

АО «Гипрогазцентр»
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Ухтинский государственный технический университет»

На правах рукописи



НИКУЛИН СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ
КОРРОЗИИ НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ НА ОСНОВЕ
ОПТИМАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ
РАБОТЫ СТАНЦИЙ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ**

Специальность:

25.00.19 – Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и
хранилищ

Диссертация

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Спиридович Евгений
Апполинарьевич

Ухта – 2015.

СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ СТАЛЬНЫХ МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ, ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К ОПТИМАЛЬНОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ РЕЖИМОВ СКЗ.....	13
1.1 Условия эксплуатации и коррозионное состояние магистральных нефтегазопроводов.....	13
1.2 Методы защиты трубопроводов от коррозии.....	15
1.2.1 Пассивная защита труб от коррозии.....	15
1.2.2 Активная защита от коррозии.....	17
1.3 Повышение эффективности электрохимической защиты от коррозии с учетом особенностей распределения защитного потенциала.....	27
1.4 Методы контроля защищенности и состояния магистральных газопроводов.....	33
1.5 Обзор существующих методик оптимизации работы средств электрохимической защиты.....	39
1.6 Постановка задачи исследования.....	45
1.7 Выводы по главе.....	46
2 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛОВ ПО ТРАССЕ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА.....	47
2.1 Введение понятия сторонней разности потенциалов наложенной неизвестными источниками.....	47
2.1.1 Порядок проведения измерений.....	49
2.1.2 Обработка экспериментальных данных.....	51
2.2 Идентификация системы «труба-земля».....	61
2.2.1 Процедуры идентификации системы «труба-земля» на основе регрессионного анализа.....	62
2.2.2 Определение структуры регрессионной модели.....	64
2.2.3 Верификация модели и анализ достоверности входных данных.....	65
2.3 Выводы по главе.....	66

3 СПОСОБ НАХОЖДЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СТАНЦИЙ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ.....	67
3.1 Решение задачи условной параметрической оптимизации	67
3.2 Анализ применимости критерия перелома кривой Тафеля как ограничивающего максимально допустимый потенциал	71
3.3 Применение методов структурной оптимизации	76
3.4 Выводы по главе.....	83
4 РАЗРАБОТКА ОСНОВНЫХ АЛГОРИТМОВ ОПТИМАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ СТАНЦИЙ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ	85
4.1 Структура модуля оптимизации	85
4.2 Ранжирование участков между СКЗ по степени коррозионной опасности.....	87
4.2.1 Назначение и характеристика блока	87
4.3.2 Оценка коррозионного состояния участков между СКЗ	89
4.3.3 Учет весов влияния факторов на каждом участке между СКЗ	92
4.3.4 Расчет интегрального показателя коррозионного состояния участков между СКЗ.....	93
4.3.6 Алгоритм ранжирования участков по коррозионной опасности	95
4.3.7 Алгоритм ранжирования участков по коррозионной опасности на основе интегрального показателя.....	96
4.4 Определение возможности отключения СКЗ.....	97
4.4.1 Определение режимов функционирования СКЗ.....	97
4.4.2 Проверка граничных условий на выходные данные СКЗ.....	98
4.4.3 Проверка условия на наличие участка ВКО в зоне защиты СКЗ.....	99
4.4.4 Проверка условия на наличие блуждающих токов в зоне защиты СКЗ.....	99
4.4.5 Принятие решения о возможности отключения СКЗ.....	100
4.4.6 Алгоритм определения максимального защитного потенциала	100
4.4.7 Алгоритм определения минимального защитного потенциала	103
4.5 Алгоритм поддержки принятия решения об отключении СКЗ.....	104

4.5.1 Определение количества соседних СКЗ, существенно влияющих на зону защиты	105
4.5.2 Расчет режимов работы соседних СКЗ для поддержания достаточного защитного потенциала при отключении рассматриваемой СКЗ.....	106
4.5.3 Проверка расчетных режимов на соответствие условиям по критериям	107
4.5.5 Сравнение вариантов отключения СКЗ	107
4.5.6 Формирование предложения по отключению СКЗ	107
4.5.7 Алгоритм решения	108
4.6 Оптимизация параметров защиты СКЗ.....	109
4.6.1 Оценка необходимости оптимизации режимов СКЗ.....	109
4.6.2 Расчет значений напряжения на выходе СКЗ по критериям защищенности.....	111
4.6.3 Алгоритм решения	112
4.7 Разработка прототипа ПО для решения задач оптимального управления режимами СКЗ	113
4.8 Выводы по главе	119
5 ПРОВЕДЕНИЕ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ СКЗ НА ДЕЙСТВУЮЩЕМ ОБЪЕКТЕ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА.....	120
5.1 Постановка задачи исследования	120
5.2 Описание объекта исследования, программы исследования и оборудования	121
5.3 Нахождение оптимальных режимов работы станций катодной защиты на исследуемом участке.....	124
5.4 Выводы по главе	132
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	133
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	135
ПРИЛОЖЕНИЕ А	145

СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АРМ – автоматизированное рабочее место;

АСУ ТП – автоматизированная система управления технологическими процессами;

ВКО – высокая коррозионная опасность;

ГАЗ – глубинное анодное заземление;

ГПН – генератор пилообразного напряжения;

ГТС – газотранспортная система;

ЗоК – защита от коррозии;

КИП – контрольно-измерительный пункт;

КПД – коэффициент полезного действия;

ЛПР – лицо принимающее решение;

МГ – магистральный газопровод;

МТ – магистральный трубопровод;

ПДКМ – подсистема дистанционного коррозионного мониторинга;

ПКО – повышенная коррозионная опасность;

ПК – персональный компьютер;

ПО – программное обеспечение;

ПП – промышленная площадка;

УКЗ – установка катодной защиты;

УКО – умеренная коррозионная опасность;

СКЗ – станция катодной защиты;

ЭС – электрод сравнения;

ЭХЗ – электрохимическая защита.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

Магистральные газопроводы эксплуатируются в различных климатических условиях, грунтах различной коррозионной активности, а также в морской воде.

Для обеспечения антикоррозионной защиты газопроводов используется комплексное сочетание пассивной (изоляционные покрытия) и активной (электрохимической) защиты. Критерием оценки эффективности электрохимической защиты является защитный потенциал и защитная плотность тока, которые зависят как от физико-химических свойств коррозионной среды, так и состояния оборудования противокоррозионной защиты и могут меняться в широких пределах [15, 16, 32, 35, 74].

Защита трубопроводов осуществляется за счет поддержания минимального (отрицательного) защитного потенциала на концах зоны защиты. Завышение по модулю защитных потенциалов относительно нормируемых значений приводит к перерасходу электроэнергии и в целом значительно удорожает эксплуатацию системы катодной защиты, за счет отрицательного влияния на состояние изоляционного покрытия и ведет к изменению механических свойств металла трубы, повышенному растворению анодных заземлений [41, 56, 57, 96]. В свою очередь недостаточная катодная защита нефтегазопроводов приводит к повышению скорости коррозионного поражения стенки трубопровода и, как результат, к преждевременному выходу его из строя [37, 44, 46].

Существующие системы управления станциями катодной защиты работают в функции поддержания заданного параметра без адаптации к изменяющимся условиям нагрузки, что в целом снижает эффективность применения устройств электрохимической защиты. Основными параметрами работы станций катодной защиты являются напряжение «труба-земля» и поляризационный потенциал. При этом контроль защитного по-

тенциала ведется только в точке дренажа, что не позволяет системе реагировать на изменения параметров нагрузки по трассе трубопровода. Кроме того, на ряде объектов, степень защищенности которых составляет 100%, тем не менее, обнаруживаются коррозионные дефекты.

В условиях отсутствия информации по всем факторам, влияющим на коррозию, в том числе и изменяющихся во времени (блуждающие токи, в т.ч. и индуцированные, плотность постоянного и переменного токов, режимы работы смежных станций катодной защиты либо смежных объектов, включенных в совместную защиту или имеющих электрическую связь между собой, удельное сопротивление грунта, температура и т.д.) практически невозможно принять решение об оптимальных выходных режимах работы станций катодной защиты, обеспечивающих защищенность по протяженности и во времени на всех сооружениях одновременно с минимальными энергозатратами.

Развитие систем дистанционного коррозионного мониторинга дает возможность получения массива информации о состоянии магистрального трубопровода и степени его защищенности в различных его точках [74]. Перед эксплуатирующими организациями ставятся цели эффективного и оптимального управления системой противокоррозионной защиты и электрохимической защиты в частности. При этом до настоящего времени отсутствует инструмент, позволяющий на основе оценки совокупности коррозионных факторов, особенностей защищаемого участка, состояния оборудования электрохимической защиты принять решение о выборе оптимальных режимов работы станций катодной защиты.

Цель работы

Совершенствование методов оптимального регулирования режимов работы и разработка алгоритмов оптимального управления станциями катодной защиты от коррозии магистральных трубопроводов.

Основные задачи исследований:

- анализ современных методик оптимального регулирования режимов работы станций катодной защиты;
- разработка модели распределения потенциалов по трассе магистрального нефтегазопровода на основе идентификации модели «труба-земля»;
- выявление необходимых и достаточных критериев для решения задачи повышения эффективности катодной защиты от коррозии;
- нахождение методов решения многокритериальной задачи установления оптимальных параметров станций катодной защиты от коррозии;
- разработка алгоритмов оптимального регулирования режимов работы станций катодной защиты;
- апробация полученных результатов на объекте линейной части действующего магистрального газопровода.

Научная новизна

1. Усовершенствована модель распределения потенциалов по трассе магистрального нефтегазопровода в зависимости от управляющего воздействия, отличающаяся от известных уменьшением времени на проведение замеров для ее идентификации за счет использования систем дистанционного коррозионного мониторинга и введения понятия сторонняя разность потенциалов «труба-земля» трубопровода, которая учитывает влияние неизвестных источников тока на величину защитной суммарной разности потенциалов «труба-земля» в конкретной точке. Экспериментальным путем установлено, что погрешность вычисляемого значения защитной суммарной разности потенциалов «труба-земля» в конкретной точке, с помощью предложенной модели, не превышает 0,6% относительно измеряемой для данных условий проведения исследования.

2. Разработаны подходы на основе методов структурно-параметрической оптимизации для решения многокритериальной задачи нахождения оптимальных параметров станций катодной защиты.

3. Предложена формула интегрального показателя степени влияния коррозионных факторов Int_j на участке магистрального трубопровода, позволяющая ранжировать участки между станциями катодной защиты для принятия решений о возможности изменения режимов работы станций.

Защищаемые положения

1. Разработанная модель распределения потенциалов по трассе магистрального нефтегазопровода в зависимости от режимов работы СКЗ коррозии за счет введения понятия сторонняя разность потенциалов «труба-земля» и возможности сокращения времени за счет проведения дистанционного измерения параметров защищенности и регулирования режимов станций катодной защиты.

2. Разработанные методы идентификации модели «труба-земля» с использованием байесовской методологии, позволяющие повысить точность формируемой модели.

3. Многокритериальный подход к решению задачи повышения эффективности защиты от коррозии на основе применения методов структурной оптимизации для нахождения выходных параметров работы станций катодной защиты магистральных трубопроводов от коррозии.

4. Разработанные алгоритмы эффективного управления системой активной защиты от коррозии магистральных трубопроводов, учитывающие параметры защищаемого объекта, оборудования противокоррозионной защиты и коррозионного состояния участка трубопровода.

Практическая значимость

Полученные результаты позволяют проводить оптимальное регулирование режимов работы станций катодной защиты в реальном масштабе

времени, как действующих магистральных трубопроводов, так и новых вводимых в эксплуатацию трубопроводов, позволяющие добиться как защищенности и энергоэффективности, так и продления срока службы элементов противокоррозионной защиты (изоляционных покрытий, анодных заземлений).

Полученные результаты использованы для проведения работ по оптимизации режимов работы средств ЭХЗ действующего магистрального газопровода «Саратов-Горький» км 92 - 147.

Результаты работы внедрены:

- при разработке мероприятий по обеспечению энергетической эффективности, определению оптимальных режимов работы станций катодной защиты, как при реконструкции существующих нефтегазотранспортных объектов, так и вновь строящихся объектов в АО «Гипрогазцентр» (шифр 4543 «Магистральный газопровод «Сила Сибири», «Общесистемные решения»; шифр 14/2225 «Математическое обеспечение оптимизации режимов работы станций катодной защиты ГТС «Сила Сибири»);

- в учебный процесс по дисциплинам «Защита объектов транспорта и хранения нефти и газа от коррозии» и «Электрохимические методы защиты нефтегазопроводов», которые входят в учебные программы подготовки магистров и бакалавров по направлению 131000 – «Нефтегазовое дело» на базовой кафедре «Проектирование и эксплуатация газонефтепроводов и газонефтехранилищ» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева в АО «Гипрогазцентр»;

Апробация работы

Основные результаты работы были доложены и обсуждены на конференциях:

- Научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электроэнергетики», 22 – 23 ноября 2012 г. – НГТУ, Нижний Новгород.

- Научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов научно-исследовательских и проектных организаций ОАО «Газпром» «Актуальные вопросы проектирования объектов добычи и транспортировки газа», 24 – 27 сентября 2013 года – ОАО «Гипрогазцентр», Нижний Новгород.
- V Международная молодежная научно-практическая конференция «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность», 20 – 22 ноября 2013 г. – ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Москва.
- XX Международная научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии. ИСТ – 2014», 15 – 17 апреля 2014 г. – НГТУ, Нижний Новгород.
- XIII Международная молодежная научно-техническая конференция «Будущее технической науки», 23 мая 2014 г. – НГТУ, Нижний Новгород.
- I Научно-практическая конференция молодых специалистов ОАО «Гипрогазцентр» «Актуальные вопросы проектирования объектов транспорта нефти и газа», 17 – 18 сентября 2014 г. – ОАО «Гипрогазцентр», Нижний Новгород.
- Научно-практическая конференция специалистов АСПО Газпром «Научно-технологические инновации при проектировании объектов газовой промышленности», 19 ноября 2014 г. – АСПО Газпром, Москва.
- VIII Международная научно-техническая конференция «Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта», 25 – 28 ноября 2014 г. – Полоцкий Государственный Университет, г. Новополоцк Республика Беларусь.
- XVI Международная молодежная научная конференция «Севергеозкотех» 26 – 28 марта 2015 г. – Ухтинский государственный технический университет, Ухта.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 15 печатных работ, в том числе 5 – в изданиях, входящих в «Перечень...» ВАК Минобрнауки РФ.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения. Материал изложен на 145 страницах, содержащих 50 рисунков и 15 таблиц. Список цитируемой литературы включает 97 наименований работ.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ СТАЛЬНЫХ МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ, ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К ОПТИМАЛЬНОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ РЕЖИМОВ СКЗ

1.1 Условия эксплуатации и коррозионное состояние магистральных нефтегазопроводов

Общая протяженность магистральных газопроводов в Российской Федерации составляет более 171 тыс. км, общая протяженность магистральных нефтепроводов составляет более 71 тыс. км и постоянно увеличивается. Магистральные нефтегазопроводы способны перемещать огромное количество энергоносителей на большие расстояния, при этом их достоинствами являются надежность, дешевизна и бесшумность.

Магистральные трубопроводы работают в различных природно-климатических условиях [20, 43, 65]. Прокладка трубопроводов осуществляется как под землей, так и над ее поверхностью, в морской воде и по дну рек, озер и болот. Температура эксплуатации трубопроводов также различна и может быть как отрицательной, так и положительной [42].

Основным материалом, из которого изготавливаются магистральные трубопроводы, является сталь, которая в процессе эксплуатации подвергается коррозионному воздействию окружающей трубопровод среды [1].

Основной причиной аварий на подземных магистральных трубопроводах является коррозия, при этом необходимо отметить, что на коррозию наружной стенки трубопроводов приходится около 95% отказов, и всего лишь 5% – на коррозию внутренней стенки трубопроводов.

Основной задачей эксплуатирующих магистральные трубопроводы организаций является обеспечение безаварийной деятельности объектов в течение заявленного срока службы. Решение этой проблемы комплексное

и зависит от повышения качества проектирования, строительства и эксплуатации объектов трубопроводного транспорта [4].

Одной из причин аварий является нарушение требований к противокоррозионной защите магистральных газопроводов и контролю ее эффективности.

Для обеспечения работоспособности магистральных трубопроводов эксплуатирующим организациям необходимо проводить плановые проверки их коррозионного состояния, внедрять современные системы дистанционного коррозионного мониторинга, контролировать эффективность противокоррозионной защиты, устранять повреждения и неисправности в системе противокоррозионной защиты.

Защита от коррозии подземных и морских газопроводов независимо от коррозионной агрессивности коррозионной среды, осуществляется с помощью комплексной защиты, включающей защитные покрытия (пассивную защиту) и электрохимическую защиту (активную защиту) [32].

Требуемый уровень противокоррозионной защиты магистральных газопроводов достигается совершенствованием существующих средств электрохимической защиты, методов и устройств контроля защищенности и коррозионного состояния трубопроводов и оптимизацией параметров защиты [5].

Для обеспечения устойчивого функционирования системы транспортировки и подземного хранения газа (далее ГТС) в технической политике ОАО «Газпром» отмечается роль системы управления техническим состоянием и целостностью (СУТСЦ). Целостность характеризует способность ГТС выполнять свое функциональное назначение в заданный период времени при взаимодействии с внешней средой и с учетом полноты процедур диагностирования, технического обслуживания и ремонта, в том числе, при нарушении одним или несколькими входящими в ее состав техническими объектами требований по надежности, промышленной и экологической безопасности, а также иных требований, установленных

нормативными документами ОАО «Газпром» и федеральным законодательством [42].

Необходимым условием достижения целей ОАО «Газпром» при управлении техническим состоянием и целостностью ГТС является учет требований энергетической и экономической эффективности эксплуатации объектов ГТС. В этой части автоматизация и интеллектуализация развиваемых процедур управления противокоррозионной защитой обеспечивает прямое сокращение затрат от внедрения на новых объектах за счет:

- уменьшения установленной мощности СКЗ;
- сокращения потребляемой электроэнергии;
- увеличения ресурса СКЗ и анодных заземлителей (АЗ);
- сокращения трудозатрат на периодические измерения и оптимизацию режимов работы СКЗ;
- сокращения количества оборудования по трассе МГ для коррозионного мониторинга.

1.2 Методы защиты трубопроводов от коррозии

1.2.1 Пассивная защита труб от коррозии

Первичная защита трубопроводов от коррозии осуществляется изоляционными покрытиями. Изоляционные покрытия обеспечивают пассивную защиту трубопроводов от коррозии и препятствуют соприкосновению металла трубопровода с коррозионно-опасной средой (водой, кислородом, воздухом и др.) [19, 21, 24, 33, 38].

Основными требованиями, предъявляемыми к изоляционным покрытиям, являются: низкая влажнокислородопроницаемость, высокие механические характеристики, высокая и стабильная во времени адгезия покрытия к стали, стойкость к катодному отслаиванию, хорошие диэлек-

трические характеристики, устойчивость покрытия к ультрафиолетовому и тепловому старению. Изоляционные покрытия должны быть устойчивы к механическим воздействиям и сохранять свои свойства в широком диапазоне температур для обеспечения защищенности трубопровода на срок его эксплуатации.

Для изоляции нефтегазопроводов в трассовых условиях в настоящее время наиболее широко применяют три типа защитных покрытий: а) битумно-мастичные покрытия; б) полимерные ленточные покрытия; в) полиэтиленовое покрытие заводского нанесения [20]. Распределение покрытий действующих магистральных трубопроводов по типу представлено на рисунке 1.1.

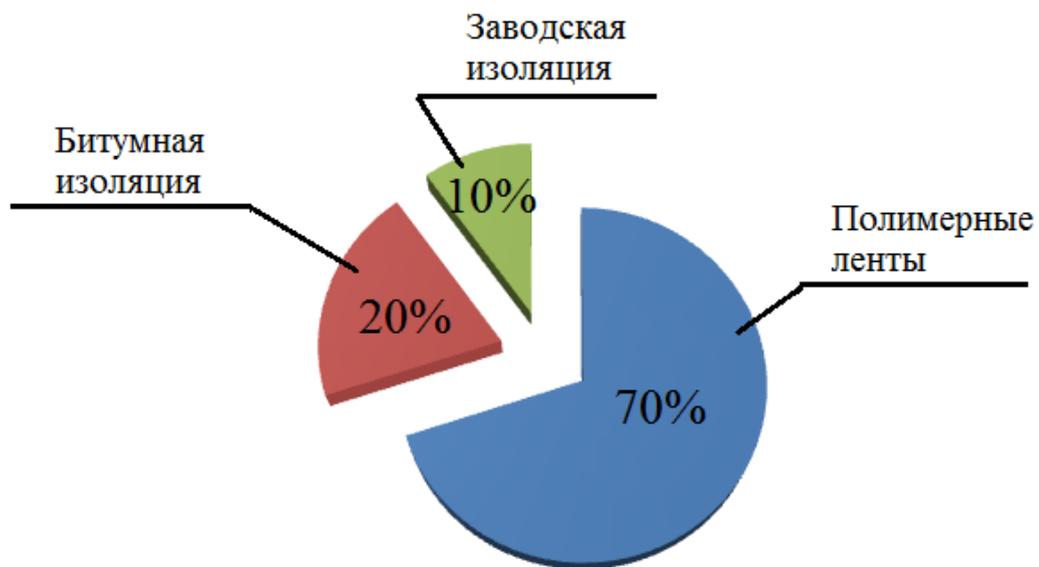


Рисунок 1.1 – Распределение по типу изоляционных покрытий действующих магистральных трубопроводов

Более эффективным наружным антикоррозионным покрытием является заводское трехслойное полиэтиленовое покрытие труб, конструкция которого состоит из двухслойного полиэтиленового покрытия наличием еще одного слоя – эпоксидного праймера. Трехслойное полиэтиленовое покрытие отвечает самым современным техническим требованиям и способно обеспечить эффективную защиту трубопроводов от коррозии

на продолжительный период их эксплуатации (до 40-50 лет и более) [76, 77].

Для обеспечения противокоррозионной защиты трубопроводов малых и средних диаметров (до 530 мм) широкое применение получило комбинированное ленточно-полиэтиленовое покрытие. Конструктивно покрытие состоит из слоя адгезионной грунтовки, слоя дублированной полиэтиленовой ленты и наружного слоя на основе экструдированного полиэтилена. Общая толщина комбинированного ленточно-полиэтиленового покрытия составляет 2,2-3,0 мм [23, 94].

Основным электрическим параметром изоляционных покрытий является их сопротивление, величина которого напрямую влияет на степень защищенности [51]. Сопротивление битумной изоляции составляет $1 \cdot 10^5$ Ом·м², сопротивление полимерной изоляции составляет $3 \cdot 10^5$ Ом·м². Сопротивление современных видов покрытия на основе экструдированного полиэтилена, наносимого в заводских условиях, составляет порядка $1 \cdot 10^7$ - $1 \cdot 10^8$ Ом·м² [32, 87, 92].

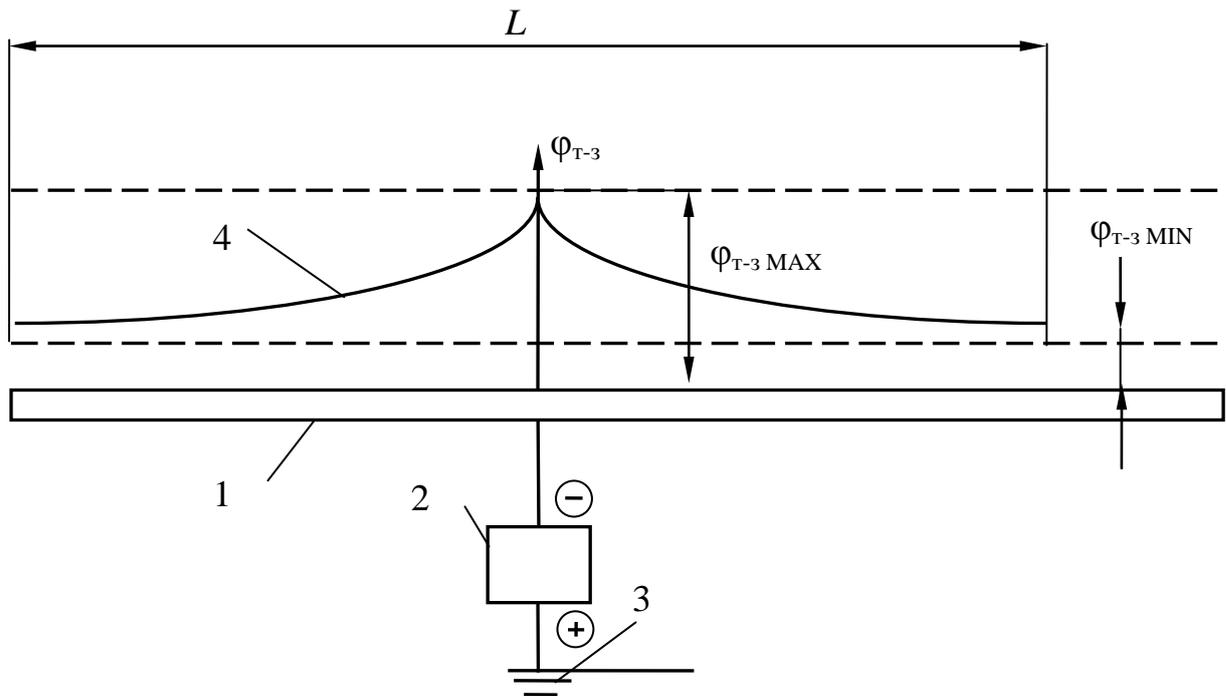
1.2.2 Активная защита от коррозии

При образовании в изоляционном покрытии дефектов и оголении металла трубы защита от коррозии осуществляется системой электрохимической защиты. Такая защита называется активной.

Сущность электрохимической защиты заключается в искусственной поляризации трубопровода (катода) таким образом, чтобы его потенциал сместился в отрицательную сторону. В результате смещения потенциала катода в отрицательную сторону работа коррозионной пары прекращается [35, 45, 58, 68]. Но необходимо учесть, что это может быть лишь при потенциале, находящимся в определенных границах и соответствующей силе защитного тока. Защитная поляризация катода может быть осуществлена наложением защитного потенциала от источника постоянного тока или применением в качестве дополнительного анода материалов,

собственный потенциал которых более отрицателен, чем материал катода [9, 14, 15, 25, 36, 37].

Поляризация трубопровода от источника постоянного тока называется электрохимической (катодной) защитой трубопровода. Схема электрохимической защиты представлена на рисунке 1.2.



- 1 – трубопровод; 2 – станция катодной защиты (СКЗ); 3 – анодное заземление;
4 – график распределения поляризационного потенциала магистрального трубопровода при защите одиночной станцией защиты

Рисунок 1.2 – Схема электрохимической защиты [7]

Трубопровод, расположенный в грунте, является катодом по отношению к электролиту, заполняющему поры грунта. Соответственно грунт является анодом по отношению к трубопроводу. Отрицательный полюс источника тока подключается к трубопроводу (катод), а положительный – к специально устраиваемому заземлению (анод). Источник тока 2 – станция катодной защиты (СКЗ). Каждая станция в зависимости от коррозионных свойств грунта, качества изоляции, мощности самой станции может защитить трубопровод 1 на участке определенной длины L . В пределах этой длины защитный потенциал, создаваемый станцией катодной защиты, обеспечивает отсутствие на катоде (трубопроводе) электрохими-

ческой коррозии. В то же время анод (заземление) вследствие активизации анодного процесса интенсивно разрушается. Показанная на рисунке 1.1 кривая 3 характеризует распределение защитной разности потенциалов ϕ в пределах длины участка L (труба-грунт). Наибольшее значение $\phi_{Т-З \text{ МАХ}}$ фиксируется обычно напротив анода, т.е. заземления [7].

На магистральных газопроводах применяют преимущественно глубинные анодные заземлители (ГАЗ), предназначенные для сооружения контура заземляющего устройства (анодного поля), который обычно состоит из нескольких ГАЗ, включенных параллельно [70].

Установка катодной защиты (УКЗ) – это комплекс сооружений, предназначенный для защиты трубопровода от коррозии внешним постоянным током.

УКЗ состоит из следующих элементов:

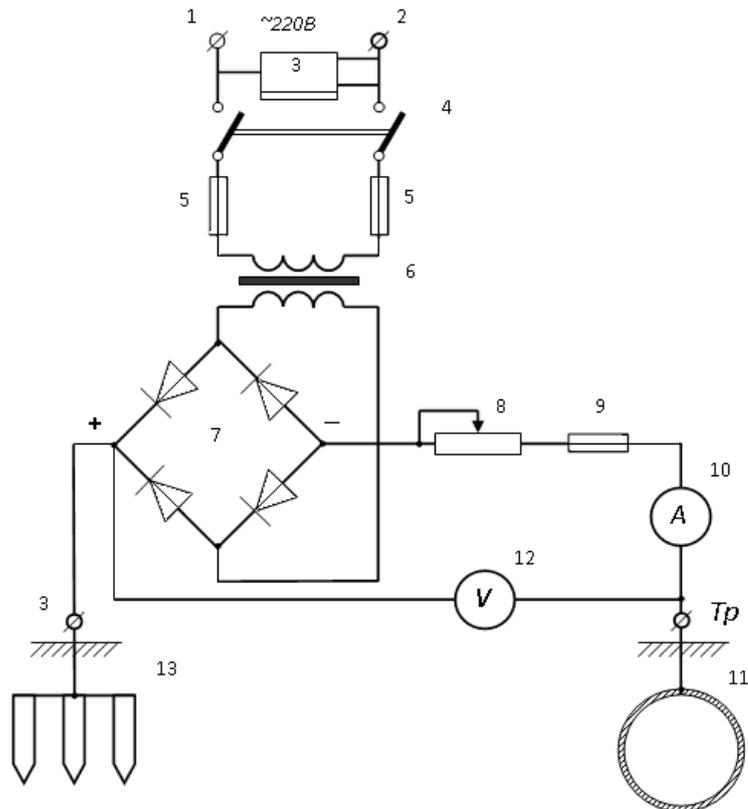
- а) выпрямителя (преобразователя напряжения станции катодной защиты (СКЗ)),
- б) анодного заземления (АЗ),
- в) защитного заземления (ЗЗ),
- г) катодного вывода трубопровода (дренажный кабель),
- д) соединительных электролиний.

Составными частями электрической цепи УКЗ являются защищаемый трубопровод и участок грунта, замыкающий анодный и катодный участки электрической цепи [7].

Станции катодной защиты предназначены для смещения защитного потенциала коррозии на подземных металлических сооружениях.

Источники постоянного тока СКЗ разделяются на две группы. К первой группе относятся преобразующие устройства – выпрямители; ко второй – генерирующие устройства: ветроэлектродгенераторы, термоэлектродгенераторы, электродгенераторы с приводом от газовых турбин, от двигателей внутреннего сгорания и т.д.

На магистральных газопроводах широкое распространение получили катодные станции с выпрямителями (рисунок 1.3), питание которых производится от сетей переменного тока. При наличии линий электропередач переменного тока с напряжением 0,4; 6 и 10 кВ, применение таких станций целесообразно и экономически оправдано. Сеть переменного тока подключается к клеммам 1 и 2.



- 1, 2 — сетевые клеммы для подключения промышленного тока;
 3 — счетчик электроэнергии; 4 — сетевой автомат защиты; 5 — предохранители;
 6 — трансформатор; 7 — выпрямитель; 8 — реостат; 9 — предохранитель;
 10 — амперметр; 11 — защищаемый трубопровод; 12 — вольтметр;
 13 — анодное заземление

Рисунок 1.3 – Принципиальная схема простейшей сетевой станции катодной защиты

Потребляемая электроэнергия учитывается счетчиком 3. Автомат 4 служит для включения установки, а предохранители 5 обеспечивают защиту от токов короткого замыкания и перегрузок на стороне переменного тока. Понижающий трансформатор 6 питает выпрямитель 7, собираемый обычно по двухполупериодной схеме. Регулирование силы постоянного

тока осуществляется реостатом 8. Защита от перегрузок цепи постоянного тока обеспечивается предохранителем 9. С помощью амперметра 10 и вольтметра 12 контролируются параметры работы СКЗ. Трубопровод 11 подключается к клемме ТР, а анодное заземление 13 – к клемме З [7].

Преобразование переменного тока в постоянный осуществляется путем предварительного понижения напряжения трансформатором с последующим выпрямлением тока полупроводниковыми вентилями. Основным недостатком данного типа преобразователей являются большие потери мощности в виде рассеивания тепла на регулирующем реостате.

Следующим поколением СКЗ стали станции тиристорного типа, в которых регулирование силы защитного тока производится электронными блоками фазового управления состоянием тиристорov.

На сегодняшний день на объектах нефтегазотранспортной системы выделяют два типа преобразователей входящих в состав станций катодной защиты:

- тиристорные;
- инверторные.

Основные современные станции катодной защиты обеспечивают работу в следующих режимах:

- автоматического поддержания суммарного защитного потенциала;
- автоматического поддержания поляризационного защитного потенциала;
- стабилизации выходного тока;
- ручного регулирования выходного напряжения;
- неуправляемого выпрямителя.

Принцип работы тиристорных преобразователей основан на предварительном понижении сетевого напряжения с помощью силового трансформатора и выпрямлении его мостовым диодно-тиристорным выпрямителем. Регулирование выходного напряжения осуществляется путем изме-

нения момента отпирания тиристоров с помощью системы фазового управления [7, 62].

Катодные станции, в зависимости от модификации, подразделяются на регулируемые и автоматические.

Автоматические устройства катодной защиты представляют собой катодные станции, снабженные специальными блоками, обеспечивающими, в зависимости от потенциального состояния сооружения, автоматическое регулирование электрических параметров защиты.

Достоинствами станций тиристорного типа являются:

- высокая надежность;
- простота конструкции, позволяющая организовать ремонт станции на местах силами специалистов службы ЭХЗ.

К недостаткам тиристорных станций относится:

- низкий КПД даже на номинальной мощности,
- выходной ток имеет недопустимо большие пульсации;
- большой вес станций;
- отсутствие корректоров мощности;
- большое количество меди в силовом трансформаторе.

Принцип работы современных станций инверторного типа рассмотрим на примере современных разработок ЗАО «Корпоративный институт электротехнического приборостроения «Энергомера» [64]. Преобразователь напряжения для катодной защиты содержит сетевой фильтр радиопомех 1, сетевой выпрямитель 2, активный фильтр 3, высокочастотный инвертор 4, дроссель 5 высокочастотного инвертора 4, трансформатор 6, выпрямительный мост 7, выходной сглаживающий фильтр 8. Схема электрическая принципиальная современных преобразователей инверторного типа производства ЗАО «Энергомера» представлена на рисунке 1.4.

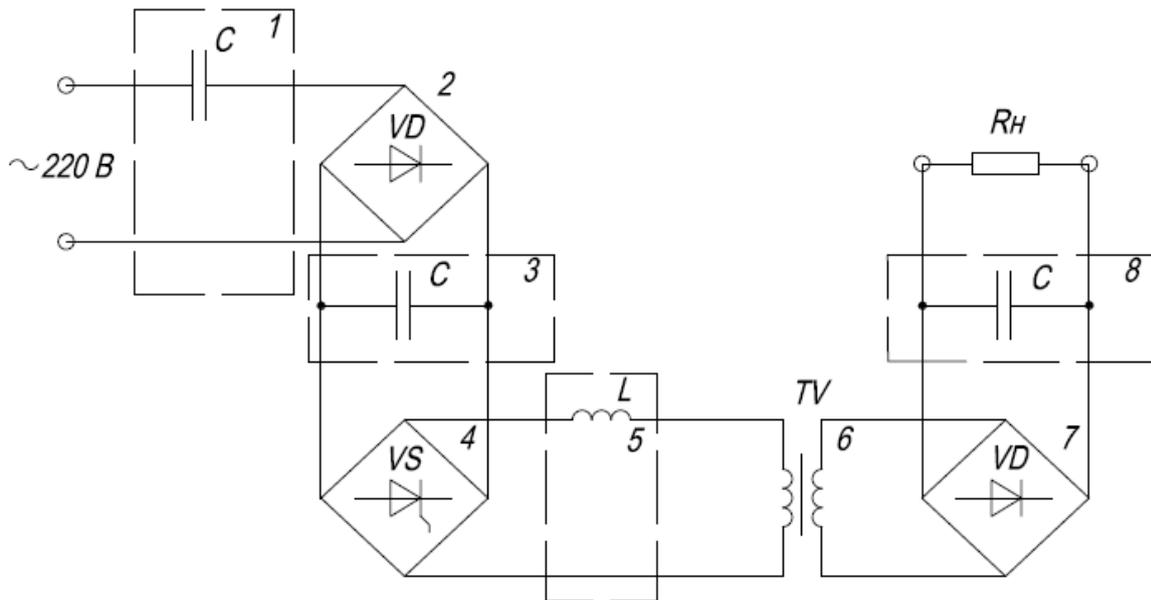


Рисунок 1.4 – Схема электрическая принципиальная современных преобразователей инверторного типа производства ЗАО «Энергомера»

Сущность работы преобразователей инверторного типа заключается в увеличении КПД за счет двойного преобразования энергии и уменьшении потерь на высокочастотном трансформаторе.

