

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)
«Политехнический институт»
Факультет «Заочный»
Кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент

Гл.энергетик ООО "Колос"

_____ В.Ф.Зимин

« ____ » _____ 2020 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующая кафедрой ЭССиСЭ

_____ И.М. Кирпичникова

« ____ » _____ 2020 г.

Оптимизация режимов работы станций катодной защиты
магистральных трубопроводов

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ-13.04.02.2019.20.522.00.00 ПЗ ВКР

Руководитель ВКР

доцент, к.т.н.

_____ В.В. Пястолов

« ____ » _____ 2020 г.

Автор ВКР

студент группы ПЗ-385

_____ Б.А. Островский

« ____ » _____ 2020 г.

Нормоконтролер

старший преподаватель

_____ Н.Ю. Аверина

« ____ » _____ 2020 г.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)
«Политехнический институт»
Факультет «Заочный»
Кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения»
Направление 13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника»
Магистерская программа
«Оптимизация развивающихся систем электроснабжения»

УТВЕРЖДАЮ:

Заведующая кафедрой ЭССиСЭ
д.т.н., профессор

_____ И.М. Кирпичникова
«__» _____ 2020 г.

ЗАДАНИЕ

на выпускную квалификационную работу студента
Островского Богдана Анатольевича
Группа –ПЗ-385

1 Тема работы Оптимизация режимов работы станций катодной защиты магистральных трубопроводов

Утверждена приказом ректора ЮУрГУ 2882 от 25.12.2019г.

Срок сдачи студентом законченной работы – 11.01.2020г.

2 Исходные данные к работе: результаты проведения научно-исследовательской работы

3 Перечень вопросов, подлежащих разработке:

1 Введение

...

6 Заключение

4 Дата выдачи задания: 24.09.2017г.

Научный руководитель _____ / В.В. Пястолов /

Задание принял к исполнению _____ / Б.А. Островский /

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

№ п/п	Наименование этапов выпускной квалификационной работы	Срок выполнения этапов работы	Отметки руководителя о выполнении
1	Введение	19.10.2017	
2	Современное состояние защиты трубопроводов	21.01.2018	
3	Разработка структуры оптимизации	09.07.2018	
4	Алгоритм определения защитного потенциала	24.12.2018	
5	Проведение исследований по нахождению потенциала	11.01.2019	
6	Заключение	30.05.2019	
7	Библиографический список	07.06.2019	
8	Оформление пояснительной записки	11.06.2019	
9	Сдача готовой работы на кафедру, представление работы на рецензию	11.01.2020	

Заведующая кафедрой ЭССиСЭ _____ / И.М. Кирпичникова /

Научный руководитель работы _____ / В.В. Пястолов /

Магистрант _____ / Б.А. Островский /

АННОТАЦИЯ

Островский Б.А. Оптимизация режимов работы станций катодной защиты магистральных трубопроводов.. – Челябинск: ЮУрГУ, ПИ, 2019, 83 с., 29 ил., 6 табл., 1 прил., библиогр. список – 48 наим.

Объект исследования – магистральный газопровода «Саратов-Горький»

Предмет исследования – существующая станция катодной защиты.

Цель работы – усовершенствование методик оптимизации режимов работы станций катодной защиты, решение проблемы развития автоматизированных средств управления и оптимального регулирования станциями катодной защиты.

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ.....	10
СТАЛЬНЫХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ И МЕТОДОВ.....	10
КОНТРОЛЯ ИХ ЗАЩИЩЕННОСТИ.....	10
1.1 Условия эксплуатации и коррозионное состояние магистральных газопроводов.....	10
1.2 Пассивная защита труб от коррозии.....	11
1.3 Активная защита от коррозии.....	13
1.4 Электрохимическая защита магистральных газопроводов от коррозии.....	16
1.5 Методы контроля защищенности магистральных газопроводов от коррозии.....	24
1.6 Обзор существующих методик оптимизации работы средств электрохимической защиты.....	35
1.7 Выводы.....	42
2 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СУЩЕСТВУЮЩЕЙ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛОВ, МЕТОДЫ СТРУКТУРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ.....	44
2.1 Введение понятия стороннего потенциала наложенного неизвестными источниками.....	44
2.2 Методы структурной оптимизации.....	51
2.3 Выводы по главе.....	54
3 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ МОДУЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ И ОСНОВНЫХ АЛГОРИТМОВ ОПТИМИЗАЦИИ.....	55
3.1 Постановка задачи исследования.....	55
3.2 Структура модуля оптимизации.....	55
3.3 Ранжирование участков между СКЗ по степени коррозионной опасности.....	60
3.3.1 Назначение и характеристика.....	60
3.3.2 Оценка коррозионного состояния участков между СКЗ.....	62
3.3.3 Учет весов влияния факторов на каждом участке между СКЗ.....	65

3.3.4 Расчет интегрального показателя коррозионного состояния участков между СКЗ.....	66
3.3.6 Алгоритм ранжирования участков по коррозионной опасности.....	68
3.3.7 Алгоритм ранжирования участков по коррозионной опасности на основе интегрального показателя.....	69
3.4 Определение возможности отключения СКЗ.....	70
3.4.1 Определение режимов функционирования СКЗ	70
Найденная матрица коэффициентов влияния А используется при определении защитных потенциалов для обеспечения поддержки принятия решения об отключении СКЗ, а также для решения задачи оптимизации.....	71
3.4.2 Проверка граничных условий на выходные данные СКЗ.....	71
3.4.3 Проверка условия на наличие участка ВКО в зоне защиты СКЗ.....	72
3.4.4 Проверка условия на наличие блуждающих токов в зоне защиты СКЗ ..	73
3.4.5 Принятие решения о возможности отключения СКЗ	73
3.4.6 Алгоритм определения максимального защитного потенциала.....	73
3.4.7 Алгоритм определения минимального защитного потенциала.....	76
3.5 Алгоритм поддержки принятия решения об отключении СКЗ	77
3.5.1 Определение количества соседних СКЗ, существенно влияющих на зону защиты	78
3.5.2 Расчет режимов работы соседних СКЗ для поддержания достаточного защитного потенциала при отключении рассматриваемой СКЗ.....	78
3.5.3 Проверка расчетных режимов на соответствие условиям по критериям	80
3.5.4 Расчет суммарного изменения мощности после предполагаемого отключения рассматриваемой СКЗ.....	80
3.5.5 Сравнение вариантов отключения СКЗ	81
3.5.6 Формирование предложения по отключению СКЗ	82
3.5.7 Алгоритм решения	82
3.6 Оптимизация параметров защиты СКЗ	83
3.6.1 Оценка необходимости оптимизации режимов СКЗ.....	83

3.6.2 Расчет значений напряжения на выходе СКЗ по критериям защищенности	85
3.6.3 Алгоритм решения	87
3.7 Расчет электрических характеристик трубопровода	88
3.7.1 Назначение и характеристика	88
3.7.2 Входное сопротивление трубопровода	88
3.7.3 Переходное сопротивление трубопровода в единицу длины	88
3.7.4 Решение обратной задачи по определению постоянной распространения тока	90
3.8 Выводы по главе	92
4 ПРОВЕДЕНИЕ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО НАХОЖДЕНИЮ ОПТИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ ЗАЩИТНОГО СУММАРНОГО ПОТЕНЦИАЛА НА ДЕЙСТВУЮЩЕМ ОБЪЕКТЕ МГ	93
4.1 Постановка задачи исследования	93
4.2 Описание объекта исследования, программы исследования и оборудования	94
4.3 Выводы по главе	101
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	102
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	104
ПРИЛОЖЕНИЕ А	120

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 от физико-химических свойств коррозионной среды и могут меняться в широких пределах.

Защита трубопроводов осуществляется за счет поддержания минимального (отрицательного) защитного потенциала на концах зоны защиты. Завышение защитных потенциалов относительно значений, необходимых для оптимальной степени защиты магистральных газопроводов от коррозии, приводит к отрицательному эффекту «перезащиты», перерасходу электроэнергии и в целом значительно удорожает эксплуатацию системы катодной защиты. В свою очередь «недозащита» газопроводов приводит к повышению скорости коррозионного поражения стенки трубопровода и как результат, к преждевременному выходу его из строя.

Существующие системы управления станциями катодной защиты работают по одному заданному параметру 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 потенциала ведется только в точке дренажа, что не позволяет системе реагировать на изменения параметров нагрузки по трас-

се 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 (СКЗ) либо смежных объектов, включенных в совместную защиту или имеющих электрическую связь между собой, удельное сопротивление грунта, температура и т.д.) практически невозможно специалистам служб защиты от коррозии принять решение об оптимальных выходных режимах работы СКЗ, обеспечивающих 100% защищенность по протяженности и во времени на всех сооружениях одновременно с минимальными энергозатратами.

Цель работы

Усовершенствование методик оптимизации режимов работы станций катодной защиты, решение проблемы развития автоматизированных средств управления и оптимального регулирования станциями катодной защиты

Основные задачи исследований:

- обобщить и проанализировать критерии, влияющие на показатели защищенности магистральных газопроводов;

- разработать методику проведения расчетов оптимальных режимов работы СКЗ в зависимости от распределения суммарных и поляризационных потенциалов по всей протяженности линейного участка магистрального газо-провода;

- синтез динамической модели на основе идентификации модели «труба-земля»;

- разработать алгоритмы оптимизации режимов управления СКЗ; нахождение методов решения многокритериальной задачи опти-

- мизации;

- провести апробацию полученных результатов на объекте МГ.

Научная новизна

Выделены критерии, влияющие на состояние защищенности магистральных газопроводов, выделены связи между влияющими критериями. Определены критерии эффективности работы системы.

Разработана методика проведения измерений потенциалов по трассе МГ для идентификации модели изменения параметров «труба-земля».

Разработана динамическая модель изменения параметров защищенности в зависимости от управляющего воздействия, позволяющая в отличие от известных моделей использовать в качестве U_{oi} величины собственного (стационарного) суммарного и поляризационного потенциала металла трубопровода в данных условиях $U_{стор}$ в совокупности с неизвестным влиянием смежных СКЗ и неопределенных источников тока, что способствует сокращению времени на измерения и повышению точности дальнейшего расчета.

Разработаны алгоритмы управления системой ЭХЗ, включающей в себя ряд СКЗ.

Применены методы структурно-параметрической оптимизации для решения многокритериальной задачи нахождения оптимальных параметров СКЗ.

Защищаемые положения

1. Разработана иерархия критериев влияющих на состояние защищенности и определены связи смежных критериев.
2. Усовершенствована существующая модель изменения параметров защищенности в зависимости от режимов работы СКЗ.
3. Многокритериальный подход решения задачи оптимизации, применение методов структурной оптимизации.

Практическая значимость

Полученные результаты были использованы для проведения работ по оптимизации режимов работы средств ЭХЗ магистрального газопровода «Са-ратов-Горький» на участке между 92 и 147 километрами.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав и выводов. Материал изложен на 148 страницах, содержащих 53 рисунка и 23 таблицы. Список цитируемой литературы включает 146 наименований работ.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ СТАЛЬНЫХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ И МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ИХ ЗАЩИЩЕННОСТИ

1.1 Условия эксплуатации и коррозионное состояние магистральных газопроводов

В настоящее время общая протяженность магистральных газопроводов в нашей стране составляет более 156 тыс. км и продолжает увеличиваться.

Магистральные газопроводы за долгие годы эксплуатации зарекомендовали себя как надежный, дешёвый и бесшумный трубопроводный транспорт, способный перемещать на большие расстояния огромное количество энергоносителя.

Природно-климатические условия эксплуатации магистральных газопроводов очень сложные. Они могут быть проложены под землей, в морской воде и горах. На их пути встречаются болота, озера и реки. При этом, газопроводы могут эксплуатироваться как при положительных так и при отрицательных температурах.

Как любой другой вид транспорта трубопроводный транспорт подвергнут естественному старению и коррозионному воздействию окружающей его среды [1].

В настоящее время коррозия остается основной причиной аварий на подземных магистральных трубопроводах, причем на наружную коррозию приходится 95% отказов и, только 5% – на внутреннюю коррозию.

Обеспечение длительности безаварийной эксплуатации трубопроводов и снижение общего количества отказов, связано с решением комплексной проблемы повышения качества проектирования, строительства и эксплуатации [2].

Среди прочих причин аварий является нарушение требований к противокоррозионной защите магистральных газопроводов и контролю ее эффективности.

Для постоянного поддержания магистральных газопроводов в работоспособном состоянии необходимо их защищать от коррозии, контролировать эффективность противокоррозионной защиты, обслуживать и ремонтировать.

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).

Требуемый уровень противокоррозионной защиты магистральных газопроводов достигается совершенствованием существующих средств электрохимической защиты, методов и устройств контроля защищенности трубопроводов и оптимизацией параметров защиты [3].

1.2 Пассивная защита труб от коррозии

Изоляционные покрытия обеспечивают первичную, пассивную защиту трубопроводов от коррозии, выполняя функцию «диффузионного барьера», через который затрудняется доступ к металлу коррозионноактивных агентов (воды, кислорода воздуха и др.) [13, 14, 19, 34, 39].

Для того чтобы защитное покрытие эффективно выполняло свои функции, оно должно удовлетворять целому ряду требований, основными из которых являются: низкая влажностепроницаемость, высокие механические характеристики, высокая и стабильная во времени адгезия покрытия к стали, стойкость к катодному отслаиванию, хорошие диэлектрические характеристики

ки, устойчивость покрытия к ультрафиолетовому и тепловому старению. Изоляционные покрытия должны выполнять свои функции в широком интервале

температур строительства и эксплуатации трубопроводов, обеспечивая их защиту от коррозии на максимально возможный срок их 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) комбинированные мастично-ленточные покрытия (покрытия типа «Пластобит») [79].

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].

Конструкция заводского полипропиленового покрытия аналогична конструкции заводского трехслойного полиэтиленового покрытия труб. Для нанесения покрытия используются порошковые эпоксидные краски, термоплавкие полимерные композиции и термосветостабилизированные композиции полипропилена. Из-за высокой ударной прочности полипропиленового покрытия его толщина может быть на 20-25 % меньше толщины полиэтиленового покрытия труб (от 1,8 мм до 2,5 мм).

Для противокоррозионной защиты трубопроводов малых и средних диаметров (до 530 мм) в последние годы довольно широко и успешно используется 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 [101, 16].

1.3 Активная защита от коррозии

При появлении в покрытии трубопровода дефектов предусматривается система катодной защиты трубопроводов, т.н. активная защита от коррозии.

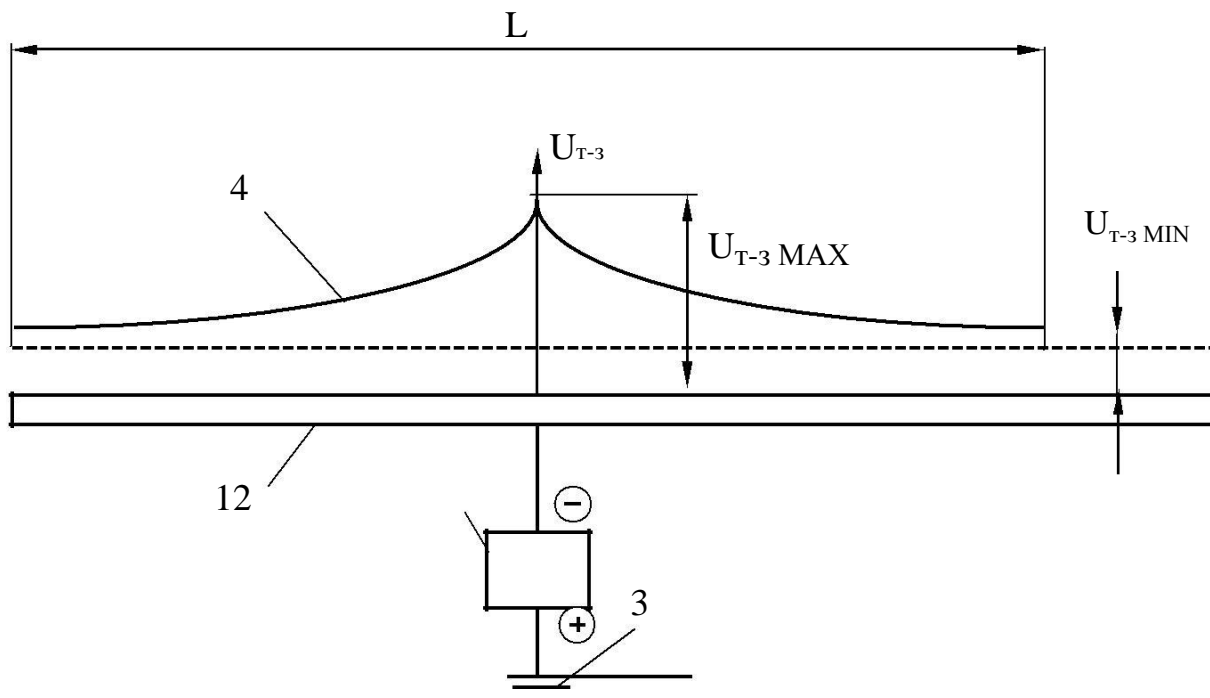
Катодная защита. Сущность катодной защиты заключается в искусственной поляризации трубопровода (катада) таким образом, чтобы его потенциал, по крайней мере, стал равным потенциалу анода коррозионной пары. Это можно сделать, подключив к двухэлектродной (катод – анод) коррозионной паре третий электрод с более отрицательным потенциалом (рисунок 1.2). В результате такой поляризации катада работа коррозионной пары прекращается. Однако это может быть лишь при определенном более отрицательном потенциале и соответствующей силе защитного тока. Защитная поляризация катада может быть осуществлена наложением защитного потенциала от источника постоянного тока или применением в качестве дополнительного анода специальных материалов [5, 11, 12, 22, 38, 40].

Рассмотрим случай поляризации постоянным током. Такая схема поляризации называется катодной защитой трубопровода.

Трубопровод, расположенный в грунте, является катодом по отношению к электролиту, заполняющему в той или иной мере 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) электрохимической 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 U в пределах длины участка L

(труба-грунт). Наибольшее значение U_{T-3} фиксируется обычно напротив анода, т.е. заземления.



