давления Метран [Электронный ресурс]. URL: 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
11. Электропривод прямоходный [Электронный ресурс]. URL: 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/Vikt_oroova&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_shemirezervirovaniya-looD-oo-oo-sravnitel'naya-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.

Приложение А (обязательное)

Структурная схема СИКН



Приложение Б (обязательное)

HAZOP-анализ СИКН

№	Управляющее слово	Элемент	Отклонение	Возможные причины	Последствия	Существующие элементы управления	Примечание	Требуемые действия
1	НЕТ	Поток нефти	Нет потока нефти	Разрыв трубопровода	Прекращение подачи нефти потребителю. Простой ТП и экономические потери	Проверка целостности трубопровода персоналом. ТО трубопровода	-	Установка сигнализатора предельного нижнего уровня LSA
				Закупоривание трубопровода примесями.		Отслеживать отключение насоса при неизменном уровне в течении некоторого времени с помощью LI		Установка датчика холостого хода LS на всасе насоса
				Нет подачи нефти, Кш-15 и Кш-16 закрыты.		Уровнемер отслеживает и передает уровень в РВС в операторную		Зависит от внимательности оператора
2	НЕТ	Клапан	Нет открытия клапана	Не сработал пускатель	Подача потока под давлением на задвижку, разгерметизация трубопровода	-	-	Установка блока управления для контроля состояния клапана

3	БОЛЬШЕ	Нефть	Больше давление нефти	Давление паров углеводорода	Разгерметизация РВС, утечка углеводорода	Отслеживать и передавать Давление с помощью датчика давления PI	Зависит от внимательности оператора	Отключение насоса Н-1 при достижении предельного давления при помощи PSA
				Неконтролируемое увеличение уровня				
4	МЕНЬШЕ	Нефть	Меньше температура нефти	Холодный климат	Замерзание нефтепродукта	Отслеживать температуру TI	Зависит от внимательности оператора	Интеграция системы электро-обогрева
5	ПЕРЕМЕНА	Поток нефти	Перемена направления потока нефти	Разрыв трубопровода, утечка нефти	Повреждение оборудования КИПиА	Отслеживать с помощью LI неожиданное уменьшение уровня	Зависит от внимательности оператора	Установка обратного клапана на входе и предохранительного клапана на выходе

Приложение В (обязательное)

Частота и последствия событий в результате аварии

Разрыв измерительной линии	Система обнаружения утечек и контроля активности (СОУиКА)	Автоматическая аварийная сигнализация информирующая оператора об утечке	Система автоматического перекрытия линии подачи флюида	Система автоматической приточно-вытяжной вентиляции и сигнализации	Финальная вероятность	Последствия						
Инцидент	1	2	3	4								
Разрыв измерительной линии P	(1-P1)	(1-P1)*(1-P2)	(1-P1)*(1-P2)*(1-P3)	(1-P1)*(1-P2)*(1-P3)*(1-P4)	0,6561	Остановленная утечка без отправления персонала и с сигналом тревоги						
				(1-P1)*(1-P2)*(1-P3)*P4	0,0729	Остановленная утечка с вероятностью отправления персонала и с сигналом тревоги						
				(1-P1)*(1-P2)*P3*(1-P4)	0,0729	Остановленная брызгуна утечка через продолжительное время						
				(1-P1)*(1-P2)*P3*P4	0,0081	Небольшой пожар с отказом сигнализации и вероятностью отправления персонала						
				(1-P1)*P2*(1-P3)*(1-P4)	0,0729	Остановленная утечка без оповещения оператора						
				(1-P1)*P2*(1-P3)*P4	0,0081	Остановленная утечка без оповещения оператора и с вероятностью отправления персонала						
				(1-P1)*P2*P3*(1-P4)	0,0081	Продолжительная небольшая пожар						
				(1-P1)*P2*P3*P4	0,0009	Продолжительная небольшая пожар с вероятностью отправления персонала						
				P1	P1*(1-P2)	P1*(1-P1)*(1-P3)	P1*(1-P1)*(1-P3)*(1-P4)	0,0729	Продолжительный средний пожар			
							P1*(1-P1)*(1-P3)*P4	0,0081	Продолжительный средний пожар с вероятностью отправления персонала			
							P1*(1-P1)*P3*(1-P4)	0,0081	Продолжительный средний пожар, перекрытый брызгуна			
							P1*(1-P1)*P3*P4	0,0009	Продолжительный средний пожар с вероятностью отправления персонала, перекрытый брызгуна			
							P1*P2	P1*P2*(1-P3)	P1*P2*(1-P3)*(1-P4)	P1*P2*(1-P3)*(1-P4)	0,0081	Продолжительный сильный пожар
										P1*P2*(1-P3)*P4	0,0009	Продолжительный сильный пожар без информирования персонала и с вероятностью отправления персонала
										P1*P2*P3*(1-P4)	0,0009	Продолжительный сильный пожар без информирования оператора
										P1*P2*P3*P4	0,0001	Взрыв в блок боксе СИКН