К достоинствам данного типа станций можно отнести:

- высокий КПД;
- низкий уровень пульсаций выходного тока;
- малый вес (типичный вес станции с мощностью в 1 кВт ~ 8...12 кг);
- компактность;
- малое количество меди в станции;
- высокий коэффициент мощности (при наличии корректора, что является обязательным требованием ГОСТа);
- легкость оперативной замены станции (преобразователя мощности) даже одним человеком, особенно при модульном исполнении станции.

К недостаткам относится:

- отсутствие возможности ремонта в мастерских служб ЭХЗ;
- более низкая, по сравнению с тиристорными, надежность станции, определяемая существенно большей сложностью, большим количеством

компонентов и чувствительностью ряда из них к скачкам напряжения во время грозы и при автономной системе электроснабжения. В последнее время ряд производителей поставляют СКЗ с установленными блоками грозозащиты и стабилизаторами напряжения, что существенно увеличивает их надёжность.

При катодной защите трубопроводов различают три значения потенциала:

- стационарный (естественный) потенциал металла трубы, существующий до включения защиты;
- наложенный (расчетный) потенциал, дополнительно накладываемый на трубопровод в результате действия защиты;
- защитная (общая) разность потенциалов, установившаяся после подключения защиты.

Общепризнанными в мировой практике критериями противокоррозионной защиты являются защитная суммарная разность потенциалов «труба-земля» и поляризационный потенциалы, определяемые как разность потенциалов между трубопроводом и «близкой» землей относительно медно-сульфатного электрода сравнения (МЭС), и отличающиеся элиминированием падения напряжения в грунте при измерении поляризационного потенциала.

Эффективная защита металла трубы от коррозионных процессов происходит, только если значение защитной разности потенциалов «труба-земля» не меньше минимального $\varphi_{Т-З \text{ MIN}}$. Смещение защитной разности потенциалов «труба-земля» в область более отрицательных значений не оказывает существенного защитного эффекта, но при чрезмерном увеличении φ по сравнению с $\varphi_{Т-З \text{ MIN}}$ между изоляцией и поверхностью металла скапливается водород, выделяющийся в результате катодного процесса. Выделение водорода может привести к изменению механических свойств металла трубы и ухудшению защитных свойств изоляционного покрытия [57]. Таким образом, поддержание оптимального значения защитной раз-

ности потенциалов по всей трассе магистрального трубопровода является необходимым условием обеспечения защищенности с минимальными энергозатратами и увеличивающим срок эксплуатации магистрального трубопровода [83].

Чем лучше качество покрытия, тем требуется меньшая защитная разность потенциалов, тем большую длину участка L можно защитить от одной станции, и наоборот – чем больше повреждений на изоляционном покрытии, тем меньше длина защищаемого участка L [69]. Следовательно, на участках новых газопроводов, вводимых в эксплуатацию, с хорошим сопротивлением изоляционного покрытия, влияние СКЗ может достигать ста и более километров.

Электрохимическая защита обеспечивается в том случае, если поляризационный потенциал (с элиминированием омического падения напряжения) удовлетворяет определенным критериям.

Для подземных металлических сооружений разность потенциалов (относительно медносульфатного электрода сравнения) должна быть более отрицательной, чем минус 0,85 В. Критерий установлен Робертом Дж. Куном. Многочисленные дальнейшие исследования подтвердили, что при этой защитной разности потенциалов скорость коррозии значительно снижается (для сталей, находящихся в наиболее распространенных коррозионных средах - менее 0,1 мм в год) [30].

Данный критерий принят во многих национальных и региональных стандартах и рекомендациях по катодной защите подземных стальных сооружений (ГОСТ 9.015-74; NACE, Standards RP-01 -69; British Standards institution CP 1021: 1973; рекомендации СЭВ и др.).

Согласно ГОСТ Р 51164-98, все стальные трубопроводы (кроме надземных), независимо от условий эксплуатации, подлежат электрохимической защите. Электрохимическая защита должна обеспечивать в течение всего срока эксплуатации непрерывную по времени катодную поляризацию трубопровода на всем его протяжении (и на всей его поверх-

ности) таким образом, чтобы значения разности потенциалов на трубопроводе были (по абсолютной величине) не меньше минимального и не больше максимального значений. Значения минимального и максимального защитных разностей потенциалов зависят от условий прокладки и эксплуатации трубопровода.

Таблица 1.1 – Минимальные значения защитных потенциалов

Условия прокладки и эксплуатации трубопровода	Минимальный защитный потенциал относительно насыщенного медно-сульфатного электрода сравнения, В	
	Поляризационный (без омической составляющей)	С омической составляющей
Грунты с удельным электрическим сопротивлением не менее 10 Ом·м при температуре транспортируемого продукта не более 293 К (20°C)	-0,85	-0,90
Грунты с удельным электрическим сопротивлением менее 10 Ом·м или опасном влиянии блуждающих токов промышленной частоты (50 Гц) и постоянных токов, или при возможной микробиологической коррозии, или при температуре транспортируемого продукта более 293 К (20°C)	-0,95	-1,05

Таблица 1.2 – Максимальные значения защитных потенциалов

Условия прокладки и эксплуатации трубопровода	Максимальный защитный потенциал относительно насыщенного медно-сульфатного электрода сравнения, В	
	Поляризационный	С омической составляющей
При прокладке трубопровода с температурой транспортируемого продукта выше 333 К (60°C) в грунтах с удельным электрическим сопротивлением менее 10 Ом·м или при подводной прокладке трубопровода с температурой транспортируемого продукта выше 333 К (60°C)	-1,10	-1,50
При других условиях прокладки трубопроводов:		
с битумной изоляцией	-1,15	-2,50
с полимерной изоляцией	-1,15	-3,50

Высокая надежность работы магистральных газопроводов может быть обеспечена за счет бездефектного изоляционного покрытия и ввода

в эксплуатацию системы электрохимической защиты в процессе строительства магистрального газопровода и не допускающей снижения защитного поляризационного потенциала ниже (по абсолютной величине) минимально допустимого значения на всем протяжении сооружения, в процессе всего периода эксплуатации [6, 86, 90].

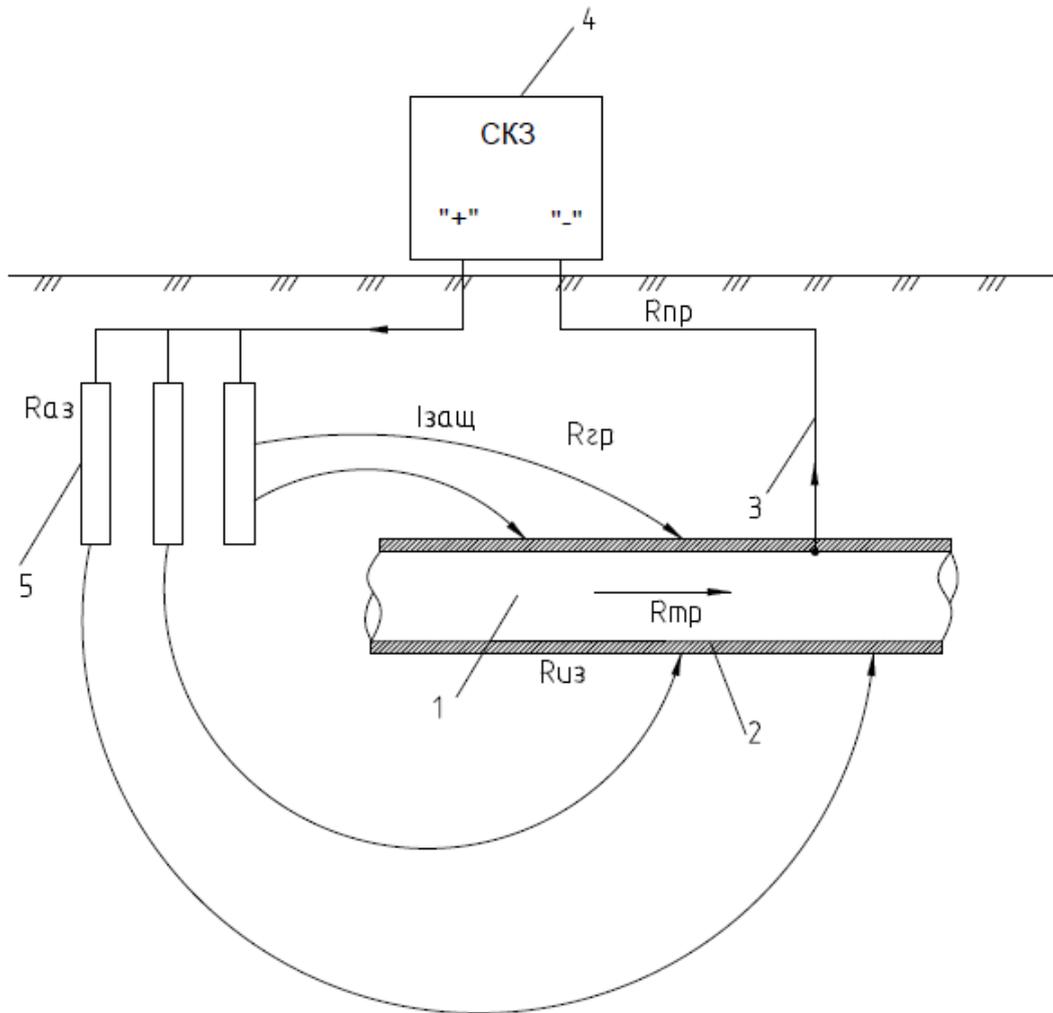
Система катодной защиты включает несколько установок катодной защиты, каждая из которых состоит из следующих восстанавливаемых элементов: источника электроснабжения, катодной станции (преобразователя), анодного заземления и линий постоянного тока, объединенных в электрическую цепь, и, при необходимости, регулирующих резисторов, шунтов, поляризованных элементов, блоков дистанционного контроля и регулирования параметров защиты.

1.3 Повышение эффективности электрохимической защиты от коррозии с учетом особенностей распределения защитного потенциала

Обеспечение величины защитного потенциала участка трубопровода напрямую зависит от величины натекающего защитного тока ($I_{\text{защ}}$). Влияние на распределение потенциала вдоль защищаемого участка оказывают изменяющиеся, как во времени, так и по протяженности параметры защищаемого объекта, оборудования противокоррозионной защиты и окружающей среды. В свою очередь на величину защитного тока оказывают влияния сопротивления цепи его протекания [27, 39], такие как:

- сопротивление изоляционного покрытия $R_{\text{из}}$, Ом·м²;
- сопротивление анодных заземлений $R_{\text{аз}}$, Ом;
- сопротивление грунта $R_{\text{гр}}$, Ом·м;
- продольное сопротивление металла трубопровода $R_{\text{тр}}$, Ом/м;
- сопротивление соединительных проводов $R_{\text{пр}}$, Ом.

Схема протекания защитного тока представлена на рисунке 1.5.



1 – защищаемый трубопровод; 2 – изоляционное покрытие; 3 – соединительные провода; 4 – станция катодной защиты; 5 – анодные заземления;

Рисунок 1.5 – Схема протекания защитного тока

Сложность поддержания защитной разности потенциалов заключается в динамическом изменении сопротивлений защищаемого участка. Проведя классификацию влияющих сопротивлений, было произведено их разделение на 3 группы в зависимости от изменения их величины во времени. Были выделены условно постоянные сопротивления (к ним отнесены сопротивление металла трубопровода и соединительных проводов), изменяющиеся во времени с постоянной тенденцией (сопротивления изоляции и анодных заземлений) и сезонно изменяющихся (удельное сопротивление грунта). Графическое отображение классификации влияющих на защитный потенциал сопротивлений представлено на рисунке 1.6.



$R_{тр}$ - продольное сопротивление трубопровода; $R_{пр}$ - сопротивление соединительных проводов; $R_{из}$ - сопротивление изоляционного покрытия; $R_{аз}$ - сопротивление анодных заземлений; $R_{гр}$ - удельное электрическое сопротивление грунта; t - время

Рисунок 1.6 – Графическое отображение классификации влияющих на защитный потенциал сопротивлений

Сопротивление грунта постоянно меняется в зависимости от климатических условий. Сопротивление анодных заземлений со временем увеличивается, из-за появления коррозионных отложений на его поверхности. Рассмотренные в работе Севериновой значения величин сопротивления растеканию действующих анодных заземлителей Сосногорского ЛПУ МГ показывают, их значительное превышение относительно требуемых по нормативной документации значений [70]. Значения величин сопротивления растеканию действующих анодных заземлителей Сосногорского ЛПУ МГ представлены на рисунке 1.7.

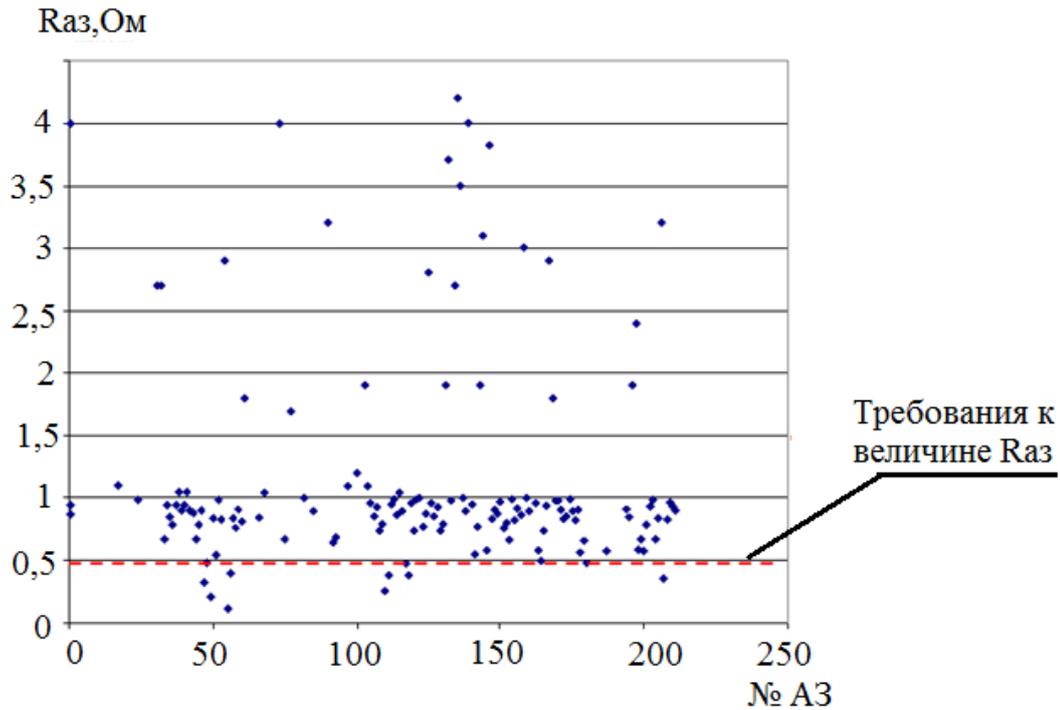


Рисунок 1.7 – Сопротивление растеканию анодных заземлителей Сосногорского ЛПУ МГ (по результатам филиала ООО «Газпром ВНИИ-ГАЗ») [70]

Сопротивление изоляционного покрытия значительно снижается в процессе эксплуатации магистрального трубопровода [8]. Сопротивление изоляционного покрытия во времени снижается по экспоненциальному закону

$$R_{из}(t) = R_{из0} \cdot e^{-\gamma \cdot t}, \quad (1.1)$$

где t – срок эксплуатации трубопровода, год;

$R_{из0}$ – начальное значение сопротивления изоляции, Ом·м²;

γ – коэффициент, характеризующий скорость изменения сопротивления изоляции во времени, 1/год (для битумных покрытий – 0,05, для полимерных покрытий – 0,08).

График изменения сопротивления изоляции во времени представлен на рисунке 1.8.

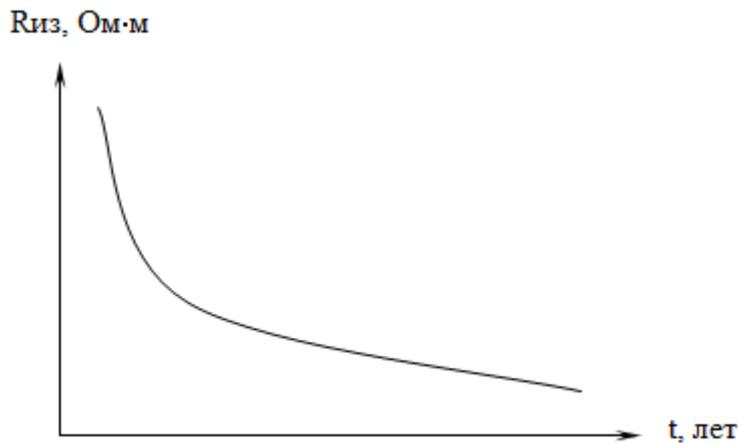


Рисунок 1.8 – График изменения сопротивления изоляции во времени

Сопротивления металла трубопровода и соединительных проводов во времени практически не изменяются.

В условиях длительной эксплуатации магистральных нефтегазопроводов, сопровождающейся образованием локальных участков неполной защиты в местах с образовавшимися дефектами защитных покрытий, основными вариантами восстановления защитного потенциала являются следующие:

- установка дополнительных СКЗ;
- установка дополнительных или ремонт существующих анодных заземлений;
- переизоляция участков трубопровода;
- изменение режимов работы СКЗ;

Перечисленные варианты требуют значительных материальных вложений, поэтому наиболее предпочтительным и первоочередным является вариант с нахождением оптимальных режимов работы СКЗ, дающим возможность имеющимися средствами защиты восстановить защитный потенциал. Кроме того, решая задачу энергоэффективности, необходимо стремиться к уменьшению совокупной выходной мощности станций на защищаемом участке. Нахождение оптимальных параметров также актуально для новых трубопроводов или трубопроводов, подвергшихся переи-

золяции, СКЗ которых работают в минимальных режимах и необходимо проведение процедуры оптимизации.

Согласно ГОСТ Р 51164-98 КПД станции должен быть не ниже 70%. Номинальная выходная мощность - это мощность, которую может отдавать станция, при номинальной нагрузке. Обычно принимают, что эта нагрузка составляет 1 Ом. КПД определяется как отношение номинальной выходной мощности к активной мощности, потребляемой станцией в номинальной режиме. И в этом режиме КПД самый высокий для любой станции. Однако большинство СКЗ работают в режимах сильно отличающихся от номинальных. Коэффициент загрузки по мощности колеблется от 0,3 до 1,0. В этом случае реальный КПД для большинства выпускаемых сегодня станций будет сильно падать при снижении выходной мощности. Особенно это заметно для трансформаторных СКЗ с применением тиристоров в качестве регулирующего элемента. Для инверторных (бестрансформаторных) СКЗ падение КПД при уменьшении выходной мощности существенно меньше [71]. Общий вид изменения КПД для СКЗ разного исполнения можно видеть на рисунке 1.9.

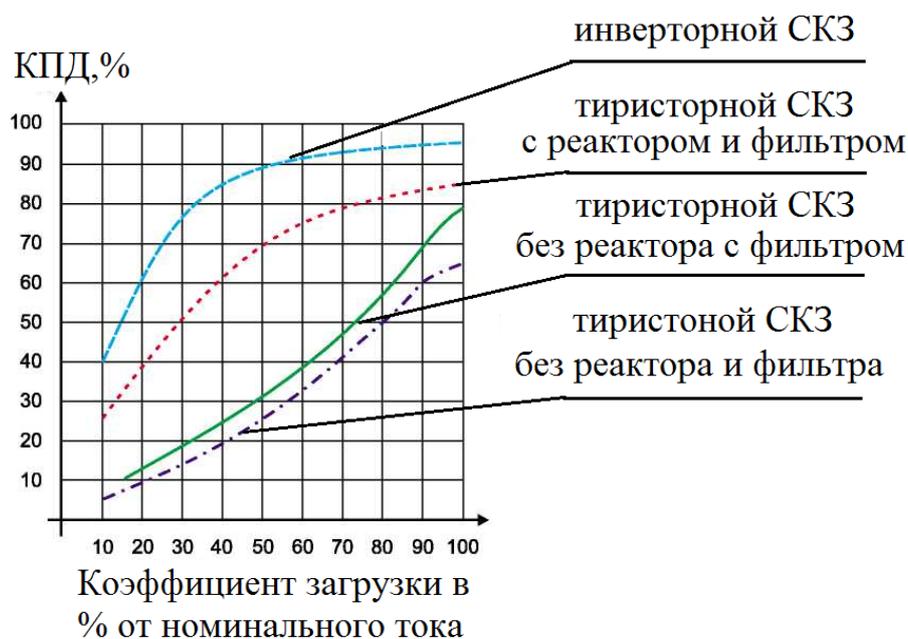


Рисунок 1.9 – Зависимость КПД от коэффициента загрузки для СКЗ разного исполнения [71]

Используя СКЗ, в режимах работы с низкой нагрузкой, основная часть потребляемой станцией электроэнергии расходуется на внутренние потери:

- омические (тепловые) потери в обмотках трансформаторов, дросселей и в активных элементах схемы;
- затраты энергии для работы схемы управления станцией;
- потери энергии в виде радиоизлучения; потери энергии пульсаций выходного тока станции на нагрузке.

Следовательно, необходимо выбирать такие совокупности режимов работы СКЗ, обеспечивающие защищенность при максимально-возможном для системы КПД.

Мощность станции катодной защиты напрямую зависит от состояния оборудования противокоррозионной защиты на участке, сезонных изменений удельного электрического сопротивления грунтов и определяется по формуле:

$$P = I^2 \cdot (Z_{\text{вхСКЗ}i}(t) + R_{\text{пр}} + R_{\text{аз}}), \quad (1.2)$$

где I – сила тока СКЗ;

$Z_{\text{вхСКЗ}i}(t)$ - характеристическое входное сопротивление трубопровода, складывающееся из продольного сопротивления трубопровода, сопротивления изоляции и сопротивления грунта.

1.4 Методы контроля и управления защищенностью средствами противокоррозионной защиты магистральных нефтегазопроводов

Для повышения эффективности электрохимической защиты магистральных газопроводов от коррозии необходимо в процессе эксплуатации осуществлять контроль защищенности от коррозии [5, 11, 16, 19], причем

результаты контроля должны отражать действительное состояние противокоррозионной защиты.

Основным критерием оценки уровня защищенности стального подземного сооружения служит защитная разность потенциалов катодной поляризации [32, 74]. В настоящее время существует множество методов контроля защитной разности потенциалов катодно защищаемого сооружения [32, 74].

Применяемые методы определения защищенности стальных подземных сооружений, как в нашей стране, так и в других странах приведены ниже.

1) Контроль защищенности по потенциалу:

- метод выносного электрода;
- метод выключения катодной поляризации;
- метод отключения тока поляризации вспомогательного электрода;
- метод применения капилляра Габера-Луггина;
- метод определения поляризационного потенциала с применением электрохимической ячейки.

2) Контроль по смещению потенциала от его стационарного значения.

3) Контроль по плотности тока катодной защиты.

Наиболее распространенным методом контроля потенциала стального подземного сооружения является метод измерения разности потенциалов между стальным сооружением и неполяризуемым электродом сравнения, находящимся в период проведения измерения над измеряемым объектом [10, 28, 32].

Поддержание уровня защитной разности потенциалов катодной поляризации в рамках, установленных нормативной документацией не является единственно верным критерием. Необходимо отметить, что коррозионные разрушения возникают и на участках, разность потенциалов которых находится в установленных рамках [10, 84]. Это связано со сложив-

шейся совокупностью коррозионных факторов, которую также необходимо учитывать, принимая решения по выбору оптимального сочетания выходных параметров станций катодной защиты магистральных трубопроводов [26, 66, 75]. Существующие в нормативно-технической документации подходы к ранжированию факторов не оценивают их совокупное влияние и не дают рекомендаций по поддержанию необходимых значений защитных потенциалов. Также, необходимо выявлять и вводить новые влияющие на коррозию факторы, такие как влияние наведенных переменных токов [18, 59, 93, 94].

В условиях отсутствия информации по всем факторам, влияющим на коррозию, в том числе и изменяющимся во времени (блуждающие токи, в том числе и индуцированные, плотность постоянного и переменного токов, режимы работы смежных станций катодной защиты либо смежных объектов, включенных в совместную защиту или имеющих электрическую связь между собой, удельное сопротивление грунта, температура и т.д.) практически невозможно принять решение об оптимальных выходных режимах работы СКЗ, обеспечивающих 100% защищенность по протяженности и во времени на всех сооружениях одновременно с минимальными энергозатратами.

В настоящее время отслеживание степени защищенности, наличия и величин различных коррозионных факторов значительно упрощается в связи с внедрением на объекты магистрального нефтегазотранспорта систем коррозионного мониторинга [74].

Коррозионный мониторинг – это:

- систематический сбор, накопление и анализ данных об изменении во времени коррозионного состояния защищаемых объектов, средств и параметров, а так же условий интенсивности коррозионного воздействия внутренних и внешних факторов на металлические конструкции и сооружения [73];

- выявление тенденций зарождения и протекания коррозионных процессов;
- определение источников внешних факторов, влияющих на коррозию во времени и протяженности;
- прогнозирование коррозии, электрических характеристик сооружений, тенденций изменения работы оборудования.

Требования к системам коррозионного мониторинга для объектов газотранспортной системы изложены в СТО Газпром 9.4-023-2013 «Мониторинг и прогноз коррозионного состояния объектов и оборудования. Система сбора, обработки и анализа данных. Основные требования».

Схема автоматизированного контроля и управления средствами ЗоК по СТО Газпром 9.4-023-2013 представлена на рисунке 1.10.

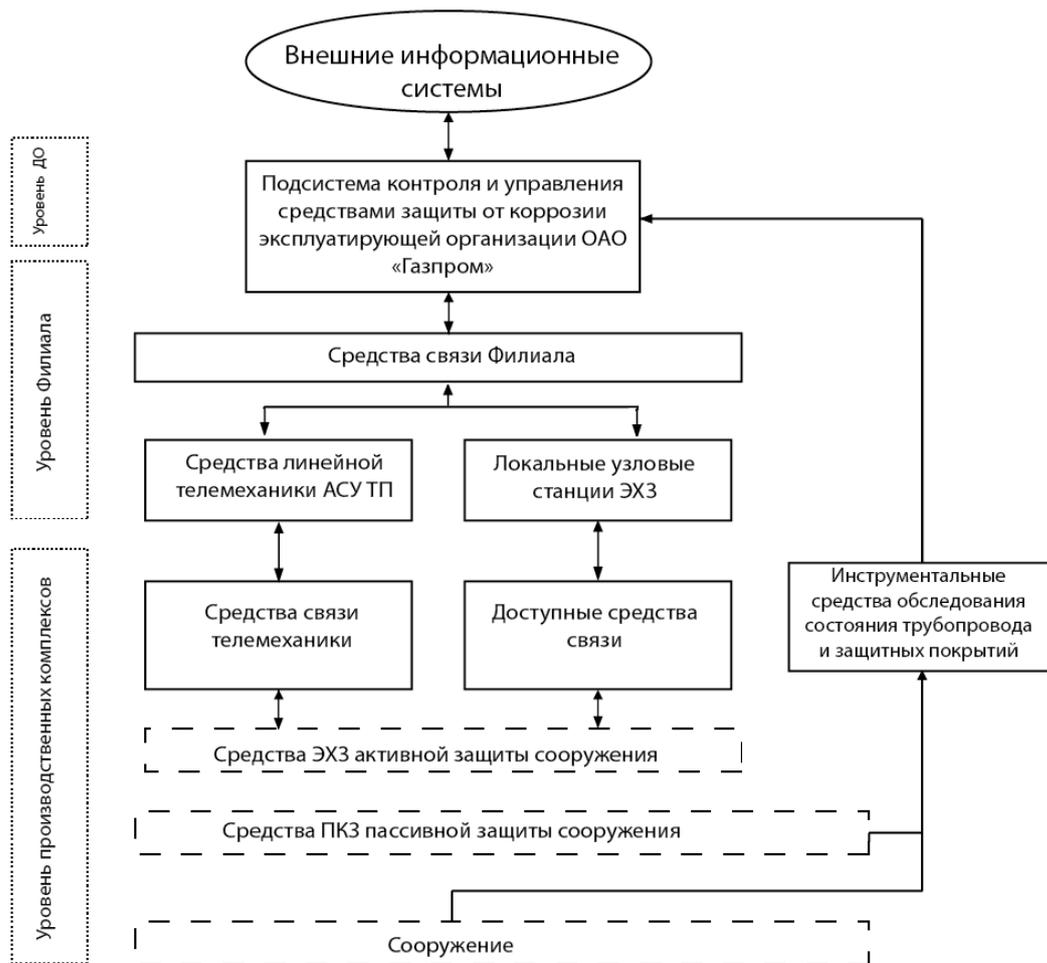


Рисунок 1.10 – Схема автоматизированного контроля и управления средствами ЗоК

Система коррозионного мониторинга предназначена для сбора и обработки информации о коррозионных процессах и противокоррозионной защите подземных металлических сооружений и передачи этой информации на АРМ оператора.

Система активного коррозионного мониторинга включает в себя средства электрохимической защиты, сенсорные устройства и датчики для контроля параметров коррозии и защиты, измерительное оборудование, а также систему сбора, обработки и передачи информации [72].

Схема имеет три уровня и показывает, что возможно получение информации о состоянии трубопровода, степени его защищенности и состоянии оборудования противокоррозионной защиты от нескольких источников, таких как:

- системы дистанционного коррозионного мониторинга;
- средства линейной телемеханики АСУ ТП;
- результаты инструментальных обследований состояния трубопровода и защитных покрытий.

Основными контролируемыми параметрами при выполнении мониторинга систем электрохимической защиты магистральных газопроводов являются:

- поляризационный потенциал;
- защитная суммарная разность потенциалов;
- скорость коррозии образца-свидетеля;
- плотность катодного и переменного тока;
- выходное напряжение преобразователей УКЗ;
- выходной ток преобразователей;
- температура.

Применительно к системам электрохимической защиты газопроводов внедрение эксплуатационного коррозионного мониторинга позволяет решать следующие практические задачи:

1) непрерывный контроль коррозионных процессов в коррозионно-опасных зонах;

2) контроль параметров ПКЗ, оперативная их корректировка в соответствии с НД;

3) интеграция со смежными информационными системами для решения следующего комплекса задач:

- расчет текущих показателей технического состояния и прогноз их изменения;

- расчет срока вывода в капитальный ремонт;

- расчет показателей надежности объектов и срока их безопасной эксплуатации;

4) расчет оптимизированных режимов работы средств ЭХЗ и ингибиторной защиты;

5) анализ коррозионного состояния сооружений и оборудования и выявление тенденций их коррозии на объектном или отраслевом уровне;

6) повышение эффективности противокоррозионной защиты объектов и оборудования ОАО «Газпром»;

7) обеспечение аварийной сигнализация при отказах в работе средств и элементов защиты, систем электроснабжения.

Таким образом, анализ современной нормативно-технической документации в области мониторинга состояния трубопроводов приводит к тому, что задача выбора оптимального режима работы элементов системы электрохимической защиты, с учетом влияющих факторов и их совокупностей для каждого частного случая является актуальной, но при этом подходов к ее решению не предложено [74].

1.5 Обзор существующих методик оптимизации работы средств электрохимической защиты

Существующие методики оптимального регулирования в основном направлены на конкретные локализованные объекты, такие как промышленные площадки. Поле токов катодной защиты коммуникаций промышленных площадок неоднородно, поэтому в существующих методиках защищаемые коммуникации рассматривают как система точек, в которых производится измерение защитного потенциала [52]. Для каждой определенной точки производится процедура нахождения коэффициента зависимости защитной разности потенциалов от величины силы тока влияющих станций катодной защиты. Нахождение коэффициентов влияния производится методами регрессионного анализа.

Результаты исследований проведенных на различных площадках, расположенных в различных почвенно-климатических условиях показали, что зависимости изменения защитной разности потенциалов в точках от величины силы тока СКЗ адекватно и с высокой предсказательной способностью, описываются системой линейных уравнений [81, 82]:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1 &= A_{01} + A_{11}I_1 + A_{21}I_2 + \dots + A_{i1}I_n; \\ \varphi_2 &= A_{02} + A_{12}I_1 + A_{22}I_2 + \dots + A_{i2}I_n; \\ \varphi_k &= A_{0k} + A_{1j}I_1 + A_{2j}I_2 + \dots + A_{ij}I_n; \end{aligned} \right\}, \quad (1.3)$$

где φ_i - разность потенциалов i -ой точки промплощадки, $i = 1; 2; \dots; k$;

I_j - ток j -ой станции катодной защиты, $j = 1; 2; \dots; n$;

A_{ij} - коэффициент влияния n -ой СКЗ на суммарную разность потенциалов в точке измерения.

Система функций (1.3) для k шт. точек, представляющих промплощадку и n шт. СКЗ и позволяет решать задачи регулирования токов УКЗ с определением оптимального режима. Задача определения оптимальных режимов во всех существующих методиках сводится к минимизации вы-

ходной мощности всех СКЗ, используемых для защиты объекта [2, 12, 83]:

$$\sum P_j = \sum_{j=1}^m I_j^2 \cdot R_j, \quad (1.4)$$

где I_j - сила тока j -ой СКЗ;

R_j - сопротивление внешней цепи j -ой УКЗ.

При соблюдении ограничений на разности потенциалов:

$$|\Phi_{\min}| \leq |\Phi_i| \leq |\Phi_{\max}|, \quad (1.5)$$

где Φ_{\min} , Φ_{\max} - минимальная и максимальная допустимая защитные разности потенциалов в точках согласно нормативно-технической документации.

Физический смысл сформулированной задачи сводится к следующему: определить такие значения силы тока на выходе УКЗ, при которых будет обеспечена полная защищенность всех коммуникаций ПП без перезащиты, при минимальном расходе на это электроэнергии.

Задача определения текущей защищенности и выявления незащищенных участков коммуникаций определяется подстановкой в систему (1.3) значений текущих токов СКЗ и расчетом разностей потенциалов каждой конкретной точки; по результатам этих расчетов можно определить незащищенные участки коммуникаций или участки, потенциалы которых оказываются завышенными.

Рассмотрим пример нахождения коэффициентов влияния станций катодной защиты на величину защитного потенциала A_{ij} . Первоначально необходимо определить коэффициенты A_{0j} численно равные собственному потенциалу металла трубопровода при выключении всех влияющих станций и деполяризации потенциала. Коэффициенты A_{0j} зависят от металла и среды, в которую он помещен, т.е. от марки стали и химических свойств грунта (а также от электрода сравнения относительно которого проводили измерения) [3, 30].

Далее включается одна из станций, например №1. Ступенчато повышают силу выходного тока на станции катодной защиты (на рисунке 1.11 показан пример с шагом 0,5 А) и определяют потенциал в i -ой точке.