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

Рисунок 1.1 – Схема катодной защиты

При катодной защите трубопроводов различают три значения потенциала:

–естественный (стационарный) потенциал металла трубы, существующий до включения защиты;

–наложенный (расчетный) потенциал, дополнительно накладываемый на трубопровод в результате действия защиты;

– защитный (общий)

потенциал сооружения, установившийся после подключения защиты.

Эффективно защитный потенциал может выполнять свое назначение только в том случае, если он не меньше определенного, так называемого, минимального защитного потенциала U_{3min} . Отметим, что смещение защитного

потенциала в область более отрицательных значений не оказывает существенного влияния на коррозию металла. Но при чрезмерном увеличении V по сравнению с U_{3min} между изоляцией и поверхностью металла скапливается водород, выделяющийся в результате катодного процесса. Это может привести к отслоению изоляции ухудшению защитных свойств покрытия. Таким образом, можно сказать, что качество покрытия оказывает существенное влияние на параметры катодной защиты. Чем лучше качество покрытия, тем требуется меньший защитный потенциал, тем большую длину участка L можно защитить от одной станции, и наоборот – чем больше повреждений на изоляционном покрытии, тем меньше длина защищаемого участка L .

Исходя из указанных особенностей, предельные значения защитного потенциала ограничиваются значениями, приведенными в ГОСТ 9.015 – 74.

Таблица 1.1 – Значение потенциалов

Разность потенциалов	Допустимые потенциалы по отношению к электроду сравнения, В	
	водородному	медносульфатному
Минимальная для всех сред	- 0,55	- 0,85
Максимальная для всех сред: - трубопроводы с защитными покрытиями	Минус 0,8	Минус 1,1
- трубопроводы без покрытия	Не ограничивается	

В соответствии с ГОСТ 9.015 – 74 катодная поляризация трубопроводов должна осуществляться таким образом, чтобы создаваемое на всей поверхности этих сооружений значение минимальных поляризационных защитных потенциалов было по отношению к медносульфатному ЭС (по абсолютной величине) не менее - 0,85 В. Значение максимального защитного потенциала для любых сред составляет - 1,1 В. Общий перерыв в катодной поляризации допускается не более 10 суток в году.

На действующих стальных изолированных трубопроводах, не оборудованных специальными контрольно-измерительными пунктами для измерения

поляризационных потенциалов, ГОСТ 9.015–74* допускает осуществлять катодную поляризацию сооружения таким образом, чтобы значения потенциала трубы по отношению к медносульфатному ЭС (включающие поляризационную и омическую составляющие) находились в пределах от $-0,87$ до $-2,5$ В.

Катодную поляризацию подземных металлических сооружений следует осуществлять так, чтобы исключить вредное влияние ее на соседние подземные металлические сооружения. Вредным влиянием катодной поляризации защищаемого сооружения на соседних, металлических сооружений считается: уменьшение по абсолютной величине минимального или увеличение по абсолютной величине максимального защитного потенциала на соседних металлических сооружениях, имеющих катодную поляризацию; появление опасности электрохимической коррозии там, где ранее не требовалось защиты от нее. В случаях, когда при осуществлении катодной поляризации нельзя избежать вредного влияния ее на соседние металлические сооружения, должна осуществляться совместная защита этих сооружений или приниматься меры, устраняющие вредное влияние.

1.4 Электрохимическая защита магистральных газопроводов от коррозии

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 [4].

Электрохимическая защита – метод защиты от коррозии, сущность которого заключается в замедлении коррозии сооружения под действием катодной поляризации при смещении его потенциала в отрицательную сторону под

действием постоянного тока, проходящего через границу раздела «сооружение – окружающая среда».

В настоящее время имеется полная возможность обеспечить достаточно надежно функционирующую электрохимическую защиту, эффективность которой будет возрастать по мере внедрения новых разработок.

Основным критерием защищенности металла от коррозии является потенциал, достигаемый при его катодной поляризации. Особенностью процессов электрохимической защиты является однозначная связь между степенью защиты (снижением скорости коррозии) и потенциалом защищаемой поверхности.

Защитным потенциалом считается потенциал, при котором скорость растворения металла принимает предельно низкое значение, допустимое для данных условий эксплуатации.

Величина защитного потенциала стали зависит от физико-химических свойств коррозионной среды и может изменяться в широких интервалах.

При катодной защите железа и его сплавов следует строго ограничивать величину максимально допустимого защитного потенциала. Превышение максимально допустимого защитного потенциала (по абсолютной величине) оказывает отрицательное воздействие на стальную изолированную поверхность. При потенциале более отрицательном, чем минус 1,05 В относительно медносульфатного электрода, на защищаемой поверхности выделяется водород, который вызывает отслоение изоляционного покрытия и изменяет физические свойства металла.

Минимальный защитный потенциал определяют либо из термодинамических соотношений, определяющих возможность протекания рассматриваемых коррозионных процессов, либо экспериментально – путем непосредственных исследований зависимости скорости коррозии металла в данной среде.

Максимальный потенциал определяют из условий, ограничивающих допустимый уровень поляризации рассматриваемого металлического сооруже-

ния, например, из условий воздействия катодной поляризации на защитное покрытие.

При определении максимально допустимого потенциала для катодной защиты стальной конструкции необходимо учитывать возможные изменения сопротивления окружающей среды в течение всего расчетного времени ее эксплуатации.

Минимальный защитный потенциал может быть определен на основе теории многоэлектродных коррозионных систем. Согласно этой теории, для прекращения коррозии конструкцию необходимо поляризовать до потенциала наиболее отрицательной анодной составляющей ее поверхности [18,24].

Металлы, находящиеся в равновесии с собственными ионами в растворе, называются электродами первого рода. Так как эти электроды обратимо обменивают катионы с раствором, то их потенциалы называют электродными потенциалами, обратимыми (или равновесными) относительно катиона.

Для прекращения коррозии стальной конструкции ее необходимо поляризовать до обратимого потенциала железа в данном электролите. Обратимый потенциал железа в электролитах может быть рассчитан по формуле

$$E_{\text{защ}} = E_{\text{обр}} = E_{Fe}^0 + \frac{RT}{F} \ln a_{Fe^{2+}}, \text{ В}, \quad (1.1)$$

где E_{Fe}^0 – стандартный потенциал железа, R

– газовая постоянная;

T – абсолютная температура;

F – число Фарадея;

$a_{Fe^{2+}}$ – активность ионов железа в при электродном слое электролита. Так как при $pH > 5,5$ взаимодействие ионов железа с гидроксидными ионами приводит к образованию трудно-растворимого гидроксида железа (II), для определения активности ионов железа в предыдущей формуле можно воспользоваться произведением растворимости $Fe(OH)_2$. В этом случае уравнение примет вид

$$E_{защ} = E_{Fe}^0 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{L}{a_{OH^-}^2} = E_{Fe}^0 + \frac{RT}{2F} \left(\ln \frac{L}{K_B} - 2,0 pH \right), \quad (1.2)$$

где $L = a_{Fe^{2+}} a_{OH^-}^2$ - произведение растворимости гидроксида железа ($L = 1,65 \cdot 10^{-15}$);

$K_B = a_{H^+} a_{OH^-}$ - ионное произведение воды ($K_B = 1,008 \cdot 10^{-14}$);

$pH = -\lg a_{H^+}$ - водородный показатель в приэлектродном слое;

a_{OH^-} , a_{H^+} - активность гидроксильных и водородных ионов в приэлектродном слое электролита.

Подставив численные значения входящих в уравнение (3) величин, получим

$$E_{защ} = E_{Fe}^0 = 0,440 - 0,0296 \left(\lg \frac{1,65 \cdot 10^{-15}}{(1,008 \cdot 10^{-14})^2} - 2,0 pH \right) = 0,05 - 0,0592 pH, \quad (1.3)$$

Так как грунт является стабильным не перемешиваемым электролитом, а величина pH в приэлектродном слое электролита при коррозии железа изменяется в интервале от 8,3 до 9,6, то теоретическое значение защитного потенциала стали в грунте колеблется в пределах от минус 0,54 до минус 0,61 В и составляет в среднем минус 0,58 В по отношению к стандартному водородно-му электроду (н.в.э.). Уравнение не учитывает изменение кинетики коррозионного процесса и часто не соответствует экспериментальным данным.

Расчетная формула определения защитного потенциала с применением основных закономерностей кинетики электродных процессов, представляющая собой зависимость скорости электродной реакции от потенциала по уравнению Тафеля, предложена в различных работах [19,32,36].

$$E_{защ} = E_{стац} + b \lg \frac{i_{стац}}{i_{защ}}, \quad В \quad (1.4)$$

где $E_{защ}$ - защитный потенциал, В;

$E_{стац}$ - стационарный потенциал, В;

b - тафелевский коэффициент, который для реакции $Fe = Fe^{2+} + 2e$ равен 0,059;

$i_{стац}$ — токовое выражение скорости коррозии при стационарном потенциале, $E_{стац}$;

$i_{защ}$ — токовое выражение допустимой скорости коррозии при защитном потенциале, $E_{защ}$.

В общем случае уравнение (1.4) представляет собой известную зависимость скорости электродной реакции от потенциала по уравнению Тафеля при замедленной стадии ионизации (или разряда), что является ограничением метода. Кроме этого этот метод не учитывает изменения pH при электродного слоя, а величина $i_{стац}$ может существенно зависеть от различных внешних факторов.

В России, как и за рубежом, принят минимальный защитный потенциал для стальных сооружений, равный минус 0,55 В относительно нормального водородного электрода (н.в.э.) или минус 0,85 В относительно медносульфатного электрода сравнения [24,37 - 40,44,45].

Указанное в технической литературе стандартизированное значение защитного потенциала равно минус 0,85 В относительно медносульфатного электрода сравнения, во многих случаях оказывается завышенным (по абсолютной величине). Если катодную защиту технически грамотно контролируют по поляризационному потенциалу, то завышение минимального защитного потенциала (установлено, что, начиная с некоторого катодного потенциала, скорость коррозии железа и углеродистых сталей перестает зависеть от потенциала) приводит к неоправданному или бесполезному увеличению защитной плотности тока, количества катодных станций, анодных заземлений и так далее [49].

Критерий минимального защитного потенциала отрицательнее потенциала коррозии на 0,1 В применяется с 1969 года [47].

В соответствии с [34] для снижения скорости коррозии газопровода до допустимого значения 10^{-3} мм/год, достаточен катодный сдвиг потенциала на 70-85 мВ [49]. Минимально необходимая величина катодного сдвига потен-

циала на 100 мВ рассматривается как приемлемый общий критерий защищенности стального сооружения катодной поляризацией от подземной коррозии, если потенциал коррозии находится в активной области.

Во всех случаях эффективность действия электрохимического метода защиты можно охарактеризовать степенью защиты P , % [47]

$$P = \frac{W_{кор} - W_{защ}}{W_{кор}} \cdot 100 = \frac{K_{кор} - K_{защ}}{K_{кор}} \cdot 100, \quad (1.5)$$

где $W_{кор}$ – потеря массы металла за определенный период времени с единицы поверхности в условиях самопроизвольной коррозии г/(м²·ч);

$W_{защ}$ – потеря массы металла за определенный интервал времени с единицы поверхности при применении электрохимической защиты г/(м²·ч);

$K_{кор}$ – скорость коррозии при стационарном потенциале $E_{стац}$, мм/год;

K_k – допустимая скорость коррозии при катодной защите, мм/год.

Если в качестве допустимой скорости коррозии принять величину потери массы 0,001 г/(м²·ч) [14,47], то необходимую степень защиты можно найти из следующей формулы:

$$P = \frac{K - 0,001}{K} \cdot 100, \quad (1.6)$$

где K – скорость коррозии, мм/год.

Соответствующую данному состоянию защитную плотность тока можно рассчитать по формуле:

$$i_{защ} = \frac{K_{кор} \cdot \sqrt{100 - P}}{100 - P}, \text{ А/м}^2, \quad (1.7)$$

где $i_{кор} = 0,96 K$ – токовое выражение скорости коррозионного процесса. Если

K определена в г/(м²·ч), то плотность тока коррозии и защитная плотность тока выражаются в А/м². Заданной

плотности тока будет соответст-

Вовать определенное смещение потенциала

$$\Delta E = \frac{2,303RT}{F} \lg \frac{100}{100 - P}, \text{ В.} \quad (1.8)$$

В соответствии с данными [14,29] в таблице 2 и на рисунке 8 приведены значения параметров катодной защиты в зависимости от скорости коррозии стали.

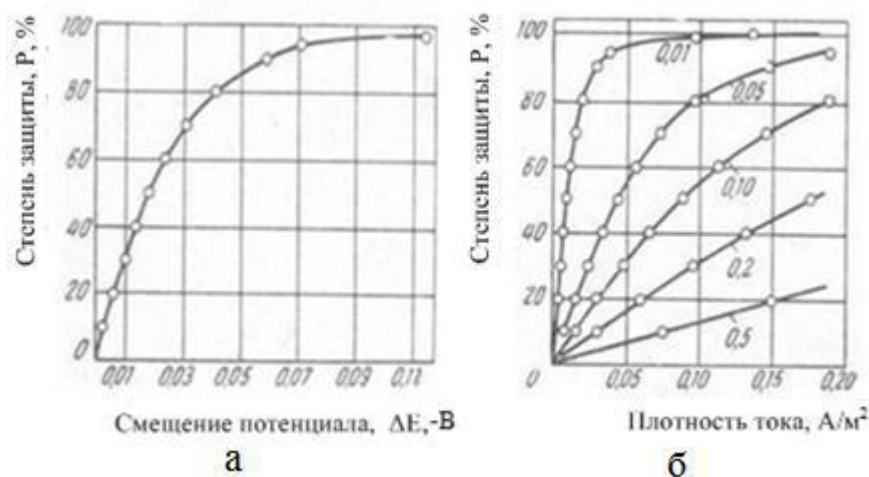
Практика эксплуатации показывает, что скорость коррозии стали в высокоомном электролите составляет, примерно, от 0,02 до 0,03 мм/год [28]. В соответствии с таблицей 2 указанной скорости коррозии соответствует величина защитной плотности тока, находящаяся в пределах от 0,085 до 0,157 А/м² и величина смещения потенциала катодной поляризации от стационарного потенциала стали, которая находится в пределах от 0,069 до 0,085 В. Указанные параметры защиты соответствуют степени защиты равной 95 – 96,7 %. Данное смещение достигается непосредственно в момент включения тока, а в дальнейшем потенциал конструкции непрерывно смещается в отрицательную сторону, что обусловлено концентрационной поляризацией по кислороду [14].

Таблица 1.2 – Параметры катодной защиты стали в зависимости от скорости коррозии

Скорость коррозии, мм/год	Степень защиты, %	Защитная плотность тока, А/м ²	Смещение потенциала, В
0,005	80,00	0,010	0,040
0,010	90,00	0,029	0,058
0,020	95,00	0,085	0,069
0,030	96,70	0,157	0,085
0,050	98,00	0,336	0,098
0,100	99,00	0,960	0,116
0,500	99,80	10,650	0,156
1,000	99,90	30,400	0,174
5,000	99,98	337,000	0,214

Одним из критериев защиты авторами работы [5] принята величина минимального защитного потенциала без омической составляющей, значения которой находятся в пределах от минус 0,65 до минус 0,95 В относительно непо-

ляризующегося медносульфатного электрода сравнения. При этом, в случае повреждения участка газопровода коррозией более 10 % толщины стенки тру-бы, для замедления коррозионных процессов, минимальные защитные потенциалы должны быть на 0,05 В отрицательнее минимальных значений [4].



а – смещение от стационарного значения потенциала; б - плотность тока катодной поляризации

Рисунок 1.2 – Зависимость изменения степени защиты (Р, %) и скорости коррозии стали $\Gamma/(m^2 \cdot ч)$ от величины смещения потенциала от стационарного значения (а) и плотности тока катодной поляризации (б)

При этом, авторами работы [48] установлено (рисунок 1.2), что степень защиты от коррозии равной 98 % достигается смещением потенциала катод-ной защиты на 0,1 В, или при плотности тока около $0,10 \text{ А/м}^2$ (б).

Е.Я. Люблинский [48] отмечает, что практически полная защита стали от коррозии достигается при плотности тока равной около $0,12 \text{ А/м}^2$.

Авторы [49] в результате проведенных исследований скорости коррозии стали в различных грунтах, с различной аэрацией, при варьировании влагосо-держания в течение 30 суток, в качестве критерия достаточности катодной защиты приняли, что средняя скорость коррозии не должна превышать $0,025 \text{ мм/год}$ при отсутствии питтингов на поверхности стали. При этом, удельное электрическое сопротивление грунта меняли от 0,8 до $8000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

При положительных температурах и отсутствии сульфатвосстанавливающих бактерий защитные величины составили от 50 до 100 мВ. Показано, что в таких широко распространенных условиях электрохимическая защита стали при смещении потенциала катодной поляризации от стационарного значения на 100 мВ столь же эффективна, как и при потенциале, равным минус 0,85 В от-носительно медносульфатного электрода, но намного более целесообразна с технико-экономической точки зрения.

В целом же в литературе отсутствуют данные, позволяющие определить параметры электрохимической защиты стали в средах, характеризующих все разнообразие условий эксплуатации магистральных газопроводов.

1.5 Методы контроля защищенности магистральных газопроводов от коррозии

Для повышения эффективности электрохимической защиты магистральных газопроводов от коррозии необходимо в процессе эксплуатации осуществлять контроль защищенности от коррозии [3,9,11,13], причем результаты контроля должны отражать действительное состояние противокоррозионной защиты. В тоже время авторы работ [4, 9,10] утверждают, что неточности контроля при эффективной противокоррозионной защите не всегда приводят к коррозионным отказам.

Основным критерием оценки уровня защищенности стального подземного сооружения служит потенциал катодной поляризации [4].

Метод контроля защищенности по потенциалу заключается в контроле потенциала стального подземного сооружения и поддержании его в регламентированных нормативными документами пределах.

В настоящее время существует множество методов контроля потенциала катоднозащищаемого сооружения [4].