Приложение Г (справочное)

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

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ТМ12	Васин Андрей Иванович		

Руководитель ВКР

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

Консультант – лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИЯ ШБИП	Куимова Марина Валерьевна	к.п.н.		

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

MooND stands out among various structures for reserving EPS contours. 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. It is done 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. It is used to impede security functions if it must execute (in query mode) or cause the termination of execution of the safety function (in continuous mode), turning controlled equipment (TP) in a dangerous or potentially dangerous condition or reduce 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/major 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/major sampling mechanisms qualify and validate all digital input and output signals coming from field devices, while analog input signals are subjected to the process of an average value estimation. 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.

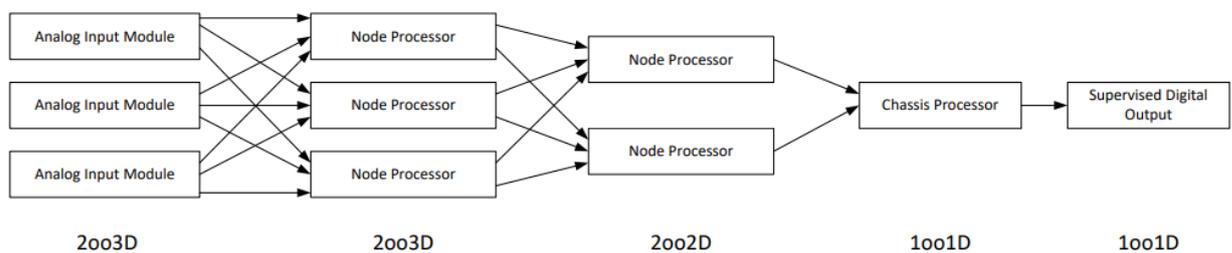


Figure 1. Diagram of the sequential degradation Tricon.

Let's 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 enables 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. Two processors included in the voting scheme can only be used in security systems [2].

Let's construct a graph of the Tricon 2003D operating model using the classical method (Figure 2). The developed graph model contains the state S8 (an absorbing state) which is a final state. In this state, undetected hazardous failures can occur. The following graphical notations are used in Figure 3: "+" - functional state, "-" - detected failure, "x" - undetected failure.