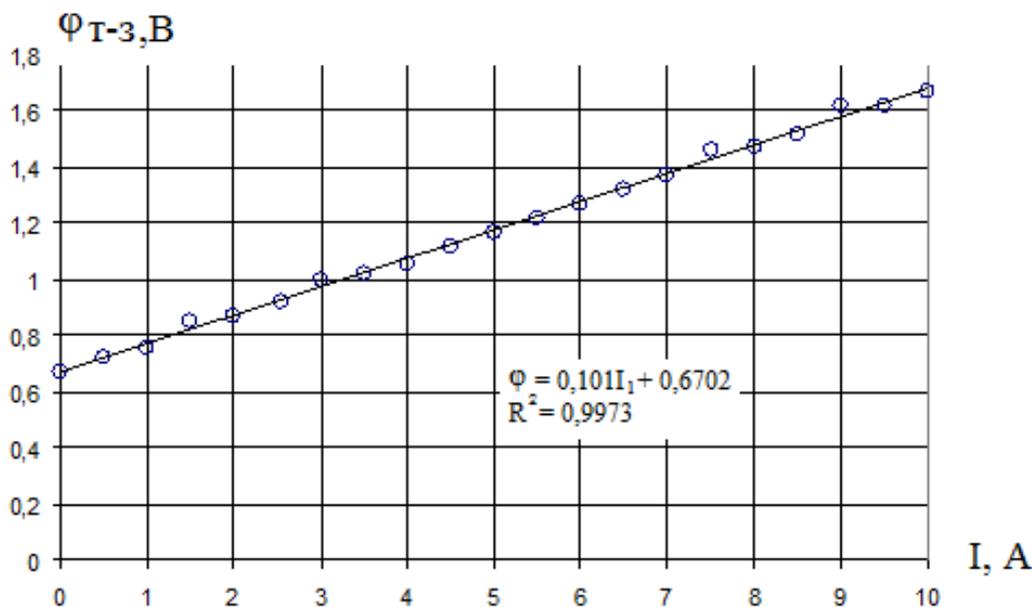


Рисунок 1.11 – График изменения потенциала при повышении силы защитного тока [30]

В данном примере аппроксимацией с достоверностью $R^2=0,9973$ установлено, что зависимость между разностью потенциалов и силой тока описывается уравнением:

$$\varphi_1 = 0,101 \cdot I_1 + 0,6702. \quad (1.6)$$

Таким образом, данными измерениями установлено что для первого уравнения системы (1.3) $A_{0I}=0,6702$ В, $A_{1I}=0,1011$. Аналогичным образом устанавливаются все последующие коэффициенты уравнения [30].

Далее задаются определенными значениями защитного потенциала, которым должен соответствовать потенциал в каждой точке измерения. Например, согласно ГОСТ 51164-98 для трубопроводов изолированных битумом, транспортирующих среду с температурой более 20°C , $\varphi_i \in (-1,05; -2,5)$ В. После чего подбирают силы токов на каждой из станций защиты, которые удовлетворяют условию $\varphi_i \in (-1,05; -2,5)$ В [30].

Для анализа распределения тока в сетях произвольной конфигурации применяют различные методы компьютерного моделирования. Газо-

провод рассматривают, как множество элементов с дискретно заданными параметрами, постоянными в пределах каждого участка, и описывают связи между отдельными элементами. Расчет распределения тока и потенциала в сети сводится к решению системы уравнений, число которых соответствует числу элементарных участков [22]. В комплексе программ для решения системы уравнений использованы принципы матричной алгебры.

Рассмотренные ранее методы описывают процедуры оптимизации для объектов промышленных площадок. Что касается объектов линейной части магистрального трубопроводного транспорта, то согласно проведенному анализу процедуры оптимизации также строятся на уменьшении выходной мощности совокупности СКЗ (1.4), с определением системы уравнений распределения защитного потенциала от силы тока СКЗ [12, 29]. Однако отмечается сложность определения коэффициентов A_{ij} , согласно методике проведения ряда измерений, предлагаемой для промышленных площадок.

Электрическое поле токов катодной защиты трубопроводов носит сложный характер [39]. На распределение поля влияет большое количество не учитываемых факторов, поэтому восстановление зависимостей необходимо производить экспериментальным путем с периодической корректировкой коэффициентов влияния.

В работе М. Н. Башаева предлагается замена реального трубопровода математической моделью с последующей вычислительной процедурой определения оптимальных режимов СКЗ. Фрагмент конечно-разностной системы уравнений для i -ого узла дискретизации модели при условии, что никакие другие поля, кроме образованных токами защиты, не действуют, а модель предназначена для расчета наложенной разности потенциалов (т.е. без учета собственного потенциала металла трубы – φ_e), можно представить следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{R_{uzi}}{\pi D_t L_i} J_i + \varphi_{з.и} + \varphi_{т.и} &= 0; \\ J_i + \sum_i^{i+1} \frac{\varphi_{т.и+1} - \varphi_{т.и}}{L_i R_{np.i}} + \delta_i I_k &= 0 \dots \delta_i = \begin{cases} 1 \text{ при } i = k_D \\ 0 \text{ при } i \neq k_D \end{cases}; \\ \varphi_{з.и}(p_s) &= \frac{\rho_z}{4\pi} \left(\sum_i \frac{J_i}{R(p_s, p_i)} - \sum_k \frac{I_k}{R(p_s, p_k)} \right); \end{aligned} \right\}, \quad (1.7)$$

где $\varphi_{т.и}$ - потенциал металла i -ого отрезка трубы, В;

R_{uzi} - удельное электрическое сопротивление изоляционного покрытия, Ом·м²;

$R_{np.i}$ - удельное электрическое сопротивление металла трубы, Ом/м;

$D_t L_i$ - диаметр и длина i -ого отрезка трубы, м;

$\varphi_{з.и}$ - потенциал точки земли, лежащей на поверхности i -ого отрезка трубы, В;

$i=1, \dots, N$ (N – количество участков дискретизации);

$k=1, \dots, M$ (M – количество СКЗ);

k_D - точка дренажа;

(p_s, p_i) - расстояние от точки p_s , в которой определяется потенциал, до точки, в которой находится фиктивный источник, м;

(p_s, p_k) - расстояние от точки p_s , в которой определяется потенциал, до точки, в которой находится анодное заземление СКЗ, м.

Дискретная модель токораспределения системы ЭХЗ представлена на рисунке 1.12.

Описанная выше модель применима для расчетов линейной части МТ. Но если точка дренажа СКЗ находится в поле защитного заземления системы электробезопасности, а тем более труб свайного фундамента, то для получения зависимости разности потенциалов «труба – земля» в точке дренажа – φ_D от токов СКЗ такая модель непригодна. Кроме того, недостатками данной модели можно выделить большой объем исходной ин-

формации, необходимой для создания модели, такой как: исходные данные по трубопроводу, данные периодических замеров защищенности, данные работы станций катодной защиты. Получение массива точных данных по продолжительному участку трубопровода значительно снижает степень достоверности модели.

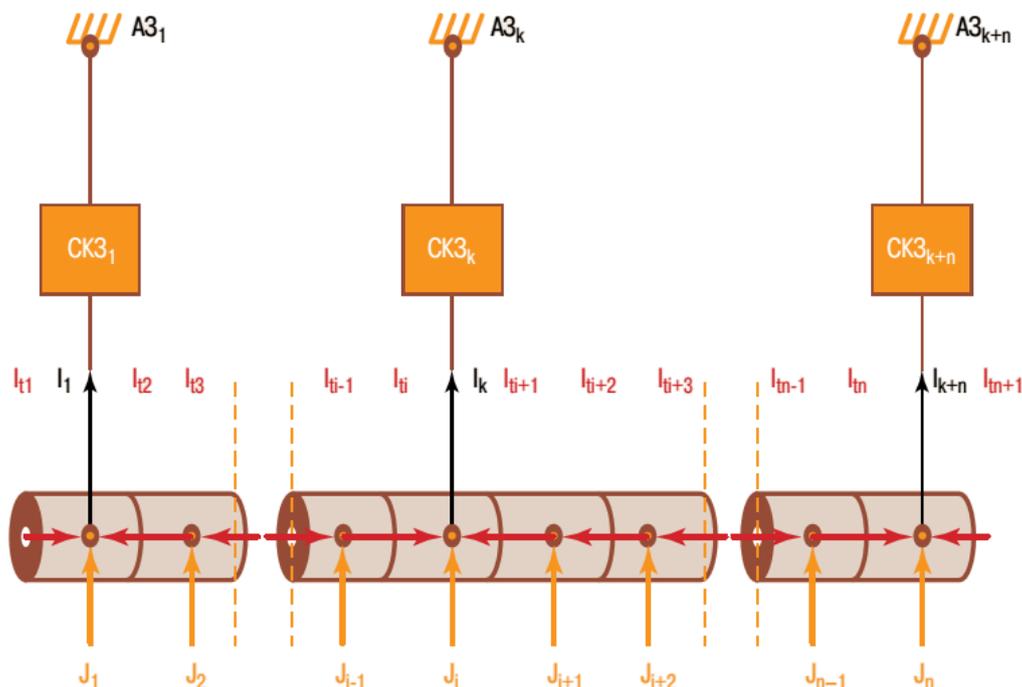


Рисунок 1.12 – Дискретная модель токораспределения системы ЭХЗ [12]

Рассмотренным методикам присущи следующие особенности:

1. Аддитивный механизм совместного воздействия нескольких станций на каждую точку трубопровода, т.е. потенциал в любой точке определяется простым алгебраическим сложением потенциала наводимого каждой станцией [30].
2. Линейная зависимость потенциала от силы тока [2].
3. При определении оптимальных режимов не учитываются коррозионные факторы и их совокупности на защищаемом участке.
4. Оптимальное регулирование производится по параметру выходная мощность СКЗ, при этом другие параметры не рассматриваются.

5. В методиках с экспериментальным нахождением зависимостей силы тока СКЗ на распределение защитных разностей потенциалов, необходимо определение стационарного потенциала, для определения которого требуется деполяризация трубопровода, что достаточно сложно осуществить на действующем трубопроводе с хорошим состоянием изоляционного покрытия.

1.6 Постановка задачи исследования

Анализ теоретических, экспериментальных и эксплуатационных данных показывает, что повышение срока службы магистральных газопроводов возможно при оптимальных значениях критериев электрохимической защиты и повышении эффективности контроля защищенности от коррозии.

Для решения указанной задачи были определены следующие направления исследований и разработок, которые легли в основу настоящей работы:

- совершенствование методики проведения измерений на трассе магистрального трубопровода для выявления зависимостей влияния выходных параметров СКЗ на распределение защитных потенциалов, развитие существующих моделей распределения потенциалов в системе «труба-земля»;
- решение многокритериальной задачи нахождения оптимальных режимов работы станций катодной защиты;
- разработка ряда алгоритмов оптимального управления, учитывающих режимы работы СКЗ, электрические характеристики трубопровода, внешние коррозионные факторы;
- апробация разработанных решений на реальном объекте.

1.7 Выводы по главе

1. Показано, что электрическое поле токов катодной защиты трубопроводов носит сложный характер. Распределение этого поля в условиях линейного участка с приемлемой точностью практически невозможно описать математическими зависимостями, так как на него влияет большое количество сложно учитываемых факторов (блуждающие токи, удельное сопротивление грунта и т.д.).

2. Задача эффективного регулирования режимами работы станциями катодной защиты от коррозии может быть решена с высокой степенью точности только сбором данных на объекте исследования. В этой связи рассмотрены основные принципы и расчетные зависимости оптимального регулирования режимов работы средств ЭХЗ трубопроводов промышленных площадок и линейной части магистральных трубопроводов, выделены недостатки существующих методик.

3. Установлено, что существующие методики не учитывают влияние ряда важных факторов: влияние на распределения потенциала состояния изоляционного покрытия, неизбежного изменения в процессе эксплуатации параметров среды, коррозионных факторов и их совокупностей.

4. Показана возможность применения систем дистанционного коррозионного мониторинга для решения задач оптимального управления, с использованием параметров измеряемых системой в различных точках трубопровода.

5. Отмечено, что решение задачи оптимального регулирования относительно уменьшения параметра энергопотребления не является единственным рациональным, так как не учитываются многие параметры, такие как распределение коррозионных факторов на участке, степень загруженности СКЗ, негативное влияние повышенной плотности тока в некоторых точках защищаемого объекта.

2 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛОВ ПО ТРАССЕ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА

2.1 Введение понятия сторонней разности потенциалов наложенной неизвестными источниками

Проведенный в предыдущей главе анализ показал, что в методиках с экспериментальным нахождением зависимостей распределения защитных потенциалов от силы тока СКЗ обязательно определение стационарного потенциала. Как было отмечено ранее коэффициенты системы уравнений A_{0j} численно равны собственному потенциалу металла трубопровода при выключении всех влияющих станций и его деполяризации, и зависят от марки стали и химических свойств грунта, в который помещен металл трубопровода. Коэффициенты A_{ij} определяются по представленной методике (см. пункт 1.5).

К недостаткам представленной методики можно отнести нахождение коэффициентов A_{0j} , так как они численно равны собственному потенциалу при выключении всех влияющих станций и деполяризации потенциала. В реальных условиях, на действующих объектах магистральных газопроводов получить данный коэффициент не представляется возможным. На действующем объекте магистрального трубопровода с хорошим состоянием изоляционного покрытия, деполяризация участка для нахождения стационарного потенциала трубопровода в точке измерения может происходить несколько суток, при этом на данную точку будут оказывать влияние работающие станции катодной защиты, которые могут находиться за сотни километров от исследуемой точки. Следовательно, существующая методика не применима для данных трубопроводов, так как требует выключения большого количества станций катодной защиты

на срок, превышающий регламентированный и требует больших материально-технических затрат.

В качестве решения данной проблемы в качестве коэффициента A_{0j} системы предложено использовать не собственный потенциал трубопровода, а находить наложенную неопределенными источниками разность потенциалов «труба-земля» в точке, с учетом известного влияния определенных станций катодной защиты. Назовем данную разность потенциалов сторонней. Предложенный метод заключается в определении коэффициентов влияния станций катодной защиты на определенную точку и вычислении сторонней разности потенциалов «труба-земля», как разницу между суммарной разностью потенциалов в данной точке и выявленной совокупностью влияний станций катодной защиты. Предполагается, что при определении всех влияний от станций катодной защиты и при отсутствии посторонних источников, вычисленная разность потенциалов по значению будет близка к стационарному потенциалу трубопровода в конкретной точке.

Для проверки данной методики был проведен ряд измерений на действующем объекте магистрального газопровода «Саратов-Горький». Был выбран участок газопровода, на котором располагалось семь станций катодной защиты, между километрами 92 и 147. На участке установлены станции типа В-ОПЕ-3М, работающие в режиме неуправляемого выпрямителя с поддержанием заданной силы тока на выходе. Диаметр газопровода 720 мм, толщина стенки 8 мм. Газопровод введен в эксплуатацию в 1963 году. На данном участке газопровод подвергался переукладке в 2001 году. Тип изоляции - заводская полимерная. Точка дренажа центральной станции на 107 километре была выбрана как точка вычисления исследуемого потенциала.

2.1.1 Порядок проведения измерений

Для определения сторонней разности потенциалов «труба-земля» был определен порядок измерений, который заключался в последовательном изменении силы тока на выходе станции катодной защиты и измерении защитной суммарной разности потенциалов в точке дренажа данной станции при этом смежные СКЗ работают в режиме стабилизации по току. Номинальные величины силы тока на СКЗ км 99 и 117 равны 3,5 и 0,7 А соответственно.

Далее приведен порядок проведения измерений.

1. Выключают станцию катодной защиты.
2. Производят измерение суммарной защитной разности потенциалов «труба-земля» в точке дренажа СКЗ [48, 67]. Измерение производят относительно стационарного медносульфатного электрода сравнения. Измерения выполняют электронными вольтметрами (мультиметрами) с входным сопротивлением не менее 10 МОм в диапазоне измерений 0-5 В. Рекомендуется использовать приборы с точностью измерения напряжения постоянного тока и силы постоянного тока не более 0,1%.
3. Измеряют силу тока на выходе СКЗ. Для измерения силы тока рекомендуется использовать бесконтактные измерители тока.
4. Включают станцию катодной защиты.
5. Увеличивают силу тока на выходе станции на шаг регулирования (1 А).
6. Повторяют п. 2,3.
7. Повторяют п. 5 до значения 13 А.
8. Повторяют п. 1-7 восемь раз.

Данные измерения проводились с целью накопления статистики изменения суммарной защитной разности потенциалов «труба-земля» при различных выходных параметрах станции катодной защиты. Измерения суммарной защитной разности потенциалов «труба-земля» производились на клеммной панели, расположенной внутри блок-бокса СКЗ. На

клеммную панель выведены провода от трубы и от медносульфатного электрода сравнения, стационарно установленного в грунт рядом с трубопроводом. Внешний вид клеммной панели представлен на рисунке 2.1.



Клеммная панель внутри блок-бокса СКЗ

Рисунок 2.1 – Внешний вид клеммной панели внутри блок-бокса СКЗ

Сторонняя разность потенциалов включает в себя составляющую, зависящую от выходных параметров смежных станций. Поэтому для точки проведения исследования были найдены коэффициенты влияния смежных СКЗ на суммарную защитную разность потенциалов. Для нахождения коэффициентов влияния были проведены работы на двух смежных СКЗ (км 99, 117) в следующем порядке.

1. Выключают смежную станцию катодной защиты.
2. Производят измерение суммарной защитной разности потенциалов «труба-земля» в исследуемой точке. Измерение производят относительно стационарного электрода сравнения. Измерения выполняют электронными вольтметрами (мультиметрами) с входным сопротивлением не менее 10 МОм в диапазоне измерений 0-5 В. Рекомендуется использовать приборы с точностью измерения напряжения постоянного тока и силы постоянного тока не более 0,1%.

3. Измеряют силу тока на выходе СКЗ. Для измерения силы тока рекомендуется использовать бесконтактные измерители тока.

4. Включают смежную станцию катодной защиты.

5. Увеличивают силу тока на выходе станции на шаг регулирования (3 А).

6. Повторяют п. 2,3.

7. Повторяют п. 5 до максимального возможного значения (определяется экспериментально исходя из технических возможностей СКЗ и параметров нагрузки).

Данный порядок измерений повторяли для второй смежной СКЗ.

2.1.2 Обработка экспериментальных данных

Полученный объем данных об изменении суммарной защитной разности потенциалов «труба-земля» в исследуемой точке при изменении режимов работы смежных СКЗ дал возможность, методами регрессионного анализа, восстановить коэффициенты влияния данных СКЗ на величину потенциала в точке.

Пример вычисления уравнения влияния станции на 99 километре на потенциал в точке дренажа на 107 километре представлен на рисунке 2.2.

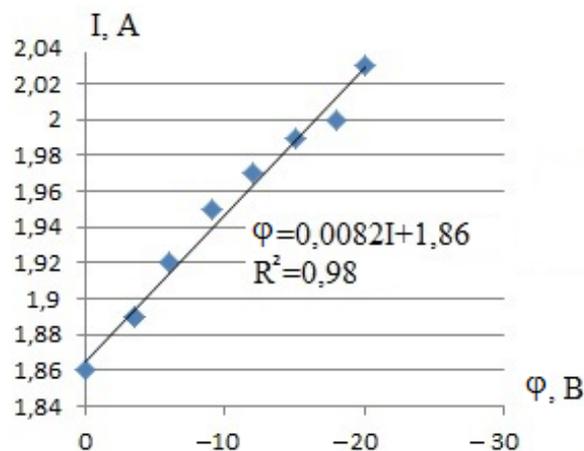


Рисунок. 2.2 – Влияние станции катодной защиты расположенной на 99 километре на суммарную разность потенциалов «труба-земля» в точке дренажа станции на 107 километре

В данном примере аппроксимацией с достоверностью $R^2=0,999$ установили, что зависимость между потенциалом и силой тока описывается уравнением:

$$\varphi_1 = 0,0082 \cdot I_1 + 1,8653, \quad (2.2)$$

где 0,0082 – коэффициент влияния A_{11} станции катодной защиты, расположенной на 99 километре на суммарный потенциал на 107 километре.

Таким образом, установили влияние смежной станции катодной защиты (км 117) на исследуемую точку. Коэффициент влияния A_{ij} СКЗ 117 км равен 0,0023.

По результатам измерений суммарной разности потенциалов «труба-земля» в исследуемой точке от изменения выходных параметров СКЗ 107 км также было получено уравнение влияния станции на суммарную разность потенциалов (рисунок 2.3).

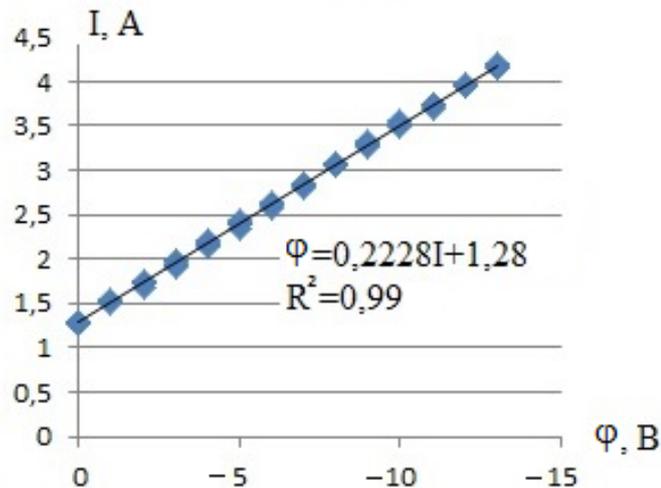


Рисунок 2.3 – Влияние станции катодной защиты расположенной на 107 километре на суммарную разность потенциалов «труба-земля» в исследуемой точке

Для данной совокупности аппроксимацией с достоверностью $R^2=0,999$ установили, что зависимость между потенциалом и силой тока описывается уравнением:

$$\varphi_1 = 0,2228 \cdot I_1 + 1,2805 . \quad (2.3)$$

После получения всех коэффициентов влияния составили уравнение:

$$\varphi_1 = \varphi_{\text{ст}} + A_{11} \cdot I_1 + A_{12} \cdot I_2 + \dots + A_{ij} \cdot I_n, \quad (2.4)$$

где $\varphi_{\text{ст}}$ - стационарный потенциал трубопровода, В.

Из данного уравнения выразили стационарный потенциал. Так как влияние всех станций катодной защиты и источников тока не было определено, то данный коэффициент принимает значения сторонней разности потенциалов «труба-земля», включающего в себя как стационарный потенциал, так и потенциал наложенный неизвестными источниками:

$$\varphi_{\text{стор}} = \varphi_1 - A_{11} \cdot I_1 - A_{12} \cdot I_2 - \dots - A_{ij} \cdot I_n, \quad (2.5)$$

где $\varphi_{\text{стор}}$ - сторонняя разность потенциалов трубопровода, В;

φ_1 - защитная суммарная разность потенциалов «труба-земля»;

I_n - сила тока на выходе n -ой СКЗ.

Особенностью введенного критерия является его значительное отличие от стационарного потенциала, используемого во всех существующих моделях распределения защитных потенциалов, заключающееся в том, что сторонний потенциал включает в себя как потенциал наложенный станциями защиты, влияние которых не было определено, так и потенциал деполяризации трубопровода:

$$\varphi_{\text{стор}} = \varphi_{\text{ст}} + \varphi_{\text{деп}} + A_{ij} \cdot I_n, \quad (2.6)$$

где $\varphi_{\text{деп}}$ - потенциал деполяризации трубопровода, В.

Далее была проведена проверка вычисления сторонней разности потенциалов при различных измеренных значениях силы тока станций катодной защиты на 107 километре и суммарного потенциала в точке ее дренажа. Влияние других станций вычисляли с помощью полученных коэффициентов и вычитали из значения согласно формуле (2.5). Вычисленное суммарное влияние смежных станций катодной защиты, равно 0,048 В.

По вычисленным значениям сторонней разности потенциалов была составлена таблица 1 его значений для каждого значения силы тока на

выходе СКЗ. Средние значения сторонней разности потенциалов для каждой силы тока СКЗ вычисляли по формуле:

$$\bar{\Phi}_{\text{стор}} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 \Phi_{\text{стор}i}, \quad (2.7)$$

Также, посчитали средние значения сторонней разности потенциалов и величину «дрейфа» данного параметра для каждой силы тока на выходе СКЗ по формуле:

$$\Delta\Phi_{\text{стор}} = |\Phi_{\text{стор}max} - \Phi_{\text{стор}min}|, \quad (2.8)$$

По результатам вычислений составили таблицу значений стороннего потенциала для каждой силы тока на выходе СКЗ [80].

Таблица 2.1 – Значения стороннего потенциала для каждой силы тока на выходе СКЗ

Сила тока СКЗ,А	$\Phi_{\text{стор}}$ В	Сила тока СКЗ,А	$\Phi_{\text{стор}}$ В	Сила тока СКЗ,А	$\Phi_{\text{стор}}$ В	Сила тока СКЗ,А	$\Phi_{\text{стор}}$ В	Сила тока СКЗ,А	$\Phi_{\text{стор}}$ В	Сила тока СКЗ,А	$\Phi_{\text{стор}}$ В	Сила тока СКЗ,А	$\Phi_{\text{стор}}$ В
0	1,232	1	1,2292	2	1,2264	3	1,2536	4	1,2308	5	1,228	6	1,225
0	1,212	1	1,2392	2	1,2364	3	1,2236	4	1,2608	5	1,258	6	1,265
0	1,222	1	1,2492	2	1,2464	3	1,2336	4	1,2508	5	1,238	6	1,245
0	1,232	1	1,2492	2	1,2464	3	1,2536	4	1,2508	5	1,248	6	1,235
0	1,232	1	1,2392	2	1,2264	3	1,1936	4	1,2108	5	1,188	6	1,225
0	1,232	1	1,2392	2	1,2264	3	1,2636	4	1,2636	5	1,2308	6	1,218
0	1,212	1	1,2392	2	1,1764	3	1,2136	4	1,1908	5	1,218	6	1,215
0	1,232	1	1,2692	2	1,2264	3	1,2036	4	1,2608	5	1,288	6	1,225
$\Phi_{\text{стор}cp}$ В	1,226		1,2442		1,2264		1,229		1,2399		1,237		1,231
$\Delta\Phi_{\text{стор}}$ В	0,02		0,03		0,07		0,07		0,0728		0,07		0,05

Окончание таблицы 2.1

Сила тока СКЗ,А	$\Phi_{стор}$ В	Сила тока СКЗ,А	$\Phi_{стор}$ В	Сила тока СКЗ,А	$\Phi_{стор}$ В	Сила тока СКЗ,А	$\Phi_{стор}$ В	Сила тока СКЗ,А	$\Phi_{стор}$ В	Сила тока СКЗ,А	$\Phi_{стор}$ В	Сила тока СКЗ,А	$\Phi_{стор}$ В
7	1,2124	8	1,2196	9	1,2168	10	1,224	11	1,2312	12	1,2384	13	1,2456
7	1,2524	8	1,2396	9	1,2368	10	1,244	11	1,2512	12	1,2384	13	1,2256
7	1,2424	8	1,2396	9	1,2468	10	1,284	11	1,2512	12	1,2284	13	1,2056
7	1,2224	8	1,2396	9	1,2468	10	1,264	11	1,2512	12	1,2184	13	1,2256
7	1,1824	8	1,2296	9	1,2068	10	1,214	11	1,2012	12	1,2284	13	1,2156
Сила тока СКЗ,А	$\Phi_{стор}$ В	Сила тока СКЗ,А	$\Phi_{стор}$ В	Сила тока СКЗ,А	$\Phi_{стор}$ В	Сила тока СКЗ,А	$\Phi_{стор}$ В	Сила тока СКЗ,А	$\Phi_{стор}$ В	Сила тока СКЗ,А	$\Phi_{стор}$ В	Сила тока СКЗ,А	$\Phi_{стор}$ В
7	1,2224	8	1,2296	9	1,2168	10	1,224	11	1,2512	12	1,2284	13	1,2456
7	1,2424	8	1,2196	9	1,2468	10	1,234	11	1,2412	12	1,2284	13	1,2156
$\Phi_{сторср}$ В	1,2215		1,2312		1,2368		1,2415		1,2403		1,22875		1,22595
$\Delta\Phi_{стор}$ В	0,07		0,02		0,07		0,06		0,02		0,02		0,04

Анализ изменения сторонней разности потенциалов для каждой величины силы тока показал, что «дрейф» рассчитанного значения данного параметра не превышает 0,075 В. При этом, произвели сравнение средних значений величины стороннего потенциала для каждой величины силы тока. Разница между этими значениями не превысила 0,02 В.

По результатам вычисления было построено распределение вероятностей стороннего потенциала в точке дренажа (рисунок 2.4).

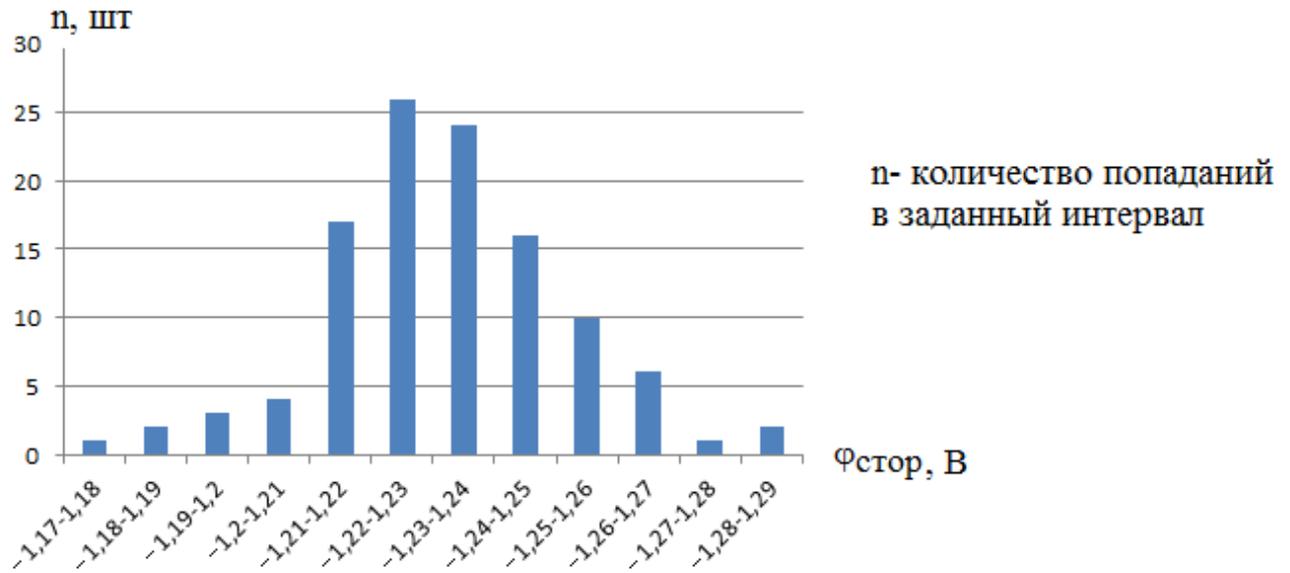


Рисунок 2.4 – Распределение вероятностей вычисленного значения сторонней разности потенциалов в точке дренажа СКЗ на 107 километре

Для данного распределения было вычислено математическое ожидание значения собственного потенциала по формуле:

$$M(\varphi_{\text{стор}}) = \sum_{i=1}^n U\varphi_i \cdot p_i, \quad (2.9)$$

$$M(\varphi_{\text{стор}}) = 1,2307.$$

Кроме того, из формулы (2.4) вычислено суммарное влияние остальных станций катодной защиты, равное 0,048 В. Сложив данное число с математическим ожиданием значения сторонней разности потенциалов, получаем значение 1,2804 В, что практически совпадает со значением сторонней разности потенциалов вычисленного методом линейной аппроксимации (формула 2.2), при большом количестве и диапазоне измерений.

Дисперсию данной величины вычисляли по формуле:

$$D(\varphi_{\text{стор}}) = \sum_{i=1}^n U^2 \varphi_i \cdot p_i - M(\varphi_{\text{стор}})^2, \quad (2.10)$$

$$D(\varphi_{\text{стор}}) = 0,286.$$

После определения величины дисперсии определяли среднеквадратичное отклонение по формуле:

$$\sigma(\varphi_{\text{стор}}) = \sqrt{D(\varphi_{\text{стор}})}, \quad (2.11)$$

$$\sigma(\varphi_{\text{стор}}) = 0,535.$$

Кроме того, было проведено сравнение полученной величины сторонней разности потенциалов с модой и медианой данного распределения. Моду распределения вычислили по формуле:

$$M_o(\varphi_{\text{стор}}) = x_o + h \frac{f_m - f_{m-1}}{(f_m - f_{m-1}) + (f_m + f_{m-1})}, \quad (2.12)$$

$$M_o(\varphi_{\text{стор}}) = 1,232.$$

Также, для данного распределения вычислили медиану по формуле:

$$M_e(\varphi_{\text{стор}}) = x_o + h \frac{\sum f_i - S_{m-1}}{2 f_m}, \quad (2.13)$$

$$M_e(\varphi_{\text{стор}}) = 1,2312.$$

Сложив вычисленное ранее суммарное влияние остальных станций катодной защиты с математическим ожиданием и с модой и медианой распределения значений сторонней разности потенциалов, получили значения 1,2804, 1,28 и 1,2792 В соответственно. Для точки дренажа значение коэффициента будет равно стационарному потенциалу в данной точке в сумме с потенциалом, который накладывается от смежных СКЗ. Исходя из этого, это значение можно также принять за значение сторонней разности потенциалов. Следовательно, значения сторонней разности потенциалов вычисленные методами математического ожидания, а также по моде и медиане полученного распределения, практически совпадают со значением сторонней разности потенциалов вычисленного методом линейной аппроксимации (формула 2.3) и равному 1,2805 В, при большом количестве и диапазоне измерений.

Далее произвели оценку относительной погрешности вычисления защитной разности потенциалов «труба-земля» в точке дренажа станции, равного сторонней разности потенциалов, при силе тока равной 0 А, по методу линейной аппроксимации, по моде и математическому ожиданию.

$$\varepsilon_{\varphi} = \frac{\varphi_{\text{изм}} - \varphi_{\text{расч}}}{\varphi_{\text{изм}}} \cdot 100\% . \quad (2.14)$$

Среднее значение относительной погрешности для каждого метода рассчитали по формуле:

$$\varepsilon_{\varphi\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^8 \varepsilon_{\varphi}}{8} . \quad (2.15)$$

По результатам сравнительного анализа погрешности вычисления потенциала в точке различными методами при силе тока СКЗ равной 0 А была составлена таблица 2.2.

Таблица 2.2 – Погрешности вычисления потенциала в точке различными методами при силе тока СКЗ равной 0 А

Сила тока СКЗ, А	$\varphi_{\text{изм}}, В$	$\varphi_{\text{расч}}, В$ по методу линейной аппроксимации	$\varphi_{\text{расч}}, В$ мат. ожидание	$\varphi_{\text{расч}}, В$ по моде	$\varphi_{\text{расч}}, В$ по медиане	$\varepsilon_{\varphi}, В$ по методу линейной аппроксимации	$\varepsilon_{\varphi}, В$ мат. ожидание	$\varepsilon_{\varphi}, В$ по моде	$\varepsilon_{\varphi}, В$ по медиане
0	1,28	1,2805	1,2804	1,28	1,2792	0,031	0	0,039	0,062
0	1,26	1,2805	1,2804	1,28	1,2792	1,619	1,58	1,626	1,523
0	1,27	1,2805	1,2804	1,28	1,2792	0,818	0,787	0,826	0,724
0	1,28	1,2805	1,2804	1,28	1,2792	0,031	0	0,039	0,062
0	1,28	1,2805	1,2804	1,28	1,2792	0,031	0	0,039	0,062
0	1,28	1,2805	1,2804	1,28	1,2792	0,031	0	0,039	0,062
0	1,26	1,2805	1,2804	1,28	1,2792	1,619	1,58	1,626	1,523
0	1,28	1,2805	1,2804	1,28	1,2792	0,031	0	0,039	0,062
$\varepsilon_{\varphi\text{ср}}$						0,526	0,495	0,534	0,510

Вычислили максимальную возможную относительную погрешность определения сторонней разности потенциалов для одного измерения по полученным экспериментальным данным. Для этого выбрали одиночное значение стороннего потенциала, имеющее максимальную по абсолютной величине разность с вычисленным значением стороннего потенциала ме-

тодом математического ожидания с использованием всего массива экспериментальных данных. Относительную погрешность определили по формуле:

$$\varepsilon_{\varphi} = \frac{\varphi_{\text{стор}} - \varphi_{\text{стор max}}}{\varphi_{\text{стор}}} \cdot 100\% , \quad (2.16)$$

$$\varepsilon_{\varphi} = \frac{1,2307 - 1,288}{1,2307} \cdot 100\% = 4,47\% .$$

Для практического применения параметра сторонней разности потенциалов и составления модели распределения потенциалов по трассе без отключения и деполяризации трубопровода была составлена методика проведения измерений на участке магистрального газопровода для нахождения данного параметра.