Применяемые методы

определения защищенности стальных подземных сооружений, как в нашей стране, так и за рубежом рассмотрим 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 потенциала между стальным сооружением и неполяризуемым электродом сравнения, находящимся в период проведения измерения над измеряемым объектом [1,56]. При осуществлении измерения таким методом, результаты измерения в значительной степени искажены. Искажение результатов измерений происходит по причине наличия омической составляющей в величине потенциала и приводит к значительным отклонениям потенциала от истинного значения. Кинетика электродных процессов и защищенность от коррозии стальных подземных сооружений характеризуется поляризационным (электрохимическим) потенциалом сооружения. Омическая составляющая потенциала IR – погрешность определяется по закону Ома произведением величины сопротивления электролита на величину тока. В реальных условиях, при измерении потенциала стального подземного сооружения, электрод сравнения располагают на различном расстоянии от поверхности сооружения (от нескольких сантиметров до нескольких метров). Если неполяризующийся электрод сравнения расположен на поверхности земли, то измеряемая разность потенциалов «труба - земля», содержит кроме величи-

ны поляризационного потенциала, еще
и величину падения напряжения между электродом сравнения и металлом трубы.

$$E_{изм} = E_{пол} + E_{ом} + IR_{г}, \quad (1.9)$$

где $E_{изм}$ – измеряемая величина потенциала, В;

$E_{пол}$ – поляризационный потенциал, В;

$E_{ом} = IR$ – омическая составляющая потенциала, В.

Омическая составляющая потенциала по знаку совпадает с поляризационным потенциалом, по этой причине измеренная прибором величина потенциала всегда будет больше поляризационного потенциала по абсолютной величине. Эта причина приводит к ложным выводам о защищенности подземного сооружения.

Омическая составляющая потенциала складывается из:

- падения напряжения в грунте, которое зависит от сопротивления грунта в точке измерения потенциала;

- падения напряжения в изоляционном покрытии, зависящем от качества изоляции и, следовательно, от сопротивления изоляции;

- падения напряжения в электроде сравнения, которое зависит от сопротивления электрода сравнения;

- поляризационного падения потенциала, зависящего от сопротивления металла трубы, удаления от точки дренажа и от сопротивления растеканию тока анодного заземлителя.

Величина омической составляющей зависит от многих факторов и интегрально учесть ее невозможно, так как она имеет максимальное значение в точке дренажа и минимальное значение в конце зоны защиты. Кроме того, ее величина определяется удельным электрическим сопротивлением грунта, размерами сквозных дефектов в изоляционном покрытии и их концентрации на поверхности контролируемого подземного металлического сооружения. Также, огромное влияние оказывают блуждающие токи, как от источников постоянного, так и переменного тока. Все эти факторы, влияющие на потенциал, являются случайными величинами в общей корродирующей системе, в которой одновременно протекает множество различных по своей природе процессов, не поддаю-

щихся разграничению. По этой причине контроль противокоррозионной защиты не может быть интегральным, усредняющим. Метод оценки эффективности защиты протяженных стальных подземных сооружений должен учитывать его отдельные точки, в которых больше всего проявляется коррозионное воздействие окружающей среды. Следовательно, необходим дифференциальный подход к оценке эффективности защиты от коррозии.

Таким образом, оценка эффективности защиты стального подземного сооружения от коррозии по величине потенциала с омической составляющей является недостоверной и не отражает истинную картину коррозионного состояния сооружения [58].

Для получения достоверных сведений о защищенности стального подземного сооружения необходимо при измерении потенциала, исключить омическую составляющую и измерять поляризационный потенциал сооружения, то есть потенциал без омической составляющей.

В лабораторных условиях измерение поляризационного потенциала не вызывает особых затруднений у специалистов, исследующих коррозионные процессы, происходящие на сталях в различных средах. Наибольшую трудность представляет измерение поляризационного потенциала на стальных подземных сооружениях в полевых (трассовых) условиях.

Рассмотрим метод выключения катодной поляризации. Используемый метод измерения основан на различии поведения омической и поляризационной составляющих потенциала во времени. При измерениях с помощью выключателя разрывают электрическую цепь установок катодной защиты (УКЗ). Измерение напряжения регистрируют записывающим постоянным напряжением прибором [57]. При отключении внешнего электрического поля, ток в грунте,

за счет источника тока, исчезает за короткое время, определяемое скоростью распространения электромагнитного поля (около 10^{-7} сек). Поляризация стального подземного сооружения осуществляется через точку дренажа и изменение потенциала вдоль трубопровода от точки дренажа осуществляется по экспоненте. По различным причинам (изменение сопротивления изоляции и удельного со-

противления грунта и др.) изменение потенциала вдоль трубопровода будет отличаться от экспоненциальной кривой. Потенциалы на границе раздела «металл - электролит» вдоль трубопровода могут быть различными. При исчезновении внешнего электрического поля происходит выравнивание падения напряжения в двойном электрическом слое по длине трубопровода. Этот уравнивающий ток замыкается через трубопровод, имеющий низкое продольное электрическое сопротивление. Интервал времени, в течение которого протекают уравнивающие токи, определяется многими причинами – диаметр трубопровода и его протяженность, состояние изоляционного покрытия, величина поляризующего тока, время предварительной поляризации, удельное сопротивление грунта и прочее.

Зафиксировать и оценить этот интервал времени достаточно сложно. Аналитических выражений, описывающих протекающие процессы во времени не найдено и в настоящее время пользуются экспериментальными данными или полуэмпирическими формулами [56].

При использовании метода отключения тока защиты важно, чтобы все средства катодной защиты, оказывающие влияние на защиту участка трубопровода, на котором проводится измерение, отключались синхронно. Для этой цели применяют специальные прерыватели тока катодной защиты, синхронизированные по времени, либо отключение воздушной вдольтрассовой линии электропитания, к которой подключены все установки катодной защиты, исследуемого участка трубопровода. В местах измерения потенциала устанавливают записывающие потенциал устройства, которые до отключения тока фиксируют разность потенциалов «труба - земля», в момент отключения – спад омической составляющей и дальнейшую деполяризацию трубы. Участки трубопроводов, расположенных

в различных грунтовых условиях и на различном удалении от точек дренажа поляризуются не одинаково [59]. Величины поляризационного потенциала определяются путем дешифрования полученных диаграмм.

При наличии единичного дефекта в изоляционном покрытии протяженного стального подземного сооружения, погрешность, вызываемую уравнительными токами можно устранить, измеряя градиенты потенциала относи-

тельно двух электродов сравнения. Один электрод располагают над дефектом, а другой на расстоянии, равном глубине укладки трубопровода перпендикулярно оси трубопровода [60].

Метод измерения поляризационного потенциала отключением источника катодной поляризации вносит в результаты измерения большую погрешность. По этой причине этот метод не всегда применим.

Таким образом, измерение поляризационного потенциала методом выключения тока защиты является довольно сложным в аппаратном и методическом отношении методом, так как он требует наличия большого количества прерывателей тока и отключения установок катодной защиты (УКЗ) одновременно, что не всегда выполнимо. Кроме того, наличие перетекания токов вдоль по трубопроводу после отключения УКЗ, вносят погрешности в измерения. Причем, чем ближе проводятся измерения к точке дренажа, тем выше ошибка в результатах измерения.

При этом, метод выключения УКЗ не применим в условиях влияния блуждающих токов, при применении протекторной защиты, при наличии «стационарных» перемычек между рядом расположенными стальными подземными сооружениями (крановые соединения) при многониточном исполнении уложенных в один коридор объектов.

Наибольшее распространение измерения поляризационного потенциала получил метод отключения тока поляризации от датчика потенциала, постоянно подключенного к катодно-защищаемому трубопроводу. Метод заключается в измерении потенциала катодной защиты в момент отключения датчика потенциала от стального подземного сооружения. В различных источниках датчик потенциала может называться вспомогательным электродом или электродом имитатором дефекта [70].

Рассматриваемый метод
не требует отключений системы электрохимической защиты стального подземного сооружения.

Следует отметить,
что потенциал стального подземного сооружения представляет некую среднюю величину значений потенциалов в местах сквоз-

ных дефектов изоляции вблизи точки измерения. Датчик потенциала имитирует сквозной дефект в изоляции стального подземного сооружения, и поскольку он находится в тех же условиях, что и стальное подземное сооружение, измеренный на нем потенциал, отвечает уровню катодной поляризации сооружения в месте сквозного дефекта изоляционного покрытия.

Измерения осуществляют приборами с коммутацией тока, такими как ПКИ-02, 43313.1, ПКО и другие. Эти приборы совмещают в себе вольтметр и коммутирующее устройство. Они позволяют определять потенциал с омической составляющей и поляризационный потенциал, но показания приборов (по разным причинам) не всегда соответствуют действительным значениям поляризационного потенциала. При проведении измерений по этому методу в измерительную величину всегда входит падение напряжения между электродом сравнения и датчиком потенциала. Отсюда следует, что необходимо стремиться к максимальному приближению электрода сравнения к датчику потенциала. Очевидно,

что применение метода отключения датчика потенциала ограничивается высоким удельным электрическим сопротивлением грунта в точке проведения измерения и воздействием блуждающих токов на стальное подземное сооружение. В грунтах с высоким удельным электрическим сопротивлением ввиду слабого тока, протекающего через датчик потенциала, поляризация его протекает медленно, и получить достоверные данные при измерении практически невозможно. Кроме того, наличие переменной составляющей потенциала «труба - земля» вносит существенную погрешность в измерения. [71].

Таким образом, метод отключения тока поляризации датчика потенциала, не применим в грунтах с удельным электрическим сопротивлением свыше 500 Ом·м, в зонах действия блуждающих токов (постоянного и переменного тока) и при наличии переменной составляющей в токе катодной защиты.

Наиболее достоверным методом измерения поляризационного потенциала на стальном подземном сооружении, хотя и очень трудоемким, является ме-

тод измерения с помощью капилляра Габера – Луггина. Этот метод используют при тестировании различных методов измерения с целью определения наиболее

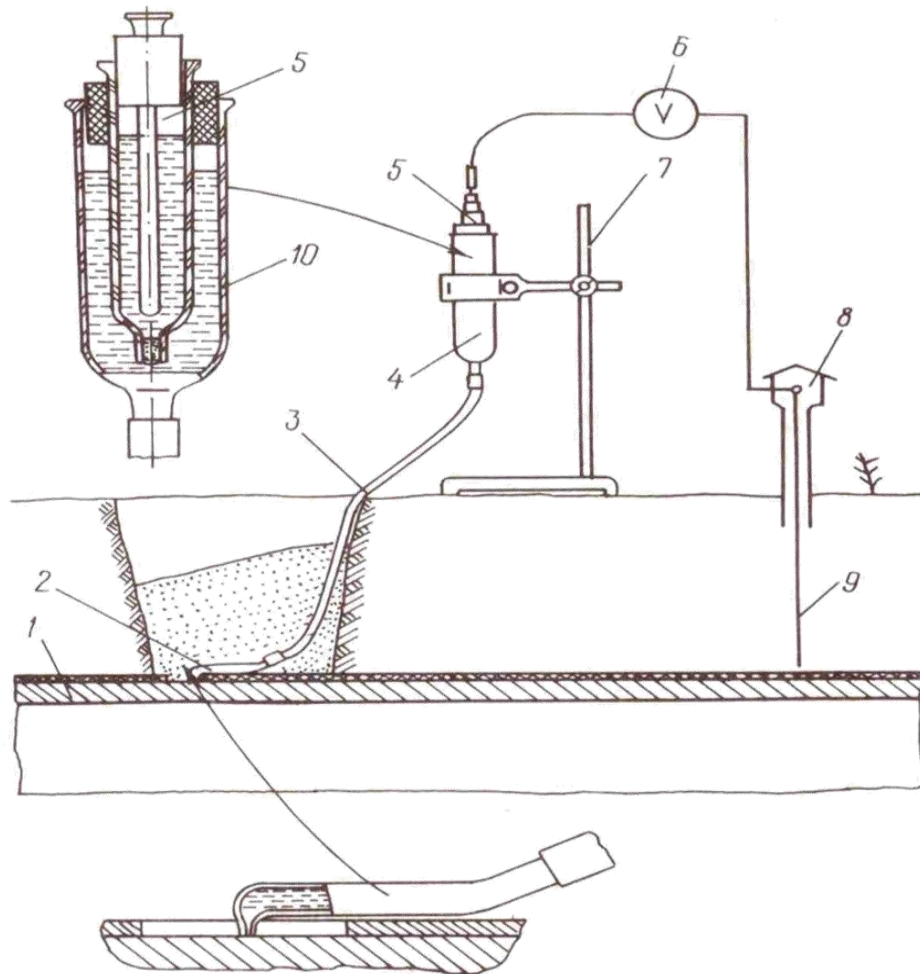
корректного метода для измерения поляризационного потенциала на обследуемом участке. Схема измерения поляризационного потенциала с применением капилляра Габера – Луггина представлена на рисунке 9.

Для применения капилляра Габера – Луггина при прямых измерениях на стальных подземных сооружениях отрывают шурф до верхней образующей трубы, снимают изоляционное покрытие (наносит искусственный дефект в изоляционном покрытии) на площади поверхности равной площади датчика потенциала (625 мм^2). Устанавливают капилляр на поверхности дефекта трубопровода, соединяют его шлангом с воронкой и заполняют 3% водным раствором NaCl.

Обратным грунтом (вынутым из шурфа) засыпают дефект вместе с капилляром, а через воронку в раствор помещают электрод сравнения. Измерения проводят вольтметром с входным сопротивлением не менее 10 МОм через 10 – 12 часов после засыпки шурфа. Рядом с шурфом размещают устройства подлежащие тестированию. Показания тестируемых устройств, которые наиболее близки к показаниям, полученным при измерении с применением капилляра Габера – Луггина считают наиболее применимыми для проведения измерений на исследуемом участке стального подземного сооружения [72].

Практика эксплуатации показывает, что метод применения капилляра Габера - Луггина обеспечивает высокую стабильность и точность показаний поляризационного потенциала на стальном подземном сооружении. Однако данный метод требует больших трудозатрат при монтаже и подготовке к проведению измерений. Кроме того, происходит нарушение изоляционного покрытия на исследуемом стальном подземном сооружении, которое после проведения измерений необходимо восстановить.

Таким образом, в соответствии с утверждением, сделанном в работе [10], можно согласиться с тем, что идеального контроля не бывает, но к этому необходимо стремиться.



1 – трубопровод; 2 – капилляр Габера - Луггина; 3 – шланг; 4 – воронка; 5 – электрод сравнения; 6 – вольтметр; 7 – штатив; 8 – контрольно-измерительный пункт; 9 – катодный вывод; 10 – воронка с 3% водным раствором NaCl

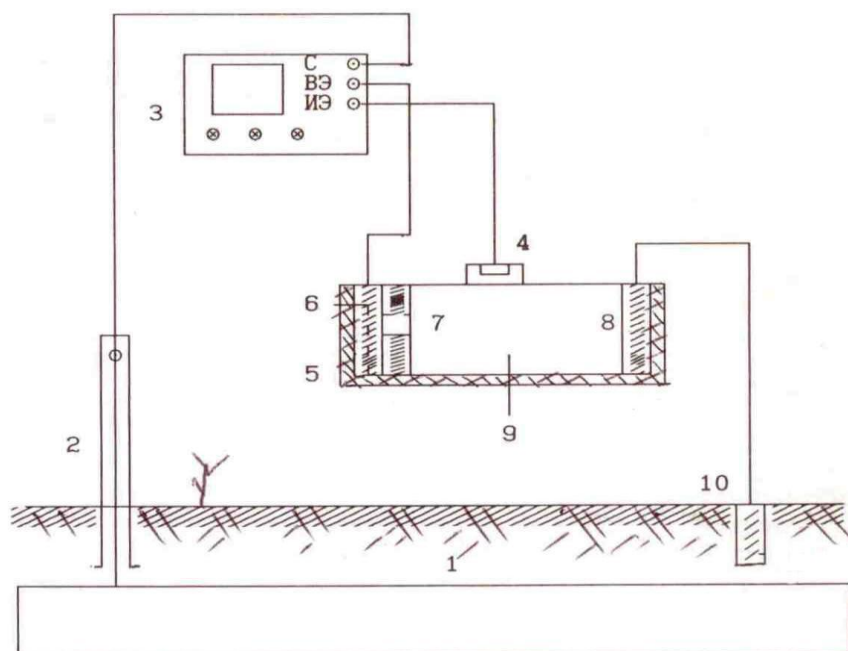
Рисунок 1.3 – Измерение потенциала с помощью капилляра Габера – Луггина-

на

На участках воздействия блуждающих токов и удельного электрического сопротивления, не превышающего 1000 Ом м применяют метод определения поляризационного потенциала с применением электрохимической ячейки.

При этом методе используется электрохимическая ячейка, представляющая собой диэлектрическую емкость в которой размещается вспомогательный электрод (ВЭ), электрод сравнения и дополнительный анод (рисунок 10).

Электрохимическая ячейка соединяется с измерительным прибором (типа 43312, который работает в режиме поляризационного потенциала), через коммутатор прибора с трубопроводом и с анодным заземлителем. При наличии нескольких типов грунтов на исследуемом участке, необходимо иметь достаточное количество ячеек (для каждого типа грунта свою ячейку). Заполнение ячейки осуществляется грунтом, непосредственно вынутым из шурфа. При заполнении ячейки грунтом необходимо уплотнять грунт послойно и принимать меры по устранению высыхания грунта. После того как произойдет стабилизация индикаторной шкалы прибора, результаты измерения фиксируют. В зоне действия блуждающих токов, стабилизации показаний шкалы прибора не происходит и рекомендуется снимать показания прибора с определенной периодичностью, через несколько минут после подключения ячейки и включения прибора в работу. Полученные результаты усредняют.



1 – грунт; 2 – контрольно-измерительный пункт; 3 – измерительный прибор; 4 – электрод сравнения; 5 – ячейка; 6 – вспомогательный электрод; 7 – дефект в изоляционном покрытии; 8 – анод в ячейке; 9 – грунт в ячейке; 10 – временный анод в грунте

Рисунок 1.4 – Определение поляризационного потенциала с применением электрохимической ячейки

Таким образом, при определении поляризационного потенциала необходимо наличие специальных ячеек и специального измерительного прибора. Кроме того, уплотняя в ячейке грунт, взятый из шурфа, происходит обогащение его кислородом из атмосферного воздуха и изменение влажности, что приводит к искажению получаемых результатов.