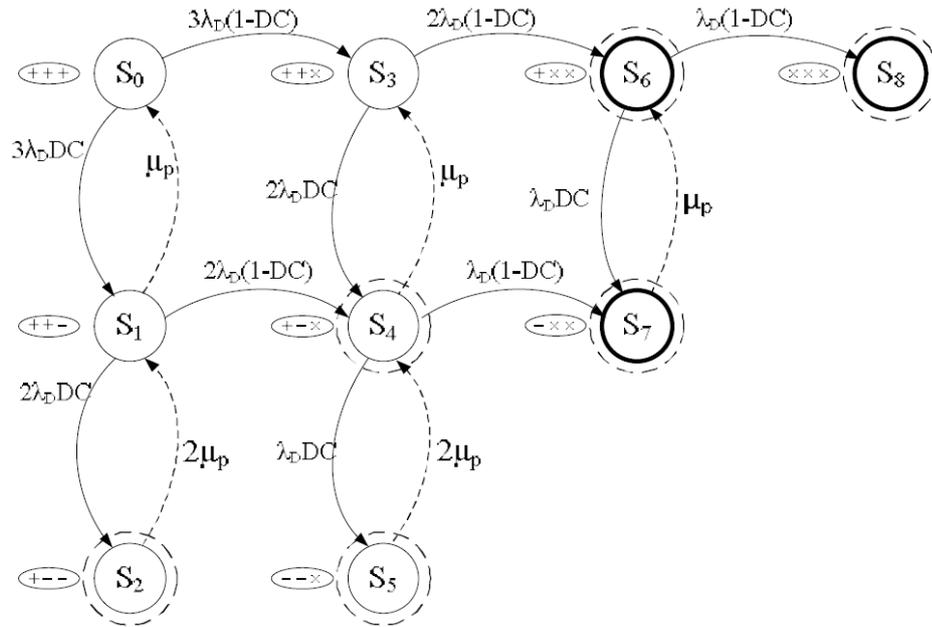


Figure 2. Markov model of 2oo3D with absorbing states.

The graph of the model contains:

- functioning states: S0 (all channels are operational), S1 (dangerous failure detected in one of the channels), and S3 (failure manifested in one of the channels but not detected as dangerous);
- non-functioning states: S2 (dangerous failures detected in two channels), S4 (dangerous failure detected in one channel and failure manifested but not detected as dangerous in another channel), and S5 (dangerous failures detected in two channels and failure manifested but not detected as dangerous in the third channel);
- states with undetected dangerous failures that cannot be mitigated by the majority/major organ: S6 (failures manifested but not detected as dangerous in two channels), S7 (dangerous failure detected in one channel and failures manifested but not detected as dangerous in two channels), S8 (failures manifested but not detected as dangerous in all three channels).

It is also worth noting that the portion of hazardous failures detected by automatic diagnostic tests is defined as the diagnostic coverage (DC), calculated using equation 1:

$$DC = \frac{\sum \lambda_{DD}}{\sum \lambda_{Dtotal}} \quad (1)$$

where $\sum \lambda_{DD}$ is cumulative intensity of detected hazardous failures,

$\sum \lambda_{Dtotal}$ is overall cumulative intensity of hazardous failures.

We will establish a system of differential equations for the 2oo3D graph. By considering the initial conditions, we will transform them into the Laplace domain and formulate the following equations:

$$\left\{ \begin{array}{l} s \cdot p_0(s) = -((3\lambda_D \cdot DC + 3\lambda_D(1-DC))p_0(s) + \mu_p p_1(s) + 1; \\ s \cdot p_1(s) = -(2\lambda_D DC + \mu_p + 2\lambda_D(1-DC))p_1(s) + 3\lambda_D DC \cdot p_0(s) + 2\mu_p p_2(s); \\ s \cdot p_2(s) = -2\mu_p p_2(s) + 3\lambda_D DC \cdot p_1(s); \\ s \cdot p_3(s) = -(2\lambda_D(1-DC) + 2\lambda_D DC)p_3(s) + 3\lambda_D(1-DC)p_0(s) + \mu_p p_6(s); \\ s \cdot p_4(s) = -(\lambda_D DC + \lambda_D(1-DC) + \mu_p)p_4(s) + 2\lambda_D DC \cdot p_3(s) + 2\lambda_D(1-DC)p_1(s) + 2\mu_p p_5(s); \\ s \cdot p_5(s) = -2\mu_p p_5(s) + \lambda_D DC \cdot p_4(s); \\ s \cdot p_6(s) = -(\lambda_D(1-DC) + \lambda_D DC)p_6(s) + 2\lambda_D(1-DC)p_3(s) + \mu_p p_7(s); \\ s \cdot p_7(s) = -\mu_p p_7(s) + \lambda_D DC \cdot p_6(s) + \lambda_D(1-DC)p_4(s); \\ s \cdot p_8(s) = \lambda_D(1-DC)p_6(s). \end{array} \right.$$