Для нахождения сторонней разности потенциалов на участке магистрального газопровода необходимо провести действия в следующем порядке:

1. Выбирают точки контроля суммарного потенциала на трассе магистрального газопровода. Необходимо выбрать точки, в которых установлены подсистемы дистанционного коррозионного мониторинга. При их отсутствии, опираясь на данные сплошных измерений состояния защищенности исследуемого участка, выбирают точки с минимальным защитным потенциалом между СКЗ. Также точками измерения выбирают точки дренажа СКЗ на исследуемом участке.

2. В автоматическом или ручном режиме производят измерения суммарного потенциала в контрольных точках.

3. Выбирают СКЗ, для которой фиксируют значения выходной силы тока и напряжения.

4. Отключают СКЗ.

5. Через 15 минут производят измерения суммарного потенциала в контрольных точках.

6. Включают СКЗ. Выставляют силу тока равной половине от номинального возможного. Фиксируют значения выходной силы тока и напряжения.

7. Через 15 минут производят измерения суммарного потенциала в контрольных точках.

8. Выставляют силу тока на номинально возможную величину. Фиксируют значения выходной силы тока и напряжения.

9. Через 15 минут производят измерения суммарного потенциала в контрольных точках.

10. Повторяют пункты 2-9 для всех СКЗ на исследуемом участке.

Полученный массив данных дает возможность нахождения сторонней разности потенциалов и создания модели распределения суммарной разности потенциалов «труба-земля» по трассе трубопровода в зависимости от выходных режимов СКЗ. Увеличение числа статистических данных о изменении защищенности на участке в совокупности с выходными параметрами СКЗ ведет к уточнению коэффициентов модели распределения потенциалов.

Таким образом, установлено, что для решения задачи оптимального регулирования можно пользоваться значением коэффициента собственного потенциала точки трубопровода в совокупности с наложенным потенциалом неизвестных источников, предложенное определение - сторонняя разность потенциалов «труба-земля» в точке. При этом не требуется отключение всех станций катодной защиты на большой промежуток времени, а достаточно последовательно провести их отключение для установления коэффициентов влияния. Значение погрешности вычисления суммарного защитного потенциала в точке дренажа СКЗ при силе тока равной нулю 0 А, с использованием значения сторонней разности потенциалов, вычисленного различными методами, относительно измеренного не превышает 0,6%. Кроме того, установлено, что при наличии статистики данных точность вычисления сторонней разности потенциалов

возрастает. Относительная погрешность вычисления суммарной разности потенциалов в точке, с использованием сторонней разности потенциалов для одиночного измерения, имеющего максимальную по абсолютной величине разность от его среднего вычисленного значения, в результате экспериментальных исследований составила 4,47%, значение погрешности суммарной разности потенциалов, вычисленного предложенным методом, с учетом статистики в 112 измерений, не превышает 0,6%.

Применение параметра сторонней разности потенциалов и проведение измерений по предложенной методике ведет к уменьшению времени проведения замеров для восстановления коэффициентов зависимостей защитного потенциала от величины силы тока на выходе СКЗ. Уменьшение времени измерений напрямую зависит от времени деполяризации трубопровода, которая в свою очередь прямо пропорциональна текущему состоянию изоляционного покрытия.

2.2 Идентификация системы «труба-земля»

Зависимость защитного суммарного потенциала в точках контроля от токов СКЗ определяется [7] выражением

$$\varphi_i = \sum_{j=1}^{K_{\text{СКЗ}}} A_{ij} \cdot I_j + A_{0j}, \quad (2.17)$$

Графическое представление математической модели системы «труба-земля» с указанием источников получения информации о защищенности и управляющих объектов – СКЗ представлена на рисунке 2.5.

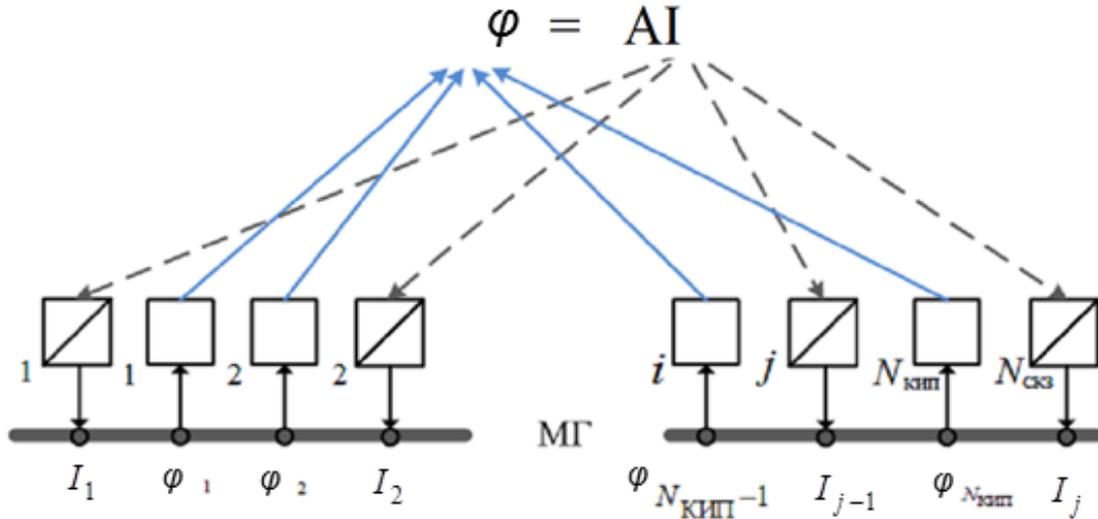


Рисунок 2.5 – Графическое представление математической модели системы «труба-земля»

2.2.1 Процедуры идентификации системы «труба-земля» на основе регрессионного анализа

Рассмотрим задачу идентификации системы «труба-земля», заключающуюся в восстановлении зависимостей φ_i , по данным наблюдений. Используя эти данные, получаем обучающую выборку, содержащую значения токов СКЗ $I_j(n)$, и суммарной разности потенциалов в точках контроля (в том числе на контрольно-измерительных пунктах) $\varphi_i(n)$, измеренные на интервале стационарности в моменты времени t_n , $n = 1; 2; \dots; N$.

Учитывая характер зависимости (2.17) воспользуемся моделью линейной множественной регрессии, которую для каждой точки контроля запишем в векторном виде

$$\varphi_i(n) = \mathbf{A}_i^T \mathbf{i}(n) + \xi_i(n), \quad (2.18)$$

где $\mathbf{i}(n) = [1, I_1(n), \dots, I_j(n)]^T$ – расширенный вектор токов СКЗ, применявшийся в момент t_n ;

$\mathbf{A}_i^T = [A_{i0}, A_{i1}, \dots, A_{ij}]$ – вектор параметров регрессионной модели.

Оценка параметров регрессионной модели может быть найдена по методу максимального правдоподобия, приводящего [55] в случае гауссовских шумов наблюдения ξ , к оценке по методу наименьших квадратов

$$\hat{\mathbf{A}}_i = (\mathbf{I}_{\text{СКЗ}}^T \mathbf{I}_{\text{СКЗ}})^{-1} \mathbf{I}_{\text{СКЗ}}^T \Phi_i, \quad (2.19)$$

где $\Phi_i = [\varphi_i(1), \dots, \varphi_i(N)]^T$ – вектор измеренных значений защитных разностей потенциалов в i -й точке контроля;

$\hat{\mathbf{A}}_i$ – вектор коэффициентов влияния СКЗ на значения защитных разностей потенциалов;

$\mathbf{I}_{\text{СКЗ}}^T$ – транспонированная матрица токов СКЗ;

$\mathbf{I}_{\text{СКЗ}}$ – $(N_{\text{СКЗ}} \cdot (N_{\text{СКЗ}} + 1))$ -матрица, определяемая выражением

$$\mathbf{I}_{\text{СКЗ}} = \begin{bmatrix} 1 & I_1(1) & \dots & I_j(1) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & I_1(N_{\text{СКЗ}}) & \dots & I_j(N_{\text{СКЗ}}) \end{bmatrix}. \quad (2.20)$$

При использовании байесовской методологии [1.72, 1.73] повышается устойчивость оценок параметров модели

$$\hat{\mathbf{A}}_i = (\mathbf{I}_{\text{СКЗ}}^T \mathbf{I}_{\text{СКЗ}} + \tilde{\mu}_i \mathbf{I})^{-1} \mathbf{I}_{\text{СКЗ}}^T \Phi_i, \quad (2.21)$$

которые определяются аналогично, так называемой, гребневой регрессии. В последнем выражении \mathbf{I} – единичная матрица порядка $(K_{\text{СКЗ}} + 1)$, μ – параметр регуляризации, оценка которого определяется по методу простых итераций

$$\hat{\mu}_i = \frac{\gamma(\tilde{\mu}_i)}{N_{\text{СКЗ}} - \gamma(\tilde{\mu}_i)} \frac{\|\Phi_i - \mathbf{I}_{\text{СКЗ}} \tilde{\mathbf{A}}_i\|^2}{\|\tilde{\mathbf{A}}_i\|^2}, \quad (2.22)$$

где $\gamma(\tilde{\mu}_i) = N_{\text{СКЗ}} + 1 - \tilde{\mu}_i \text{tr}(\mathbf{I}_{\text{СКЗ}}^T \mathbf{I}_{\text{СКЗ}} + \tilde{\mu}_i \mathbf{I})^{-1}$ – эффективное количество параметров.

2.2.2 Определение структуры регрессионной модели

Известно [49], что учет априорной информации позволяет повысить точность формируемых моделей. Физическая интерпретация задачи идентификации системы «труба-земля» свидетельствует, что коэффициенты влияния A_{ij} , представляющие собой параметры регрессионной модели, являются положительными. Кроме того, по мере удаления СКЗ от точки контроля влияние соответствующего тока СКЗ на измеряемый суммарный потенциал ослабевает. Входные переменные (регрессоры), которые очень слабо влияют на выходную переменную, имеют низкую значимость, а их включение в регрессионную модель не способствуют повышению точности оценок параметров и прогноза зависимой переменной. Таким образом, следуя принципу «бритвы Оккама», применим процедуру отбора [34] значимых входных переменных при формировании регрессионных моделей (2.17). Наличие априорной информации о взаимном расположении точек контроля и СКЗ позволяет использовать алгоритм обратной пошаговой регрессии, основанный на последовательном исключении входных переменных из полной модели. При этом входные переменные (токи СКЗ) исключаются в порядке уменьшения расстояния от СКЗ до данной точки контроля.

Условие окончания алгоритма отбора входных переменных определяется критерием выбора структуры регрессионной модели, который зачастую основан на последовательности F-тестов. Поскольку серия тестов проводится на одних и тех же данных, то результаты оказываются смещенными, что представляет так называемую проблему множественных сравнений, для преодоления которой разработаны различные корректирующие подходы [34]. Альтернативный, методически целостный подход к решению задачи структурно-параметрической идентификации представляет последовательная байесовская методология [52, 76, 77]. Полученные в рамках этой методологии алгоритмы структурно-параметрического синтеза нейросетевых моделей [53, 54] очевидным об-

разом редуцируются на случай определения структуры модели линейной множественной регрессии (2.17).

2.2.3 Верификация модели и анализ достоверности входных данных

Для анализа качества полученной модели «труба-земля», представляющей собой совокупность оценок функций регрессии $\hat{\phi}_i = \hat{\mathbf{A}}_i^T \mathbf{i}$, воспользуемся оценкой дисперсий случайных ошибок (шумов измерения) $\hat{D}_{\xi_i} = (N - \gamma_i)^{-1} \|\Phi_i - \hat{\Phi}_i\|^2$. Здесь γ – эффективное количество параметров, которое для модели (2.17) с оценками параметров (2.17) составляет $\gamma = K_l + 1$, где K_l – количество регрессоров, оставшихся после отбора значимых входных переменных.

При выявлении точек контроля (в том числе КИП), для которых $\hat{\sigma}_{\xi_i} = \sqrt{\hat{D}_{\xi_i}}$ значительно превышает среднюю квадратичную погрешность, характеризующую точность измерений, возникает необходимость в дополнительной проверке достоверности соответствующих данных мониторинга, включая обнаружение выбросов. Дополнительная проверка качества выборки, основанная на проверке гипотез о равенстве дисперсий шума измерения для различных пар регрессионных моделей, может быть выполнена с помощью F-критерия.

Об ошибках в обучающей выборке свидетельствует и наличие значимо отличающихся от нуля отрицательных значений оценок параметров A_{ij} модели, полученной после процедуры структурно-параметрической идентификации. Кроме того, оценки коэффициентов влияния должны монотонно убывать по мере удаления СКЗ от рассматриваемой точки контроля.

Оценить соответствие построенной регрессионной модели обучающей выборке позволяет коэффициент детерминации R_i^2 , определя-

ющий относительную долю изменчивости, объясненную линейной регрессией в полной изменчивости выходной переменной. Однако высокие значения коэффициента детерминации не гарантируют в общем случае верификацию построенной модели.

2.3 Выводы по главе

1. Проведена проверка применимости метода регрессионного анализа для восстановления зависимостей влияния выходных параметров станций катодной защиты на потенциалы в точках измерения для линейной части магистрального трубопровода.

2. Введено понятие сторонней разности потенциалов «труба-земля» наложенного неизвестными источниками, определяющего стационарный потенциал в совокупности с потенциалом, наложенным неизвестными источниками. Введение данного параметра в модель распределения трубопровода привело к возможности нахождения оптимальных параметров действующего трубопровода без отключения СКЗ на продолжительный срок, что способствует облегчению проведения процедуры оптимального регулирования. Относительная погрешность вычисления суммарной разности потенциалов в контрольной точке, с использованием стороннего потенциала для одиночного измерения в результате экспериментальных исследований составила 4,47%, значение погрешности суммарного потенциала, вычисленного предложенным методом, с учетом статистики в 112 измерений, не превышает 0,6%.

3. Теоретически обоснована методика идентификации системы «труба-земля».

3 СПОСОБ НАХОЖДЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СТАНЦИЙ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ

3.1 Решение задачи условной параметрической оптимизации

После идентификации системы «труба-земля» для частного случая необходимо произвести расчет оптимального значения относительно определенного параметра, то есть решить задачу условной оптимизации.

Задача условной оптимизации – поиск минимального значения функции $f(I)$ n -мерного векторного аргумента $f(I) \rightarrow \min$ при заданных ограничениях.

Решение параметрической задачи условной оптимизации строится на минимизации выходной мощности совокупности станций катодной защиты.

Вектор $\hat{\mathbf{i}}_{\text{СКЗ}} = [\hat{I}_1, \dots, \hat{I}_j]^T$ оптимальных выходных токов для $N_{\text{СКЗ}}$ станций катодной защиты, включающий управляющие величины для системы ЭХЗ, может быть найден [60] из решения экстремальной задачи минимизации суммарной потребляемой мощности

$$W_{\Sigma}(\mathbf{i}_{\text{СКЗ}}) = \sum_{j=1}^{N_{\text{СКЗ}}} (R_j i_{\text{СКЗ}j}^2 + P_{\text{вн}j}) \quad (3.1)$$

при обеспечении условий защищенности магистральных трубопроводов, заданных в ГОСТ Р 51164-98, определяющих ограничения неравенства

$$U_{\text{н}i} \leq u_l(\mathbf{i}_{\text{СКЗ}}) \leq U_{\text{в}i}, \quad (3.2)$$

а также двухсторонних ограничений на неотрицательность и максимально возможные значения токов СКЗ. Параметрами целевой функции (1) являются сопротивления нагрузки R_j и потери электроэнергии $P_{\text{вн}j}$ на внутреннее потребление j -й СКЗ. Зависимость защитного сум-

марного потенциала в точках контроля от токов СКЗ определяется [7] выражением (2.17).

Процедуры решения задачи условной оптимизации были проверены решением задачи нахождения оптимальных выходных параметров для участка, защищаемого двумя СКЗ, работающими в режиме неуправляемого выпрямителя [88]. Сила тока каждой СКЗ равна 1 А. Решение задачи было произведено в среде MathCAD [97].

Исходными данными являются коэффициенты влияния силы тока СКЗ на разность потенциалов в контрольных точках, полученные при проведении процедур идентификации системы «труба-земля» (см. главу 2). Также входными данными являются величины сопротивления нагрузки для каждой СКЗ и величины ограничений, накладываемых на значения защитного потенциала.

$$A = \begin{Bmatrix} 0,4 & 0,3 \\ 0,45 & 0,45 \\ 0,5 & 0,3 \\ 0,2 & 0,4 \end{Bmatrix}, U_{\min} = \begin{Bmatrix} 0,85 \\ 0,85 \\ 0,85 \\ 0,85 \end{Bmatrix}, U_{\max} = \begin{Bmatrix} 1,15 \\ 1,15 \\ 1,15 \\ 1,15 \end{Bmatrix}, R_j = \begin{Bmatrix} 1,76 \\ 2,25 \end{Bmatrix}.$$

Выходная мощность совокупности СКЗ определяется по формуле:

$$P_{\text{вых}j} = \sum_{j=1}^{N_{\text{СКЗ}}} U_{\text{СКЗ}j} \cdot I_{\text{СКЗ}j} = \sum_{j=1}^{N_{\text{СКЗ}}} R_j \cdot I_{\text{СКЗ}j}^2 \quad (3.3)$$

где $U_{\text{СКЗ}j}$ - выходное напряжение СКЗ, В;

$I_{\text{СКЗ}j}$ - выходная сила тока СКЗ, А;

R_j - сопротивление нагрузки СКЗ, Ом.

После проведения процедуры условной оптимизации выходной мощности был получен график, на котором пересечением линий допустимых ограничений наложенных на минимизируемую величину получена область допустимых решений (рисунок 3.1).

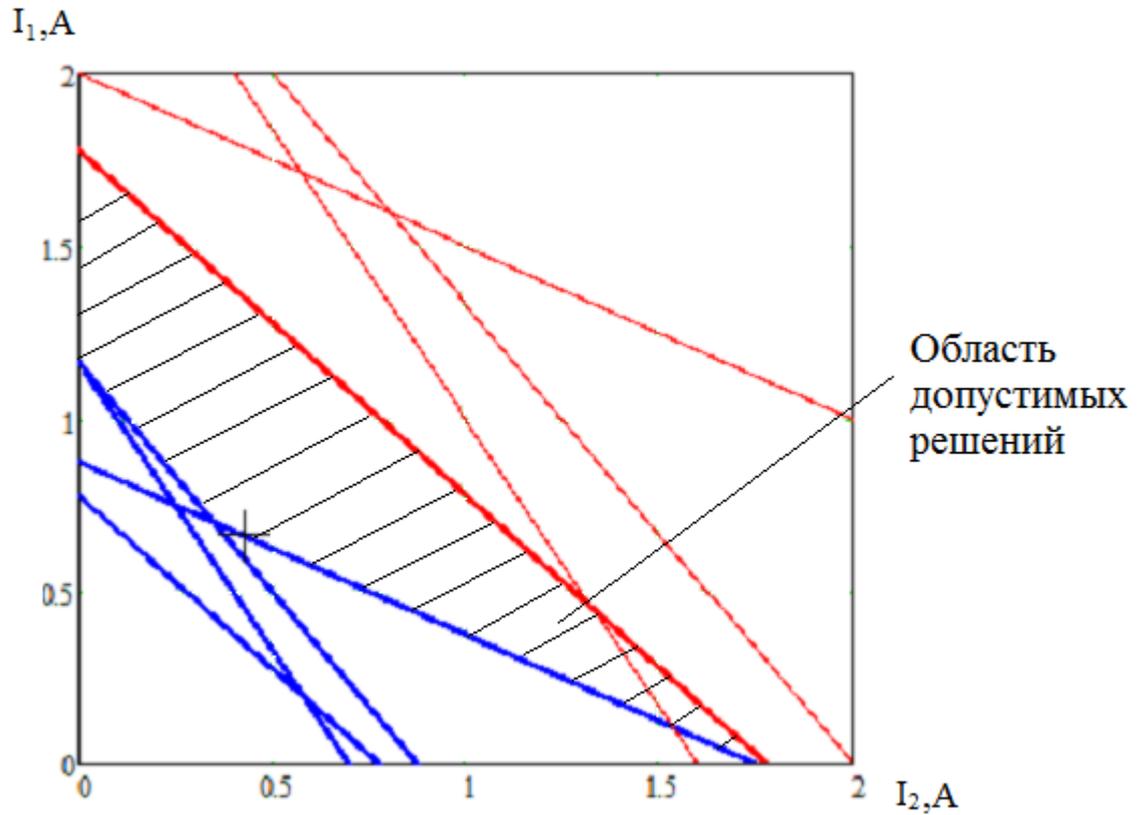


Рисунок 3.1 – Область допустимых решений

Область допустимых решений представляет собой трехмерное пространство образуемое ограничениями по минимальному и максимальному допустимому потенциалу в точках, и силой тока СКЗ, необходимой для получения данных потенциалов (рисунок 3.2).

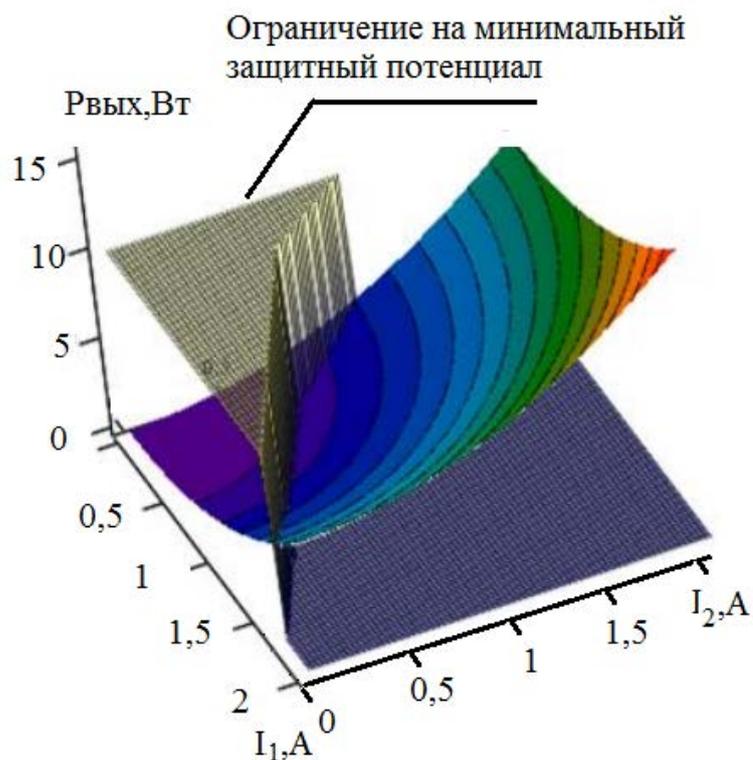
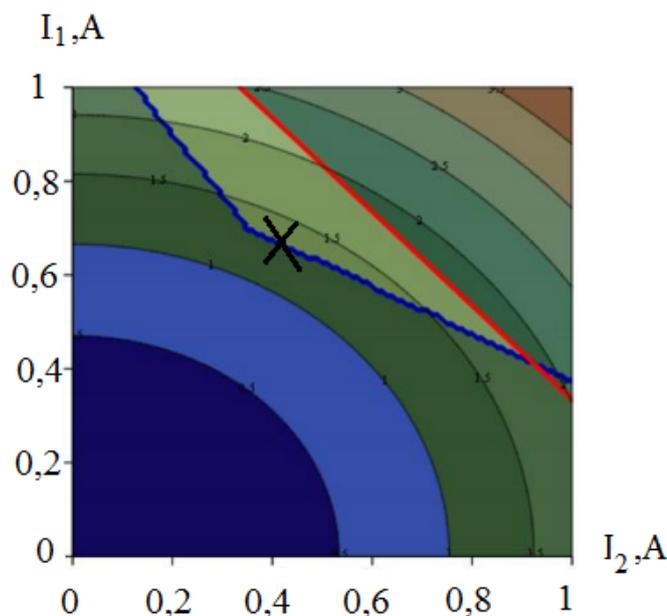


Рисунок 3.2 – Трехмерное отображение области допустимых решений

В области допустимых решений определена точка, определяющая выходные параметры станций катодной защиты, отвечающая минимальным параметрам выходной мощности и не нарушающая условия защищенности (рисунок 3.3).



✕ - Точка оптимального решения

Рисунок 3.3 – Точка решения параметрической задачи оптимизации
 Пример расчета оптимальных режимов работы СКЗ в среде MathCAD приведен в приложении А.

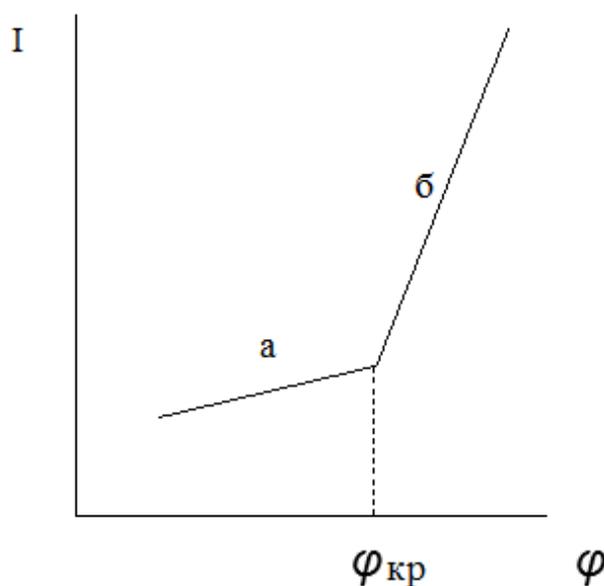
Выводы:

В результате решения задачи условной параметрической оптимизации, было найдено решение, обеспечивающее защищенность на участке в рамках допустимого диапазона защитных потенциалов с минимальной выходной мощностью совокупности СКЗ. Оптимальная сила тока СКЗ №1 составила 0,43 А, а оптимальная сила тока СКЗ №2 составила 0,66 А. Суммарная выходная мощность станций катодной защиты уменьшилась на 44%.

3.2 Анализ применимости критерия перелома кривой Тафеля как ограничивающего максимально допустимый потенциал

Как было отмечено ранее поддержание защитного потенциала в рамках заданных ГОСТ Р 51164-98 с обеспечением только минимальных энергозатрат не является рациональным и достаточным условием. Допу-

стимый диапазон значений для суммарного защитного потенциала достаточно широк и для полиэтиленовой изоляции составляет порядка 2,5 В. Следовательно, решая задачу выбора оптимального сочетания выходных параметров станций катодной защиты, основываясь только на уменьшении энергозатрат возможно получение решений, при которых некоторые станции катодной защиты подвергаются отключению, а оставшиеся работают на максимальных режимах с высоким КПД. При таких условиях защищенность будет обеспечиваться, но потенциал трубопровода в зонах точек дренажа данных СКЗ будет стремиться к верхней допустимой границе максимума. В этом необходимо учесть возможное негативное влияние повышенной плотности тока на металл трубопровода и состояние изоляционного покрытия. Известно, что поляризационная кривая зависимости потенциала металла трубопровода от силы тока СКЗ состоит из двух участков, кривой восстановления кислорода «Зона а» и кривой восстановления воды «Зона б» (рисунок 3.4).



а – кривая восстановления кислорода, б – кривая восстановления воды
с выделением водорода

Рисунок 3.4 – Вольт-амперная характеристика [1.90]

Представленные участки имеют различные углы наклона, т.е. различные значения градиента логарифма тока по потенциалу. Эти значения обусловлены следующим, на первом отрезке происходит восстановление адсорбированного кислорода, а на втором - восстановление воды с выделением водорода. Выделение водорода является негативным фактором, так как влечет за собой изменение механических свойств металла трубы, а также негативно влияет на состояние изоляционного покрытия [17, 55, 56]. Поэтому необходимо следить за тем, чтобы сила тока СКЗ не превышала пределы, при которых на участках трубопровода могут начаться процессы выделения воды с восстановлением водорода. Следовательно, точка излома графика $\varphi_{кр}$ является параметром, значение которого необходимо контролировать и учитывать при решении многокритериальной задачи оптимизации [63]. Исследования подтверждают, что значение $\varphi_{кр}$ зависит от условий среды, в которой проложен трубопровод [47].

Существующие способы регулирования параметров катодной защиты участков подземных трубопроводов основаны на идентификации точки перехода одного отрезка в другой $\varphi_{кр}$ и выборе значения защитного потенциала ниже определенного на 0,03 – 0,06 В.

Предлагается использовать данный параметр $\varphi_{кр}$ как верхнюю границу максимума диапазона допустимого изменения защитного потенциала по трассе магистрального трубопровода.

Для проверки возможности применения данного параметра на реальном объекте были проведены натурные исследования по нахождению $\varphi_{кр}$ на реальном объекте магистрального газопровода с помощью оборудования систем дистанционного коррозионного мониторинга. В исследовании использовалась подсистема дистанционного коррозионного мониторинга производства ЗАО «Трубопроводные системы и технологии», установленная на участке магистрального газопровода «Саратов-Горький» в районе перехода через автомобильную дорогу на 117 км. Подсистема ПКМ-ТСТ-КонтКорр предназначена для контроля скорости коррозии и

параметров ЭХЗ стальных сооружений. Основные параметры, контролируемые подсистемой и диапазоны расчетных и измеряемых величин, представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Параметры, контролируемые ПКМ

Параметр	Значение
Скорость коррозии (контрольной пластины измерительного зонда)	Расчетная величина, 0,001...10 мм/год
Поляризационный потенциал сооружения	0...+/-5 В
БОС-потенциал сооружения	Расчетная величина, 0...+/-5 В
Суммарный потенциал на сооружении относительно электрода сравнения	0...+/-7,5 В
Переменное напряжение на сооружении относительно электрода сравнения	0...100 В
Постоянный/переменный ток сооружение – контрольная пластина измерительного зонда	0...+/-300 мА
Плотность постоянного/переменного тока через контрольную пластину измерительного зонда	Расчетная величина А/м ²
Сопrotивление растеканию переменного тока	Расчетная величина, Ом·м ²
Сила тока через блок совместной защиты (БСЗ), до 2 каналов	0...+/-50 А
Падение напряжения на токоизмерительных выводах (сила тока в трубопроводе)	0...1 мВ
Сопrotивление между трубопроводом и защитным кожухом	0...10 кОм
Температура трубопровода	-50...+100 °С
Напряжение батареи питания	0...5 В

Исследования заключались в обработке информации, поступающей с определённой периодичностью на АРМ с ПКМ-ТСТ-КонтКорр для проверки возможности нахождения $\varphi_{кр}$ по данным изменения силы и плотности тока на зонде, входящим в состав ПДКМ. Был выбран промежуток времени с 01.09.2014 по 03.09.2014, так как в это время проводились работы по изменению режимов работы СКЗ на данном участке МГ. Измерения основных параметров коррозионного мониторинга ПКМ-ТСТ-КонтКорр проводилось 1 раз в 15 минут.

Массив информации составил 288 значений, при обработке которого были получены графики зависимости защитного суммарного потенциала от силы тока на контрольной пластине (рисунок 3.5) и зависимости защитного суммарного потенциала от логарифма силы тока натекающего на контрольную пластину (рисунок 3.6).

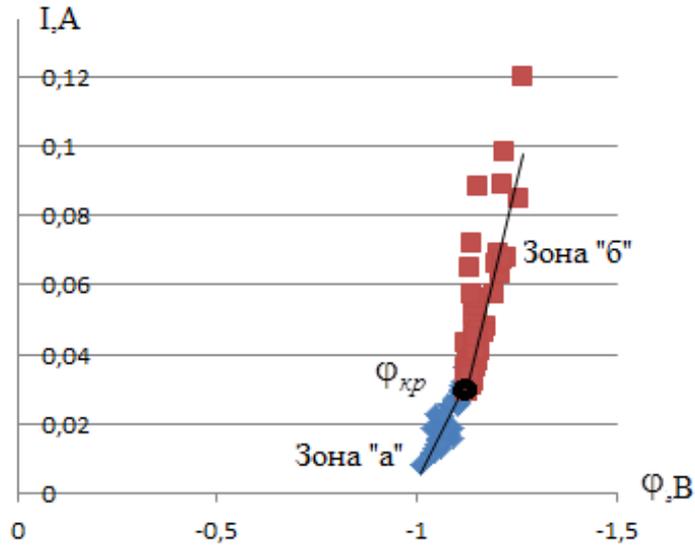


Рисунок 3.5 – Зависимости защитного суммарного потенциала от силы тока на контрольной пластине

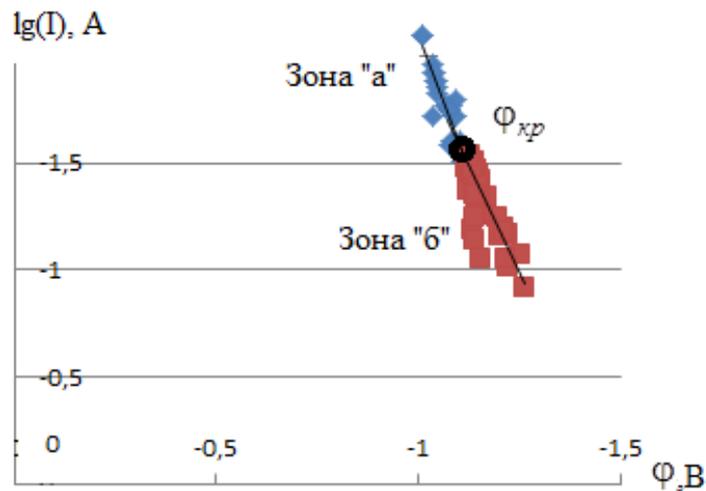


Рисунок 3.6 – Зависимости защитного суммарного потенциала от логарифма силы тока натекающего на контрольную пластину.

Значение $\varphi_{кр}$ одинаково для обоих графиков и равно минус 1,11 В, следовательно при решении задачи оптимизации необходимо выбирать

такие режимы работы СКЗ, чтобы потенциал в данной точке не превышал данное значение.

3.3 Применение методов структурной оптимизации

Управление системой ЭХЗ основывается на определении таких значений управляющих воздействий – силы тока на выходе станций катодной защиты, которые, обеспечивали бы в точках измерения, расположенных по трассе трубопровода, значения защитного суммарного и поляризионного потенциалов в границах коридора, определяемого требованиями нормативно-технической документации.

Задача поддержания защитных потенциалов в пределах заданных границ является необходимым условием, но при этом всегда существует возможность оптимизации. При решении задачи параметрической оптимизации в качестве целевой функции выбирается выходная мощность совокупности СКЗ, принадлежащих объекту магистрального трубопровода.

Рассмотрим структурную схему системы управления (рисунок 3.7) [89].

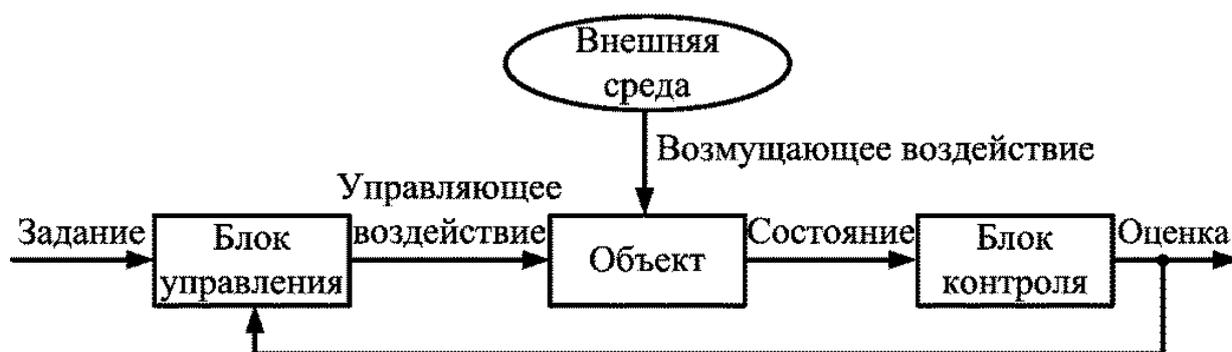


Рисунок 3.7 – Структурная схема системы управления

Блоком управления является совокупность станций катодной защиты на контролируемом участке. Управляющим воздействием является сила тока на выходе каждой станции. Под объектом подразумевается защищаемый участок трубопровода, на который оказывают влияние совокупности перечисленных ранее факторов. Контроль над состоянием защи-

ценности производится в измерительных точках. Для систем магистральных трубопроводов такими точками являются контрольно-измерительные пункты (КИП), информация с которых доступна для обработки. Таким образом, управление системой ЭХЗ основывается на определении таких значений управляющих воздействий – силы тока на выходе станций катодной защиты, которые, обеспечивали бы в точках измерения, расположенных по трассе трубопровода, значения защитного суммарного и поляризационного потенциалов в границах коридора, определяемого требованиями ГОСТ [55].