В основе данного метода контроля защищенности по смещению потенциала лежит контроль защищенности стального сооружения по разности потенциалов между катодно-защищаемым трубопроводом и вспомогательным электродом, не подключенным к трубопроводу, но находящимся вблизи стенки трубы. Потенциал при этом, контролируется с применением электрода сравнения, по возможности максимально приближенного к вспомогательному электроду. Для применения данного метода в условиях укладки трубопровода в грунт, необходимым условием является измерение потенциала трубопровода и потенциала вспомогательного электрода с минимальной погрешностью, то есть, потенциалов без омической составляющей. В связи с этим, данный метод не применим в зонах действия блуждающих токов, в высокоомных и многолетне-мерзлых грунтах. Кроме того, вспомогательный электрод должен находиться строго в тех же условиях, что и трубопровод, что в условиях грунта трудновыполнимо.

Таким образом, методы контроля эффективности электрохимической защиты по поляризационному потенциалу, исключаящие омическую составляющую, являются наиболее достоверными. При этом все известные методы имеют ряд недостатков связанных при их применении с повышенной трудоемкостью: отключением системы электрохимической защиты, нарушением изоляционного покрытия на трубопроводе. Кроме того, они не унифицированы

по возможному их применению во всех условиях эксплуатации магистральных газопроводов.

В системах контроля эффективности электрохимической защиты магистральных газопроводов от коррозии применяют электроды сравнения, относительно которых измеряют потенциалы стали. При этом, контроль потенциала может осуществляться как при разовых так и при длительных измерениях.

1.6 Обзор существующих методик оптимизации работы средств электрохимической защиты

Поле токов катодной защиты в условиях коммуникаций сложной конфигурации весьма неоднородно, поэтому невозможно получить аналитическую зависимость изменения разности потенциалов какого-либо участка коммуникаций от координат этого участка и от величины токов, стекающих с анодных заземлений. В связи с этим, коммуникации промплощадки рассматриваются как система или набор точек, в которых выполняются измерения потенциалов. В этом случае, при фиксированной системе анодных заземлений, задача определения параметров ЭХЗ сводится к нахождению зависимостей потенциалов каждой точки от величины токов стекающих с анодных заземлений. Эта задача решается с применением методов регрессионного анализа.

Результаты исследований проведенных на различных площадках, расположенных в различных почвенно-климатических условиях показали, что эти зависимости адекватно и с высокой предсказательной способностью, описываются системой линейных уравнений [81]:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= A_{01} + A_{11} I_1 + A_{21} I_2 + \dots + A_{n1} I_n; \\ U_2 &= A_{02} + A_{12} I_1 + A_{22} I_2 + \dots + A_{n2} I_n; \\ &= A_{0k} + A_{1k} I_1 + A_{2k} I_2 + \dots + A_{nk} I_n; \end{aligned} \right\} \quad (1.9)$$

где U_i - потенциал i -ой точки промплощадки, $i = 1; 2; \dots; k$; I_j - ток j -ой станции катодной защиты, $j = 1; 2; \dots; n$.

A_{nk} - коэффициенты, определяемые методом наименьших квадратов. Система функций (1.9) для k шт. точек, репрезентативно представляющих промплощадку и n шт. СКЗ характеризует параметры ЭХЗ коммуникаций

конкретной промплощадки и позволяет решать задачи регулирования токов УКЗ

с определением оптимального режима. Задача определения оптимальных режимов может быть сформулирована следующим образом:

Определить такие $I_1; I_2; \dots; I_n$, которые, при выполнении условий:

$$\begin{aligned} U_{\max 1} &\geq A_{01} + A_{11} I_1 + A_{21} I_2 + \dots + A_{n1} I_n \geq U_{\min 1}; \\ U_{\max 2} &\geq A_{02} + A_{12} I_1 + A_{22} I_2 + \dots + A_{n2} I_n \geq U_{\min 2}; \\ U_{\max k} &\geq A_{0k} + A_{1k} I_1 + A_{2k} I_2 + \dots + A_{nk} I_n \geq U_{\min k}; \end{aligned} \quad (1.10)$$

минимизируют уравнение:

$$F = I_1 R_1 + I_2 R_2 + \dots + I_n R_n$$

где I_j - ток j -ой УКЗ;

R_i - сопротивление внешней цепи i -ой УКЗ;

A_{ij} - коэффициенты из системы (1.9);

$U_{\min j}; U_{\max j}$ - максимально допустимые и минимальные защитные потенциалы j -ой точки, соответственно.

Физический смысл сформулированной задачи сводится к следующему: Определить такие токовые режимы работ УКЗ, при которых будет обеспечена полная защищенность всех коммуникаций ПП без перезащиты, при мини-мальном расходе на это электроэнергии.

Описанная задача соответствует канонической форме задачи математического программирования, она всегда имеет решение при достаточно больших C_j и отсутствии ограничений.

Исследования коэффициентов A_{ij} системы (1.9) показывает, что в пределах одной конкретной промплощадки коэффициенты A_{ij} , с достаточной

для инженерных нужд точностью, являются функцией расстояния от каждой точки до анодного заземления (при схеме защиты с сосредоточенными анодным заземлителем). При этом определено, что наиболее подходящим видом аппроксимации является степенная функция, вида:

$$A_{ij} = M (d_{ij}) \quad (1.11)$$

где A_{ij} - коэффициенты из системы (1.9),

d_{ij} - расстояние от i -ой точки до j -го анодного заземления;

M_j - коэффициенты определяемые методом наименьших квадратов.

С применением рассчитанных M_j - коэффициентов можно решить ряд задач связанных с определением оптимального местоположения средств ЭХЗ (при схеме защиты с сосредоточенными АЗ) и управлением системы защиты.

Задача определения оптимального режима СКЗ с обеспечением полной защиты коммуникаций ПП и минимальным расходом электроэнергии сводит-ся к решению задачи (1.10) со следующими верхними ограничениями по току:

$$C_j = \min \left\{ \sqrt{\frac{W_j}{R_j}} ; \frac{U_j}{R_j} ; I_j \right\}, \quad (1.12)$$

где W - номинальная мощность преобразователя СКЗ;

U ; I - максимальные напряжение и ток преобразователя СКЗ;

R - сопротивление внешней цепи УКЗ.

Задача определения текущей защищенности и выявления незащищенных участков коммуникаций определяется подстановкой в систему (1.9) значений текущих токов СКЗ и расчетом потенциалов каждой точки; по результатам этих расчетов можно определить незащищенные участки коммуникаций или участки, потенциалы которых оказываются наиболее положительными и, следовательно, наиболее коррозионно-опасными.

Согласно существующей методики, для каждой точки измерения определяются коэффициенты A_{nk} . Коэффициенты A_{0k} численно равны собственному потенциалу при выключении всех влияющих станций и деполяризации потенциала. Коэффициенты A_{0k} 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).

Далее включается одна из станций, например №1. Ступенчато повышают силу выходного тока на станции катодной защиты (на рисунке 1.5 показан пример с шагом 0,5 А) и определяют потенциал в i -той точке.

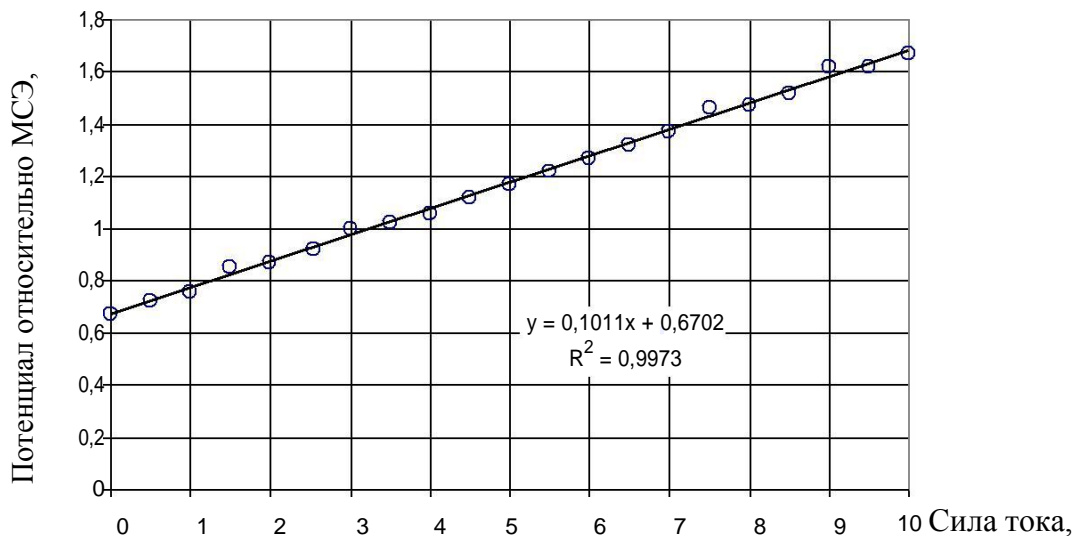


Рисунок 1.5 – График изменения потенциала при повышении силы защитного тока

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

$$U_1 = 0,1011I_1 + 0,6702. (1.13)$$

Таким образом, данными измерениями установлено что для первого уравнения системы (1.9) $A_{0I}=0,6702$ В, $A_{1I}=0,1011$. Аналогичным образом устанавливаются все последующие коэффициенты уравнения.

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 С, $U_i \in (-1,05; -2,5)$ В. После чего подбирают силы токов на каждой из станций защиты, которые удовлетворяют условию $U_i \in (-1,05; -2,5)$ В.

Для анализа распределения тока в сетях произвольной конфигурации применяют различные методы компьютерного моделирования. Газопровод рассматривают, как множество элементов с дискретно заданными параметрами, постоянными в пределах каждого участка, и описывают связи между от-

дельными элементами. Расчет распределения тока и потенциала в сети сводится

к решению системы уравнений, число которых соответствует числу элементарных участков [15]. Так, в комплексе программ АРМ ЭХЗ-5 для решения подобной системы уравнений использованы принципы матричной алгебры.

В последнее время получил распространение метод объектно-ориентированного программирования (ООП), позволяющий описывать сложные системы из набора взаимно подчиненных объектов. Каждый объект функционально автономен в своем поведении и способен реагировать определенным образом на "внутренние" и "внешние" события, возникающие при работе программы. По аналогии с физическими моделями процесса, объектно-ориентированная модель строится из набора объектов-кирпичиков, однако при этом сохраняются все преимущества численных методов расчета. Этот принцип используют при разработке пакета «Underground».

Для моделирования разветвленной сети газопроводов произвольной структуры в пакете «Underground» принята следующая иерархия объектов: "система" - "линия" - "узел".

Старшим в иерархии является объект "система", включающий в себя набор объектов "линия", которые моделируют отдельные нитки газопровода. Объект "линия" состоит из комбинации объектов "узел", описывающих поведение отдельных участков газопровода, включая точки дренажа тока. "Система" является "дирижером", согласующим взаимодействие всех объектов, но не вмешивающимся в алгоритмы их функционирования.

Для моделирования участка газопровода с несколькими точками дренажа тока в объекте "система" программно реализован принцип суперпозиции. Для каждой точки дренажа производится независимый расчет распределения тока. Затем полученные результаты суммируются для каждого элементарного участка сети - "узел".

С точки зрения электротехники, газопровод с катодной защитой может быть представлен, как проводник с продольной утечкой тока в токопроводя-

щую среду (грунт).

В объекте "линия" реализован алгоритм моделирования этого процесса.

Для каждого элементарного участка эквивалентной схемы "линии" (рисунок 1.10) ток в теле элемента обозначим $I_{n, k}$, а ток утечки через этот элемент $I_{y, k}$.

Тогда для суммарного защитного тока I , подведенного в точке дренажа можно записать:

$$I = \sum_{k=1}^n I_{y, k} \quad (1.14)$$

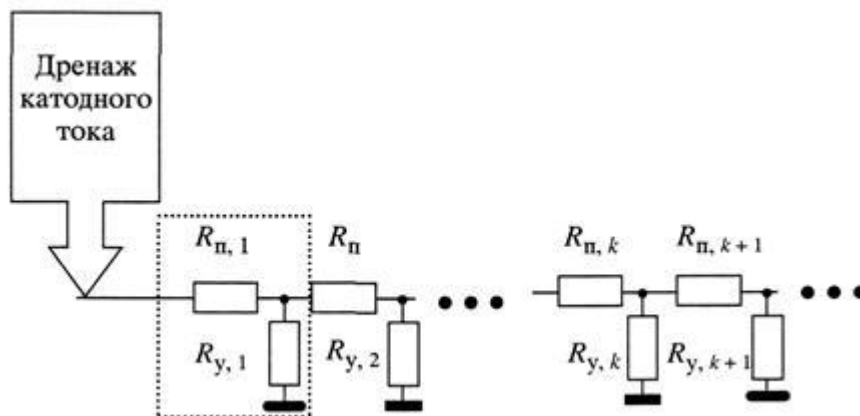


Рисунок 1.6 – Эквивалентная электрическая схема проводника с утечкой тока по длине. Пунктирной рамкой выделен элементарный участок, соответствующий объекту "узел". R_n – продольное сопротивление тела элементарного участка трубы, R_y – сопротивление утечки для элементарного участка

$$I_{y, n} = I_{n, k} - I_{n, k+1} \quad (1.15)$$

$$\sum_{k=1}^n (I_{n, k} - I_{n, k+1}) = \sum_{k=1}^n I_{y, k} = \sum_{k=1}^n I_{y, k} \quad (1.16)$$

Здесь U – потенциал точки дренажа катодного тока относительно земли. Применительно к реальному газопроводу это можно рассматривать, как потенциал относительно "далекой земли". Если принять во внимание полуэмпи-

рическую формулу, учитывающую влияния поля близко расположенных анодов [7], то уравнение (1.16) получит вид:

$$\sum_{i=1}^k (I_{n,i} \kappa_{n,i} + I_{y,k} \kappa_{y,k}) U_{a,k} = U, \quad (1.17)$$

где $U_{a,k}$ - потенциал земли в точке k , вызванный током анодного заземления.

Таким образом, для моделирования объекта "линия" необходимо чтобы каждый составляющий ее объект "узел" возвращал два параметра: I_n и I_y , алгоритм расчета которых находится полностью в компетенции последнего. При этом "узел" может как соответствовать элементарному участку газопровода с определенным набором свойств (габариты, изоляция, поляризация характеристика, грунт и т.п.), так и представлять ссылку на дочернюю "линию", которая также может иметь произвольное число ответвлений.

Несложно заметить, что 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. Очевидно, что согласно (1) потенциал U_1 определяется сложением потенциала от действия первой станции $A_{11}I_1$, второй $A_{21}I_2$ и т.д.

2. Линейная зависимость потенциала от силы тока.

3. На зависимости потенциала от силы тока не предполагается наличие точек-экстремумов, по аналогии с кривой «усилие растяжения - деформация», поэтому не нормируется рациональный диапазон применения методики.

4. Не учитывается влияние на распределения потенциала состояния изоляционного покрытия.

5. Априори заложена неизменность в процессе эксплуатации параметров среды (удельного электрического сопротивления грунта) и характеристик анодных заземлений (сопротивления растеканию анодных заземлителей).

6. Не учитывается возможность натекания тока с других сооружений, так и стекания его на другие сооружения.

Предлагается совершенствование существующей методики регулирования режимов работы средств ЭХЗ, включая выполнение следующих мероприятий:

1. Определение положения подземных сооружений и анодных заземлений.
2. Анализ измерения потенциала трубопроводов.
3. Оценка состояния изоляции.
4. Анализ наличия источников сторонних (блуждающих) токов.
5. Оценка свойств грунта.
6. Локализация токопроводящих перемычек.
7. Восстановление токопроводящих перемычек.

Очевидно, что в ряде случаев регулированием режимов ЭХЗ не удастся добиться соответствия потенциала требованиям ГОСТ 51164-98. В этой связи предлагается кроме простого регулирования применение комплекса мер (перечислено по степени трудоемкости их реализации): расчет необходимых выходных параметров и регулирование режимов работы станций защиты; перенос анодных или защитных заземлений; установка дополнительных экранов или анодов; установка или удаление перемычек; ремонт изоляции трубопровода.

1.7 Выводы

1. На примерах 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, т.к. на него влияет большое количество не учитываемых факторов.

2. Задача оптимизации может быть решена только сбором данных на объекте исследования. В этой связи рассмотрены основные принципы и расчетные зависимости оптимизации работы средств ЭХЗ трубопроводов промышленных площадок.

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 и характеристик анодных заземлений, не учитывается возможность натекания тока с других сооружений, так и стекания его на другие сооружения.

4. Предложена структурная схема реализации комплексной методики оптимизации ЭХЗ трубопроводов ПП включающая выполнение трех этапов: проведение лабораторных исследований с получением эмпирических зависимостей на моделях; анализ данных об объекте исследования; разработка и реализация комплекса мероприятий по оптимизации работы средств ЭХЗ.

5. Установлено, что разработанные методы измерения потенциала трубопроводов не обеспечивают требуемой точности измерений в условиях одиночных дефектов изоляционного покрытия и неравномерности процессов натекания тока катодной защиты.

Цель работы – разработка методики повышения эффективности противокоррозионной защиты линейной части нефтегазопроводов.

2 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СУЩЕСТВУЮЩЕЙ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛОВ, МЕТОДЫ СТРУКТУРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

2.1 Введение

понятия стороннего потенциала наложенного неизвестными источниками

Поле токов катодной защиты в условиях протяженного участка магистрального газопровода весьма неоднородно, поэтому невозможно получить аналитическую зависимость изменения разности потенциалов участка магистрального газопровода от координат этого участка и от величины токов, стекающих с анодных заземлений. В связи с этим, участок магистрального газопровода рассматривается как система или набор точек, в которых выполняются измерения потенциалов. В этом случае, при фиксированной системе анодных заземлений, задача определения параметров электрохимической защиты сводится к нахождению зависимостей потенциалов каждой точки от величины токов, стекающих с анодных заземлений. Эта задача решается с применением методов регрессионного анализа.

Результаты исследований проведенных на различных промышленных площадках, расположенных в различных почвенно-климатических условиях показали, что эти зависимости адекватно и с высокой предсказательной способностью, описываются системой линейных уравнений (1.9).

Система функций (1.9) для k точек, репрезентативно представляющих промплощадку из n станций катодной защиты, характеризует параметры электрохимической защиты коммуникаций конкретной промплощадки и позволяет решать задачи регулирования токов станций катодной защиты с определением оптимального режима.