By transforming the equations into a matrix form (where $A(s)$ is the state matrix and B represents the initial conditions) and utilizing the equation: $P(s) = A(s)^{-1}B$, we can determine the probabilities of the system being in state S_0 for a diagnostic coverage value of one, $DC = 1$ (Figure 3).

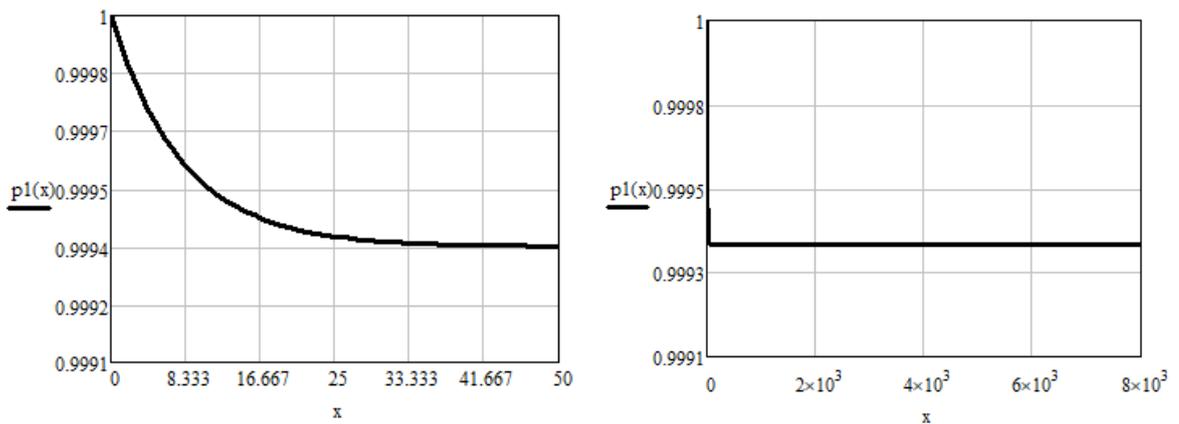


Figure 3. Probability graph of the system being in the zero state for 2oo3D model (DC = 1).

In case of detecting all hazardous failures ($DC = 1$), the model exhibits asymptotic convergence to a steady-state value.

We investigate the Markov model without absorbing states for the 2oo3D architecture (Figure 4). This model provides the exit from the state of undetected hazardous failure without implementing additional measures.