Определив зависимость изменения защитных суммарных и поляризационных потенциалов от выходных параметров СКЗ, задача поддержания их значений в рамках установленных ГОСТ упрощается. Но для нахождения оптимального решения недостаточно установить защитный суммарный и поляризационный потенциал в пределах нормы, кроме этого необходимо решить многокритериальную задачу условной оптимизации, включающую в себя:

- мощность потребления каждой станции;
- коэффициент полезного действия (КПД) каждой станции;
- плотность катодного тока на защищаемом участке;

Задача осложняется тем, что магистральный трубопровод представляет собой протяженный объект, с изменяющимися факторами коррозии и критериями регулирования, как по протяженности трубопровода, так и во времени. Проведенный анализ показал, что на управление системой ЭХЗ значительное влияние оказывает совокупность факторов и критериев, таких как:

- изменение нагрузки для СКЗ в зависимости от меняющихся во времени сопротивления грунта, изоляции и анодного заземления и др.;
- влияние источников блуждающих токов (электрифицированный транспорт, смежные системы ЭХЗ);

- влияние переменного тока промышленной частоты (блуждающего и индуцированного);
- отношение плотностей катодного и переменного тока на сооружении;
- необходимость оптимизации по защитному потенциалу и потребляемой мощности СКЗ одновременно.

Как было обозначено ранее, в качестве целевой функции выбрана выходная мощность СКЗ. Для нахождения решения применяются принципы структурной оптимизации [61]. Так как метод структурной оптимизации применим только для одного критерия, минимизации подвергается суммарная выходная мощность, а остальные показатели, такие как коэффициент полезного действия станций катодной защиты, границы потенциала, допустимые плотности катодного тока, переводятся в разряд ограничений.

Задача структурно-параметрической оптимизации может быть представлена в виде двух вложенных задач [14]. Внешней задачей является выбор структур (конфигураций) режимов работы станций катодной защиты. Для решения задачи структурной оптимизации предлагаются алгоритмы полного перебора возможных решений с нахождением множества Парето-оптимальных решений. Внутренней задачей является выполнение процедуры параметрической оптимизации с целью улучшения найденных эффективных решений.

Алгоритм реализации задачи структурно-параметрической оптимизации представлен на рисунке 3.8. Алгоритм включает в себя последовательный перебор возможных структур и при нахождении оптимальных проведения процедур параметрической оптимизации с выводом решения.

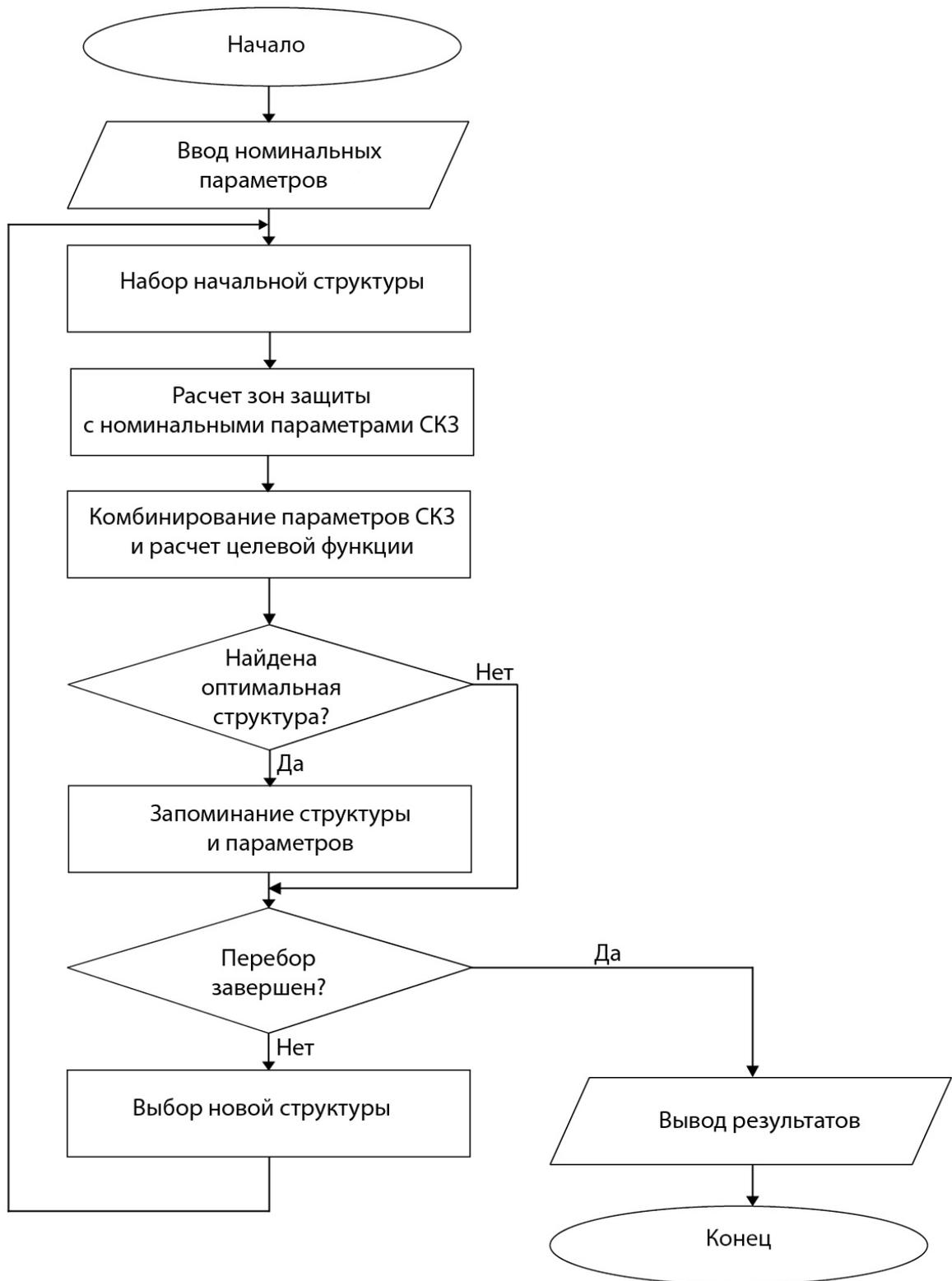


Рисунок 3.8 – Алгоритм реализации задачи структурно-параметрической оптимизации режимов работы СКЗ

Для проверки применимости подходов по решению задачи структурно-параметрической оптимизации была проведена работа по нахождению оптимальных режимов работы по данным, полученным с реального

объекта - магистрального газопровода «Красные Баки-Урень». Исходные данные по трубопроводу представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Исходные данные по магистральному газопроводу «Красные Баки-Урень».

Обозначение показателя	Наименование показателя	Единицы измерения	Величина
D_T	Диаметр трубопровода	м	530
ρ_T	Удельное электрическое сопротивление материала трубопровода	Ом·м	$2,45 \cdot 10^{-7}$
δ_T	Толщина стенки трубопровода	м	6
$R_{из}$	Начальное переходное сопротивление «труба-земля»	Ом·м ²	$3 \cdot 10^5$
$\rho_{гр}$	Среднее удельное сопротивление грунта	Ом·м	100
H_T	Глубина залегания трубопровода	м	1,5

Состояние защищенности с распределением потенциалов трассе газопровода было определено из отчетов службы защиты от коррозии. По полученным данным был составлен график распределения суммарного защитного потенциала в пакете MathCAD (рисунок 3.9).

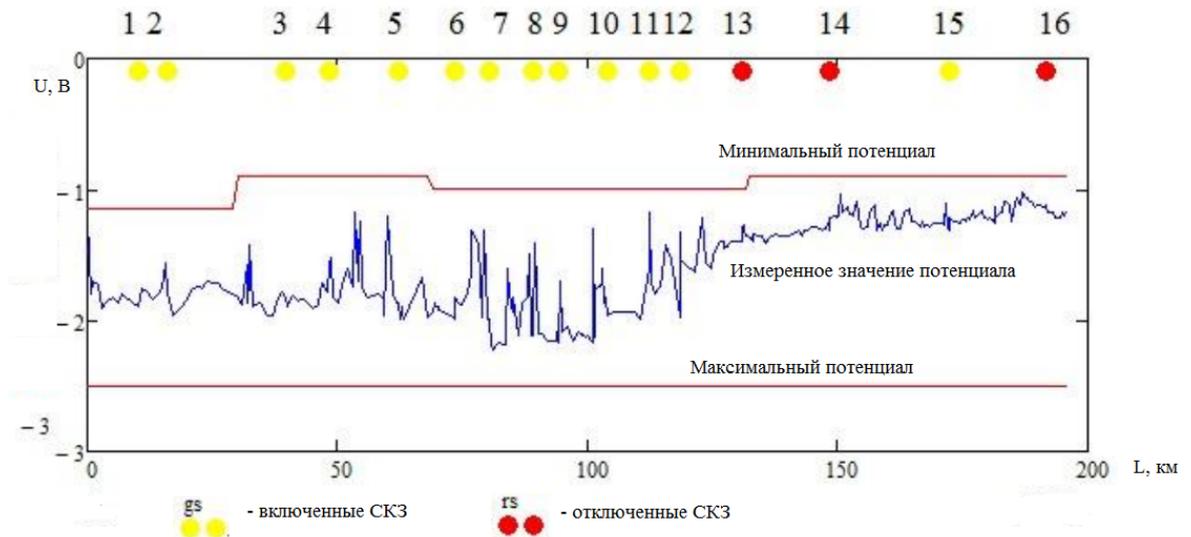


Рисунок 3.9 – График распределения суммарного защитного потенциала

Далее необходимо выполнить последовательный перебор конфигураций допускающих отключение СКЗ, где 1 – отключение не допустимо, 0 – отключение допустимо.

В результате последовательного перебора структур выполняли ранжирование структур (конфигураций) по значениям целевой функции выделенного критерия (потребляемой мощности).

Рекомендации об отключении СКЗ формируются по критерию минимизации потребляемой мощности и максимизации КПД. Перебор структур представлен на рисунке 3.10.

	Конфигурация СКЗ*																Средний КПД		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	567.5	63
3	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	497.5	71.86
4	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	443.7	52.67
5	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	439.8	68.17
6	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	425.3	67.08
7	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	400.3	65.03

* 0 - выключено
1 - включено

Потребляемая мощность

Рисунок 3.10 – Последовательный перебор структур

График изменения значений потребляемой мощности при переборе структур представлен на рисунке 3.11.

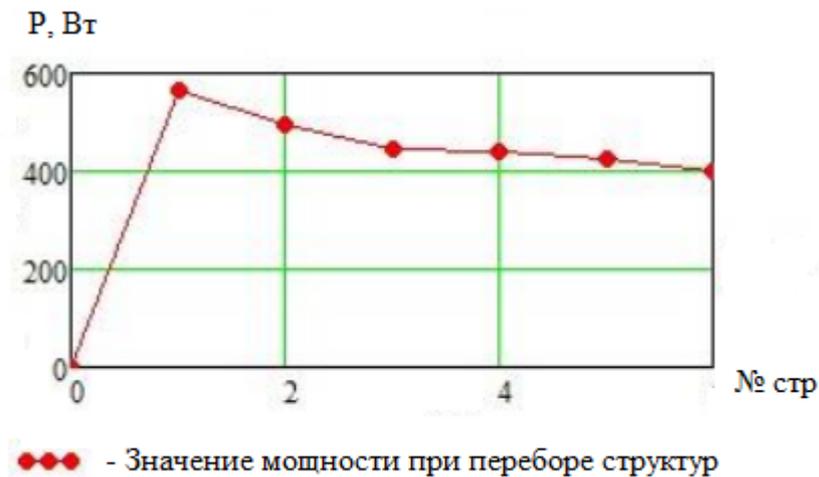


Рисунок 3.11 – График изменения значений потребляемой мощности при переборе структур

График изменения значений КПД при переборе структур представлен на рисунке 3.12.

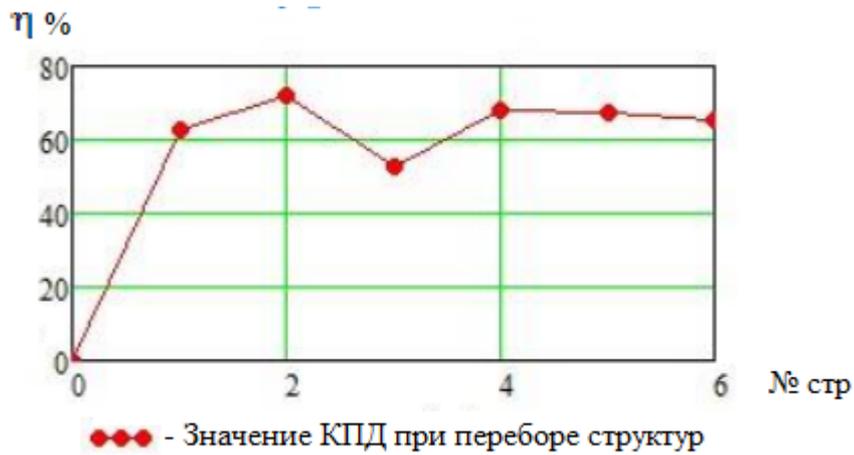


Рисунок 3.12 – График изменения значений КПД при переборе структур

После нахождения оптимальной структуры к ней были применены процедуры параметрической оптимизации, результатом которых явилось предложение по отключению двух станций катодной защиты № 4, 7. График виртуального перераспределения потенциалов после отключения СКЗ № 4, 7 и оптимизации режимов остальных станций представлен на рисунке 3.13.

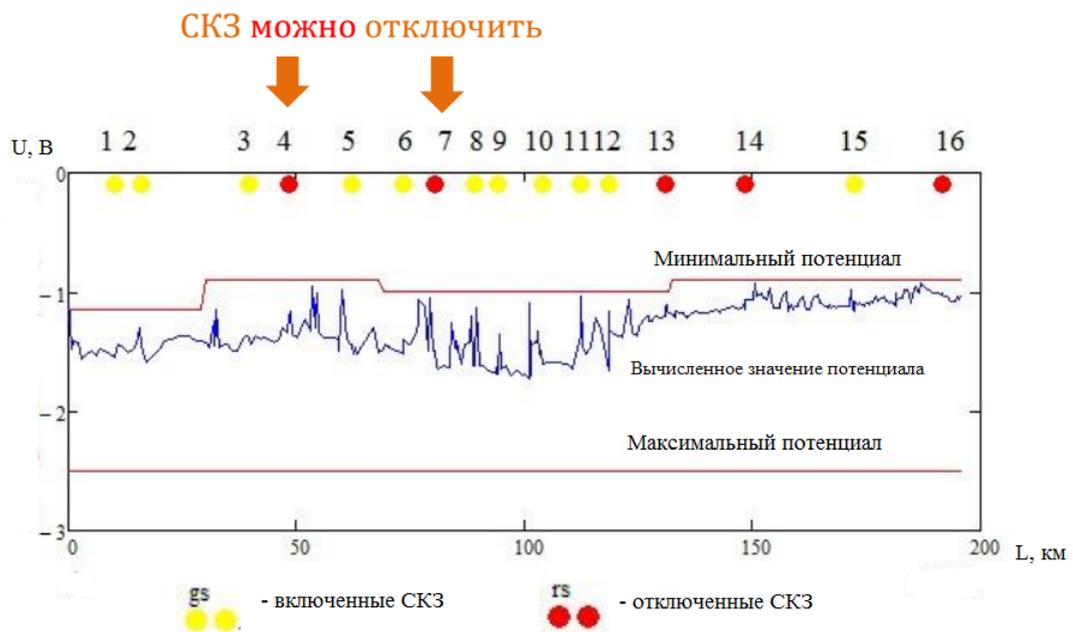


Рисунок 3.13 – График перераспределения потенциалов после виртуального отключения СКЗ № 4, 7.

Выводы:

1. Применение метода структурной оптимизации дало возможность решать задачу оптимального регулирования для совокупности СКЗ с возможностью минимизации выходной мощности, увеличения КПД, и при этом поддержания защитных потенциалов в границах определяемых ГОСТ.

2. Разработан алгоритм решения задачи структурно-параметрической оптимизации режимов работы станций катодной защиты.

3. Проведена проверка решения задачи структурно-параметрической оптимизации с использованием реальных данных о состоянии защищенности объекта магистрального газопровода с использованием пакета MathCAD.

3.4 Выводы по главе

1. Разработаны процедуры решения задачи условной параметрической оптимизации режимов работы станций катодной защиты с проверкой применимости в пакете MathCAD.

2. Проведен анализ применимости критерия перелома кривой Тафеля как ограничивающего максимальный допустимый потенциал, который показал необходимость учета данного критерия при решении задачи оптимального регулирования. Проведена проверка нахождения критерия перелома $\varphi_{кр}$ на реальном объекте с использованием данных о плотности натекающего тока, поступающих с подсистемы дистанционного коррозионного мониторинга. Проверка показала возможность нахождения $\varphi_{кр}$ как по плотности натекающего тока, так и по логарифму силы натекающего тока и для обоих случаев значение $\varphi_{кр}$ составило минус 1,11 В.

3. Разработан алгоритм решения задачи структурно-параметрической оптимизации режимов работы станций катодной защиты.

4. Проведена проверка решения задачи структурно-параметрической оптимизации с использованием реальных данных о состоянии защищенности объекта магистрального газопровода в пакете MathCAD. Проверка показала, что на защищаемом шестнадцатью станциями катодной защиты участке магистрального газопровода, три из которых выведены в резерв, можно дополнительно вывести в резерв еще две станции катодной защиты, при этом будет обеспечиваться защищенность.

4 РАЗРАБОТКА ОСНОВНЫХ АЛГОРИТМОВ ОПТИМАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ СТАНЦИЙ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ

4.1 Структура модуля оптимизации

До настоящего времени отсутствует инструмент, позволяющий по определенным правилам управлять системой ЭХЗ в целом, давать предложения по оптимизации работы средств ЭХЗ и производить аналитическую зависимость совокупного влияния факторов на состояние защищенности.

Для определения работы модуля оптимизации была составлена структурная схема, включающая в себя:

- блок обработки исходных данных о состоянии защищенности и основных характеристиках МГ;
- блок ранжирования участков между СКЗ по степени коррозионной опасности;
- блок определения возможности отключения или оптимизации режимов работы СКЗ;
- блок расчета параметров защиты при отключении СКЗ;
- блок корректировки математической модели;
- блок предложения оптимальных решений оператору.

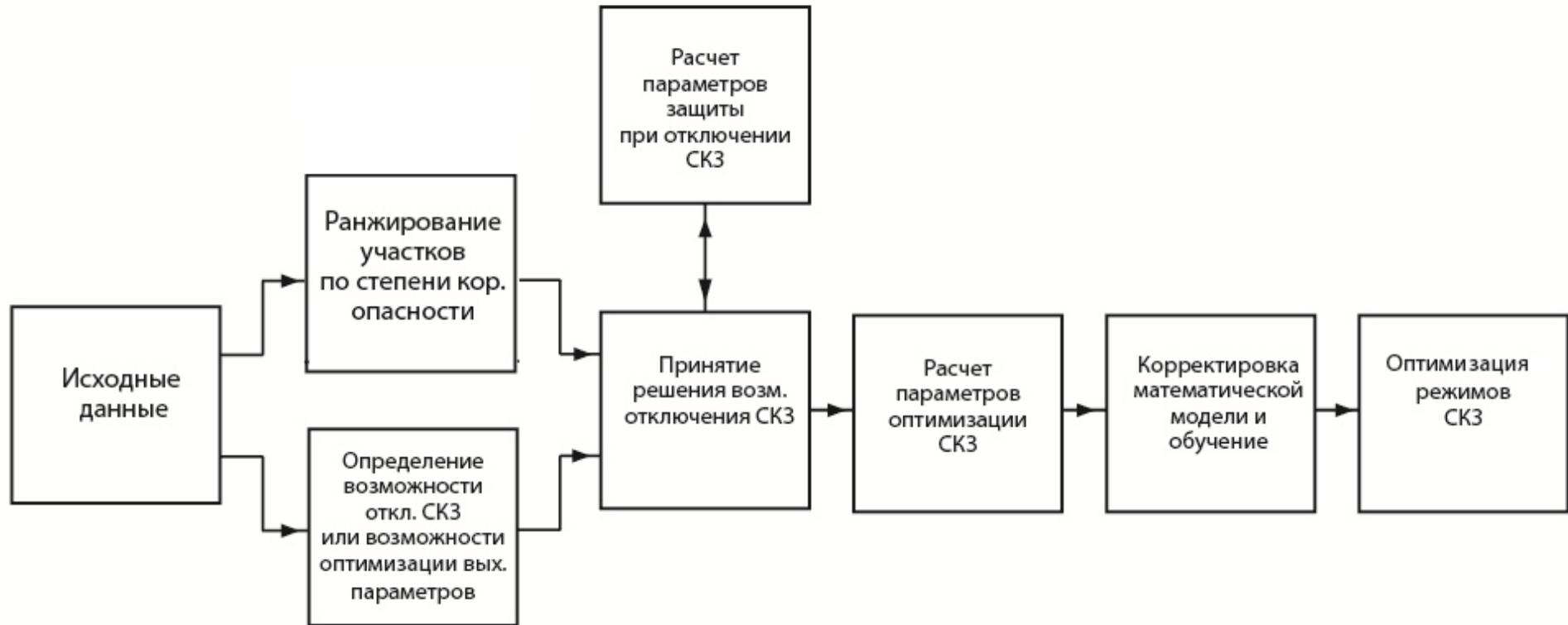


Рисунок 4.1 – Структурная схема модуля оптимизации режимов работы СКЗ

4.2 Ранжирование участков между СКЗ по степени коррозионной опасности

4.2.1 Назначение и характеристика блока

Блок ранжирования участков между СКЗ по степени коррозионной опасности служит для определения их коррозионного состояния. Ранжирование зон коррозионной опасности производится по скорости коррозии и по интегральному показателю, учитывающему факторы коррозионной опасности.

Задача осложняется тем, что магистральный трубопровод представляет собой протяженный объект, с изменяющимися факторами коррозии и критериями регулирования, как по протяженности трубопровода, так и во времени. Таким образом, мы получаем задачу с различной совокупностью факторов и критериев, таких как:

- 1) Наличие блуждающих постоянных токов.
- 2) Наличие блуждающих переменных токов.
- 3) Наличие водорастворимых солей больше заданной величины.
- 4) Температура транспортируемого продукта больше заданной установки.
- 5) Удельное электрическое сопротивление грунта меньше заданной установки.
- 6) Наличие индуцированного переменного напряжения на трубопроводе.
- 7) Наличие болотистых, черноземных почв.
- 8) Наличие подводных переходов и пойм рек.
- 9) Наличие пересечения с авто, ж/д дорогами.
- 10) Наличие пересечения с трубопроводами.
- 11) Наличие стоков, свалок мусора и шлаков.

По полученной информации необходимо составить ряд массивов, используемых при дальнейшем вычислении. Кроме того, для ранжирования участков необходимо учитывать коррозионное состояние МГ, определяемое по данным,

поступающим с датчиков скорости коррозии, входящих в состав систем дистанционного коррозионного мониторинга.

Таблица 4.1 – Описание массивов входных данных

Обозначение показателя	Наименование показателя	Единицы измерения
$l_{\text{пост}}$	Длина участка с наличием блуждающих постоянных токов	км
$l_{\text{пер}}$	Длина участка с наличием блуждающих переменных токов	км
$l_{\text{соль}}$	Длина участка с наличием водорастворимых солей больше заданной величины	км
$l_{\text{тем}}$	Длина участка с температурой транспортируемого продукта больше заданной установки	км
$l_{\text{уэс}}$	Длина участка с удельным электрическое сопротивлением грунта меньше заданной установки	км
$l_{\text{инт}}$	Длина участка с наличием индуцированного переменного напряжения на трубопроводе	км
$l_{\text{бол}}$	Длина участка с наличием е болотистых и черноземных почв	км
$l_{\text{подв}}$	Длина участка с наличием подводных переходов и пойм рек	км
$l_{\text{дор}}$	Длина участка с наличием пересечения с авто, ж/д дорогами	км
$l_{\text{труб}}$	Длина участка с наличием пересечения с трубопроводами	км
$l_{\text{сток}}$	Длина участка с наличием стоков, свалок мусора и шлаков	км
$l_{\text{эс}}$	Положение датчиков ЭС	км

Окончание таблицы 4.1

Обозначение показателя	Наименование показателя	Единицы измерения
$l_{отк}$	Положение участков трубы, на которых произошли коррозионные отказы (разрывы, свищи) или обнаружены коррозионные язвы и трещины глубиной свыше 15 % толщины стенки трубы, а также участки, на которых скорость коррозии превышает 0,5 мм в год	км
$R_c(t)$	Измеряемое сопротивление металлического элемента в произвольный момент времени t	Ом
$R_r(t)$	Измеряемое сопротивление контрольного образца в произвольный момент времени t	Ом
$R_c(t=0)$	Измеряемое сопротивление металлического элемента в начальный момент времени t	Ом
$R_r(t=0)$	Измеряемое сопротивление контрольного образца в начальный момент времени t	Ом
$\delta(t=0)$	Толщина металлического элемента в начальный момент времени	м
t	Момент времени измерения сопротивления	с
δ	Толщина металлического элемента при измерении сопротивления в момент времени t	м
U	Допустимая величина утонения	мм
T	Расчетный срок службы газопровода	год

4.3.2 Оценка коррозионного состояния участков между СКЗ

Коррозионное состояние участка МГ оценивается с помощью датчиков коррозии на основе измерения изменений сопротивления металлического элемента, спроектированного в виде контрольной пластины. В процессе коррозии

металлического элемента происходит его утонение (потеря веса), что приводит к возрастанию электрического сопротивления элемента. Поскольку сопротивление элемента также меняется в связи с колебаниями температуры, для компенсации температуры используется второй элемент, который имеет покрытие для защиты от коррозии. Элемент, помещенный в коррозионную среду, является контрольной пластиной, а элемент, защищенный от коррозии покрытием, является контрольным образцом. Эти два элемента термически соединены в целях эффективного уравнивания любых температурных расхождений между ними.

Значения сопротивления двух отдельных элементов обычно измеряются проведением возбуждающего тока через элементы и измерением напряжения, сгенерированного по всей длине элемента возбуждающим током

Сопротивление металлического элемента датчика ЭС:

$$R = \rho(T) \frac{l}{b\delta} , \quad (4.1)$$

где $\rho(T)$ – удельное сопротивление металлического элемента как функция температуры, Ом·м;

l – длина металлического элемента, м;

b – ширина металлического элемента, м;

δ – толщина металлического элемента, м.

Отсюда находим зависимость между толщиной корродируемого металлического элемента и его сопротивлением:

$$\delta(t) = \delta(t=0) \frac{R_r(t)}{R_c(t)} \cdot \frac{R_c(t=0)}{R_r(t=0)} , \quad (4.2)$$

где $R_c(t)$ – измеряемое сопротивление металлического элемента в произвольный момент времени t , Ом;

$R_r(t)$ – измеряемое сопротивление контрольного образца в произвольный момент времени t , Ом;

$R_c(t=0)$ – измеряемое сопротивление металлического элемента в начальный момент времени t , Ом;

$R_r(t=0)$ – измеряемое сопротивление контрольного образца в начальный момент времени t , Ом;

$\delta(t=0)$ – толщина металлического элемента в начальный момент времени, м.

Среднюю скорость коррозии за некоторый выбранный промежуток времени находим по формуле:

$$U_{корр}^{cp} = -\sum_{i=1}^i \frac{\delta_i - \delta_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} = -\sum_{i=1}^i \frac{\Delta\delta_i}{\Delta t_i}, \quad (4.3)$$

где t_i – момент времени измерения сопротивления, с;

δ_i – толщина металлического элемента при измерении сопротивления в момент времени t_i , м.

Единицы измерения, полученного значения $U_{корр}^{cp}$ (м/с) следует перевести в мм/год с использованием множителя $10^3 \cdot t_c$, где t_c – число секунд в году.

Ранжирование зон коррозионной опасности подземных трубопроводов в зависимости от скорости коррозии приведено в таблице 4.2 [31, 81].

Таблица 4.2 – Ранжирование зон коррозионной опасности трубопроводов

Степень коррозионной опасности	Скорость коррозии, мм/год
Высокая	Более 0,3
Повышенная	От 0,1 до 0,3
Умеренная	Менее 0,1

В соответствии с ГОСТ Р 51164-98 к участкам высокой коррозионной опасности относят участки между установками электрохимической защиты, на которых произошли коррозионные отказы (разрывы, свищи) или обнаружены коррозионные язвы и трещины глубиной свыше 15 % толщины стенки трубы, а также участки, на которых скорость коррозии превышает 0,5 мм в год.

Основным показателем опасности коррозии является скорость коррозии. Оценка опасности коррозии осуществляется на основе показателя допустимой скорости коррозии, K_{don} , которая определяется по формуле

$$K_{don} = \frac{U}{T}, \quad (4.4)$$

где U – допустимая величина утонения, мм;

T – расчетный срок службы сооружения, год.

Критерием опасности коррозии является превышение значения фактической скорости коррозии K по отношению к допустимой скорости коррозии K_{don} .

$$K > K_{don}$$

Информация о степени коррозионной опасности (таблица 4.2), о коррозионных отказах и показатель допустимой скорости коррозии K_{don} , используются при принятии решений о возможности отключения отдельных СКЗ.

Критерием опасности коррозии является превышение значения фактической скорости коррозии по отношению к допустимой скорости коррозии

Информация о степени коррозионной опасности (таблица 4.2), о коррозионных отказах и показатель допустимой скорости коррозии K_{don} , используются при принятии решений о возможности отключения отдельных СКЗ.

4.3.3 Учет весов влияния факторов на каждом участке между СКЗ

В зависимости от степени коррозионной опасности на основании экспериментальных исследований могут быть назначены весовые коэффициенты (баллы) для следующих факторов:

- 1) наличие блуждающих постоянных токов, w_1 ;
- 2) наличие блуждающих переменных токов, w_2 ;
- 3) наличие водорастворимых солей больше заданной величины, w_3 ;
- 4) температура транспортируемого продукта больше заданной устав-ки, w_4 ;

- 5) удельное электрическое сопротивление грунта меньше заданной уставки, w_5 ;
- 6) наличие индуцированного переменного напряжения на трубопроводе, w_6 ;
- 7) наличие болотистых, черноземных почв, w_7 ;
- 8) наличие подводных переходов и пойм рек, w_8 ;
- 9) наличие пересечения с авто, ж/д дорогами, w_9 ;
- 10) наличие пересечения с трубопроводами, w_{10} ;
- 11) наличие стоков, свалок мусора и шлаков, w_{11} .

Весовые коэффициенты (баллы) могут быть выставлены и на основании экспертных оценок.

4.3.4 Расчет интегрального показателя коррозионного состояния участков между СКЗ

Значения весовых коэффициентов (баллов) факторов п. 4.3.3 могут быть использованы для оценки степени влияния коррозионных факторов на участке между СКЗ относительно друг друга в соответствии с интегральным показателем. Интегральный показатель для произвольного участка между СКЗ определяется по формуле

$$Int_j = \frac{w_1 n_{1j} Id_{1j} + w_2 n_{2j} Id_{2j} + \dots + w_{11} n_{11j} Id_{11j}}{w_1 n_1 + w_2 n_2 + \dots + w_{11} n_{11}}, \quad (4.5)$$

где w_i – весовой коэффициент ($i = \overline{1,11}$);

n_i – количество i -го фактора по всем участкам мониторинга;

n_{ij} – количество i -го фактора на j -ом участке мониторинга;

Id_{ij} – индекс фактора опасности (i) на j -ом участке ($Id_{ij}=1$, если на j -ом участке присутствует соответствующий фактор; $Id_{ij}=0$, если на j -ом участке отсутствует соответствующий фактор).

Использование интегрального показателя позволяет получить ранжированный список участков между СКЗ по относительной степени коррозионной опасности.

4.3.5 Ранжирование участков между СКЗ по степени коррозионной опасности

Ранжирование участков между СКЗ по степени коррозионной опасности проводится на основании сравнения $U_{корр}^{cp}$ по каждому участку с таблицей 4.2.

Если значение $U_{корр}^{cp}$ более 0,3 и $K_{дон}$, то соответствующее значение $l_{ЭСП}$ положения датчика ЭС в зоне ВКО записывается в массив ВКО.

Кроме того, к участкам ВКО в соответствии с ГОСТ Р 51164-98 следует отнести участки между СКЗ, на которых произошли коррозионные отказы (разрывы, свищи) или обнаружены коррозионные язвы и трещины глубиной свыше 15 % толщины стенки трубы, а также участки, на которых скорость коррозии превышает 0,5 мм в год.

Если значение $U_{корр}^{cp}$ от 0,1 до 0,3, то соответствующее значение $l_{ЭСП}$ положения датчика ЭС в зоне ПКО записывается в массив ПКО.

Если значение $U_{корр}^{cp}$ менее 0,1 то соответствующее значение $l_{ЭСП}$ положения датчика ЭС в зоне УКО записывается в массив УКО.

В соответствии с интегральным показателем осуществляется ранжирование участков между СКЗ по степени убывания его значения.

Результатом ранжирования является массив значений интегрального показателя в порядке убывания его величины по каждому участку между СКЗ.