Физический смысл сформулированной задачи сводится к следующему:

Определить такие токовые режимы работ станций катодной защиты, при которых будет обеспечена полная защищенность всех коммуникаций промышленной площадки без перезащиты, при минимальном расходе на это электроэнергии.

Исследования коэффициентов A_{ij} системы (1.9) показывает, что в пределах одной конкретной промплощадки коэффициенты A_{ij} , с достаточной для инженерных нужд точностью, являются функцией расстояния от каждой точки до анодного заземления (при схеме защиты с сосредоточенным анодным заземлителем). При этом определено, что наиболее подходящим видом аппроксимации является степенная функция, вида:

$$A_{ij} = M (d_{ij})^{-\varphi} \quad (2.1)$$

где A_{ij} - коэффициенты из системы (1.9),

d_{ij} - расстояние от i -ой точки до j -го анодного заземления;

M , φ – коэффициенты, определяемые методом наименьших квадратов.

С применением рассчитанных M , φ - коэффициентов можно решить ряд задач связанных с определением оптимального местоположения средств электрохимической защиты (при схеме защиты с сосредоточенными анодными заземлениями) и управлением системы защиты.

Задача определения текущей защищенности и выявления незащищенных участков коммуникаций определяется подстановкой в систему (1.9) значений текущих токов станций катодной защиты и расчетом потенциалов каждой точки; по результатам этих расчетов можно определить незащищенные участки коммуникаций или участки, потенциалы которых оказываются наиболее положительными и, следовательно, наиболее коррозионно-опасными.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что данная система уравнений позволяет

вычислять влияние силы тока каждой станции катодной защиты на установившийся защитный потенциал в точке измерения для линейной части магистрального трубопровода. Коэффициенты A_{0k} численно равны собственному потенциалу при выключении всех влияющих стан-

ций и деполяризации трубопровода. Коэффициенты A_{0k} зависят от металла и среды, в которую он помещен, т.е. от марки стали и химических свойств грун-та. Коэффициенты A_{ij} определяются по разработанной методике. Методика заключается в определении изменения защитных потенциалов в точках измерения от изменения выходных параметров станции катодной защиты. Составляются системы линейных алгебраических уравнений, относительно неизвестных коэффициентов влияния станций катодной защиты на различные точки измерения. Порядок каждой системы уравнений определяется количеством выбранных станций катодной защиты. Количество систем уравнений определяется количеством выбранных точек измерений. Для решения задачи необходимо произвести ряд замеров установившихся значений защитных потенциалов в контрольных точках измерения последовательно отключая каждую станцию катодной защиты. Таким образом, идентифицируется система уравнений влияния силы тока станций катодной защиты на потенциалы в точках, решая каждое уравнение которой, методом оценки множественной регрессии, устанавливаются коэффициенты.

К недостаткам представленной методики можно отнести нахождение коэффициентов, 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 трубы в точке измерения может происходить более недели, при этом на данную точку будут оказывать влияние работающие станции катодной защиты, которые могут находиться за сотни километров от исследуемой точки. Следо-

вательно, 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 системы предлагается использовать не собственный потенциал трубопровода, а находить наложенный неопределенными источниками потенциал в точке, с учетом известного влияния определенных станций катодной защиты. Назовем данный потенциал сторонним. Предложенный метод заключается в определении коэффициентов влияния станций катодной защиты на определенную точку и вычислении стороннего потенциала, как разницу между суммарным потенциалом 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, вычисленный потенциал по значению будет близок к стационарному потенциалу трубы.

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. Точка дренажа центральной станции на 107 километре была выбрана как точка вычисления исследуемого потенциала.

Порядок проведения измерений:

1. Выключают станцию катодной защиты.
2. Производят измерение суммарного защитного потенциала в точке дренажа СКЗ. Измерение производится относительно стационарного электрода сравнения. Измерения выполняются 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%, например мультиметры Fluke 79/29, производства John Fluke Co., США.
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 выходе станции на шаг регулирования (1 Ампер).

6. Повторяют п. 2,3.

7. Повторяют п. 5 до значения 13 А.

8. Повторяют п. 1-7 восемь раз.

Для данной точки были найдены коэффициенты влияния станций катодной защиты. Для этого были проведены измерения суммарного потенциала в точке в зависимости от изменения силы тока на выходе каждой станции. По полученным данным методом линейной аппроксимации получены уравнения, описывающие взаимосвязь между изменением потенциала в исследуемой точке и изменением силы тока на станции катодной защиты [2]. Пример вычисления уравнения влияния станции на 99 километре на потенциал в точке дренажа на 107 километре представлен на рисунке 2.1.

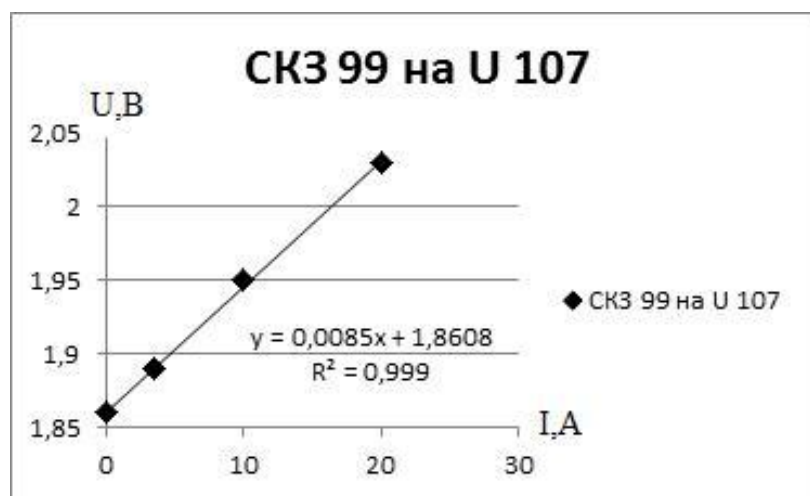


Рисунок. 2.1 – Влияние станции катодной защиты расположенной на 99 километре на суммарный потенциал в точке дренажа станции на 107 километре

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

$$U_1 = 0,0085 \cdot I_1 + 1,8608 \quad (2.2)$$

где 0,0085 – коэффициент влияния A_{ij} станции катодной защиты, расположенной на 99 километре на суммарный потенциал на 107 километре.

Таким образом, устанавливается влияние каждой станции катодной защиты на исследуемую точку.

Для станции катодной защиты расположенной на 107 километре и точкой дренажа которой является исследуемая, были проведен ряд измерений, для повышения точности нахождения функции влияния и исследуемого потенциала. Сила тока станции повышалась ступенчато от 0 ампер до 13 ампер с шагом в 1 ампер. При этом в точке дренажа производились измерения защитного суммарного потенциала. По результатам измерений также было получено уравнение влияния станции на суммарный потенциал (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 – Влияние станции катодной защиты расположенной на 107 километре на суммарный потенциал в точке дренажа

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

$$U_1 = \varphi_{ст} + 0,2228 \cdot I_1 + 1,2805 \quad (2.3)$$

После получения всех коэффициентов влияния составляется уравнение:

$$U_1 = \varphi_{ст} + k_1 \cdot I_1 + k_2 \cdot I_2 + \dots + k_n \cdot I_n \quad (2.4)$$

Выразим из данного уравнения стационарный потенциал. Так как влияние всех станций катодной защиты не было определено, то данный коэффициент принимает значения стороннего потенциала, включающего в себя как стационарный потенциал, так и потенциал наложенный неизвестными источниками:

$$\varphi_{\text{стор}} = U_1 k_1 I_1 + k_2 I_2 + \dots + k_n I_n; \quad (2.5)$$

Далее была проведена проверка вычисления стороннего потенциала при различных измеренных значениях силы тока станций катодной защиты на 107 километре и суммарного потенциала в точке ее дренажа. Влияние других станций вычислялось с помощью полученных коэффициентов и вычиталось из значения согласно формуле (6).

По результатам вычисления было построено распределение вероятностей стороннего потенциала в точке дренажа (рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 –

Изменение вычисленного значения собственного потенциала в точке дренажа станции на 107 километре

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

$$M(\varphi_{\text{стор}}) = \sum_{i=1}^n \varphi U_i p_i; \quad (2.6)$$

$$M(\varphi_{\text{стор}}) = 1,2307 \quad (2.7)$$

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

Таким образом, установлено, что для решения задачи оптимизации можно пользоваться значением коэффициента собственного потенциала точки трубопровода в совокупности с наложенным потенциалом неизвестных источников, предложенное определение - сторонний потенциал 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. Кроме того, установлено, что при наличии статистики данных точность вычисления стороннего потенциала возрастает, математическое ожидание данной величины практически совпадает со значением полученным методом линейной аппроксимации.

2.2 Методы 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 поляризационного потенциалов в границах коридора, определяемого требованиями ГОСТ.

Задача поддержания защитных потенциалов в пределах заданных границ является необходимым условием, но при этом всегда существует возможность

оптимизации.

В

качестве целевой функции выбирается выходная мощность совокупности СКЗ, принадлежащих объекту магистрального трубопровода.

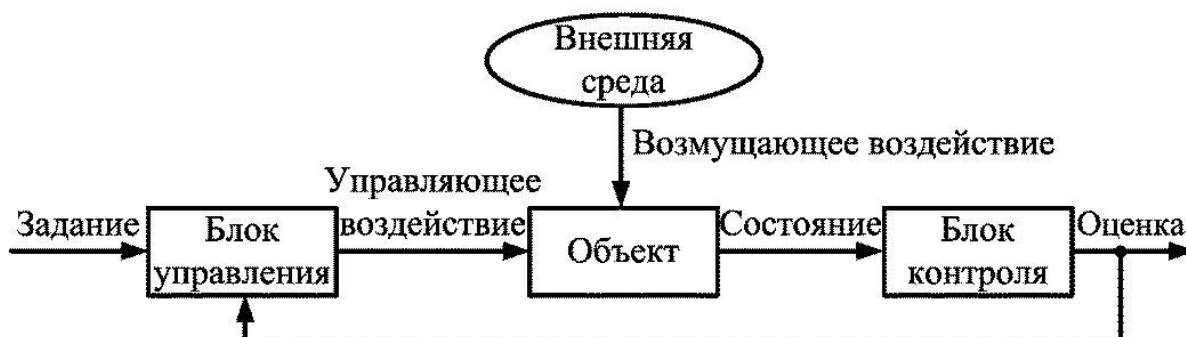


Рисунок 2.4 – Структурная схема системы управления

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 поляризационный потенциал в пределах нормы, кроме этого необходимо решить задачу условной оптимизации, включающую в себя:

- мощность потребления каждой станции;
- коэффициент полезного действия (КПД) каждой станции;
- скорость коррозии 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 поляризационному 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. 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, технические возможности СКЗ, переводятся в разряд ограничений.

Выходная мощность каждой станции определяется по формуле:

$$P_{\text{вых}i} = \sum_{i=1}^{N_{\text{скз}}} U_{\text{вых}i} \cdot I_{\text{вых}i} = \sum_{i=1}^{N_{\text{скз}}} Z_{\text{вхСКЗ}i} \cdot I_{\text{вых}i}^2 \quad (2.8)$$

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

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

$Z_{\text{вхСКЗ}i}$ - сопротивление нагрузки СКЗ, Ом.

После решения задачи структурной оптимизации в среде MathCAD для участка, на котором расположены две СКЗ, получен график, на котором изо-бращена допустимая область решений при различном сочетании выходных то-ков СКЗ (рисунок 2.5).

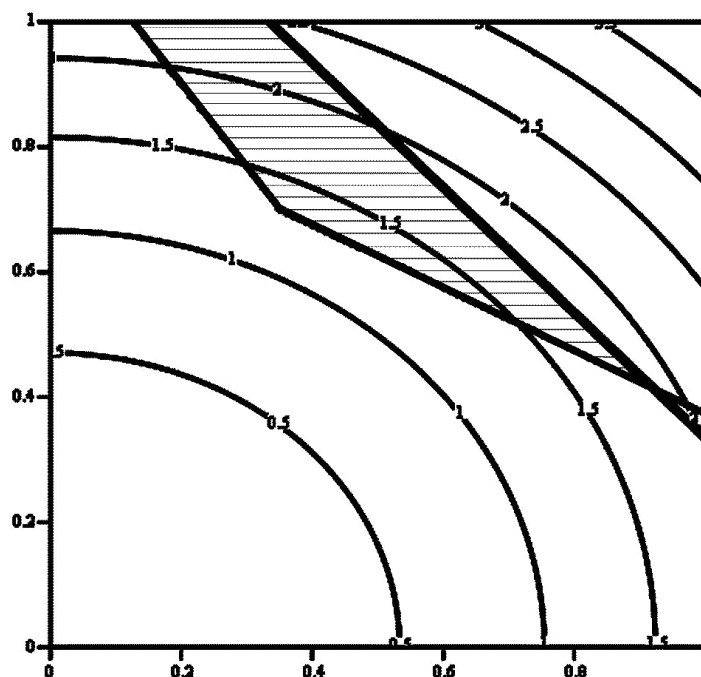


Рисунок 2.5 – Область допустимых решений минимизации выходной мощности СКЗ

Пример расчета оптимальных режимов работы СКЗ в среде MathCAD приведен в приложении А.

2.3 Выводы по главе

Введено понятие стороннего потенциала наложенного неизвестными источниками, определяющего стационарный потенциал в совокупности с 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 оптимизации.

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

3 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ МОДУЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ И ОСНОВНЫХ АЛГОРИТМОВ ОПТИМИЗАЦИИ

3.1 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.

При этом для определения значений критериев электрохимической защиты должны использоваться устройства, обеспечивающие достоверность их значений.

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

- разработка методики проведения измерений на трассе МГ для выявления зависимостей влияния выходных параметров СКЗ на распределение защитных потенциалов, развитие существующих моделей распределения потенциалов;

- разработка ряда алгоритмов оптимального управления, учитывающих режимы работы СКЗ, электрические характеристики трубопровода, внешние факторы;

- нахождения метода решения многокритериальной задачи оптимизации;

3.2 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 СК 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;

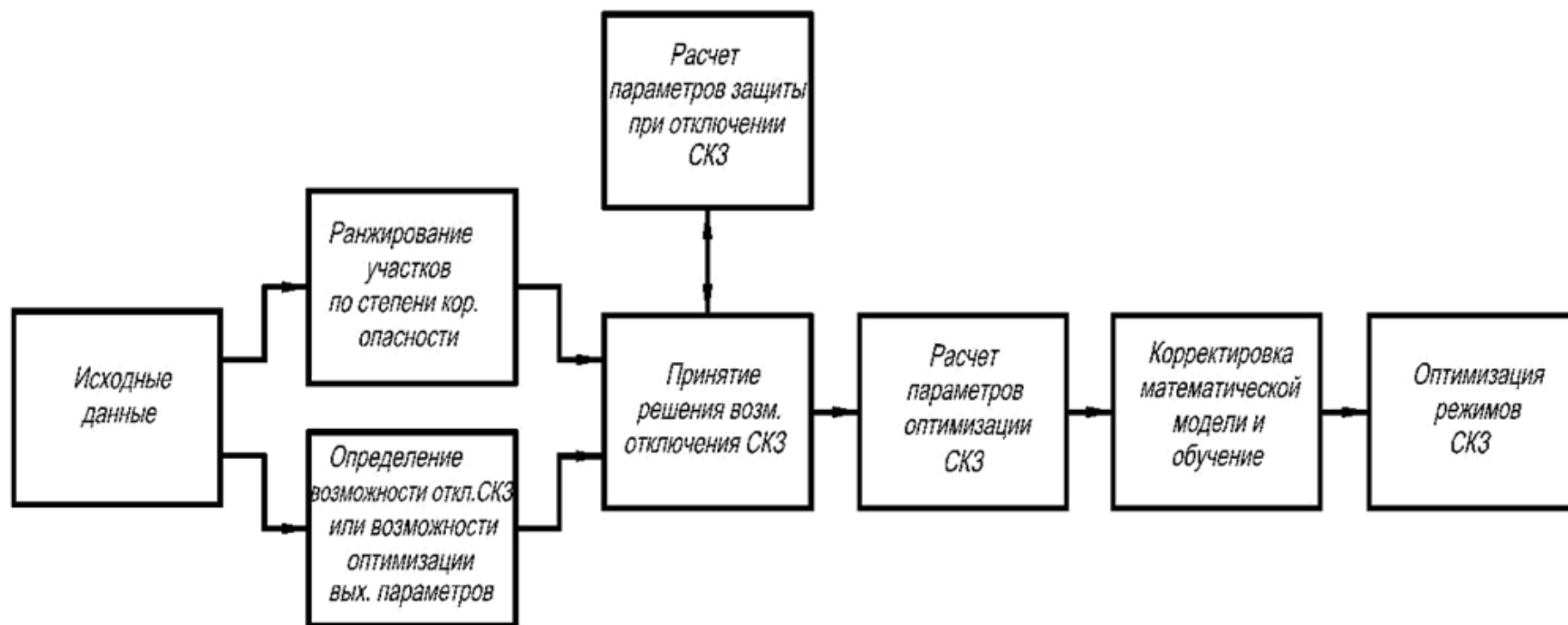


Рисунок 3.1 – Модуль оптимизации режимов СКЗ

3.3 Ранжирование участков между СКЗ по степени коррозионной опасности

3.3.1 Назначение и характеристика

Определение коррозионного состояния участков газопровода. Мониторинг скорости коррозии. Ранжирование зон коррозионной опасности 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) Нормативно-справочная информация по трубе.
- 2) Наличие блуждающих постоянных токов.
- 3) Наличие блуждающих переменных токов.
- 4) Наличие водорастворимых солей больше заданной величины.
- 5) Температура транспортируемого продукта больше заданной установки.
- 6) Удельное электрическое сопротивление грунта меньше заданной установки.
- 7) Наличие индуцированного переменного напряжения на трубопроводе.
- 8) Наличие болотистых, черноземных почв.
- 9) Наличие подводных переходов и пойм рек.
- 10) Наличие пересечения с авто, ж/д дорогами.
- 11) Наличие пересечения с трубопроводами.
- 12) 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.