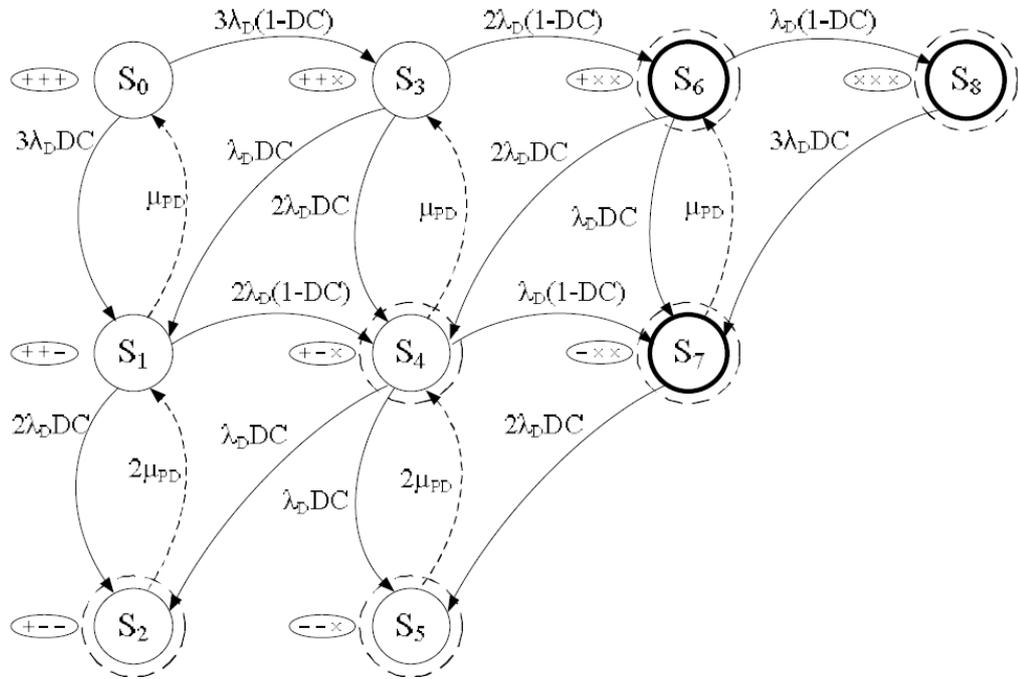


Figure 4. Markov model of 2oo3D without absorbing states.

Similarly, we will derive the system of differential equations, and then plot the probability of the system being in the operational state (state 0) with $DC = 1$ (Figure 5).

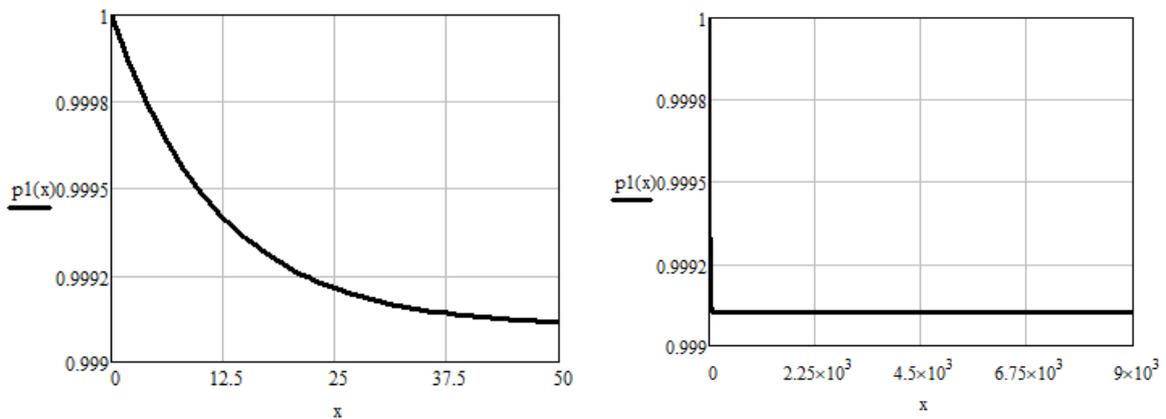


Figure 5. Probability graph of the system being in the operational state for the model without absorbing states ($DC = 1$).

Let's calculate the average Probability of Failure on Demand (PFD_{avg}), considering that it is obtained by subtracting the probability of successful operation in the functional states (where at least two controller modules perform the required functions) from unity:

$$PFD_{avg} = 1 - P_0(t) - P_1(t) - P_3(t). \quad (2)$$

Based on equation (2), let's construct a comparative graph of the average Probability of Failure on Demand (PFD_{avg}) for two model variants when $DC = 1$ (Figure 6).