4.3.6 Алгоритм ранжирования участков по коррозионной опасности

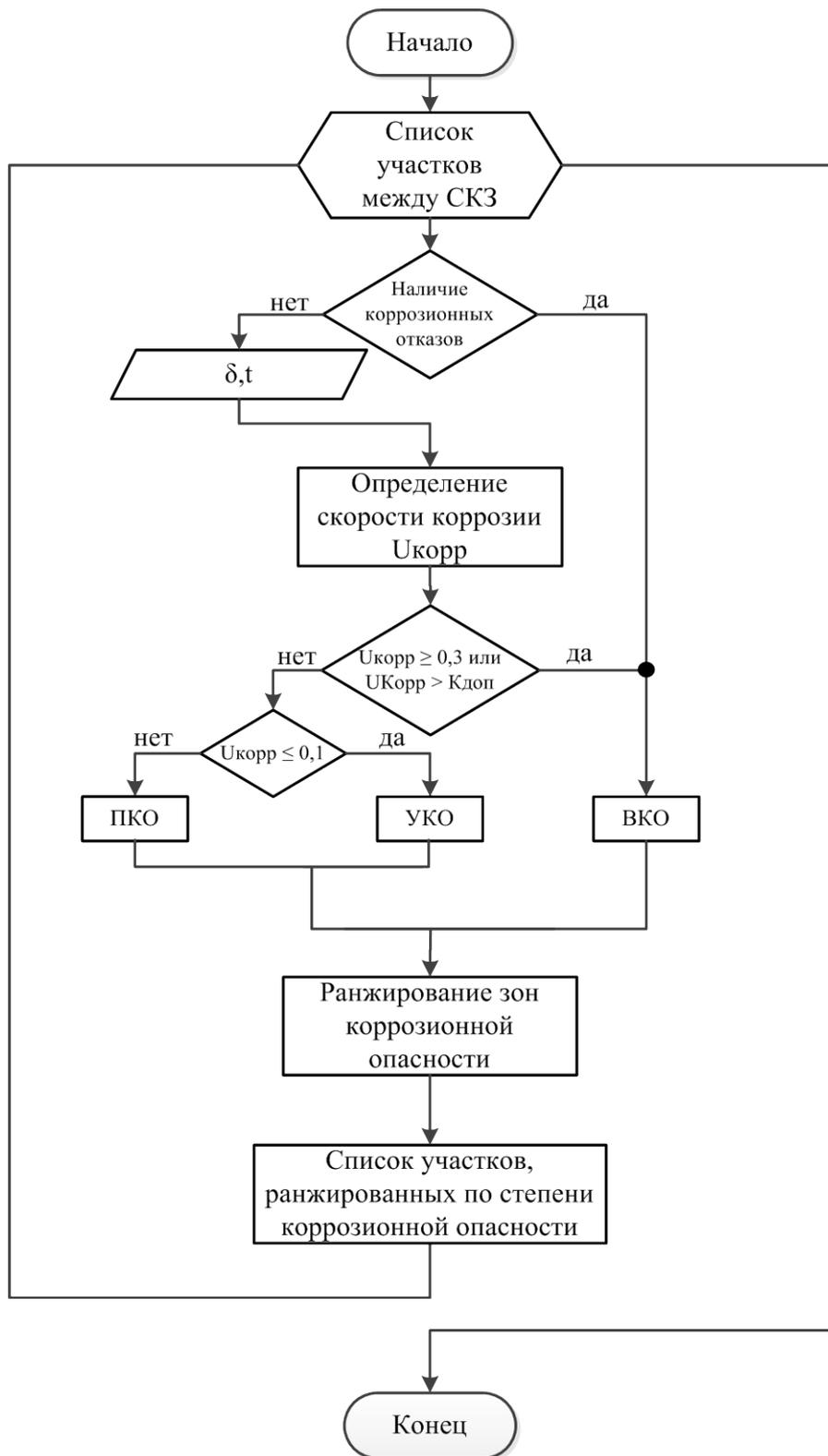


Рисунок 4.2 – Блок-схема алгоритма ранжирования участков по степени коррозионной опасности

4.3.7 Алгоритм ранжирования участков по коррозионной опасности на основе интегрального показателя

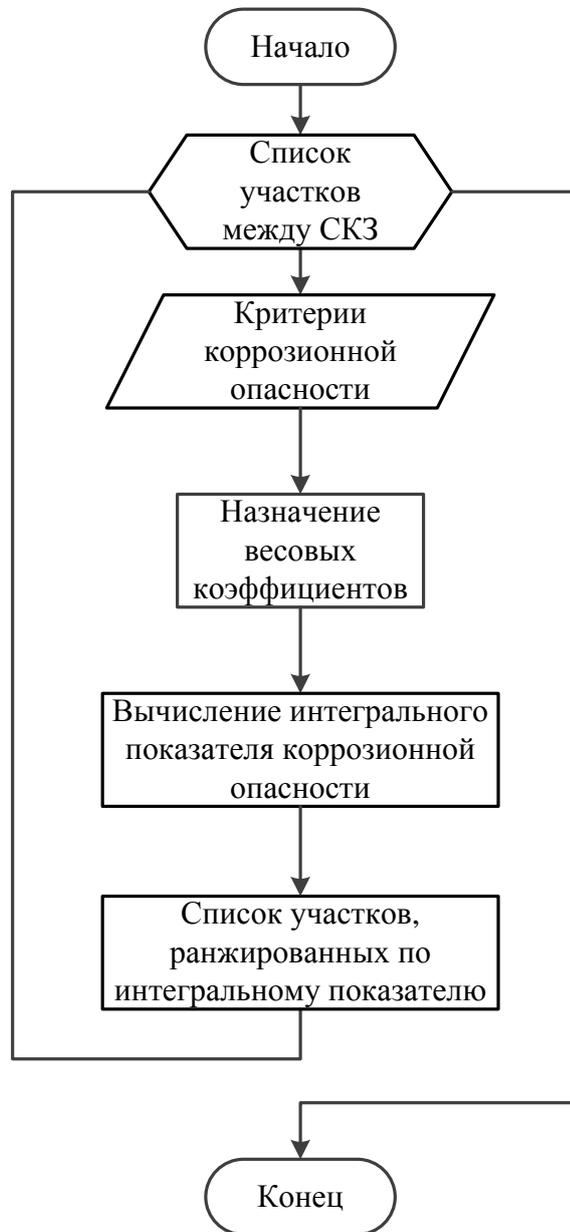


Рисунок 4.3 – Блок-схема алгоритма ранжирования участков по степени коррозионной опасности на основе интегрального показателя

4.4 Определение возможности отключения СКЗ

4.4.1 Определение режимов функционирования СКЗ

Чтобы убедиться, что отдельные СКЗ можно отключить, необходимо:

- 1) определить находятся ли в смежных с предполагаемой для отключения СКЗ участках зоны ВКО или блуждающие токи;
- 2) проверить находится ли защитный потенциал в допустимом коридоре.
- 3) убедиться в том, что режимы СКЗ не превышают номинальных значений.

Для того, чтобы определить находится ли защитный потенциал в допустимом коридоре используется выражение зависимости защитного потенциала по длине участка МГ от выставленных выходных токов СКЗ [7]

$$\varphi = -\mathbf{A} \cdot I + \varphi_{\text{ст}}, \quad (4.6)$$

где $I = \{I_1, I_2, \dots, I_j\}^T$ – выходные токи СКЗ;

\mathbf{A} – матрица коэффициентов влияния, которая имеет вид

$$\mathbf{A} = \begin{Bmatrix} A_{11} & \dots & A_{1i} \\ \dots & \dots & \dots \\ A_{1j} & \dots & A_{ij} \end{Bmatrix} \quad (4.7)$$

Как было обозначено ранее результаты исследований показывают, что зависимость защитных потенциалов от выходных токов СКЗ адекватно описываются системой линейных уравнений (1.3)[81, 82]:

При известных выходных токах СКЗ и известных защитных потенциалах можно найти коэффициенты влияния матрицы \mathbf{A} . Для этого производятся замеры защитных потенциалов в некоторых зафиксированных выбранных точках при различных режимах функционирования СКЗ (меняются выходные токи).

Матрица коэффициентов влияния определяется выражением

$$\mathbf{A} = (I^T I)^{-1} I^T \varphi, \quad (4.8)$$

где $I = \{I_1, I_2, \dots, I_q\}^T$ – измеренные выходные токи СКЗ;

$\varphi = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_r\}^T$ – измеренные защитные потенциалы.

q – количество выбранных СКЗ для исследования;

r – количество выбранных точек для измерения защитных потенциалов.

Найденная матрица коэффициентов влияния \mathbf{A} используется при определении защитных разностей потенциалов для обеспечения поддержки принятия решения об отключении СКЗ, а также для решения задачи оптимального регулирования.

4.4.2 Проверка граничных условий на выходные данные СКЗ

Проверка выполнения граничных условий при отключении СКЗ осуществляется в соответствии со следующим неравенством

$$\varphi_0 \leq -\mathbf{A} \cdot I_{\text{откл}} + \varphi_{\text{ст}} \leq \varphi_M, \quad (4.9)$$

где φ_0 – верхняя граница защитных разностей потенциалов (п. 4.5.1);

φ_M – нижняя граница защитных разностей потенциалов (п. 4.5.2);

$I_{\text{откл}} = \{I_1, I_2, \dots, I_{j-1}, 0, I_{j+1}, \dots, I_m\}^T$ – вектор выходных токов при наличии j -ой отключенной СКЗ. В общем случае может быть отключено несколько СКЗ, что будет определяться соответствующими нулями в векторе выходных токов.

Напряжение на выходе катодной установки

$$\varphi_j = I_{\text{откл}j} \cdot R_j, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (4.10)$$

Выходная мощность катодной установки

$$P_j = I_{\text{откл}j} \cdot \varphi_j \quad (4.11)$$

При этом должны выполняться условия

$$I_{\text{откл}} < k_R I_H \text{ и } \varphi < \varphi_H \text{ и } P < P_H,$$

где $I_H = \{I_1, I_2, \dots, I_m\}^T$ – номинальные токи СКЗ;

$\varphi_H = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m\}^T$ – номинальные напряжения СКЗ.

$P_H = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}^T$ – номинальные мощности СКЗ.

k_R – коэффициент, учитывающий изменения внешнего сопротивления УКЗ и определяющий возможность достижения номинальных режимов СКЗ.

Коэффициент k_R определяется экспериментально для соответствующих типов СКЗ в процессе изменения внешнего сопротивления УКЗ:

$$k_R = \sqrt{\frac{R(0)}{R(t)}}, \quad (4.12)$$

где $R(0)$ – внешнее сопротивление УКЗ в начальный момент времени;

$R(t)$ – внешнее сопротивление УКЗ в момент времени t , соответствующий году эксплуатации МГ.

Если расчетный защитный потенциал при виртуально отключенной j -ой СКЗ находится в допустимом коридоре и расчетные режимы работы СКЗ не превышают номинальные значения, то j -ую СКЗ можно отключить, при условии, что выполняются условия отсутствия зон ВКО и блуждающих токов на смежных с j -ой СКЗ участках.

4.4.3 Проверка условия на наличие участка ВКО в зоне защиты СКЗ

В соответствии со списком, получаемым согласно алгоритму п. 4.3.4 при наличии ВКО на рассматриваемом участке между двумя соседними СКЗ принимается решение о том, что эти СКЗ не подлежат отключению.

4.4.4 Проверка условия на наличие блуждающих токов в зоне защиты СКЗ

В соответствии со списком, получаемым согласно алгоритму п. 4.3.5 при наличии блуждающих токов на участке в зоне защиты двух соседних СКЗ принимается решение о том, что эти СКЗ не подлежат отключению.

4.4.5 Принятие решения о возможности отключения СКЗ

Если на соседних с рассматриваемой СКЗ участках отсутствует ВКО и нет блуждающих токов, а также при отключении рассматриваемой СКЗ сохраняется степень защищенности участка МГ и режимы СКЗ отвечают номинальным значениям, то может быть принято решение об отключении данной СКЗ в соответствующей конфигурации

$$Id = \{1,1,\dots,1,0,1,\dots,1\}^T, \quad (4.13)$$

где принято обозначение: «0» означает, что данная СКЗ отключена, а «1» – остальные СКЗ включены.

4.4.6 Алгоритм определения максимального защитного потенциала

В соответствии с ГОСТ Р 51164-98 определяются максимальные защитные поляризационные потенциалы согласно рисунку 4.1, с омической составляющей согласно рисунку 4.4 [50].

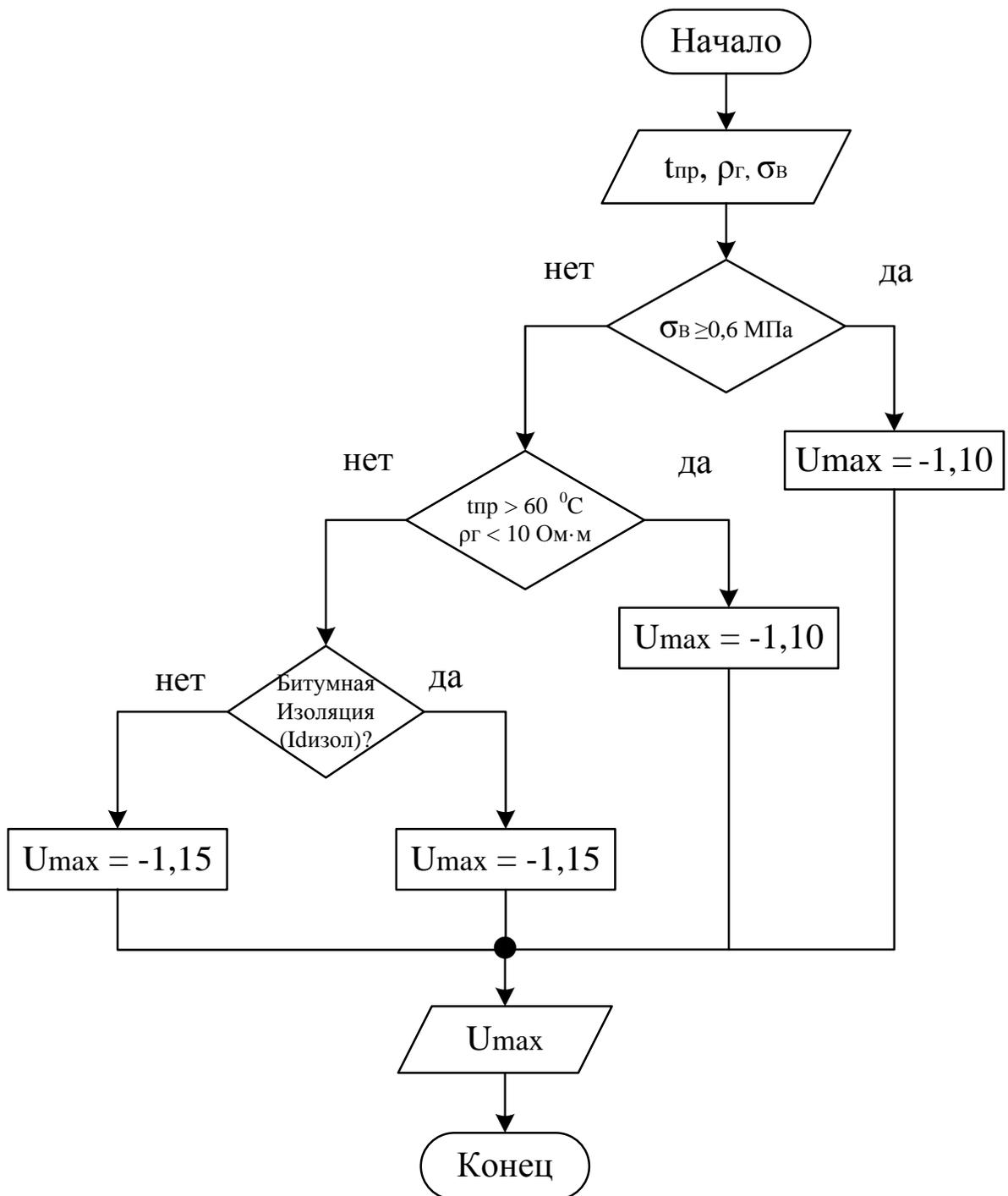


Рисунок 4.4 – Блок-схема алгоритма определения максимального защитного потенциала (поляризационный)

Для определения границ максимального защитного суммарного потенциала разработана блок-схема представленная на рисунке 4.5.

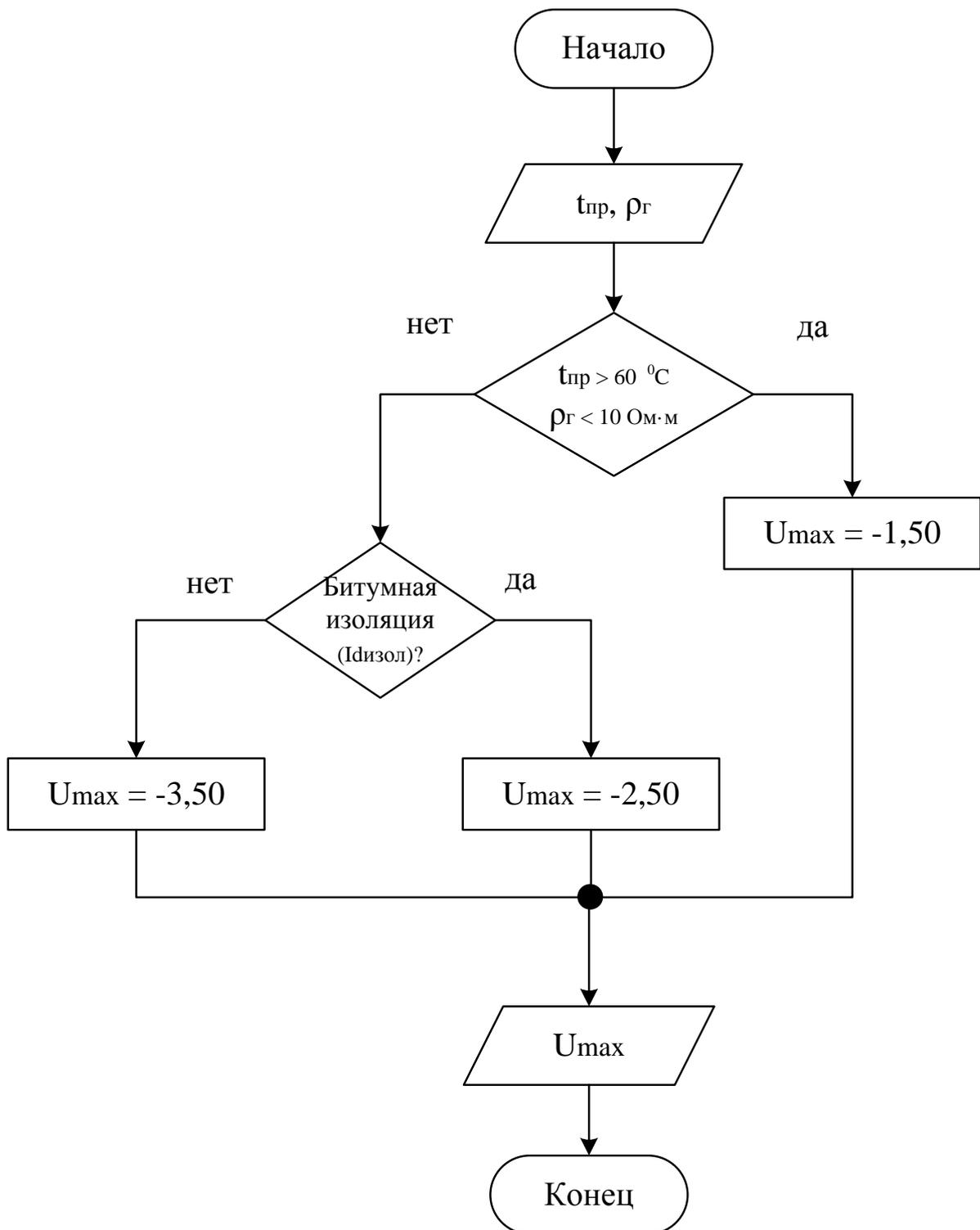


Рисунок 4.5 – Блок-схема алгоритма определения максимального защитного потенциала (с омической составляющей)

4.4.7 Алгоритм определения минимального защитного потенциала

В соответствии с ГОСТ Р 51164-98 определяются минимальные защитные поляризационные потенциалы согласно рисунку 4.6, с омической составляющей согласно рисунку 4.7.

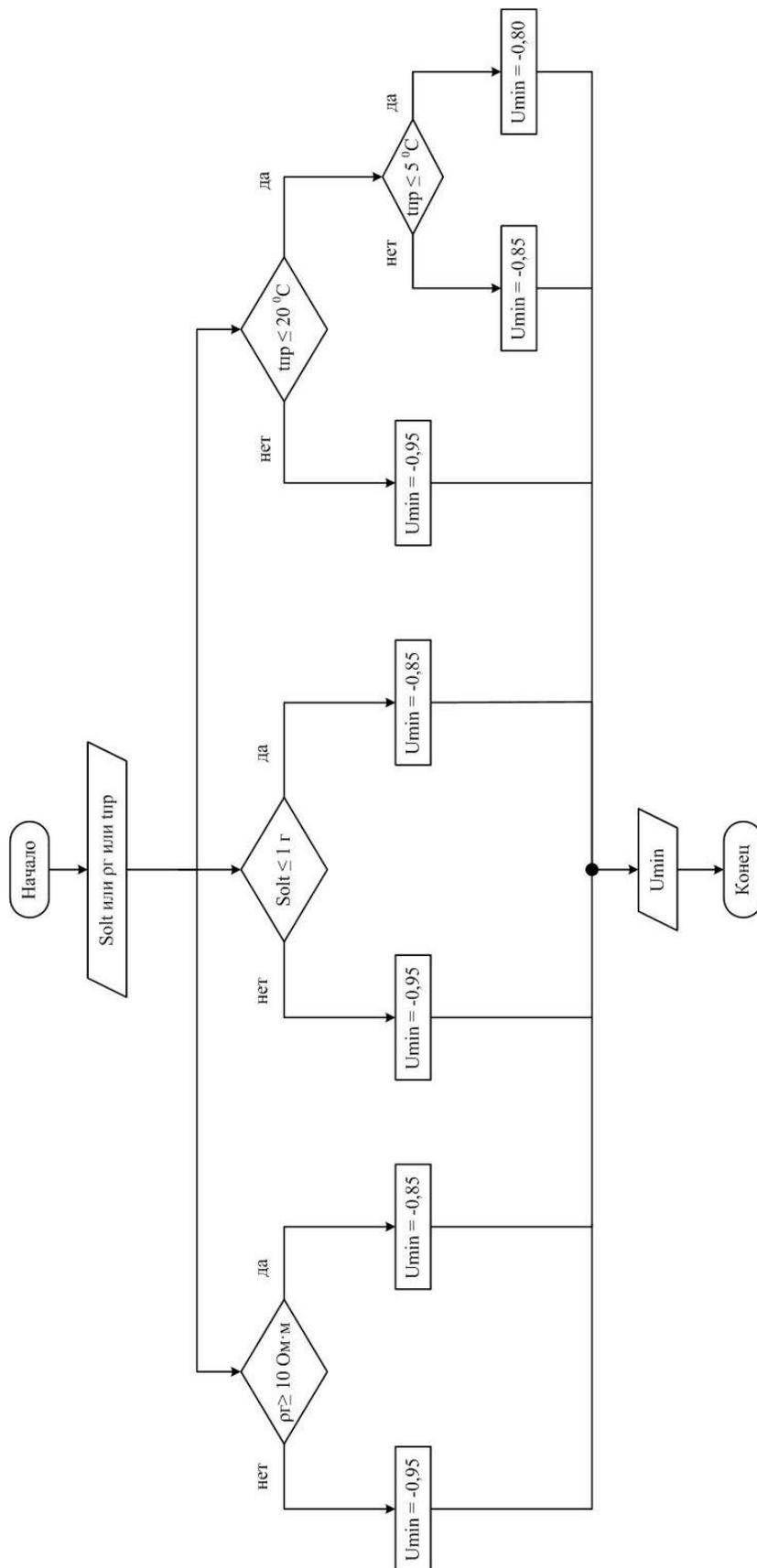


Рисунок 4.6 – Блок-схема алгоритма определения минимального защитного потенциала (поляризационный)

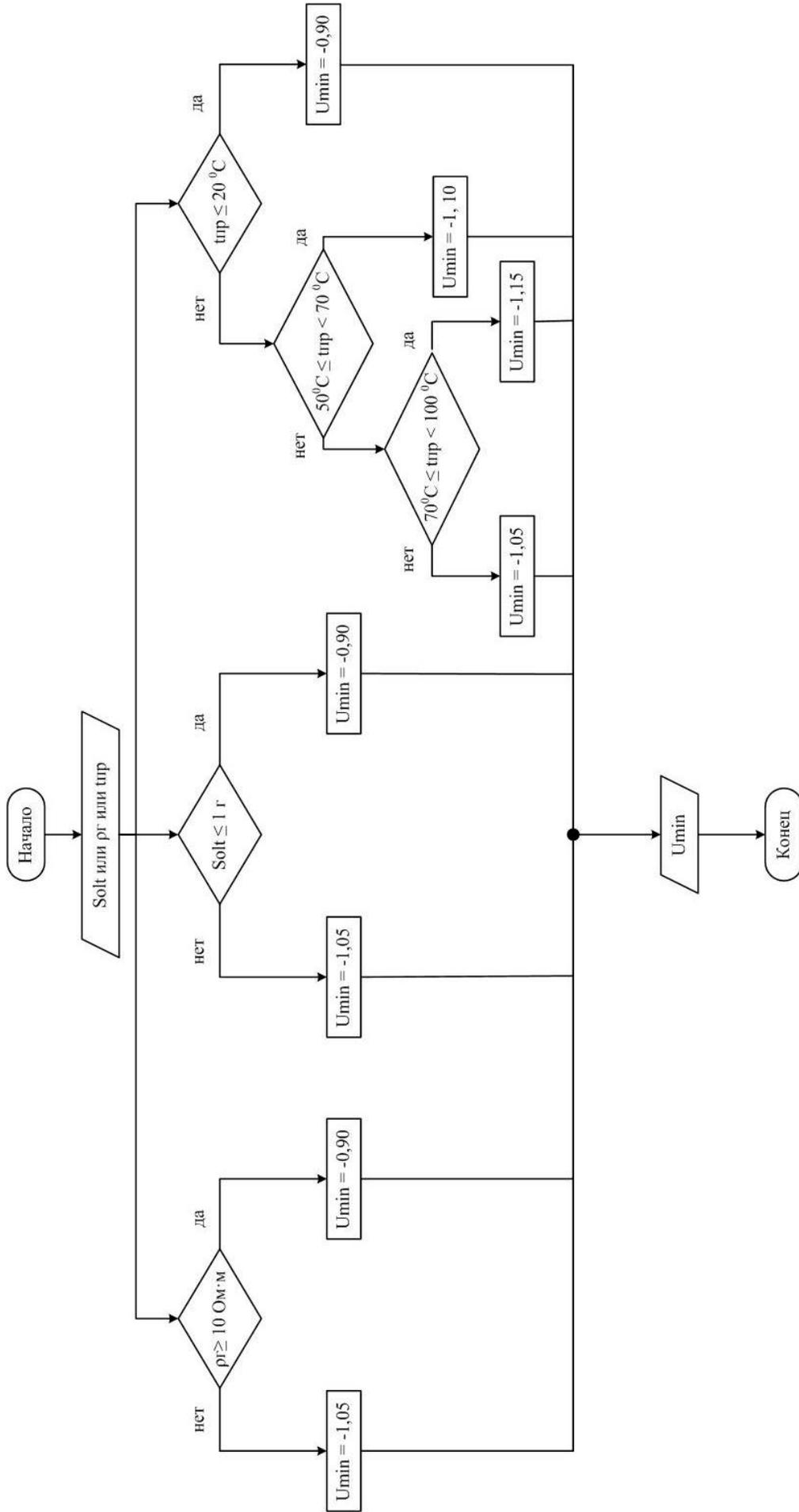


Рисунок 4.7 – Блок-схема алгоритма определения минимального защитного потенциала (с омиической составляющей)

4.5 Алгоритм поддержки принятия решения об отключении СКЗ

4.5.1 Определение количества соседних СКЗ, существенно влияющих на зону защиты

Защитный потенциал в точке расположения отключенной СКЗ

$$\varphi_j = -A_{j,k} \cdot I_k + \varphi_{ст}, \quad k = 1, 2, \dots, j-1, j+1, \dots, m, \quad (4.14)$$

где $A_{j,k}$ – коэффициенты влияния СКЗ на защитные потенциалы, определяемые в соответствии с п. 3.4.1;

Влияние соседних СКЗ на защитный потенциал в точке j -ой отключенной СКЗ, определяется отдельно для левого и правого плеча j -ой СКЗ.

Для левого плеча $k = \overline{1, j-1}$ проверка идет в обратном порядке от $(j-1)$ -ой СКЗ в сторону убывания порядкового номера СКЗ

Если для некоторой СКЗ защитный потенциал удовлетворяет неравенству

$$\left| \frac{\sum_{k=j-1}^{k-1} A_{j,k} \cdot I_k - \sum_{k=j-1}^k A_{j,k} \cdot I_k}{\sum_{k=j-1}^k A_{j,k} \cdot I_k} \right| < \frac{k_\varphi}{100}, \quad (4.15)$$

где k_φ – коэффициент, учитывающий ограничения влияния соседних СКЗ на защитный потенциал (значение k_φ определяется экспертом исходя из точности измерения прибором защитного потенциала в точке j -ой отключенной СКЗ);

то считается, что $(k-1)$ -ая СКЗ не влияет на зону защиты.

Для правого плеча $k = \overline{j+1, m}$ проверка идет в сторону увеличения порядкового номера СКЗ.

4.5.2 Расчет режимов работы соседних СКЗ для поддержания достаточного защитного потенциала при отключении рассматриваемой СКЗ

Распределение защитного потенциала по длине участка МГ при некоторых выключенных СКЗ

$$\varphi = -\mathbf{A} \cdot I_{\text{откл}} + \varphi_{\text{ст}}, \quad (4.16)$$

где $I_{\text{откл}} = \{I_1, I_2, \dots, I_{j-1}, 0, I_{j+1}, \dots, I_m\}^T$ – вектор выходных токов при наличии j -ой отключенной СКЗ.

В общем случае может быть отключено несколько СКЗ, что будет определяться соответствующими нулями в векторе выходных токов.

Проверка выполнения условий при отключении СКЗ:

$$- U_0 \leq -\mathbf{A} \cdot I_{\text{откл}} + \varphi_{\text{ст}} \leq U_M;$$

$$- I_{\text{откл}} \geq 0;$$

$$- 0 < I_{\text{откл}} \leq k_R I_H, 0 < I_{\text{откл}} \leq \frac{U_H}{R}, 0 < I_{\text{откл}} \leq \sqrt{\frac{P_H}{R}}.$$

Режимы работы СКЗ при некоторых отключенных станциях катодной защиты:

- напряжение на выходе катодной установки:

$$\varphi_j = I_{\text{откл}j} \cdot R_j, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (4.17)$$

- выходная мощность катодной установки:

$$P_j = I_{\text{откл}j} \cdot U_j. \quad (4.18)$$

- потребляемая мощность катодной установки:

$$W_j = P_j + P_{\text{внутр}j}, \quad (4.19)$$

где $P_{\text{внутр}}$ - потери на внутреннее потребление СКЗ.

- КПД катодной установки:

$$\eta_j = \frac{P_j}{W_j} \cdot 100. \quad (4.20)$$

Для рассматриваемого участка МГ при некоторых отключенных СКЗ:

- суммарная выходная мощность:

$$P_{\Sigma} = \sum_j P_j, \text{ где } j = 1, 2, \dots, m; \quad (4.21)$$

- суммарная потребляемая мощность:

$$W_{\Sigma} = \sum_j W_j, \text{ где } j = 1, 2, \dots, m; \quad (4.22)$$

- суммарное КПД:

$$\eta_{\Sigma} = \frac{P_{\Sigma}}{W_{\Sigma}} \cdot 100. \quad (4.23)$$

4.5.3 Проверка расчетных режимов на соответствие условиям по критериям

Проверка осуществляется на основании результатов расчета по алгоритму (п. 4.5.2) и наличия критериев (п. 4.3.3) на соответствующих участках между СКЗ.

Учет критериев (п. 4.3.3) учитывается так же при выборе структуры СКЗ (подраздел 4.4).

4.5.5 Сравнение вариантов отключения СКЗ

Сравнение проводится по структуре СКЗ, а также по суммарной потребляемой мощности и суммарному КПД.

Один вариант предпочтительнее другого в случае, если потребляемая мощность меньше, а КПД больше.

4.5.6 Формирование предложения по отключению СКЗ

Предложения по отключению СКЗ формируются в виде журнала, который представляет собой таблицу, которая хранит конфигурации СКЗ, суммарную потребляемую мощность, суммарное КПД по каждому предлагаемому варианту конфигурации СКЗ.

Конфигурация $Id = \{1, 1, \dots, 1, 0, 1, \dots, 1\}^T$ соответствует j -ой отключенной СКЗ (п. 4.4.5).

4.5.7 Алгоритм решения

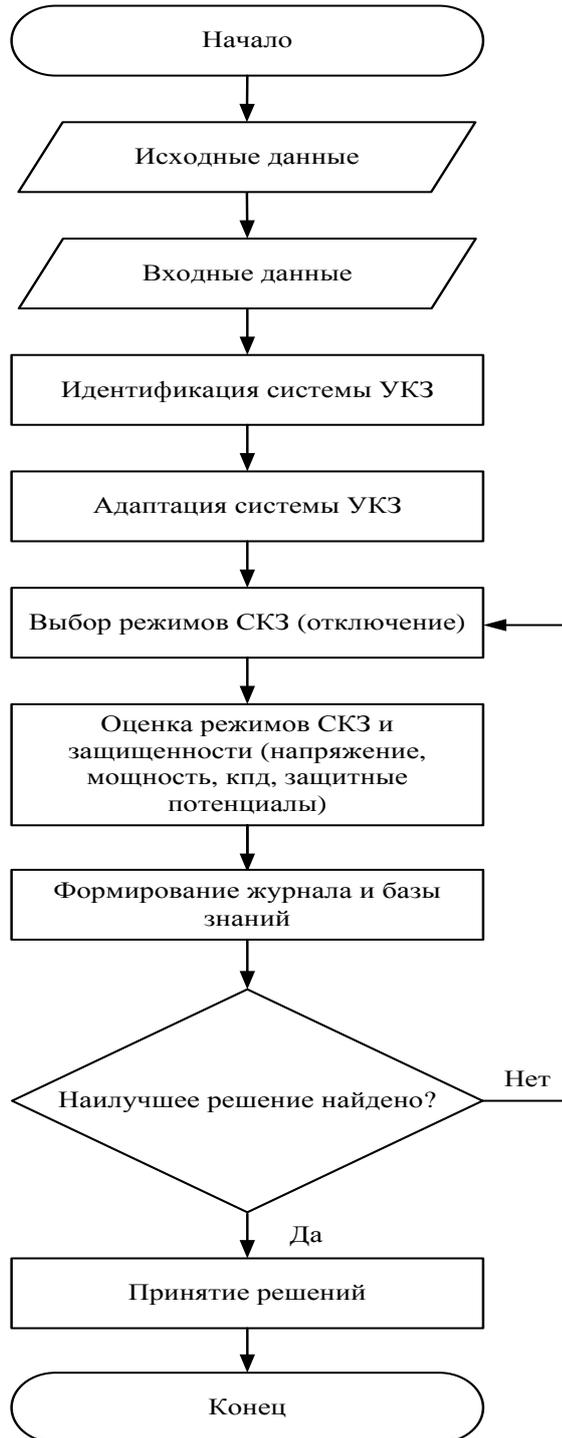


Рисунок 4.8 – Блок-схема алгоритма поддержки принятия решения об отключении СКЗ

4.6 Оптимизация параметров защиты СКЗ

4.6.1 Оценка необходимости оптимизации режимов СКЗ

Выбор структуры СКЗ осуществляется на основе экспертных знаний с учетом следующих условий:

- если защитный потенциал выходит за пределы коридора;
- если все СКЗ включены;
- если низкий КПД;
- если присутствуют участки с ВКО;
- если присутствуют участки с блуждающими токами.

При выборе структуры учитывается, что для отключаемых СКЗ на соседнем с ними участках отсутствует ВКО и нет блуждающих токов. С учетом этого, экспертом формируется конфигурация СКЗ: $Id^* = \{1,0,1,\dots,1,0,1,0,\dots,1,0,1\}^T$, где принято обозначение: «0» означает, что соответствующие СКЗ отключены, а «1» – соответствующие СКЗ включены.