Таблица 3.1 – Описание массивов входных данных

Обозначение показателя	Наименование показателя	Единицы измерения
l <i>блост</i>	Наличие блуждающих постоянных токов	км
l <i>блер</i>	Наличие блуждающих переменных токов	км
l <i>с оль</i>	Наличие водорастворимых солей больше заданной величины	км
l <i>темп</i>	Температура транспортируемого продукта больше заданной установки	км
l <i>уэс</i>	Удельное электрическое сопротивление грунта меньше заданной установки	км
l <i>инн</i>	Наличие индуцированного переменного напряжения на трубопроводе	км
l <i>бол</i>	Наличие болотистых и черноземных почв	км
l <i>подв</i>	Наличие подводных переходов и пойм рек	км
l <i>дор</i>	Наличие пересечения с авто, ж/д дорогами	км
l <i>труб</i>	Наличие пересечения с трубопроводами	км
l <i>с ток</i>	Наличие стоков, свалок мусора и шлаков	км
l <i>э с</i>	Положение датчиков ЭС	км
l <i>от к</i>	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

Окончание таблицы 3.1

Обозначение показателя	Наименование показателя	Единицы измерения
$R_c(t)$	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

3.3.2 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, являет-

ся 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 [18]:

$$R(T) \rho = \frac{l}{b\delta}, \quad (3.1)$$

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

l – длина металлического элемента, м;

b – ширина металлического элемента, м; –
толщина металлического элемента, м. δ

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

$$\delta_{(t)} = \delta_{(t=0)} \cdot \frac{R_r(t)}{R_r(t=0)} \cdot \frac{R_c(t=0)}{R_c(t)}, \quad (3.2)$$

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:

$$U_{корр}^{cp} = -\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i - \delta_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} = -\sum_{i=1}^n \frac{\Delta\delta_i}{\Delta t_i}, \quad (3.3)$$

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 2.2 (СТО Газпром 9.0-001-2009).

Таблица 3.2 – 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, $K_{дон}$, которая определяется по формуле

$$K_{дон} = \frac{Y}{T}, \quad (3.4)$$

где Y – 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

$$K > K_{\text{доп}}$$

Информация о степени коррозионной опасности (табл. 3.2), о коррозионных отказах и показатель допустимой скорости коррозии $K_{\text{доп}}$, 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 (табл. 3.2), о коррозионных отказах и показатель допустимой скорости коррозии $K_{\text{доп}}$, используются при принятии решений о возможности отключения отдельных СКЗ.

3.3.3 Учет весов влияния факторов на каждом участке между СКЗ

- 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 уставки, 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.

3.3.4 Расчет интегрального показателя коррозионного состояния участков между СКЗ

Значения весовых коэффициентов (баллов) факторов п. 3.3.3 могут быть использованы для оценки коррозионного состояния участков между СКЗ относительно друг друга в соответствии с интегральным показателем. Интегральный показатель для произвольного участка между СКЗ определяется по формуле

$$Int_j = \frac{w_1 n_{1j} Id_{1j} + w_2 n_{2j} Id_{2j} + \dots + w_{11} n_{11j} Id_{11j}}{w_1 n_1 + w_2 n_2 + \dots + w_{11} n_{11}}, \quad (3.5)$$

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 j -ом участке отсутствует соответствующий фактор).

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

3.3.5 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 табл. 2.5 (СТО Газпром 9.0-001-2009).

Если значение $U_{корр}^{cp}$ более $0.3 K_{дон}$, 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 $l_{ЭСУ}$ 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.

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.

3.3.6 Алгоритм ранжирования участков по коррозионной опасности

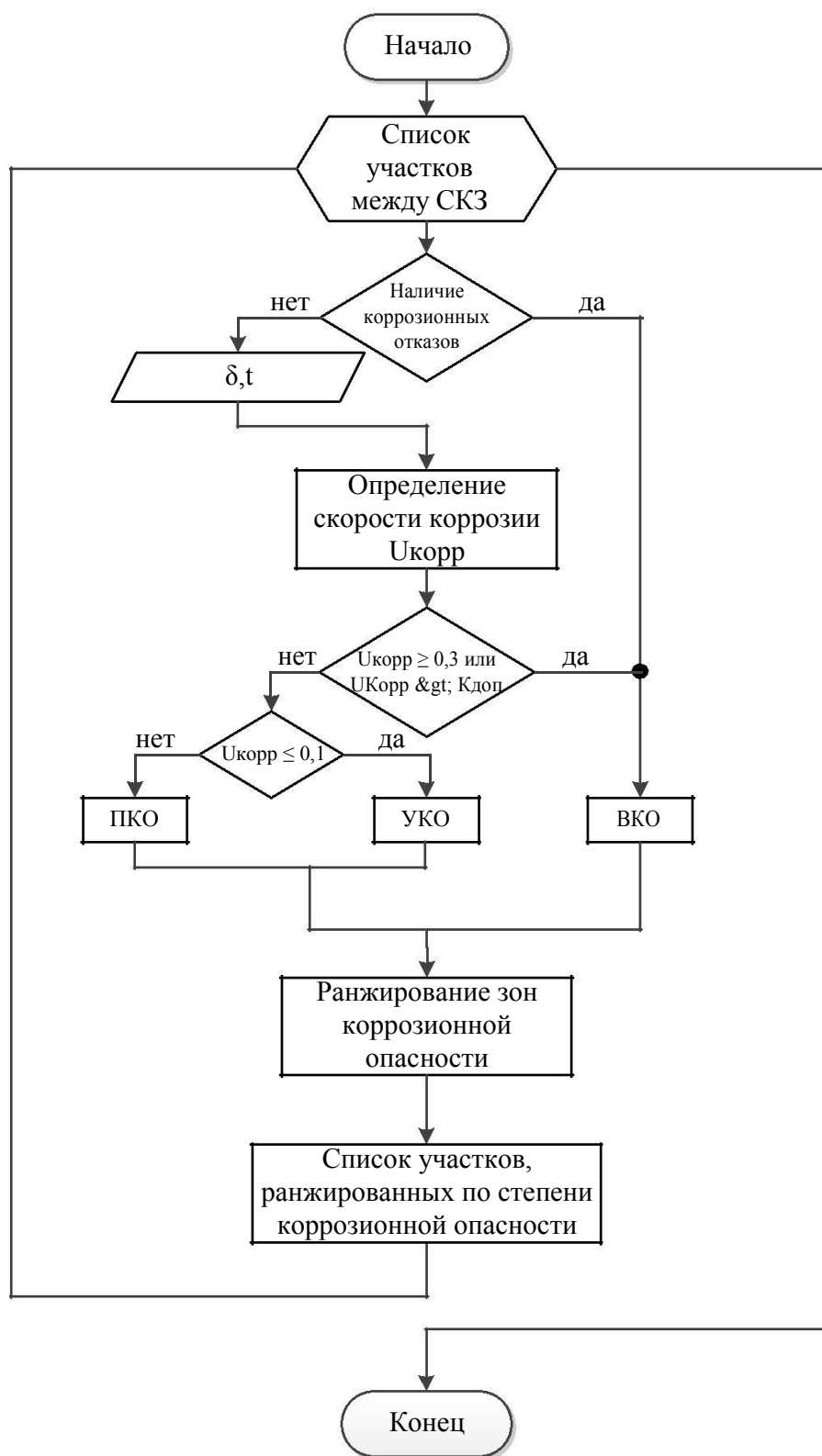


Рисунок 3.2 – Блок-схема алгоритма ранжирования участков по степени коррозионной опасности

3.3.7 Алгоритм ранжирования участков по коррозионной опасности на основе интегрального показателя

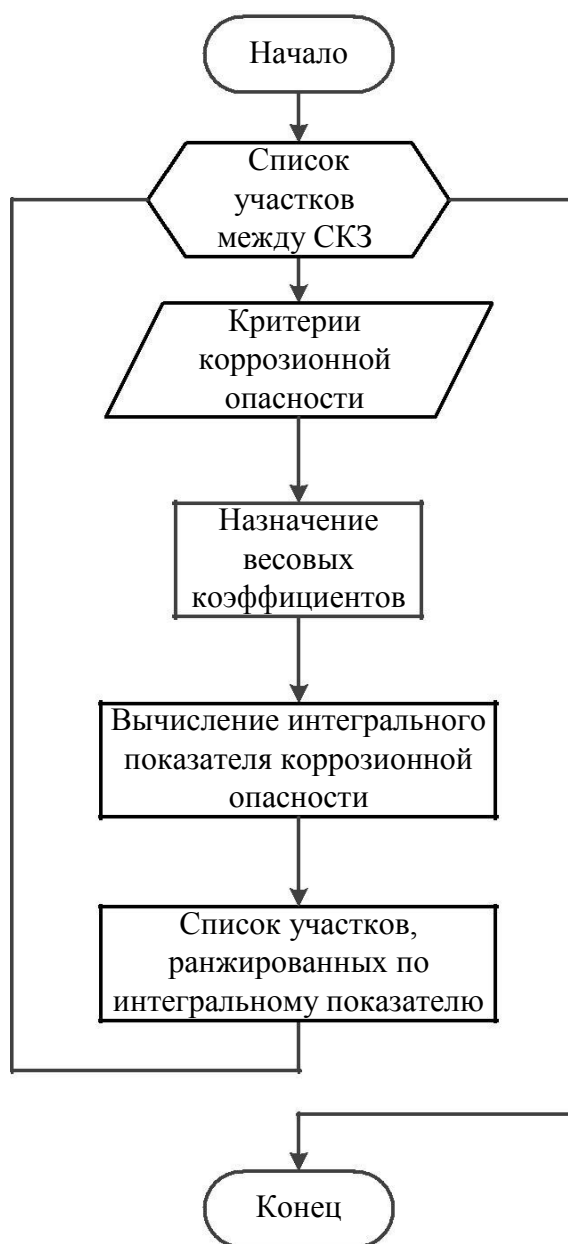


Рисунок 3.3 – Блок-схема алгоритма ранжирования участков по степени коррозионной опасности на основе интегрального показателя

где m – количество СКЗ;

n – количество точек измерения защитного потенциала.

При известных выходных токах СКЗ и известных защитных потенциалах можно найти коэффициенты влияния матрицы 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

$$= A (I^T I)^{-1} \varphi^T, \quad (3.9)$$

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

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

q – количество выбранных СКЗ для исследования;

r – количество выбранных точек для измерения защитных потенциалов.

Найденная матрица коэффициентов влияния A используется при определении защитных потенциалов для обеспечения поддержки принятия решения об отключении СКЗ, а также для решения задачи оптимизации.

3.4.2 Проверка граничных условий на выходные данные СКЗ

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

$$U_0 \leq -A \cdot I_{откл} + U_e \leq U_M, \quad (3.10)$$

где U_0 – верхняя граница защитных потенциалов (п. 2.5.1);

U_M – нижняя граница защитных потенциалов (п. 2.5.2);

$I_{откл} = \{I_1, \dots, I_{j-1}, 0, I_{j+1}, \dots, I_m\}$ – 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

$$U_j = I_{отклj} R_j, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (3.11)$$

Выходная мощность катодной установки

$$P_j = I_{отклj} U_j \quad (3.12)$$

При этом должны выполняться условия

$$I_{откл} < k_R I_{HI} < U_{HI} < P_{HI} \quad (3.13)$$

где $I_{HI} = \{I_1, I_2, \dots, I_m\}$ – номинальные токи СКЗ;

$U_{HI} = \{U_1, U_2, \dots, U_m\}$ – номинальные напряжения СКЗ.

$P_{HI} = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$ – номинальные мощности СКЗ.

k_R – коэффициент, учитывающий изменения внешнего сопротивления УКЗ.

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

3.4.3 Проверка условия на наличие участка ВКО в зоне защиты СКЗ

В соответствии со списком, получаемым согласно алгоритму п. 3.3.4 при наличии ВКО на рассматриваемом участке между двумя соседними СКЗ принимается решение о том, что эти СКЗ не подлежат отключению.

3.4.4 Проверка условия на наличие блуждающих токов в зоне защиты СКЗ

В соответствии со списком, получаемым согласно алгоритму п. 3.3.5 при наличии блуждающих токов на участке в зоне защиты двух соседних СКЗ принимается решение о том, что эти СКЗ не подлежат отключению.

3.4.5 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

$$Id = \{1, \dots, 1, 0, 1, \dots\}^T, \quad (3.14)$$

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

3.4.6 Алгоритм определения максимального защитного потенциала

В соответствии с ГОСТ Р 51164-98 определяются максимальные защитные поляризационные потенциалы согласно рисунку 3.1, с омической составляющей согласно рисунку 3.4.

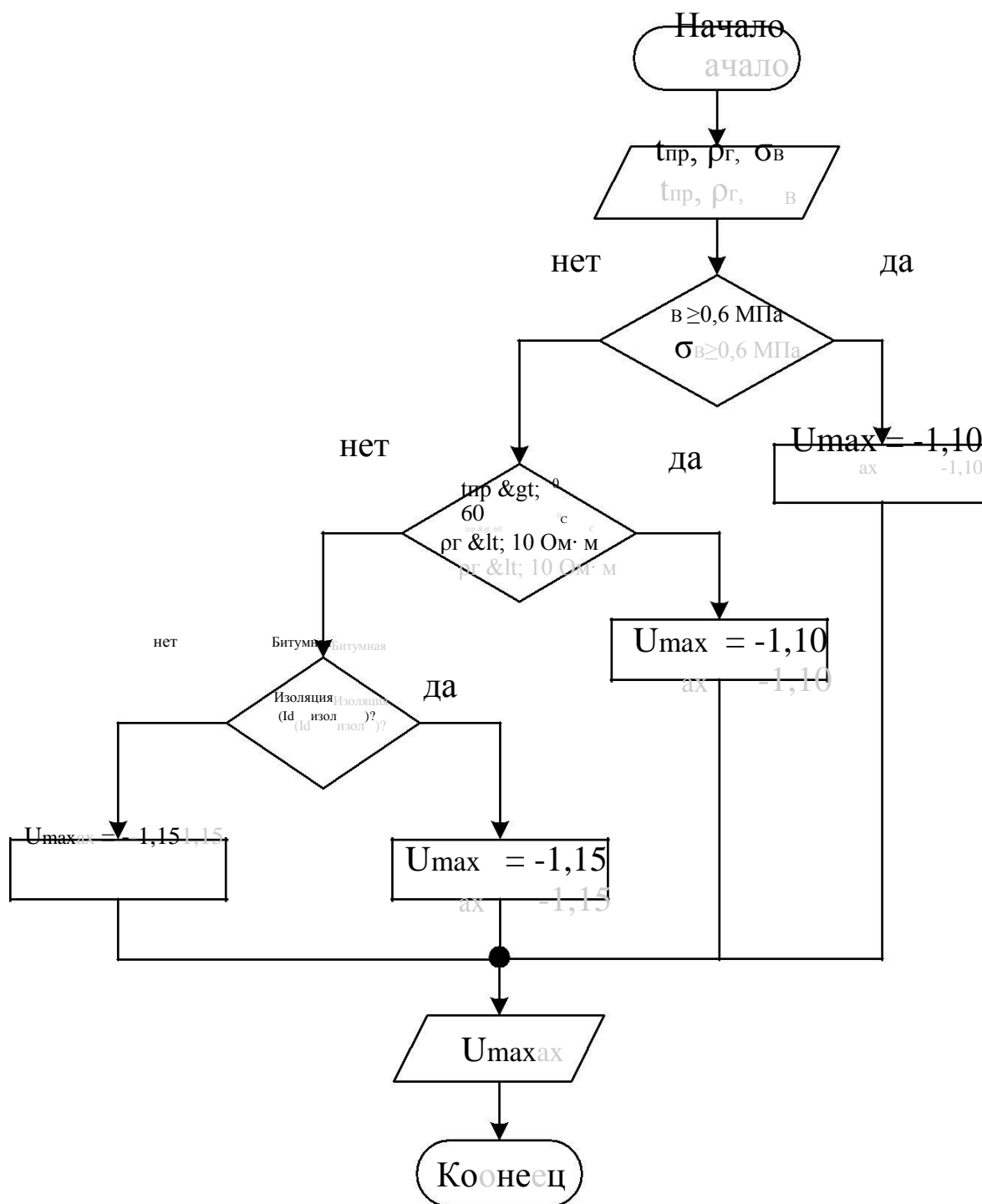


Рисунок 3.4 – Блок-схема алгоритма определения максимального защитного потенциала (поляризационный)

Для определения границ максимального защитного суммарного потенциала разработана блок-схема представленная на рисунке 3.5.