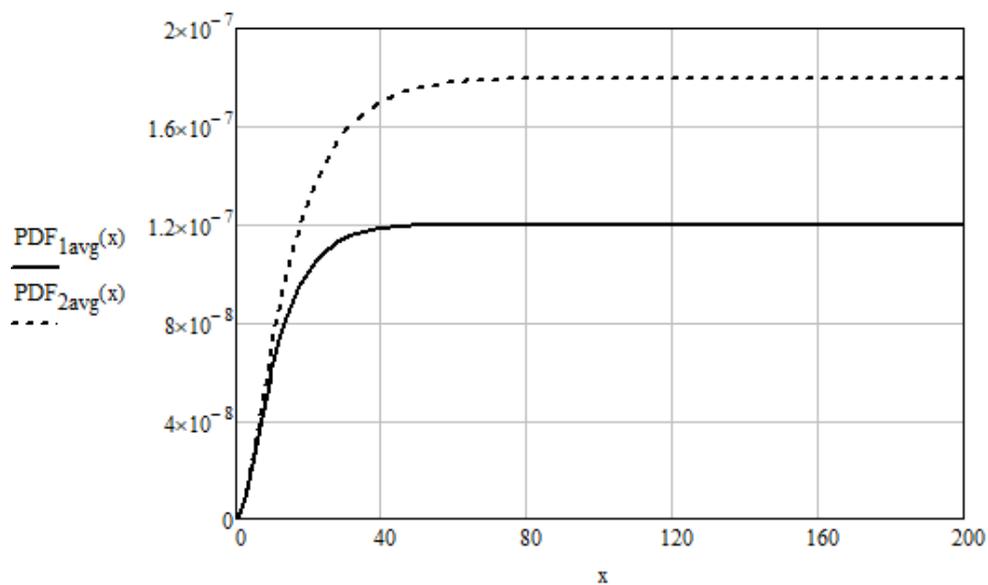


Figure 6. Comparison of system failure probabilities with absorbing states (PFD_{1avg}) and without absorbing states (PFD_{2avg}) at $DC=1$.

The models exhibit similar behavior in terms of the PFD_{avg} function, characterized by asymptotic convergence to a steady-state value. However, the graphs differ due to variations in the input parameters μ_p and μ_{pd} . With maximum diagnostic coverage both models correspond to the SIL3 level.

The 2oo2D architecture consists of two channels connected in parallel. During normal operation, both channels are required to perform the safety function. Let's investigate the degradation of the Tricon controller to the 2oo2D state (Figure 7).