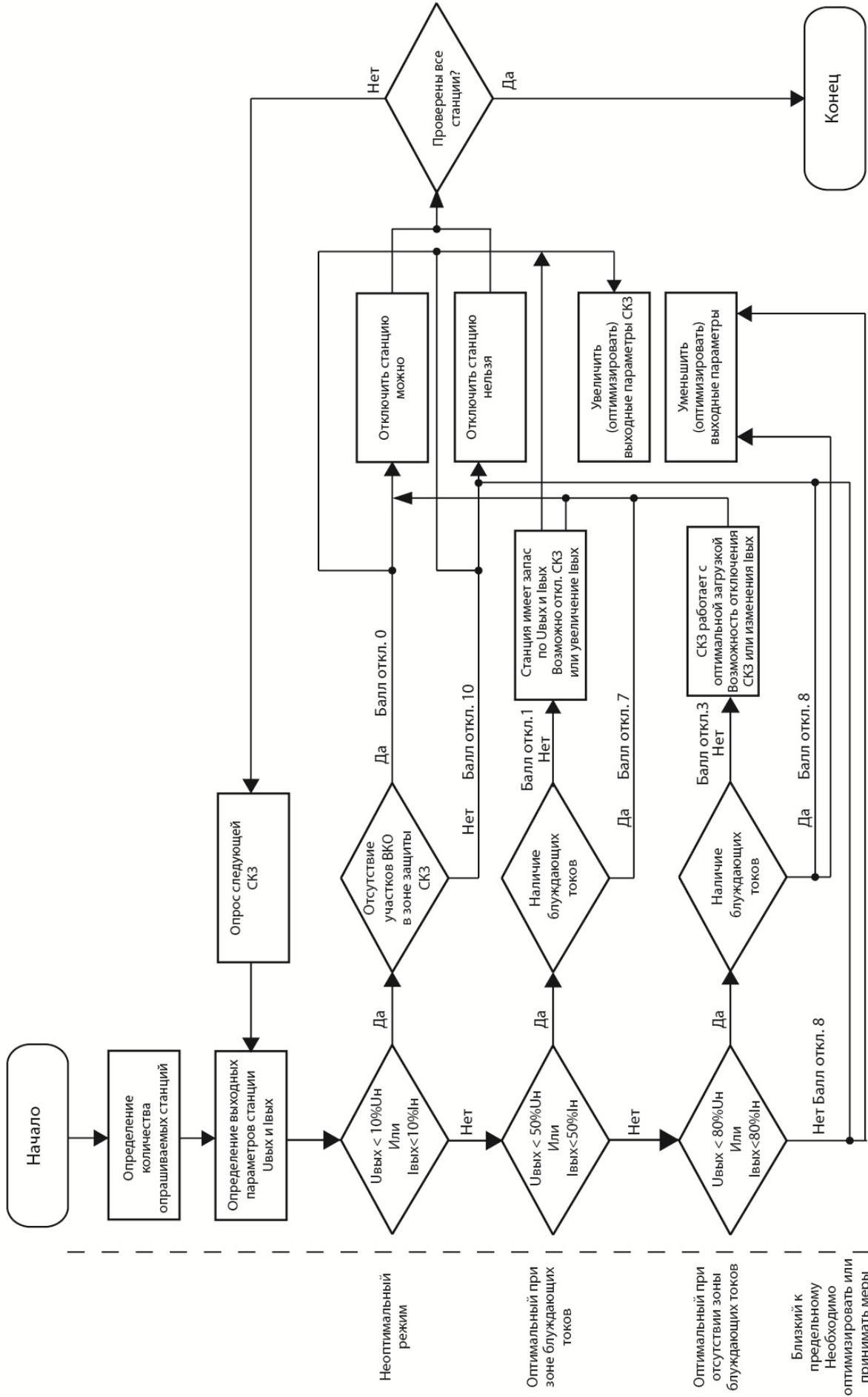


Рисунок 4.9 – Блок-схема алгоритма определения необходимости оптимизации режимов СКЗ

4.6.2 Расчет значений напряжения на выходе СКЗ по критериям защищенности

ЛПР для принятия решений выдаются следующие результаты оптимизации: выходной ток СКЗ (управляемый параметр) и выходное напряжение СКЗ, обеспечивающие требуемые критерии защищенности на выбранном участке МГ; выходная и потребляемая мощность (мощность каждой СКЗ и суммарная мощность); КПД каждой СКЗ и КПД системы коррозионной защиты.

4.6.3 Алгоритм решения

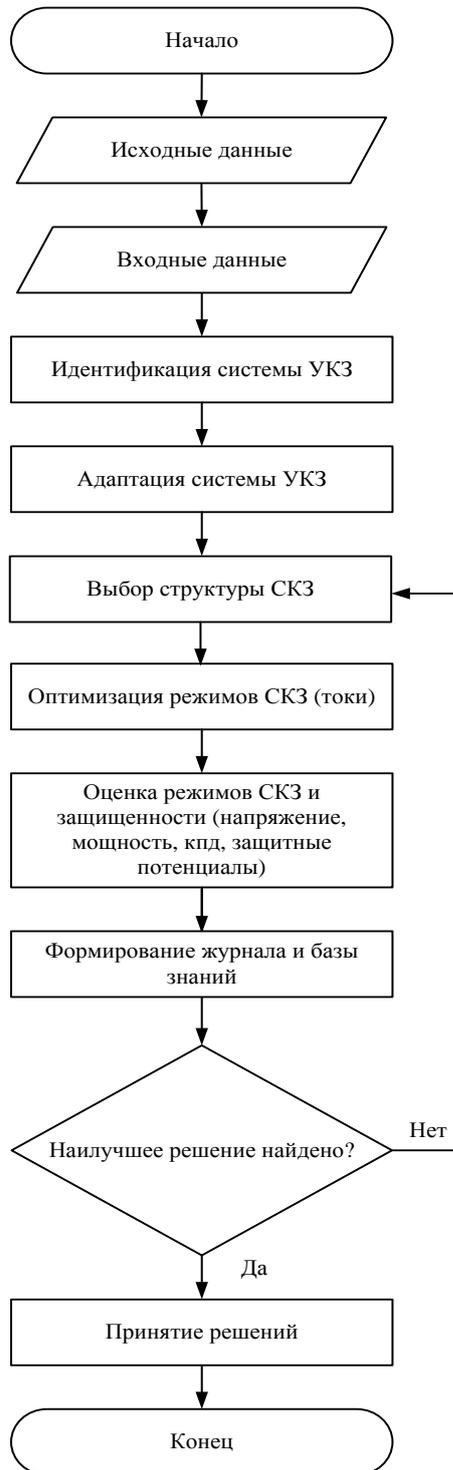


Рисунок 4.10 – Блок-схема алгоритма оптимизации режимов СКЗ

4.7 Разработка прототипа ПО для решения задач оптимального управления режимами СКЗ

До настоящего времени отсутствует инструмент, позволяющий по определенным правилам управлять системой электрохимической защиты (ЭХЗ) в целом, давать предложения по оптимальному регулированию режимов работы средств ЭХЗ и определять аналитическую зависимость совокупного влияния факторов на состояние защищенности. Учитывая, что с внедрением подсистем дистанционного коррозионного мониторинга, появляется возможность контролировать большой объем параметров, влияющих на коррозионное состояние, в точках, расположенных по трассе магистральных трубопроводов, задача управления средствами ЭХЗ как единой системой упрощается. Достаточно сложно выставить оптимальные режимы работы станций катодной защиты на участке магистрального трубопровода, гарантированно обеспечивающие 100% защищенность как по протяженности, так и во времени, и учитывающие совокупности влияющих условий и особенностей конкретного участка.

Развитие прототипа программного обеспечения, направленного на поддержку принятия решений специалиста службы защиты от коррозии в направлении оптимального регулирования станциями катодной защиты является актуальной и востребованной необходимостью [13].

Прототип программного обеспечения Cathodic Protection Optimization (CPO) предназначен для демонстрации работоспособности разработанных процедур оптимизации режимов работы станций катодной защиты (СКЗ).

Инструментарием прототипа является пакет прикладных программ MATLAB, используемый для решения задач технических вычислений и одноименный язык программирования [89]. Прототип программного обеспечения CPO представляет собой исполняемый файл, запускаемый на ПК после процедуры инсталляции (наличие установленного на ПК пакета MATLAB не требуется).

Перейдем к рассмотрению функциональных возможностей прототипа программного обеспечения. Ввод исходных данных в программу осуществляется путем заполнения форм:

- КИП.txt – наименования точек контроля $U_{\text{сум}}$;
- СКЗ.txt – обозначения станций катодной защиты;
- Date.txt – дата и время измерения $I_{\text{СКЗ}}$ и $U_{\text{сум}}$;
- I.txt – массив выходных токов СКЗ (измерительные данные);
- USUM.txt – массив значений суммарного потенциала (измерительные данные);
- R.txt – выходные сопротивления СКЗ;
- UMIN.txt – нижняя граница защитного потенциала;
- UMAX.txt – верхняя граница защитного потенциала;

Далее производится обработка поступившей информации в следующей последовательности: оценка матрицы коэффициентов влияния по измерительным данным и определение выходных токов СКЗ в результате решения задачи оптимизации. После этого производится вывод измерительных данных и результатов расчетов на экран. Полученные данные являются достаточной информацией для специалиста службы защиты от коррозии для принятия решения по выставлению оптимальных режимов работы станций катодной защиты. Общая схема функционирования программы представлена на рисунке 4.11.



Рисунок 4.11.- Общая схема функционирования программы

Перейдем к детальному рассмотрению архитектуры прототипа программного обеспечения. Основными расчетными модулями программы являются следующие:

- модуль нахождения зависимости $I_{\text{СКЗ}}$ и $U_{\text{СУМ}}$ от времени;
- модуль графического построения зависимостей $U_{\text{СУМ}}$ от $I_{\text{СКЗ}}$ (корреляционное поле);
- модуль вывода значений $I_{\text{СКЗ}}$ и $U_{\text{СУМ}}$ для различных точек магистрального трубопровода;
- модуль оптимизации режимов работы СКЗ;

Основная экранная форма прототипа программного обеспечения представлена на рисунке 4.12.

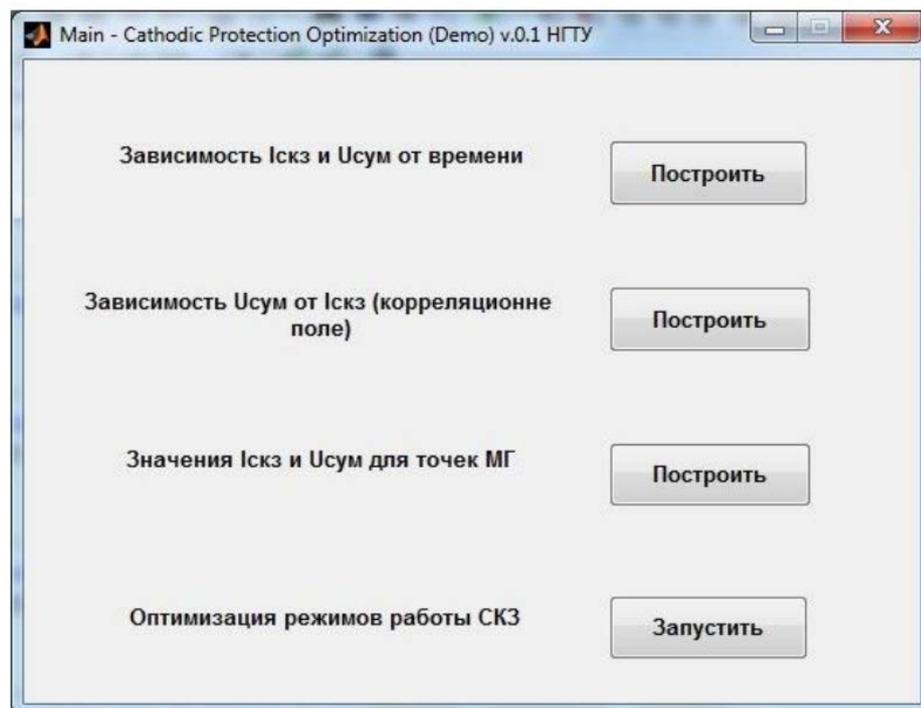


Рисунок 4.12. - Основная экранная форма прототипа программного обеспечения

Используя модуль нахождения зависимостей $I_{\text{СКЗ}}$ и $U_{\text{СУМ}}$ от времени специалист службы защиты от коррозии может визуально оценить степень влияния изменения воздействующего на систему параметра – силы тока СКЗ в конкретный момент времени, на отклик системы в контрольных точках – изменение суммарного потенциала. Модуль содержит два выпадающих списка: СКЗ и

КИП. При выборе элемента списка в соответствующем окне появляется график, отображающий зависимость значения $I_{\text{СКЗ}}$ или $U_{\text{сум}}$ от времени. Зависимости изменения $I_{\text{СКЗ}}$ и $U_{\text{сум}}$ представлены на рисунке 4.13.

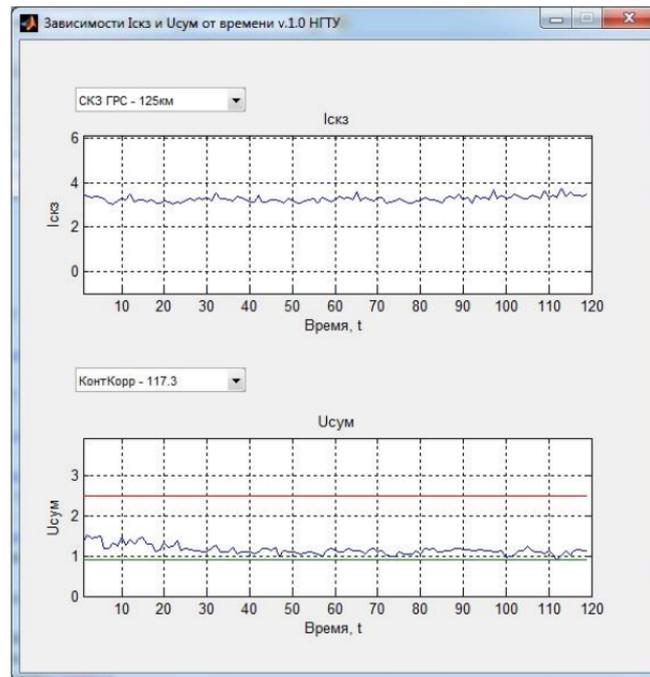


Рисунок 4.13. - Зависимости изменения $I_{\text{СКЗ}}$ и $U_{\text{сум}}$

Визуальное отображение корреляционного поля зависимости изменения $I_{\text{СКЗ}}$ и $U_{\text{сум}}$ также способствует оценке степени влияния силы тока СКЗ на потенциалы в контрольных точках, кроме того с помощью него возможно проводить первичный анализ достоверности информации и производить фильтрацию «выбросов», то есть значений изменение которых не связано с изменением управляющих воздействий. Визуальное отображение корреляционного поля представлено на рисунке 4.14.

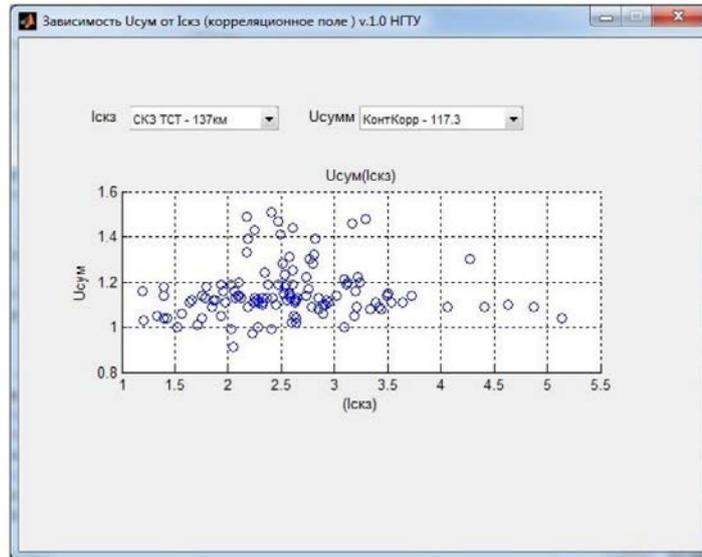


Рисунок 4.14. – Корреляционное поле зависимости изменения $I_{скз}$ и $U_{сум}$

Модуль вывода значений $I_{скз}$ и $U_{сум}$ для различных точек магистрального трубопровода позволяет анализировать значения токов на разных СКЗ и защитных суммарных потенциалов в выбранный момент времени, а также отобразить рекомендованные значения показателей и граничные значения защитных потенциалов. Экранная форма модуля представлена на рисунке 4.15.

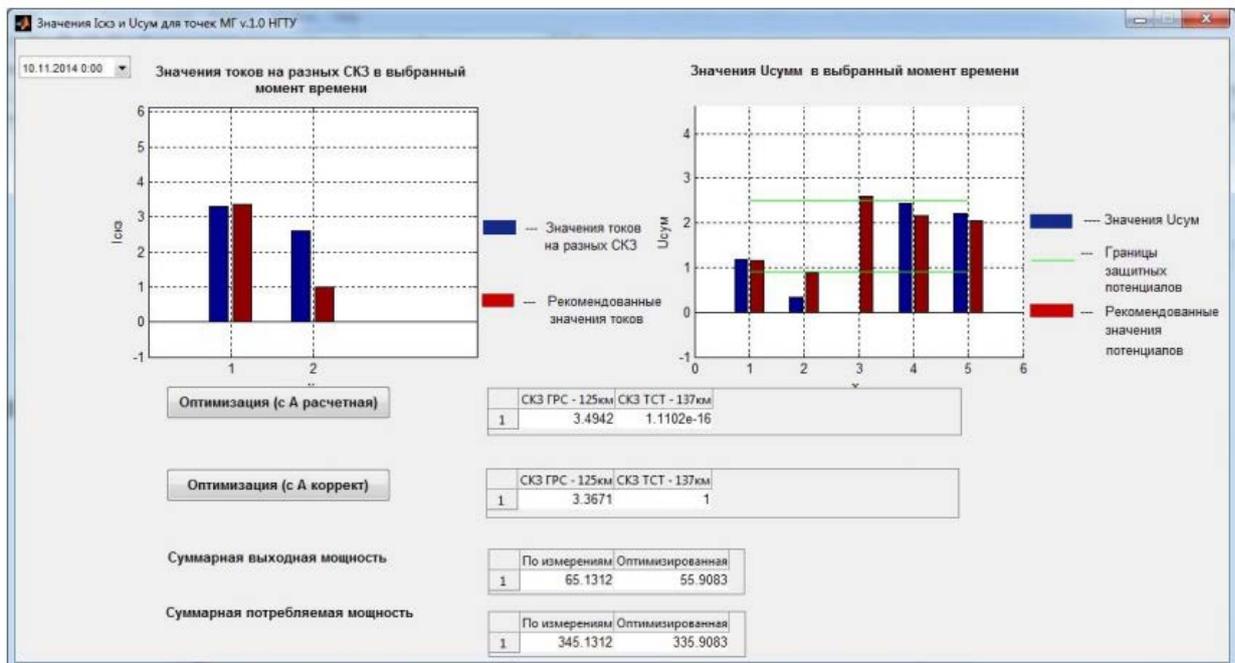


Рисунок 4.15. – Модуль вывода значений $I_{скз}$ и $U_{сум}$ для различных точек магистрального трубопровода

Модуль оптимизации режимов работы СКЗ позволяет отобразить матрицу A коэффициентов влияния, массив $\varphi_{стоп}$ и вектор оптимального значения за-

щитного суммарного потенциала $U_{\text{СКЗопт}}$, полученный в результате оптимизации. Экранная форма модуля представлена на рисунке 4.16.

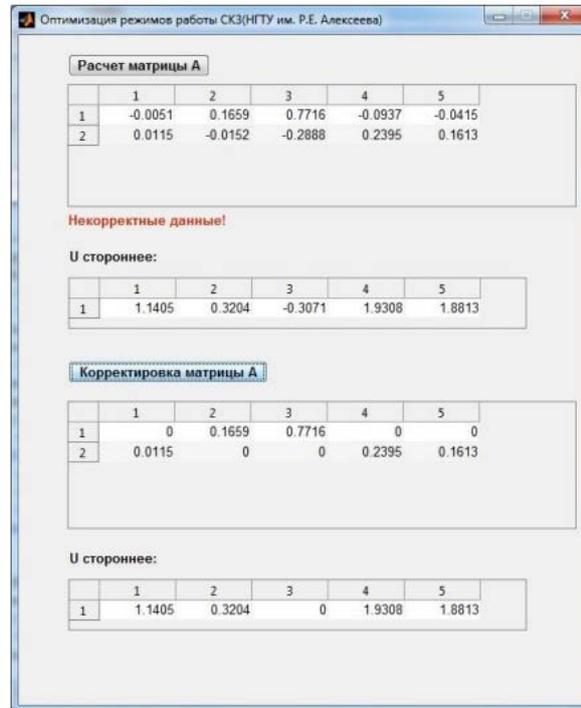


Рисунок 4.16. – Модуль оптимизации режимов работы СКЗ

Выводы:

Основными возможностями разработанного прототипа программного обеспечения являются:

- построение матрицы зависимостей распределения потенциалов по трассе МГ;
- расчет оптимизированных параметров СКЗ;
- визуализация изменения основных измеряемых параметров коррозионного мониторинга во времени и вдоль МТ для различных точек контроля;
- выполнение расчетов оптимизированных режимов работы СКЗ для различных комбинаций исходных данных.

Основными недостатками прототипа программного обеспечения являются:

- затруднительная процедура ввода исходной информации;
- наличие отрицательных коэффициентов, а следовательно отсутствие первичной фильтрации входных данных.

4.8 Выводы по главе

1. Разработаны алгоритмы ранжирования участков между СКЗ по коррозионному состоянию, предложена формула интегрального показателя коррозионного состояния на участке.
2. Разработаны алгоритмы и процедуры определения возможности отключения и поддержки принятия решения об отключении СКЗ.
3. Представлены основные возможности разработанного прототипа программного обеспечения для решения задач оптимального управления режимами работы.

5 ПРОВЕДЕНИЕ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ СКЗ НА ДЕЙСТВУЮЩЕМ ОБЪЕКТЕ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА

5.1 Постановка задачи исследования

В качестве экспериментальной проверки разработанных принципов оптимального управления была проведена работа на объекте магистрального газопровода «Саратов-Горький», 92 – 147 км. На данном участке установлены восемь станций катодной защиты. Две станции катодной защиты на 96 и 125 км поддерживают необходимый защитный потенциал, как на линейной части магистрального газопровода, так и на технологическом оборудовании газораспределительных станций, находящихся вблизи МГ. По всей трассе магистрального газопровода обеспечивается защищенность, станции, работают в минимальных режимах, при этом защитный суммарный потенциал стремится к верхней границе максимума, определяемого ГОСТ Р 51164-98 «Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии». На газопроводе имеются участки между СКЗ с «провалами» потенциалов, определяющимися наличием повреждений изоляционного покрытия, заземлений оборудования, переходами через автомобильные и железные дороги, совместной защитой со смежными коммуникациями и т.д. Для гарантированного обеспечения на данных участках минимально допустимого уровня защитных и поляризационных потенциалов с учетом форсмажорных обстоятельств (например, выход из строя СКЗ или элементов электроснабжения), как правило, эксплуатация поддерживает завышенные режимы СКЗ и потенциалы в точках дренажа с возможностью перекрытия зон защиты.

График состояния защищенности на участке МГ «Саратов-Горький» по данным сезонных замеров эксплуатирующей организации представлены на рисунке 5.1.



Рисунок 5.1 – Состояние защищенности на участке МГ «Саратов-Горький»

Необходимо применить разработанные подходы по оптимизации режимов работы СКЗ для данного участка МГ.

5.2 Описание объекта исследования, программы исследования и оборудования

Объектом исследования был выбран МГ «Саратов-Горький» участок «Починки-Нижний Новгород» протяженностью 55 км. Диаметр газопровода 720 мм, толщина стенки 8 мм. Газопровод введен в эксплуатацию в 1963 году. На данном участке газопровод подвергался переукладке в 1994 и 2001 годах. Тип изоляции - заводская двухслойная полимерная.

Для возможности отслеживания состояния защищенности трубопровода в реальном времени, и оперативной корректировки режимов работы СКЗ и фиксации изменения состояния защищенности, по трассе МГ, на защищаемом участке было установлено оборудование подсистем дистанционного коррозионного мониторинга ПКМ-ТСТ и БКУ производства ЗАО «Трубопроводные системы и технологии».

Оборудование ПКМ-ТСТ позволило производить измерение и передачу в режиме реального времени по каналам GSM следующих параметры коррозионного мониторинга:

- скорость коррозии;
- суммарный потенциал;
- поляризационный потенциал;
- плотность защитного тока;
- и т.д.;

Пример установки подсистем дистанционного коррозионного мониторинга представлен на рисунке 5.2.



Рисунок 5.2 – Оборудование ПДКМ на участке МГ «Саратов-Горький»

Для измерения и передачи данных о выходных параметрах СКЗ и о состоянии защищенности в точке дренажа были установлены блоки контроля и управления (БКУ). Установка БКУ позволила в режиме реального времени получать следующие параметры:

- защитный суммарный потенциал в точке дренажа СКЗ;
- защитный поляризационный потенциал в точке дренажа СКЗ;
- сила тока на выходе СКЗ;
- напряжение на выходе СКЗ

Пример установки БКУ представлен на рисунке 5.3.



Рисунок 5.3 – Оборудование БКУ на участке МГ «Саратов-Горький»

После установки оборудования необходимо провести ряд измерений распределения защитного суммарного потенциала в зависимости от режимов работы станций катодной защиты на исследуемом участке.

Порядок проведения испытаний:

1. При существующих режимах работы защитных станций, выполняют измерения защитного потенциала, особое внимание уделяют точкам, в которых по результатам предыдущих исследований наблюдались избыточные или недостаточные потенциалы.

2. Измеряют выходные параметры средств ЭХЗ с помощью оборудования ПДКМ. При измерении на СКЗ где отсутствует ПДКМ, рекомендуется использовать приборы с точностью измерения напряжения постоянного тока и силы постоянного тока не более 0,1%, например мультиметры Fluke 79/29, производства John Fluke Co., США.

3. Для измерения силы тока рекомендуется использовать бесконтактные измерители тока.

4. Рекомендуется при измерении потенциалов в точках, не оборудованных ПДКМ выполнять соединение с трубопроводов при помощи контрольно-

измерительных колонок, при их отсутствии пользоваться выносным электродом. Измерения выполняются электронными вольтметрами (мультиметрами) с входным сопротивлением не менее 10 МОм в диапазоне измерений 0-5 В.

5. В точках с недостаточным или избыточным потенциалом определяют суммарный потенциал методом выносного электрода.

6. Выключают 1 станцию катодной защиты и деполяризуют трубопроводы в течении 15 минут.

7. Определяют собственный, с учетом влияния соседних СКЗ, потенциал в точках контроля $U_{\text{стор}}$.

8. Переводят первую станцию в режим ручного регулирования режимов работы и устанавливают минимальное напряжение на выходе станции.

9. Включают станцию и устанавливают силу тока на выходе станции равную половине текущего номинального значения.

10. Выполняют измерения суммарных потенциалов в намеченных точках контроля, соответствующих текущей силе тока. При этом руководствуются п. 2-4,5.

13. Увеличивают силу тока на выходе станции катодной защиты на шаг регулирования.

14. Повторяют п. 10.

15. выполняют 5 измерений при различных параметрах выходной силы тока от нуля до максимально возможного для текущей СКЗ.

5.3 Нахождение оптимальных режимов работы станций катодной защиты на исследуемом участке

Проведенные измерения распределения защитных суммарных разностей потенциалов по трассе исследуемого участка магистрального газопровода дали возможность получения массива данных для проведения процедур идентификации системы «труба-земля».

Таблица 5.1 – Пример изменения защитных суммарных потенциалов по трассе МГ в зависимости от режимов работы СКЗ

Рег. СКЗ	$t_{изм}$	$I_{скз}, A$	$U_{скз}, B$	$U_{сум}$ кип137,В	$U_{сум}$ ж/д117,В	$U_{сум}$ а/д117,В	$U_{сум}$ скз107,В
137км	12:20	1,9	4,48	-2,11	-0,8	-0,95	-1,75
	2:26	1,27	3,4	-2,02	-0,83	-0,97	-1,77
	2:30	0,78	2,48	-1,99	-0,83	-0,95	-1,76
	2:34	0,76	2,39	-1,81	-0,83	-0,96	-1,76
	12:41	0	1,09	-1,77	-0,83	-0,96	-1,76
	12:48	0	1,05	-1,6	-0,83	-0,9	-1,75
	12:53	0	1,05	-1,58	-0,79	-0,96	-1,77
	13:01	0,88	2,68	-1,59	-0,81	-0,94	-1,75
	13:05	0,86	2,71	-1,82	-0,82	-0,96	-1,76
	13:10	1,39	3,65	-2,03	-0,81	-0,95	-1,76
	13:19	1,94	4,58	-2,19	-0,82	-0,96	-1,76
	13:22	1,91	4,55	-2,18	-0,79	-0,92	-1,75
	13:26	4,81	8,8	-2,6	-0,78	-0,91	-1,77
	13:30	1,85	4,56	-2,18	-0,79	-0,9	-1,75
107км	13:36	2,6	10,35	-2,19	-0,81	-0,93	-1,75
	13:38	2,6	10,37	-2,15	-0,81	-0,94	-1,75
	13:48	1,55	6,77	-2,16	-0,78	-0,91	-1,47
	13:50	1,55	6,73	-2,17	-0,79	-0,92	-1,47
	14:01	0,76	3,67	-2,14	-0,8	-0,92	-1,24
	14:03	0,77	3,59	-2,14	-0,8	-0,92	-1,24
	14:10	0,08	1,1	-2,15	-0,8	-0,9	-1,1
	14:12	0,09	1,04	-2,16	-0,82	-0,95	-1,1
	14:20	4,32	15,84	-2,17	-0,85	-0,96	-2,16
	14:22	2,8	11,08	-2,09	-0,81	-0,92	-1,82
117 км	14:50	0	0,81	2,21	0,86	0,97	1,77
	15:01	0,19	0,89	1,84	0,91	1	1,78
	15:03	0,79	1,07	2,05	1,06	1,06	1,77
	15:10	0,79	1,07	2,14	1,07	1,07	1,78
	15:12	0	0,84	1,93	0,87	0,87	1,77
	15:20	0,1	0,88	1,79	0,91	0,91	1,77
	15:22	0,53	1,04	1,92	1	1	1,78

Используя эти данные, получаем обучающую выборку (см. пункт 2.2), содержащую значения токов СКЗ $I_j(n)$, и защитных разностей потенциалов в точках контроля, измеренные на интервале стационарности в моменты вре-

мени t_n . Методами регрессионного анализа, описанными во второй главе, была произведена идентификация системы «труба-земля». Оценка параметров регрессионной модели проведена по методу максимального правдоподобия, приводящего в случае гауссовских шумов наблюдения ξ , к оценке по методу наименьших квадратов. По результатам процедуры была составлена матрица зависимостей, представленная в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Матрица коэффициентов распределения защитных потенциалов

Точки	Устор *	СКЗ 92 км	СКЗ 96 кран	СКЗ 99 км	СКЗ 107 км	СКЗ 117 км	СКЗ 125 км	СКЗ 137 км	СКЗ 147 км
СКЗ 92 км	1,40102	0,0785	0,014	0,0098	0,0078	0	0	0	0
СКЗ 96 кран	1,28402	0,0081	0,0413	0,0005	0	0	0	0	0
СКЗ 99 км	1,12583	0,0064	0,0095	0,0804	0,0082	0	0	0	0
99,3 а/д	1,21757	0	0,009	0,1179	0,0138	0	0	0	0
СКЗ 107 км	1,24929	0,0027	0,0027	0,0085	0,2228	0	0	0,0019	0
117,3 а/д	0,73704	0	0	0,0071	0,0115	0,227	0,029	0,0192	0,0044
СКЗ 117 км	0,73397	0	0	0,0017	0,0109	0,2993	0,015	0,0061	0,0025
117,6 ж/д	0,70663	0	0	0,0045	0,0162	0,3182	0,031	0,0077	0,0021
СКЗ 125 км	0,8822	0	0	0	0	0	0,323	0,13	0,003
СКЗ 137 км	1,43336	0	0	0	0,0038	0	0,094	0,094	0,0354
142 река	1,52256	0	0	0	0	0	0	0,0383	0,065
СКЗ 147 км	1,47728	0	0	0	0	0	0	0,0254	0,189

Произведя оценку получившихся коэффициентов, был найден ряд коэффициентов влияния СКЗ наиболее удаленных от выбранной точки (более чем через одну смежную СКЗ) и значения коэффициентов которых пренебрежительно малы (изменение разности потенциалов в точке менее 3 мВ на каждый 1 А сила тока соответствующей СКЗ). Согласно п. 2.2 были выделены входные переменные (регрессоры), которые очень слабо влияют на выходную переменную, имеют низкую значимость, а их включение в регрессионную модель не способствуют повышению точности оценок параметров и прогноза зависимой переменной. Поэтому к строкам матрицы, содержащим выделенные коэффициенты, применяется алгоритм обратной пошаговой регрессии, основанный на последовательном исключении входных переменных

из полной модели. При этом входные переменные (токи СКЗ) исключаются в порядке уменьшения расстояния от СКЗ до данной точки контроля.

Результатом применения данных процедур является идентификация системы «труба-земля», представленная в таблице 5.3. Выделенные коэффициенты были приравнены к нулю, а остальные коэффициенты строки пересчитаны.

Таблица 5.3 – Корректированная матрица коэффициентов распределения защитных потенциалов

Точки	Устор *	СКЗ 92 км	СКЗ 96 кран	СКЗ 99 км	СКЗ 107 км	СКЗ 117 км	СКЗ 125 км	СКЗ 137 км	СКЗ 147 км
СКЗ 92 км	1,40102	0,0785	0,014	0,0098	0,0078	0	0	0	0
СКЗ 96 кран	1,28402	0,0081	0,0413	0,0005	0	0	0	0	0
СКЗ 99 км	1,12583	0,0064	0,0095	0,0804	0,0082	0	0	0	0
99,3 а/д	1,21757	0	0,009	0,1179	0,0138	0	0	0	0
СКЗ 107 км	1,24929	0	0,0032	0,0086	0,223	0	0	0	0
117,3 а/д	0,73704	0	0	0,0071	0,0115	0,227	0,029	0,0192	0,0044
СКЗ 117 км	0,73397	0	0	0	0,0112	0,2993	0,015	0,0061	0,0025
117,6 ж/д	0,70663	0	0	0,0045	0,0162	0,3182	0,031	0,0077	0,0021
СКЗ 125 км	0,8822	0	0	0	0	0	0,323	0,13	0,001
СКЗ 137 км	1,43336	0	0	0	0	0	0,064	0,097	0,0354
142 река	1,52256	0	0	0	0	0	0	0,0383	0,065
СКЗ 147 км	1,47728	0	0	0	0	0	0	0,0254	0,189

Перед проведением процедур структурной оптимизации необходимо выделить коррозионные факторы, присутствующие на участках между станциями катодной защиты (см. пункты 4.3.3, 4.3.4). Оценка количества влияющих факторов на участках дает возможность определения степени коррозионной опасности и очередности изменения режимов СКЗ. Коррозионные факторы на участках между СКЗ представлены в таблице 5.4. Коэффициенты влияния коррозионных факторов выставлены на основании экспертных оценок. Интегральный показатель для участков между СКЗ определяется по формуле 4.5.

Таблица 5.4 – Коррозионные факторы на участках между СКЗ

Участок МГ, км	Пересечение с водными преградами, коэффициент 4	Пересечение с автомобильными дорогами, коэффициент 3	Пересечение с железными дорогами, коэффициент 3	Наличие блуждающих токов, постоянных, коэффициент 10	Наличие блуждающих токов, переменных, коэффициент 7	Величина интегрального показателя
92-96	-	-	-	-	+	0,33
96-99	-	+(1)	-	-	+	0,47
99-107	-	+(2)	-	-	+	0,62
107-117	-	+(3)	-	+	+	1,23
117-125	-	+(1)	+(2)	+	+	1,23
125-137	-	+(2)	-	-	+	0,47
137-147	+	-	-	-	+	0,52

Наличие на участках защиты СКЗ 117 км коррозионного фактора - блуждающие постоянные токи, приводит к тому, что согласно алгоритму определения необходимости оптимального регулирования режимов СКЗ, данная станция не может быть выведена в резерв. Кроме того, ранее было отмечено, что СКЗ 96 и 125 км работают в режиме поддержания защитного потенциала, как на линейной части МГ, так и на технологической части ГРС. Следовательно, изменение режимов данных СКЗ не представляется возможным. Также, ограничения по максимальному потенциалу в точке дренажа накладываются на СКЗ 117 км, потенциал не должен превышать минус 1,11 В (см. пункт 3.2). Отмеченные ограничения и интегральные показатели участков используются при нахождении оптимальной структуры. Согласно алгоритму производится перебор возможностей отключения СКЗ, начиная с участков где интегральный показатель наименьший, до участков с наибольшим показателем, с учетом невозможности отключения СКЗ, работающих в зонах высокой коррозионной опасности и при наличии блуждающих токов.

Далее методами структурно-параметрической оптимизации, с применением прототипа ПО, был проведен расчет оптимальных режимов работы стан-

ций катодной защиты на исследуемом участке. Полученные данные показали, что на участке трубопровода можно вывести в резерв 5 станций катодной защиты (СКЗ 92, 99, 107, 137, 147 км), при этом будет обеспечиваться защищенность. На остальных станциях катодной защиты были определены оптимальные режимы работы, позволяющие поддерживать значения защитного потенциала в границах нормы на всей протяженности участка МГ. Сравнительная таблица Выходные параметры СКЗ до оптимального регулирования и расчетные оптимизированные значения представлены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Выходные параметры СКЗ до оптимального регулирования и расчетные оптимизированные значения

	І _{СКЗ 92} км, А	І _{СКЗ 96} км, А	І _{СКЗ 99} км, А	І _{СКЗ 107} км, А	І _{СКЗ 117} км, А	І _{СКЗ 125} км, А	І _{СКЗ 137} км, А	І _{СКЗ 147} км, А
До оптимального регулирования	5,2	2	3,4	2,7	0,7	7,1	4,2	3,1
После оптимального регулирования	0	2	0	0	0,9	7,1	0	0

После этого были проведены экспериментальные исследования по измерению защитных суммарных потенциалов на участке МГ после отключения 5 СКЗ и изменения режимов остальных.