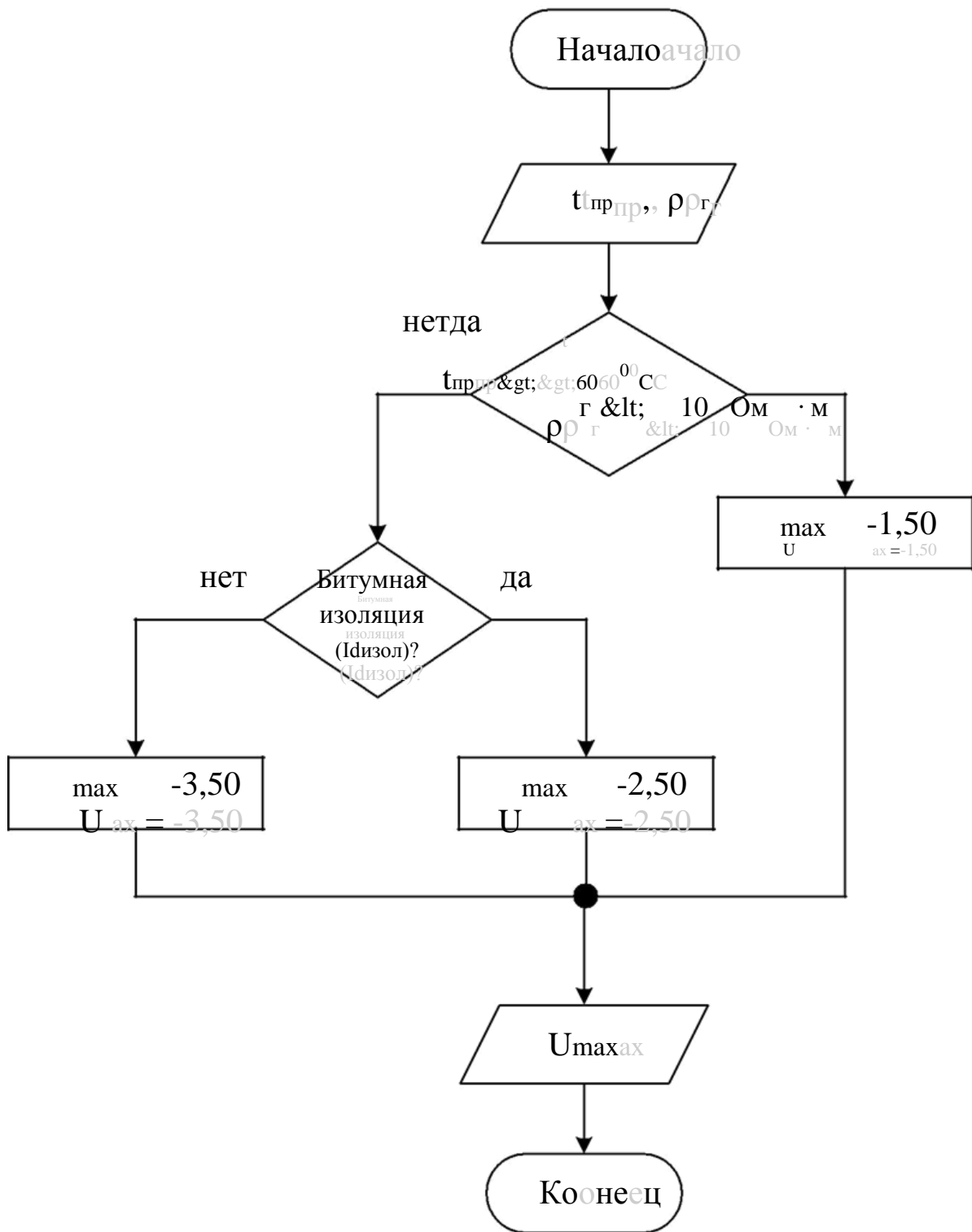
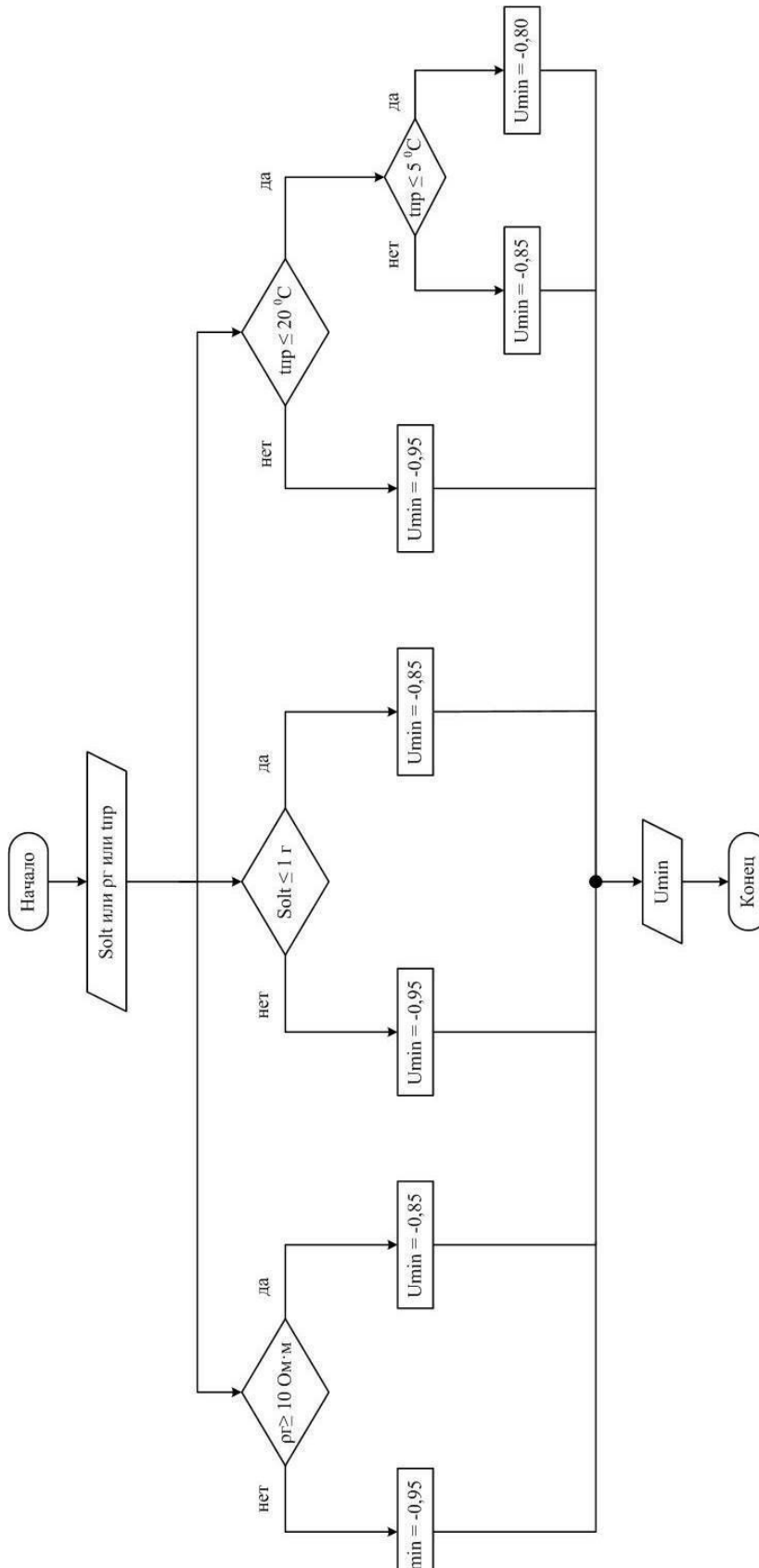


Рисунок 3.5 – Блок-схема алгоритма определения максимального защитного потенциала (с омической составляющей)

3.4.7 Алгоритм определения минимального защитного потенциала

В соответствии с ГОСТ Р 51164-98 определяются минимальные защитные поляризационные потенциалы согласно рисунку 3.6, с омической составляющей согласно рисунку 3.7.



(поляризационный) Рисунок 63. – Блок-схема алгоритма определения минимального защитного потенциала

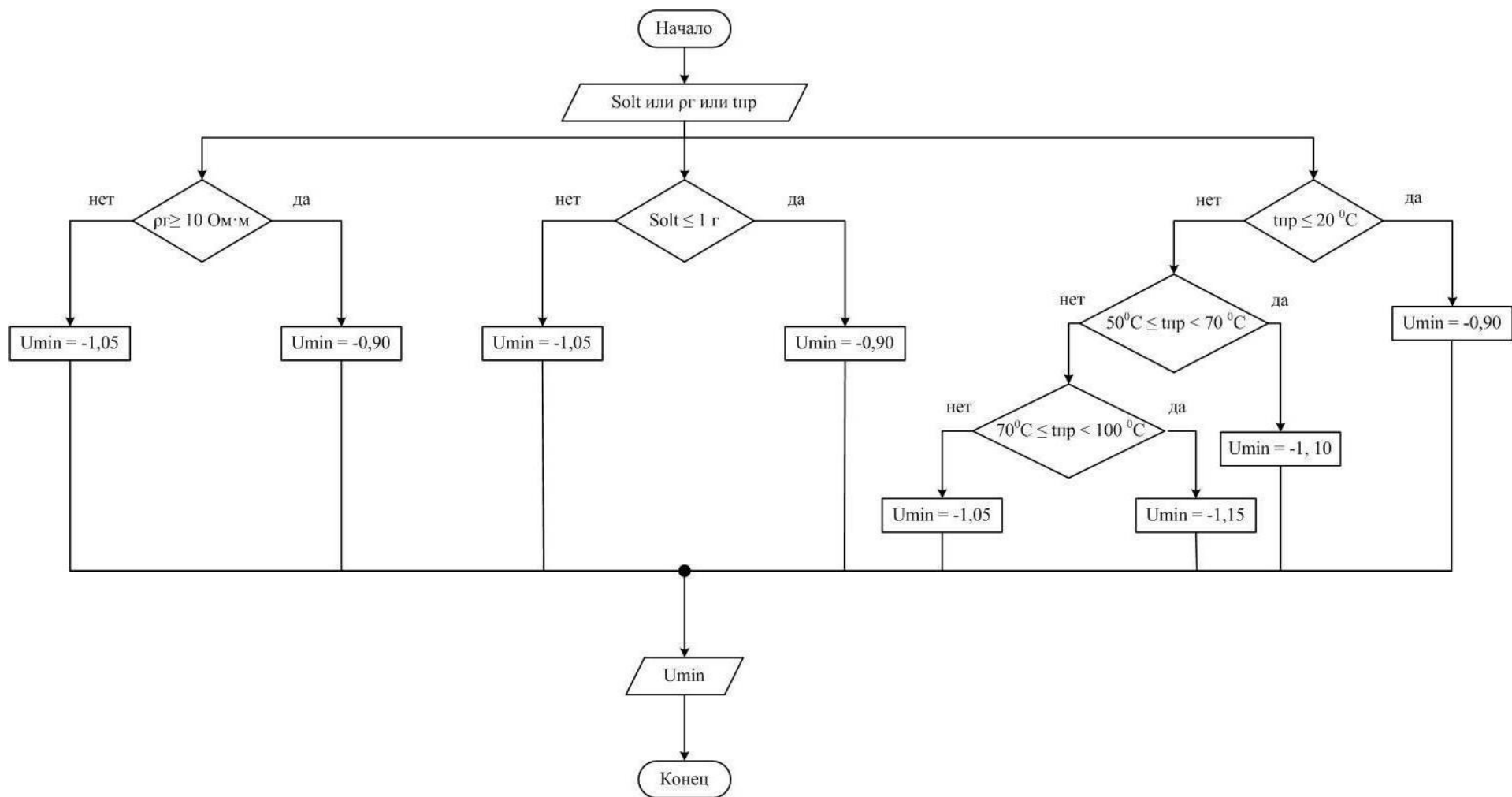


Рисунок 3.7 – Блок-схема алгоритма определения минимального защитного потенциала (с омической составляющей)

3.5 Алгоритм поддержки принятия решения об отключении СКЗ

3.5.1 Определение

количества соседних СКЗ, существенно влияющих на зону защиты

Защитный потенциал в точке расположения отключенной СКЗ

$$\varphi_j = a_{j,k} \cdot I_k + U_e, k = 1, 2, \dots, j-1, j+1, \dots, m, (3.15)$$

где

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

I_k – выходной ток k -ой СКЗ, А;

U_e – собственный потенциал, В.

Если для некоторой k -ой СКЗ защитный потенциал

$$|\varphi_j| \leq k_\varphi (U_0 - U_M), (3.16)$$

где

k_φ – коэффициент, учитывающий ограничения влияния соседних СКЗ на потенциал (задается на основе экспертных оценок, $k_\varphi \leq 1$); U_0 – максимальный защитный потенциал, В;

то считается, что k -ая СКЗ существенно влияет на зону защиты.

3.5.2 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

$$\varphi = -A I_{откл} + U_e, (3.17)$$

где $I_{откл} = \{I_1, \dots, I_{j-1}, 0, I_{j+1}, \dots, I_m\}^T$ – 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

$$\begin{aligned}
 U_0 &\leq -A I_{откл} + U_e \underline{U}_M; \\
 I_{откл} &\geq 0; \\
 U_{откл} &\leq k R I_H; 0 < U_{откл} \leq \frac{U_H}{R}; U_{откл} \leq \sqrt{\frac{P_H}{R}}.
 \end{aligned}$$

Здесь векторы-столбцы

A – матрица коэффициентов влияния;

U_0 – максимальный защитный потенциал;

U_M – минимальный защитный потенциал;

U_e – собственный потенциал;

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

$U_H = \{U_1, U_2, \dots, U_m\}^T$ – номинальные напряжения СКЗ;

$R = \{R_1, R_2, \dots, R_m\}^T$ – номинальные мощности СКЗ;

k_R – внешнее сопротивление УКЗ;

k_R – коэффициент, учитывающий изменения внешнего сопротивления УКЗ.

Режимы работы СКЗ при некоторых отключенных станциях катодной защиты:

- напряжение на выходе катодной установки:

$$U_j = I_{отклj} R_j, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (3.18)$$

- выходная мощность катодной установки:

$$P_j = I_{отклj} U_j \quad (3.19)$$

- потребляемая мощность катодной установки:

$$W_j = P_j + P_{внутрj} \quad (3.20)$$

где $P_{внутрj}$ – потери на внутреннее потребление СКЗ.

- КПД катодной установки:

$$\eta_j = \frac{P_j}{W_j} \cdot 100. \quad (3.21)$$

Для рассматриваемого участка МГ при некоторых отключенных СКЗ:

- суммарная выходная мощность:

$$P_\Sigma = \sum_j P_j, \text{ где } j = 1, 2, \dots, m; \quad (3.22)$$

- суммарная потребляемая мощность:

$$W_\Sigma = \sum_j W_j, \text{ где } j = 1, 2, \dots, m; \quad (3.23)$$

- суммарное КПД:

$$\eta_\Sigma = \frac{P_\Sigma}{W_\Sigma} \cdot 100. \quad (3.24)$$

3.5.3 Проверка расчетных режимов на соответствие условиям по критериям

Проверка осуществляется на основании результатов расчета по алгоритму (п. 3.5.2) и наличия критериев (п. 3.3.3) на соответствующих участках между СКЗ.

Учет критериев (п. 3.3.3) учитывается так же при выборе структуры СКЗ (подраздел 3.4).

3.5.4 Расчет суммарного изменения мощности после предполагаемого отключения рассматриваемой СКЗ

Выходная мощность катодной установки

$$= I_{откл} U_{откл} = \left\{ I_1, \dots, I_{j-1}, 0, I_{j+1}, \dots, I_m \right\} \cdot U_j, j=1, 2, \dots, m \quad (3.25)$$

где $I_{откл} = \left\{ I_1, \dots, I_{j-1}, 0, I_{j+1}, \dots, I_m \right\}$ 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.

Потребляемая мощность катодной установки:

$$W = P_j + P_{\text{внутр}j}$$

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

КПД катодной установки:

$$\eta_j = \frac{P_j}{W_j} \cdot 100$$

Для рассматриваемого участка МГ:

- суммарная выходная мощность:

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

- суммарная потребляемая мощность:

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

- суммарное КПД:

$$\eta_{\Sigma} = \frac{P_{\Sigma}}{W_{\Sigma}} \cdot 100 .$$

3.5.5 Сравнение вариантов отключения СКЗ

Сравнение проводится по структуре СКЗ, а также по суммарной потребляемой мощности

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

и суммарному КПД

$$\eta_{\Sigma} = \frac{P_{\Sigma}}{W_{\Sigma}} \cdot 100 .$$

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

3.5.6 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 $Id \in \{1, 1, \dots, 1, 0, 1, \dots, 1\}^T$ соответствует j -ой отключенной СКЗ (п. 3.4.5).

3.5.7 Алгоритм решения

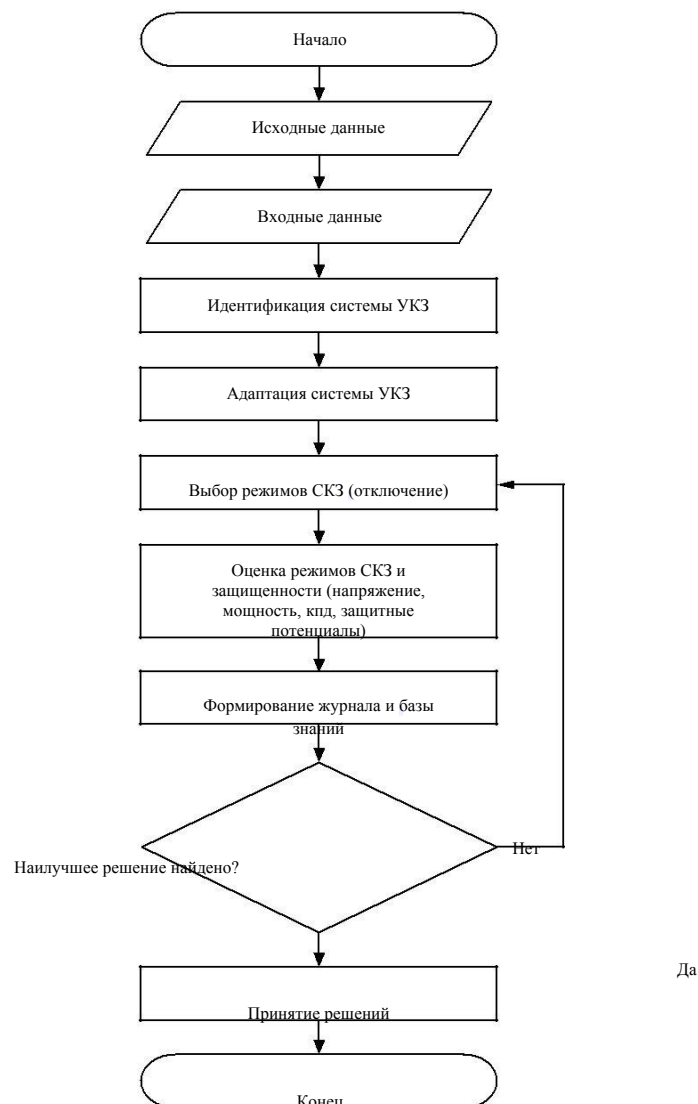


Рисунок 3.8 – Блок-схема алгоритма поддержки принятия решения об отключении СКЗ

3.6 Оптимизация параметров защиты СКЗ

3.6.1 Оценка необходимости оптимизации режимов СКЗ

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

- если защитный потенциал выходит за пределы коридора

$$U_0 \leq -A I U_e \leq U_M;$$

- 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 соседних 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.