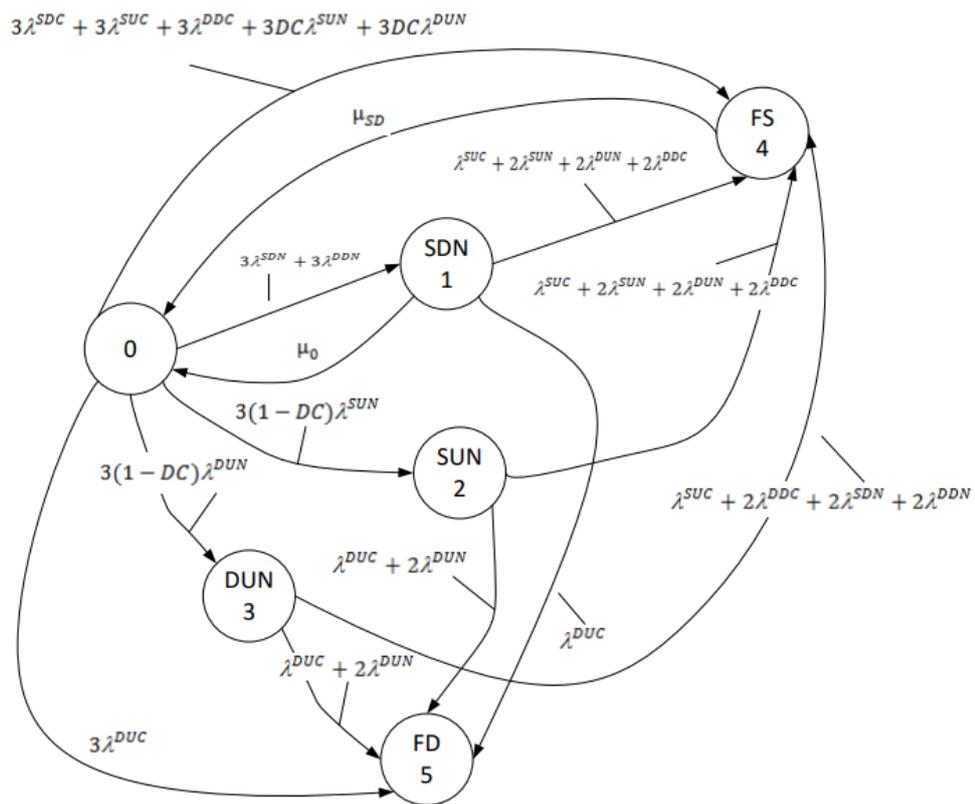


Figure 7. Markov model of a degraded controller at the 2oo2D level.

Let's formulate a system of differential equations for the graph depicted in Figure 8 and find the probability of the 2oo2D system's failure-free operation which represents the probability of the system being in the initial state. By knowing the solutions to the system of differential equations, we will plot this dependency over time (Figure 8).

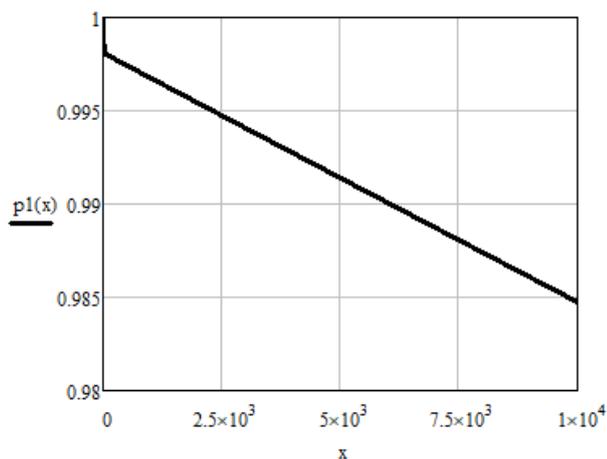


Figure 8. Probability of the 2oo2D system being in the zero state (DC=1).

While detecting all dangerous failures ($DC = 1$), the failure probability function per demand exhibits asymptotic convergence to a steady-state value (Figure 9).

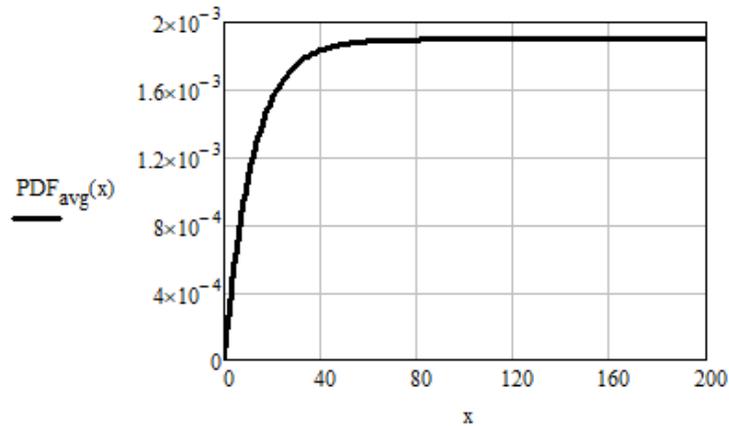


Figure 9. Dependence of PDF_{avg} function on the input parameter ($DC = 1$) for the 2oo2D model.

The research results indicate that the model of the system without considering secondary degradation tends to be conservative, making it easy to implement the system. As a result, during degradation, the system now corresponds to SIL2 level instead of SIL3, as was the case in modeling the 2oo3 architecture.

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.

Here we consider a 1oo1D system consisting of only one processor module of the controller (Figure 10). The output signal passes through a double switch whose duplicate components 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.