Исследование заключалось в установке оптимизированных режимов и отключении необходимых СКЗ и проверке установившихся защитных разностей потенциалов через сутки. Измерения производились с помощью подсистем дистанционного коррозионного мониторинга и с помощью выносного медно-сульфатного электрода и мультиметра Fluke 79/29, производства John Fluke Co., США.

По результатам измерений были получены следующие графики (рисунок 5.4).

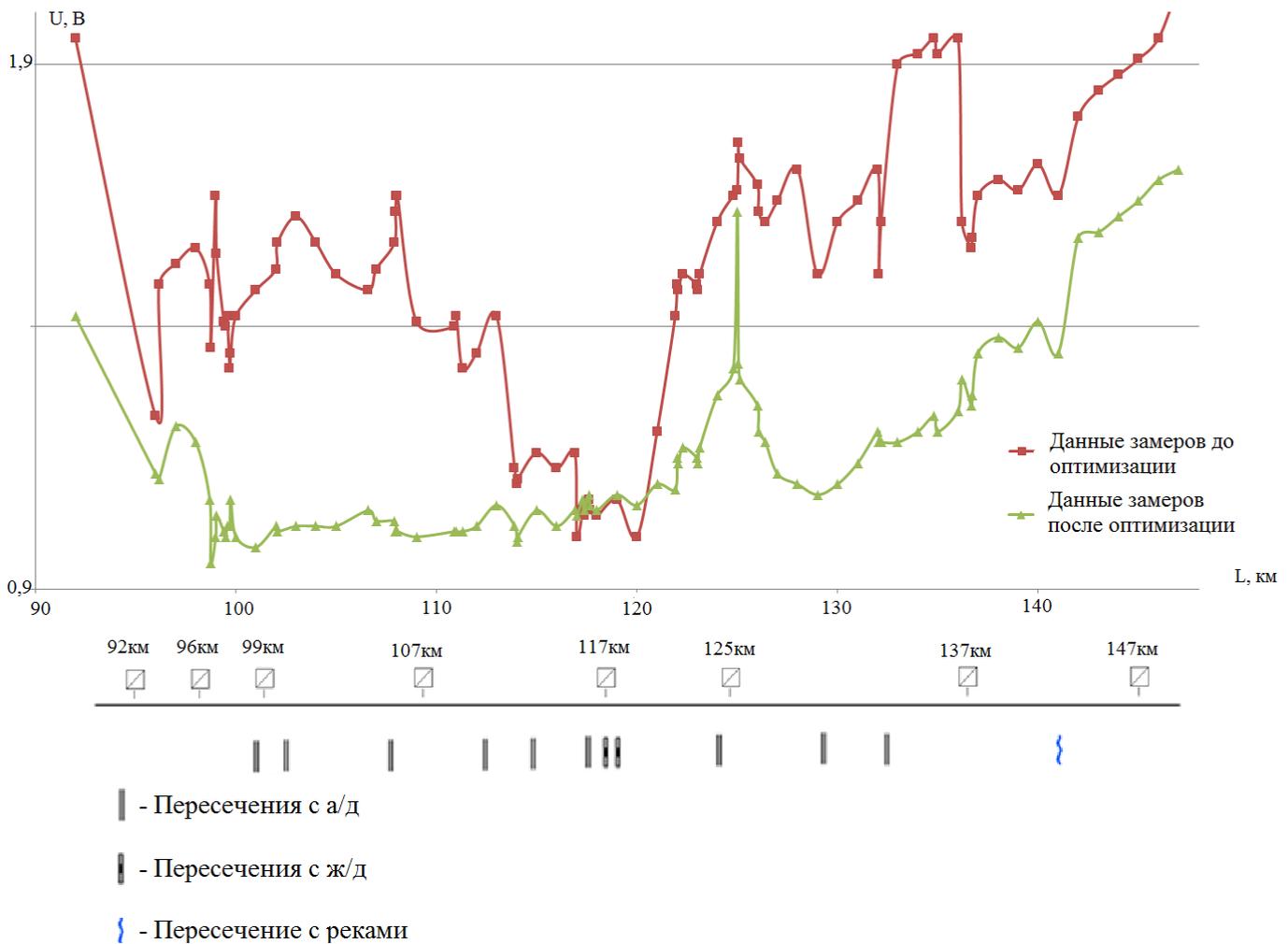


Рисунок 5.4 – Распределение потенциалов на исследуемом участке до и после оптимального регулирования режимов работы СКЗ

Также были произведены измерения выходных параметров станций катодной защиты. Были произведены измерения силы тока и напряжения на выходе СКЗ. По полученным данным по формулам 4.18-4.20 были рассчитаны выходная мощность и КПД станций катодной защиты до и после оптимального регулирования. Данные параметры приведены в таблице 5.6. Изменение суммарной выходной мощности и КПД системы электрохимической защиты было вычислено по формулам 4.21-4.23.

Таблица 5.6 - Изменение суммарной выходной мощности и КПД системы электрохимической защиты

	СКЗ 92 км	СКЗ 96 км	СКЗ 99 км	СКЗ 107 км	СКЗ 117 км	СКЗ 125 км	СКЗ 137 км	СКЗ 147 км	$\sum n_{\text{сум}}$
P_j до оптимизации, Вт	47,32	9,2	9,18	13,5	4,03	16,8	14,88	11,28	126,3
P_j после оптимизации, Вт	0	9,2	0	0	5,12	16,8	0	0	31,12
η_j до оптимизации, %	70	31	31	40	44	46	42	38	46
η_j после оптимизации, %	0	31	0	0	65	46	0	0	49

Выводы:

1. Произведена апробация разработанных процедур оптимального управления режимами работы станций катодной защиты на реальном объекте магистрального газопровода, результатами которой является:

- обеспечение защищенности на всей протяженности исследуемого участка;
- уменьшение суммарной мощности СКЗ в 4 раза;
- увеличение КПД системы на 3%.

2. Применение методов структурной оптимизации, введение ограничений на величину максимального допустимого потенциала и снижение суммарного выходного тока системы помимо увеличения энергоэффективности влечет за собой ряд существенных преимуществ, таких как:

- уменьшение влияния на свойства металла и изоляционные покрытия повышенной плотности тока;
- уменьшение силы тока системы в 4 раза приведет к пропорциональному уменьшению скорости растворения анодного заземления.
- увеличение ресурса выведенных в резерв УКЗ.

Данные положительные эффекты приведут к значительной экономии средств на техническом обслуживании и ремонте системы противокоррозионной защиты данного участка.

5.4 Выводы по главе

1. Экспериментально проверена возможность применения модели распределения защитных суммарных потенциалов от выходных параметров СКЗ для линейного участка трубопровода.

2. Вычислен интегральный показатель влияния коррозионных факторов на участках между СКЗ, который был использован для определения возможности вывода СКЗ в резерв.

3. Произведен расчет оптимальных режимов работы СКЗ методами структурной оптимизации, с учетом наложенных на систему ограничений. Расчет оптимальных параметров СКЗ показал, что на данном участке МГ можно вывести в резерв 5 СКЗ на 92, 99, 107, 137 и 147 км, при этом будет обеспечиваться защищенность, что подтверждается экспериментальными данными.

4. Вычислено, что суммарная выходная мощность системы уменьшилась в 4 раза, а КПД повысился на 3%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате данной работы по созданию основных алгоритмов и подходов для решения задачи оптимизации режимов работы станций катодной защиты магистральных трубопроводов были получены следующие результаты:

1. Введено понятие сторонняя разность потенциалов «труба-земля», определяющего стационарный потенциал металла трубопровода в совокупности с наложенным неизвестными источниками и позволяющая восстановить модель распределения потенциалов по трассе магистрального нефтегазопровода дистанционно без отключения станций катодной защиты на продолжительный срок, что способствует упрощению проведения процедуры регулирования. Полученные данные показывают, что найденная разность потенциалов «труба-земля» в точке измерения с использованием усовершенствованной модели распределения потенциалов и параметра сторонняя разность потенциалов «труба-земля», совпадает с фактическим потенциалом с погрешностью 0,6%, что является достаточной для инженерных задач точностью.

2. Решена задача эффективного регулирования совокупностью станций на участке трубопровода, с возможностью минимизации выходной мощности, увеличения КПД установок катодной защиты, и при этом поддержания защитных потенциалов в границах определяемых ГОСТ 51164-98 и, не превышая критические значения, определяемые по критерию перелома кривой Тафеля.

3. Разработаны алгоритмы оптимального управления, позволяющие производить выбор режимов работы станций катодной защиты, с учетом внешних влияющих факторов и использованием введенного интегрального показателя коррозионного состояния на участках, а также параметров системы «труба-земля» для определения оптимального режима работы, что в совокупности приводит к повышению эффективности защиты от коррозии.

4. Разработанные технические решения внедрены на магистральном газопроводе «Саратов-Горький», участок «Починки-Нижний Новгород» км 92-147. Результатом применения разработанных методик оптимального регулирования

является вывод в резерв 5 СКЗ на 92, 99, 107, 137 и 147 км, при этом обеспечивается защищенность, что подтверждается экспериментальными данными. После изменения режимов работы станций суммарная выходная мощность системы уменьшилась в 4 раза, а интегральный КПД повысился на 3%.

Следующими решаемыми задачами в данном направлении исследований будут:

1. Слежение за медленным (сезонным) изменением характеристик системы «труба-земля».
2. Корректировка (адаптация критериев по данным наблюдения).
3. Адаптация (коррекция и самообучение) модели (функциональных зависимостей) системы «труба-земля» по эксплуатационным данным.
4. Фильтрация и многофакторный анализ данных измерений для оценки электрических характеристик системы «труба-земля».
5. Решение обратных задач по определению электрических характеристик системы «труба-земля».
6. Мониторинг (автоматическое обнаружение тенденций) изменения характеристик системы «труба-земля».
7. Прогноз изменения (во времени):
 - 7.1. параметров ЭХЗ и трубопровода;
 - 7.2. коррозионного состояния трубопровода.
8. Прогнозирование состояния участков трубопровода и оборудования ЭХЗ для проведения ТОиР.
9. Поддержка принятия и контроль диспетчерских решений.
10. Определение остаточного ресурса (СКЗ, АЗ, изоляции и др.).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Абдуллин, И.Г. Магистральные газопроводы: особенности проявления КРН / И.Г. Абдуллин, А.Г. Гареев // Физика металлов. – 1992. - № 6. - С. 18-20.
2. Агиней, Р.В. Актуальные вопросы защиты от коррозии длительно эксплуатируемых магистральных газонефтепроводов / Р.В. Агиней, Ю.В. Александров. - СПб.: «Недра», 2012.- 394 с.
3. Агиней, Р.В. Разработка методов повышения эффективности противокоррозионной защиты объектов газотранспортной системы, автореф. дис. доктора техн. наук / Р.В. Агиней. - Ухта: УГТУ, 2009. – 44 с.
4. Ажогин, Ф.Ф. Коррозионное растрескивание и защита высокопрочных сталей / Ф.Ф. Ажогин. – М.: Металлургия, 1974. – 256 с.
5. Ажогин, Ф.Ф. Новые достижения в области теории и практики противокоррозионной защиты металлов / Ф.Ф. Ажогин, С.С. Иванов // Сб. докл. семинара по коррозии – Звенигород, 1980. - М., 1981. – С. 93.
6. Акимов, Г.В. Теория и методы исследования коррозии металлов / Г.В. Акимов. – М.: Изд. АН СССР, 1945. – 414 с.
7. Александров, Ю.В. Актуальные вопросы защиты от коррозии длительно эксплуатируемых магистральных газопроводов / Ю.В. Александров, Р.В. Агиней // СПб.: «Недра», 2012.- 394 с.
8. Александров, Ю.В. Разработка методологии эффективного предупреждения разрушения длительно эксплуатируемых газопроводных систем, подверженных стресс-коррозии, автореф. дис. доктора техн. наук / Ю.В. Александров. - Ухта: УГТУ, 2013. – 43 с.
9. Алиев, Р. А. Трубопроводный транспорт нефти и газа: Учебник для вузов / Р. А. Алиев, В.Д. Белоусов, А.Г. Немудров и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1988. – 368 с.
10. Андрияшин, В.А. Коррозионное разрушение поверхностей магистральных труб нефтепровода после длительного эксплуатации / В.А. Андрияшин,

А.А. Костюченко, А.И. Комаров // Защита металлов. – 2006. – т. 42. - №1. – С. 52-56.

11. АНТИКОРРОМКОМПЛЕКС-ХИМСЕРВИС. Методы обследований состояния ЭХЗ подземных трубопроводов. URL http://www.ch-s.ru/3_info/methods.html.

12. Башаев, М.А. Оптимизация режимов системы катодной защиты магистрального трубопровода / М.А. Башаев // Коррозия территории нефтегаз. - №2 (25). – 2013. – С. 58 – 61.

13. Башлыков, А.А. Человек в системе оперативно-диспетчерского управления и проблемы автоматизации процессов для интеллектуальной поддержки принятия решений / А.А. Башлыков // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. - №1. – 2014. – С. 11 – 19.

14. Бейко, И.В. Методы и алгоритмы решения задач оптимизации / И.В. Бейко, Б.Н. Бублик, П.Н. Зинько. – Киев: Вища школа, 1983. – 512 с.

15. Бекман, В. Катодная защита от коррозии /В. Бекман, В. Швенк //Справ. изд. Пер с нем. – М.: Металлургия, 1984. – 496с.

16. Бекман, В. Катодная защита: Справ. Изд. Бекман В. Пер. с нем. / Под ред. Стрижевского И.В. - М.: Металлургия, 1992. – 176 с.

17. Белеевский, В.С. Оценка достоверности расчетных значений тока коррозии и констант Тафеля по кривизне поляризационных кривых вблизи потенциала коррозии / В.С. Белеевский, К.А. Конев, В.В. Новосадов, В.Ю. Васильев // Защита металлов, 2004. Т. 40. №6 – С. 629-633.

18. Блинов, И.Г. К вопросу об уточнении степени коррозионной опасности участков нефте- и нефтепродуктопроводов / И.Г. Блинов, А.В. Валюшкин, А.В. Старочкин // - Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. № 2(14) 2014, с 58-61.

19. Борисов, Б.И. Защитная способность изоляционных покрытий подземных трубопроводов / Б.И. Борисов. – М.: Недра, 1987. - 123 с.

20. Вайншток, С.М. Трубопроводный транспорт нефти / С.М. Вайншток, В.В. Новоселов, А.Д. Прохоров, А.М. Шаммазов и др. // Под ред. С. М. Вайнштока: учеб. для вузов: в 2 т. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2004. – Т.2. – 621 с.

21. Валуйская, Д.П. Результат обследования изоляционного покрытия из поливинилхлоридных лент / Д.П. Валуйская, В.Е. Серафимович // Строительство трубопроводов. – 1966. - № 9. - С. 16-18.

22. Васильев, В.С. Применение программно-технических средств телемеханики УНК ТМ для оптимизации режимов СКЗ и диагностики нарушений изоляции трубопроводов /В.С. Васильев, С.А. Жаров, С.Ю. Покровский //В сб. Диагностика оборудования и трубопроводов. – М.: ИРЦ Газпром, 2000. №5, С. 23 – 30.

23. Велиюлин, И.И. Современные технические решения по ремонту газопроводов / И.И Велиюлин // Разработка и внедрение технологий, оборудования и материалов по ремонту изоляционных покрытий и дефектных участков труб,включая дефекты КРН, на магистральных газопроводах ОАО"Газпром": М-лы НТС ОАО "Газпром", г.Ухта, ООО "Севергазпром", 28-30 окт. 2003г. - Т.1. - М.: ООО "ИРЦ Газпром", 2004. - С. 8-15.

24. Гарбер, Ю.И. Параметры работоспособности противокоррозионных покрытий подземных трубопроводов за рубежом / Ю.И. Гарбер – М.: ВНИИО-ЭНГ, 1983. – 458 с.

25. Герасименко, А.А. Защита от коррозии, старения и биоповреждений машин, оборудования и сооружений / А.А. Герасименко. Т. 1. Справочник. – М.: Машиностроение, 1987. – 687с.

26. Глазков, В.В. Влияние различных факторов на степень защищенности магистральных трубопроводов / В.В. Глазков, Н.А. Чиженькова // Проектирование и строительство трубопроводов и газонефтепромысловых сооружений: Реф. сб. Информнефтегазстроя. – М., 1978. – Вып. 12. – С. 19-29.

27. Глазков, В.И. Определение переходного сопротивления подземных металлических трубопроводов / В.И. Глазков, В.Г. Котик, Н.П Глазов // Коррозия и защита в нефтедобывающей промышленности. – 1967. - № 5. - С. 29-34.

28. Глазов, Н.П. Методы контроля и измерений при защите подземных сооружений от коррозии / Н.П. Глазов, И.В. Стрижевский, А.М. Калашникова и др. – М.: Недра, 1978. – С. 127

29. Глазов, Н.П. Моделирование электрохимической защиты трубопроводов / Н.П. Глазов // Труды ВНИИСТ, 1987, С. 137 –142.

30. Глотов, И.В. Повышение эффективности противокоррозионной защиты подземных нефтегазопроводов в условиях промышленных площадок, автореф. дис. . канд. техн. наук / И.В. Глотов. – Ухта: УГТУ, 2009. – 19 с.

31. ГОСТ ИСО 9.602-2005. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. – М.: Стандартинформ, 2006. – 59 с.

32. ГОСТ Р 51164-98. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии; Введ. 01.07.99. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. – 45 с.

33. Гумеров Р.С. Изоляционные материалы для трубопроводов / Р.С. Гумеров, М.К. Рамеев, М.Ш. Ибрагимов // Трубопроводный транспорт нефти. – 1996. – №1. – С.22.

34. Дрейпер, Н. Прикладной регрессионный анализ. Множественная регрессия / Н. Дрейпер, Г Смит. – М.: «Диалектика», 2007. – 912 с.

35. Жук Н.П. Курс теории коррозии и защиты металлов / Н.П. Жук. – М.: Металлургия, 1976. - 472 с.

36. Защита оборудования от коррозии: Справочник / Под ред. Строкана Б.В. – Л.: Химия, 1987. – 505 с.

37. Зиневич, А. М., Защита трубопроводов и резервуаров от коррозии / А.М Зиневич, В. И. Глазков, В. Г. Котик.- М.: Недра, 1975.- 287 с. 1.9

38. Зиневич, А.М. Прогнозирование долговечности защитных покрытий подземных трубопроводов / А.М Зиневич // Строительство трубопроводов. - 1971. - №11. - С. 13-14.

39. Иванов, В.Т. Влияние неоднородных участков изоляции на распределение тока при электрохимической защите металлов от коррозии / В.Т. Иванов, Ф.Г. Гадилова // - М.: Электрохимия, 1981. – Вып. 2. – Том 17. – С. 321-325.

40. Игнатенко, В.Э. Влияние катодной поляризации на скорость коррозионного растрескивания трубных сталей / В.Э. Игнатенко, А.И. Маршаков, В.А. Маричев, Ю.Н. Михайловский, Н.А. Петров // Защита металлов, 2000, Т. 33, № 2. С.132-139.

41. Карнавский, Е. Л. Интеллектуализация процедур управления системой защиты от коррозии / Е. Л. Карнавский, В. Г. Баранов, С. А. Никулин, В.Р Миллов // Нейрокомпьютеры.– 2014. – № 11. – С. 73-79.

42. Классификация условий применения электрохимической защиты от коррозии в районах вечной мерзлоты. Издание ОНТИ ВНИИСТА, Москва, 1970, 66 с.

43. Коршак, А. А. Основы нефтегазового дела: Учебник для ВУЗов / А. А. Коршак, А. М. Шаммазов. – Уфа: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2001. – 544 с.

44. Красноярский, В. В., Коррозия и защита подземных металлических сооружений / В. В. Красноярский, Л. Я. Цикерман. – М.: Высшая школа, 1968.- 296 с.

45. Красноярский, В.В. Электрохимический метод защиты металлов от коррозии / В.В. Красноярский. – М.: Машгиз, 1961. 56 с.

46. Кузнецов, М. В. Противокоррозионная защита трубопроводов и резервуаров / М. В. Кузнецов, В. Ф. Новоселов, П. И. Тугунов, В. Ф. Котов. – М.: Недра, 1992 - 240 с.

47. Кузнецова, Е.Г. Влияние рН на анодные характеристики углеродистой стали в почве различной влажности / Е.Г. Кузнецова, Л.В. Ремезкова, А.В. Медников // Защита металлов. 1988. Т.24. № 1 - С. 21–28.

48. Куна А.Т. Техника экспериментальных работ по электрометрии, коррозии и поверхностной обработке металлов: Справочник / А.Т. Куна, А.М. Сухотина. – Л.: Химия, 1994. – 551 с.

49. Льюнг Л. Идентификация систем / Л. Льюнг. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. – 432 с.

50. Майника Э. Алгоритмы оптимизации на сетях и графах / Э. Майника. - М.: Мир, 1981. — 323 с.

51. Марченко А.Ф.. Количественные показатели защитных покрытий подземных трубопроводов. / А.Ф. Марченко // Проектирование и строительство трубопроводов и нефтегазопромысловых сооружений. - Вып. 3, 1976. - С.23-31.

52. Методика проведения электрометрического обследования коммуникаций промплощадок. – М.: ОАО «Газпром», 1999, 39 с.

53. Милов, В.Р. Байесовские методы обучения нейронных сетей / В.Р. Милов, В.Г. Баранов, С.А. Шалюгин // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2007. № 11. С. 14 – 19.

54. Милов, В.Р. Обучение нейронных RBF-сетей на основе байесовской методологии и решение задачи восстановления зависимостей / В.Р. Милов, Я.Я. Махмудов // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2005. № 4. С. 23 – 31.

55. Милов, В.Р. Структурно-параметрическая идентификация системы «труба – земля» в задаче электрохимической защиты магистральных газопроводов / В.Р. Милов, Е.Л. Карнавский, С.А. Никулин, Р.Л. Шиберт // Нейрокомпьютеры. – 2014. – №11. – С 79-85.

56. Михайловский, Ю.Н. Датчик проникновения водорода в стальные конструкции, эксплуатируемые в различных коррозионных средах / Ю.Н. Михайловский, А.И. Маршаков, В.М. Попова, Т.И. Соколова // Защита металлов. 1993. Т.29.№ 4. С.647-649.

57. Михайловский, Ю.Н. Оценка вероятности катодного охрупчивания стальных газопроводов в зоне действия / Ю.Н. Михайловский, А.И. Маршаков, В.Э. Игнатенко, Н.А. Петров // Защита металлов, 2000, Т. 33, № 2. С.140-145

58. Мустафин, Ф.М. Защита трубопроводов от коррозии /Ф.М. Мустафин, Л.И. Быков, А.Г. Гумеров и др. //Том 2: Учебное пособие. – СПб.: ООО «Недра», 2007. – 708с.

59. Никулин, С. А. Автоматизация процессов управления средствами ЭХЗ / С. А. Никулин, Е. Л. Карнавский // Коррозия территории нефтегаз. - №3 (26). – 2013. – С. 60 – 61.
60. Никулин, С.А. Оптимизация режимов установок электрохимической защиты / С.А. Никулин, Е.Л. Карнавский // Системы управления и информационные технологии. 2014. № 3 (57). С. 64 –68.
61. Новиков, Н.В. Структурно-параметрическая оптимизация технологических сетей подвижной радио связи / Н.В. Новиков, В.Р. Милов, В.В. Алексеев, А.А. Севрюков // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2010. Т.8, №2. С. 55-59.
62. Окунь, С.С. Трансформаторные и трансформаторно-тиристорные регуляторы напряжения / С.С. Окунь. - М.: Энергия, 1970,- 285 с.
63. Пат. № RU 2493291. «Способ катодной защиты протяженного участка подземного сооружения».
64. Пат. на полезную модель № 66137 «Преобразователь напряжения для катодной защиты»
65. Притула, В. В. Проблемы эксплуатации трубопроводов / В. В. Притула // Коррозия территории нефтегаз. – 2006. – №2(4). – С. 56-59.
66. РД-29.200-00-КТН-047-14 – Обследование коррозионного состояния магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов. Введ. 21.04.2014. – М.: ОАО «АК «ТРАНСНЕФТЬ», 2014. – 153 с.
67. РД-29.200-00-КТН-176-06. Регламент обследования коррозионного состояния магистральных нефтепроводов и состояния противокоррозионной защиты. Введ. 22.05.2006. – М.: ОАО «АК «ТРАНСНЕФТЬ», 2006. – 95 с.
68. Розенфельд, И.Л. Коррозия и защита металлов. Локальные и коррозионные процессы / И.Л. Розенфельд. - М.: Metallurgy, 1970. - 448 с.
69. Рудой, В.Н. Проектирование катодной защиты подземных трубопроводов / В.Н. Рудой, Н.И. Останин, Ю.П. Зайков. – Екатеринбург: УПИ, 2005. 28 с.
70. Северинова, Л. Н. Повышение эффективности противокоррозионной защиты от коррозии газопроводов с применением точечно-распределенных анод-

ных заземлений, автореф. дис. . канд. техн. наук / Л. Н. Северинова. – Ухта: УГТУ, 2010. – 25 с.

71. Семенов, А. Г. Что такое электрохимическая защита и как выбрать катодную станцию / А. Г. Семенов, Л. П. Сыса // Новости теплоснабжения. №10, 2004 г. с. 34-38.

72. Семикин, В.Ю. Подсистема контроля и управления средствами защиты от коррозии / В.Ю. Семикин // Коррозия Территории НЕФТЕГАЗ. - №1 (28). – 2014. – С. 4 – 7.

73. СТО Газпром 9.0-001-2009. Защита от коррозии. Основные положения. – М.: ОАО «Газпром» - ООО «ВНИИГАЗ», 2009.

74. СТО Газпром 9.4-023-2013. Мониторинг и прогноз коррозионного состояния объектов и оборудования. Система сбора, обработки и анализа данных. Основные требования. – М.: ОАО «Газпром» - ООО «ВНИИГАЗ», 2013.

75. Теплинский, Ю.А. Управление эксплуатационной надежностью магистральных газопроводов / Ю.А. Теплинский, И.Ю. Быков. – М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2007. – С. 400.

76. Теплинский, Ю.А. Коррозионная повреждаемость подземных трубопроводов / Ю. А. Теплинский, Н. И. Мамаев. – СПб.: Инфо–да, 2006. – 406 с.

77. Теплинский, Ю.А., Быков И.Ю. Стойкость антикоррозионных покрытий труб в условиях Крайнего Севера / Ю.А. Теплинский, И.Ю. Быков. – СПб.: Инфо–да. – 2004. - 296 с.

78. Тулупьев, А.Л. Байесовские сети доверия: логико-вероятностный вывод в ациклических направленных графах / А.Л. Тулупьев, А. В. Сироткин, С. И. Николенко. - СПб.: Издательство С.-Петербургского университета, 2009. – 400 с.

79. Тулупьев, А.Л. Байесовские сети. Логико-вероятностный подход / А.Л. Тулупьев. - СПб.: Наука, 2006. – 608 с.

80. Фадеев М.А. Элементарная обработка результатов эксперимента / М.А. Фадеев. – Нижний Новгород: ННГУ, 2004. – 120 с.

81. Фатрахманов Ф.К. Концепция и пути оптимизации катодной защиты коммуникаций промплощадок / Ф.К. Фатрахманов // Науч-техн. сбор. Совре-

менные проблемы трубопроводного транспорта газа. – М: ВНИИГАЗ, 1998, 408-411 с.

82. Фатрахманов Ф.К. Опыт оптимизации катодной защиты сложных коммуникаций промплощадок. “Международный научно-технический семинар по проблемам защиты от коррозии подземных сооружений РАО “Газпром” / Ф.К. Фатрахманов // Материалы совещаний, конференций семинаров. – М: ИРЦ Газпром, 1996. С 39-45.

83. Фатрахманов, Ф.К. Определение оптимальных параметров катодной защиты при защите коммуникаций промплощадок. Защита технологического оборудования от коррозии / Ф.К. Фатрахманов, В.Г. Винокурцев // Сборник трудов ВНИПИГАЗ. – Баку: ВНИПИГАЗ, 1983 г. С. 46-52.

84. Фрейман, Л. И. Об оценке коррозивности грунта по отношению к углеродистым сталям с учетом минимального катодного защитного потенциала и об одном из методов его определения / Л. И. Фрейман, Б. П. Прибытко // Защита металлов, том 29. № 3. 1993. с. 440-447.

85. Фрейман, Л.И. Потенциостатические методы в коррозионных исследованиях и электрохимической защите / Л.И. Фрейман, В.А. Манаров, И.Е. Брыснин. – Л.: Химия, 1972. – 239 с.

86. Харионовский В.В. Повышение прочности газопроводов в сложных условиях / В.В. Харионовский. – М.: Недра, 1990. – 204 с.

87. Харисов Р.А. Современное состояние защиты трубопроводов от коррозии полимерными покрытиями / Р.А. Харисов, А.Р. Хабирова, Ф.М. Мустафин, Р.А. Хабиров // Нефтегазовое дело, 2005. – №4. – С.3-29.

88. Хохлюк, В.А. Параллельные алгоритмы целочисленной оптимизации / В.А. Хохлюк. - М.: Радио и связь, 1987. – 224 с.

89. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

90. Черняев, В.Д. Эксплуатационная надежность магистральных нефтепроводов / В.Д. Черняев, Э.М. Ясин, В.Х. Галюк, И.И. Райхер. - М.: Недра, 1992. – 245 с.

91. Яхьяева Г.Э. Нечеткие множества и нейронные сети / Г.Э. Яхьяева. - М.: Интернет-Университет Информационных Технологий; БИНОМ, Лаборатория знаний, 2006 – 316 с.

92. Alund L.R. Polypropylene system scores high as pipeline anti-corrosion coating / L.R. Alund // Oil and Gas J. – 1992. – №50. – P.42-45.

93. Christoforidis, G. C. Inductive Interference Calculation On Imperfect Coated Pipelines Due To Nearby Faulted Parallel Transmission Lines. Electric Power Systems Research / G. C. Christoforidis, D. P. Labridis, P. S. Dokopoulos // Vol. 66, Issue 2, Aug. 2003, pp. 139-148.

94. Harris, G. M. New coatings for the corrosion protection of steel pipelines and pilings in severely aggressive environments / G. Harris, M.A. Lorenz // Corrosion Science, 1993. - Vol. 35. - Issues 5-8. - P. 1417-1423.

95. Mitigation of alternating current and lightning effects on metallic structures and corrosion control systems, NACE Standard RP0177-95.

96. Parkins, R.N. Hydrogen gas evolution from cathodically protected surfaces / R.N. Parkins, A.Y. Markworth, Y.H. Holbrook, R.R Fessler // Corrosion, 1985. -V. 41. -№ 7. – P. 389-397.

97. Tubbs, S.P. MathCAD for Electrical Engineers and Technologists Paperback / S.P. Tubbs, 2009. - 376 P.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Расчет оптимальных режимов работы трех СКЗ, установленных на участке магистрального трубопровода, методами параметрической оптимизации.

ORIGIN:= 1
 AAAAAAAAAA

Исходные данные (3 СКЗ, 3 точки контроля, 11 режимов)

$$I := \begin{pmatrix} 5 & 3.5 & 2.6 \\ 5 & 0 & 2.6 \\ 5 & 10 & 2.6 \\ 5 & 20 & 2.6 \\ 5 & 3.5 & 2.6 \\ 5 & 3.5 & 0 \\ 5 & 3.5 & 7.9 \\ 5 & 3.5 & 12.4 \\ 0 & 3.5 & 2.6 \\ 10 & 3.5 & 2.6 \\ 36 & 3.5 & 2.6 \end{pmatrix} \quad \phi_{\theta 2} := \begin{pmatrix} 1.86 \\ 1.85 \\ 1.95 \\ 2.03 \\ 1.86 \\ 1.86 \\ 1.92 \\ 1.93 \\ 1.44 \\ 2.34 \\ 4.4 \end{pmatrix} \quad \phi_{\theta 9} := \begin{pmatrix} 1.56 \\ 1.27 \\ 2.13 \\ 2.94 \\ 1.56 \\ 1.54 \\ 1.61 \\ 1.64 \\ 1.53 \\ 1.59 \\ 1.76 \end{pmatrix} \quad \phi_{107} := \begin{pmatrix} 1.89 \\ 1.86 \\ 1.95 \\ 2.03 \\ 1.89 \\ 1.3 \\ 3.16 \\ 4.13 \\ 1.8 \\ 1.84 \\ 1.9 \end{pmatrix}$$

$$\phi^{(1)} := \phi_{\theta 2} \quad \phi^{(2)} := \phi_{\theta 9} \quad \phi^{(3)} := \phi_{107}$$

$$fl(i,j) := 1$$

$$II := \text{augment}(I, \text{matrix}(\text{rows}(I), 1, fl))$$

$$II =$$

	1	2	3	4
1	5	3.5	2.6	1
2	5	0	2.6	1
3	5	10	2.6	1
4	5	20	2.6	1
5	5	3.5	2.6	1
6	5	3.5	0	1
7	5	3.5	7.9	1
8	5	3.5	12.4	1
9	0	3.5	2.6	1
10	10	3.5	2.6	1
11	36	3.5	2.6	1

$$\phi =$$

	1	2	3
1	1.86	1.56	1.89
2	1.85	1.27	1.86
3	1.95	2.13	1.95
4	2.03	2.94	2.03
5	1.86	1.56	1.89
6	1.86	1.54	1.3
7	1.92	1.61	3.16
8	1.93	1.64	4.13
9	1.44	1.53	1.8
10	2.34	1.59	1.84
11	4.4	1.76	1.9

Оценка матрицы A

$$A := (II^T \cdot II)^{-1} \cdot II^T \cdot \phi$$

$$A = \begin{pmatrix} 0.0818 & 6.3297 \times 10^{-3} & 9.3801 \times 10^{-4} \\ 9.4939 \times 10^{-3} & 0.0839 & 9.4284 \times 10^{-3} \\ 6.0894 \times 10^{-3} & 8.1015 \times 10^{-3} & 0.2322 \\ 1.4184 & 1.2168 & 1.2344 \end{pmatrix}$$

ORIGIN:= 1

Исходные данные

$$A := \begin{pmatrix} 0.0818 & 6.3297 \times 10^{-3} & 9.3801 \times 10^{-4} \\ 9.4939 \times 10^{-3} & 0.0839 & 9.4284 \times 10^{-3} \\ 6.0894 \times 10^{-3} & 8.1015 \times 10^{-3} & 0.2322 \\ 1.4184 & 1.2168 & 1.2344 \end{pmatrix}$$

$$U_{\min} := \begin{pmatrix} 0.9 \\ 0.9 \\ 0.9 \end{pmatrix}$$

$$U_{\max} := \begin{pmatrix} 2.5 \\ 2.5 \\ 2.5 \end{pmatrix}$$

$$Rs := \begin{pmatrix} 1.6 \\ 0.9058 \\ 3.3559 \end{pmatrix}$$

Целевая функция (без учета Rвнутр)

$$f(I) := Rs^T \cdot I^2$$

Начальные условия

$$I := \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Given

Ограничения неравенства

$$U_{\min} \leq A^T \cdot \text{stack}(I, 1) \leq U_{\max}$$

$$0 \leq I$$

Процедура минимизации

$$I_{\min} := \text{Minimize}(f, I)$$

Решение

$$I_{\min} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Значения ограничений

$$U_{\min} = \begin{pmatrix} 0.9 \\ 0.9 \\ 0.9 \end{pmatrix}$$

$$A^T \cdot \text{stack}(I_{\min}, 1) = \begin{pmatrix} 1.418 \\ 1.217 \\ 1.234 \end{pmatrix}$$

$$U_{\max} := \begin{pmatrix} 2.5 \\ 2.5 \\ 2.5 \end{pmatrix}$$

Значение целевой функции

$$Rs^T \cdot I_{\min}^2 = 0$$