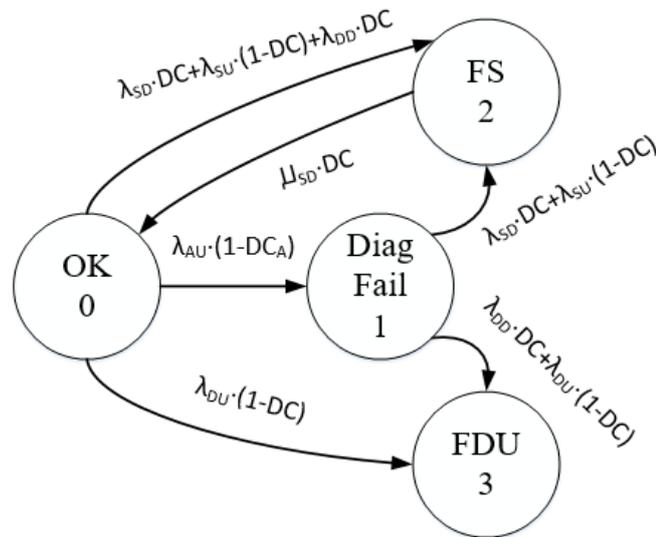


Figure 10. Graph of the Markov model for a 1oo1D system.

We constructed a system of Kolmogorov-Chapman differential equations for the graph in Figure 10. Then we solve the system of equations using the Mathcad software package and plot the probabilities of the system being in the functional state (state 0). We will examine the influence of the diagnostic coverage on the probability of system reliability. Also/In addition/ Further we will consider diagnostic coverage coefficients of 0.2, 0.5, 0.7 and 0.9 (Figure 11).

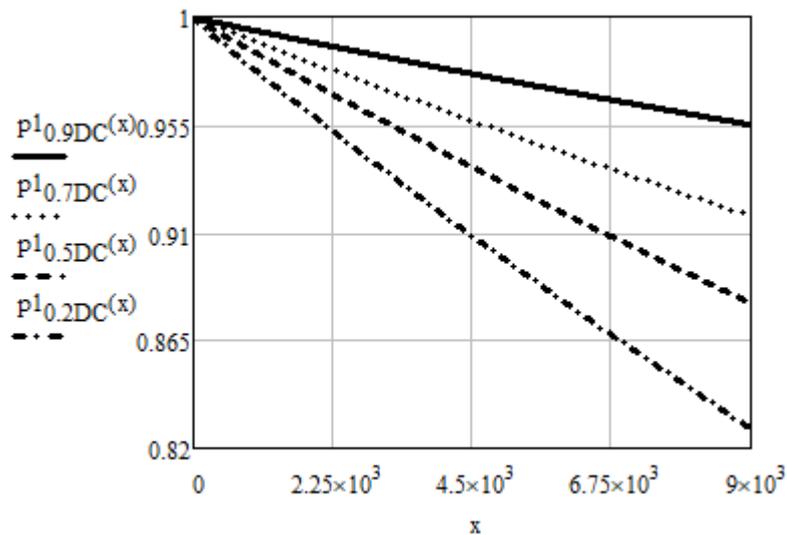


Figure 11. Probability of the 1oo1D system being in the functional state as the diagnostic coverage varies.

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

After analyzing the graph shown in Figure 10, we summarize/ present the results in 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
0.9	0.955	0.045
0.7	0.917	0.083
0.5	0.881	0.119
0.2	0.823	0.177

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 0.955; with a small depth of DC, the system requires immediate stop and a complex of restoration works.

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.

References:

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. Gromakov E.I., Liepins A.V. Integrated computer systems of design and management - Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 2013. - 218 p.
3. Börcsök J., Ugljesa E., Machmur D. Calculation of MTTF values with Markov Models for Safety Instrumented Systems // 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 // International Journal of Security and Its Applications. – 2013. – № 4. – P. 327-342.
5. Dang Pham N.T., Schwarz M., Börcsök J. Evaluation of Spurious Trip Rate of SIS dependent on demand rate // Mathematical Methods and Systems in Science and Engineering. – 2015. – P. 17-24.