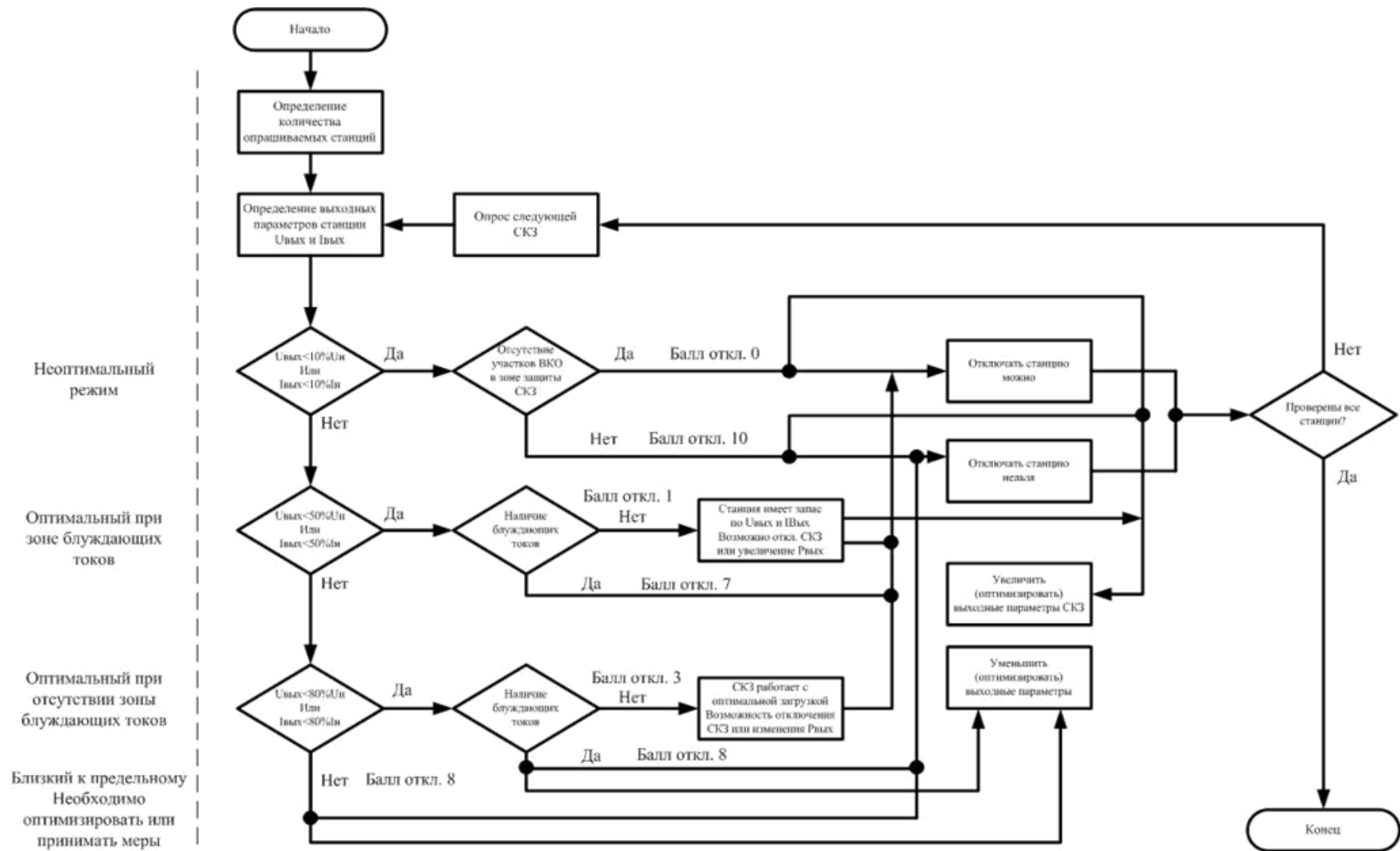


Рисунок 3.9 – Блок-схема алгоритма определения необходимости оптимизации режимов СКЗ

Распределение защитного потенциала по длине участка МГ для оптимальных выходных токов СКЗ

$$\varphi^* = -A I^* + U_e.$$

Напряжение на выходе катодной установки:

$$U_j^* = I_j^* \cdot R_j, j=1,2,\dots,m$$

Выходная мощность катодной установки:

$$P_j^* = I_j^* \cdot U_j.$$

Потребляемая мощность катодной установки:

$$W_j^* = P_j^* + P_{\text{внутр}j},$$

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

КПД катодной установки:

$$\eta_j = \frac{P_j^*}{W_j^*} \cdot 100.$$

Для рассматриваемого участка МГ:

- суммарная выходная мощность:

$$P_{\Sigma}^* = \sum_j P_j^*, \text{ где } j = 1, 2, \dots, m;$$

- суммарная потребляемая мощность:

$$W_{\Sigma}^* = \sum_j W_j^*, \text{ где } j = 1, 2, \dots, m;$$

- суммарное КПД:

$$\eta_{\Sigma} = \frac{P_{\Sigma}^*}{W_{\Sigma}^*} \cdot 100.$$

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.

3.6.3 Алгоритм решения

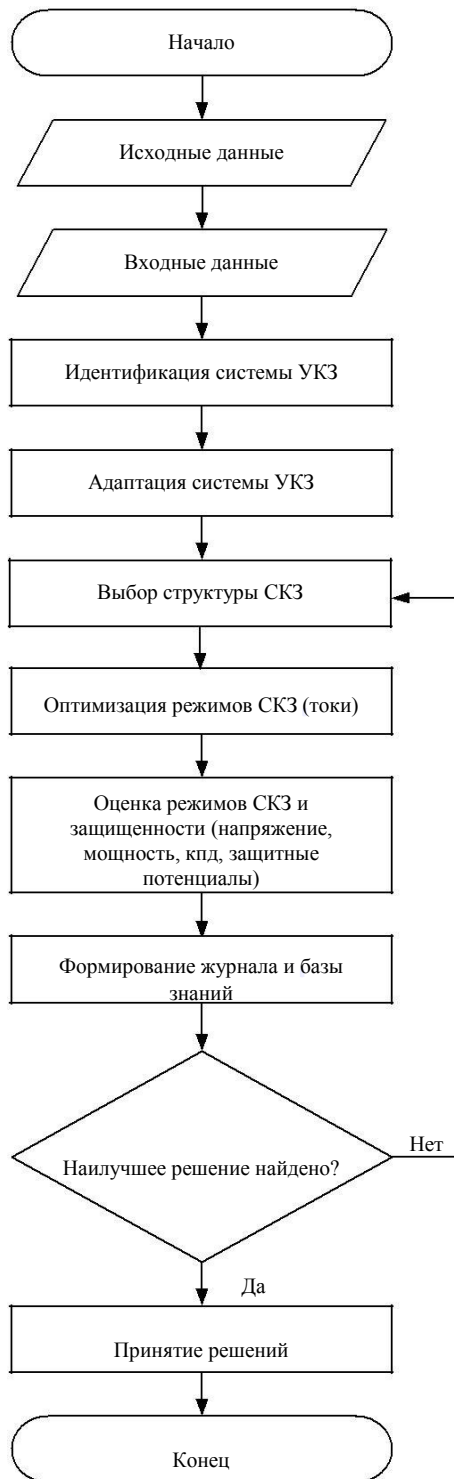


Рисунок 3.10 – Блок-схема алгоритма оптимизации режимов СКЗ

3.7 Расчет электрических характеристик трубопровода

3.7.1 Назначение и характеристика

Для возможности создания динамической модели изменения защитных потенциалов трубопровода необходимо определение изменяющихся во времени электрических характеристик трубопровода, таких как:

- продольное сопротивление трубопровода; сопротивление растеканию тока трубопровода; постоянное распространение тока вдоль трубопровода; сопротивление изоляции трубопровода
- входное сопротивление трубопровода; длина защитной зоны

3.7.2 Входное сопротивление трубопровода

В соответствии с формулой 7.21 СТО Газпром 9.2-003-2009

$$I_{\text{ВТ}} = \frac{2U_{\text{ТЗО}}}{Z_{\text{ВТ}}}, \quad (3.26)$$

получаем

$$Z_{\text{ВТ}} = -2 \cdot \frac{\phi - U_e}{I}, \quad (3.27)$$

где I – сила тока СКЗ, А;

U_e – естественный потенциал, В;

$U_{\text{ТЗО}}$ – смещение разности потенциалов (труба-земля) в точке дренажа,

$Z_{\text{ВТ}}$ – входное сопротивление трубопровода, Ом;

ϕ – защитный потенциал (определяемый по измерениям в районе расположения СКЗ), В.

3.7.3 Переходное сопротивление трубопровода в единицу длины

В соответствии с формулой 7.1 СТО Газпром 9.2-003-2009

$$R_T = \frac{\rho_T}{\pi \cdot (D_T - \delta_T) \delta_T} \quad (3.28)$$

где R_T – продольное сопротивление, Ом·м²;

D_T – диаметр трубопровода, м;

δ_T – толщина стенки трубопровода, м;

ρ_T –

удельное электрическое сопротивление материала трубопровода, Ом·м (определяется в зависимости от марки стали по таблице 6.5).

Из формулы 7.15 СТО Газпром 9.2-003-2009

$$Z_{em} = \frac{1}{2} \sqrt{R_m \cdot R_n} \quad (3.29)$$

получаем

$$R_n = \frac{4 \cdot Z_{em}^2}{l} \quad (3.30)$$

где R_n – переходное сопротивление на единицу длины, Ом·м²;

Z_{em} – входное сопротивление трубопровода, Ом.

Таблица

3.3

–

Удельное электрическое сопротивление различных марок трубной стали

Марка трубной стали	Удельное электрическое сопротивление трубной стали, Ом·м
17ГС, 17Г2СФ, 08Г2СФ	$2,45 \cdot 10^{-7}$
18Г2, СТЗ	$2,18 \cdot 10^{-7}$
18Г2САФ, 18ХГ2САФ	$2,63 \cdot 10^{-7}$
15ГСТЮ	$2,81 \cdot 10^{-7}$
Данные о марке стали отсутствуют	$2,45 \cdot 10^{-7}$

3.7.4 Решение обратной задачи по определению постоянной распространения тока

Постоянная распространения тока вдоль трубопровода.

В соответствии с формулой 7.10 СТО Газпром 9.2-003-2009.

$$\alpha = \sqrt{\frac{R_T}{R_{II}'}} \quad (3.31)$$

где R_T – продольное сопротивление, Ом·м²;

R_{II}' – переходное сопротивление, Ом·м².

Сопротивление изоляции трубопровода.

В соответствии с формулами 7.5 СТО Газпром 9.2-003-2009 определяем сопротивление растеканию тока трубопровода на единицу длины:

$$R_P' = \frac{\rho_T}{2\pi} \cdot \ln \frac{0,4 \cdot \pi \cdot R_P'}{D_T \cdot H_T \cdot R} \quad (3.32)$$

где ρ_T – удельное электрическое сопротивление материала трубопровода, Ом·м (определяют в зависимости от марки стали по таблице 6.5);

D_T – диаметр трубопровода, м;

H_T – глубина укладки трубопровода, м;

R_T – продольное сопротивление, Ом·м².

Из решения уравнения:

$$R_P' - \frac{\rho_T}{2\pi} \cdot \ln \left(\frac{0,4 \cdot \pi \cdot R_P'}{D_T \cdot H_T \cdot R} \right) = 0 \quad (3.33)$$

получаем значение R_P' .

В соответствии с формулой 7.3 СТО Газпром 9.2-003-2009:

$$R_{II}' = R_{ПЗ}' + R_P' \quad (3.34)$$

где R_{II}' – переходное сопротивление, Ом·м²;

$R_{ПЗ}'$ – сопротивление изоляции, Ом·м²;

R_P' – сопротивление растеканию трубопровода, Ом·м².

Из формулы выше следует:

$$R_{из} R_{\pi} R_P' - \dots \quad (3.35)$$

тогда

$$R_{из} \pi D t R_{из} \dots \quad (3.36)$$

Решение обратной задачи по определению зоны защиты СКЗ.

Защитный потенциал в произвольной точке трубопровода от одной работающей СКЗ определяется по формуле:

$$\varphi_j = a_{j,k} \cdot I_k + U_e, \quad (3.37)$$

где $a_{j,k}$ – коэффициенты влияния j k -ой СКЗ на защитные потенциалы в j -ой точке;

I_k – выходной ток k -ой СКЗ, А;

U_e – собственный потенциал, В.

Если защитный потенциал удовлетворяет следующему неравенству

$$|U_M| < |\varphi_j| < |U_M + k_l(U_0 - U_M)|, \quad (3.38)$$

где k_l – коэффициент запаса, показывающий отклонение защитного потенциала от минимальной границы $0 < k_l < 1$);

U_M – минимальный защитный потенциал, В;

U_0 – максимальный защитный потенциал, В;

то расстояние L_3 от k -ой СКЗ j -ой точки можно считать зоной защиты СКЗ для одного плеча трубопровода.

Аналогично находится зона защиты СКЗ для другого плеча.

3.8 Выводы по главе

Разработаны алгоритмы ранжирования участков между СКЗ по коррозионному состоянию, предложена формула интегрального показателя коррозионного состояния на участке.

Разработаны алгоритмы определения возможности отключения и поддержки принятия решения об отключении СКЗ.

Разработаны формулы для решения обратной задачи нахождения основных электрических характеристик трубопровода.

4 ПРОВЕДЕНИЕ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО НАХОЖДЕНИЮ ОПТИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ ЗАЩИТНОГО СУММАРНОГО ПОТЕНЦИАЛА НА ДЕЙСТВУЮЩЕМ ОБЪЕКТЕ МГ

4.1 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 9 станций катодной защиты. 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 а/д и ж/д, 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.

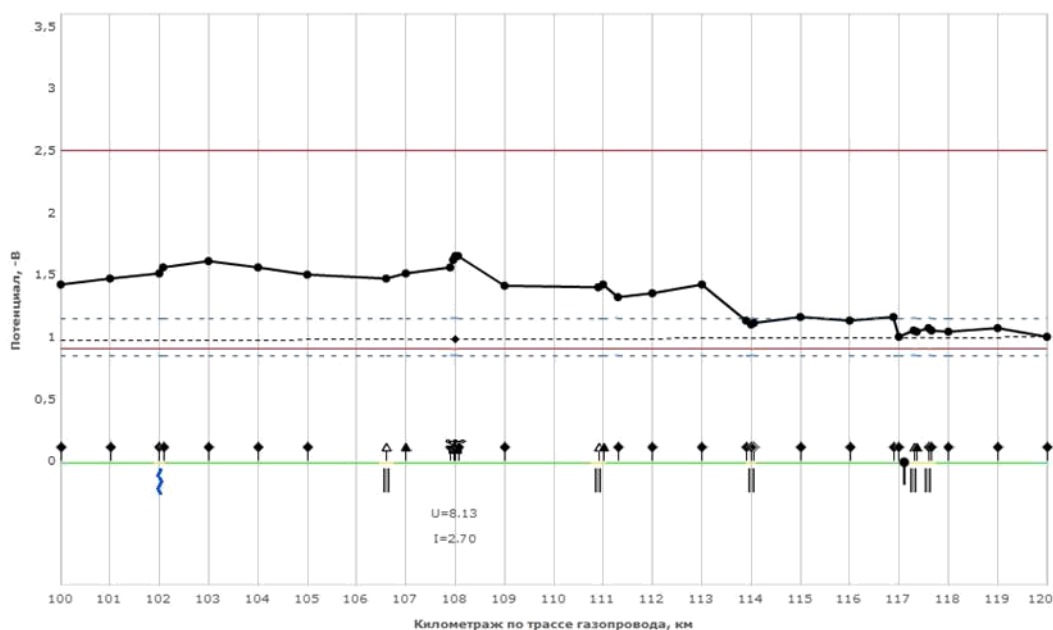


Рисунок 4.1 – Состояние защищенности на участке МГ «Саратов-Горький»

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

4.2 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 переизоляции в 1994 и 2001 годах. Тип изоляции резино-битумная.

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.

Оборудование позволило передавать в режиме реального времени по каналам GSM следующие параметры коррозионного мониторинга:

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

Пример установки подсистем дистанционного коррозионного мониторинга представлен на рисунок 4.2.



Рисунок 4.2 – Оборудование ПКМ 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). Пример установки БКУ представлен на рисунке 4.3.



Рисунок 4.3 – Оборудование БКУ на участке МГ «Саратов-Горький» После установки оборудования необходимо провести ряд измерений рас-
пределения 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 оборудован-

ных ПДКМ выполнять соединение с трубопроводов при помощи контрольно-измерительных колонок, при их отсутствии пользоваться выносным электро-

дом. Измерения выполняются электронными вольтметрами (мульти-метрами) 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 вынужденного электродного потенциала.

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

7. Определяют собственный с учетом влияния соседних 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 выходе станции 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.

По полученным данным были составлены таблицы изменения защитных суммарных потенциалов по трассе МГ в зависимости от режимов работы СКЗ.

Таблица 4.1 - Изменение защитных суммарных потенциалов по трассе МГ в зависимости от режимов работы СКЗ

Рег. СКЗ	t изм	Искз,А	Uскз,В	Uсум кип137	Uсум ж/д117	Uсум а/д117	Uсум скз107
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

Окончание таблицы 4.1.

Рег. СКЗ	t изм	Искз,А	Ускз,В	Усум кип137	Усум ж/д117	Усум а/д117	Усум скз107
	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	-----	-0,8	-0,9	-1,1
	14:12	0,09	1,04	-----	-0,82	-0,95	-1,1
	14:20	4,32	15,84	-----	-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

По полученным данным методами линейной аппроксимации находятся коэффициенты матрицы влияния.

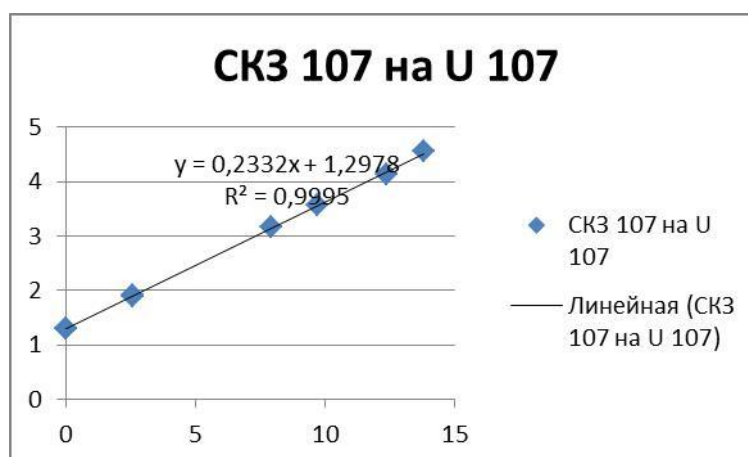


Рисунок 4.4 – Влияние СКЗ на 107 километре на потенциал в точке дренажа

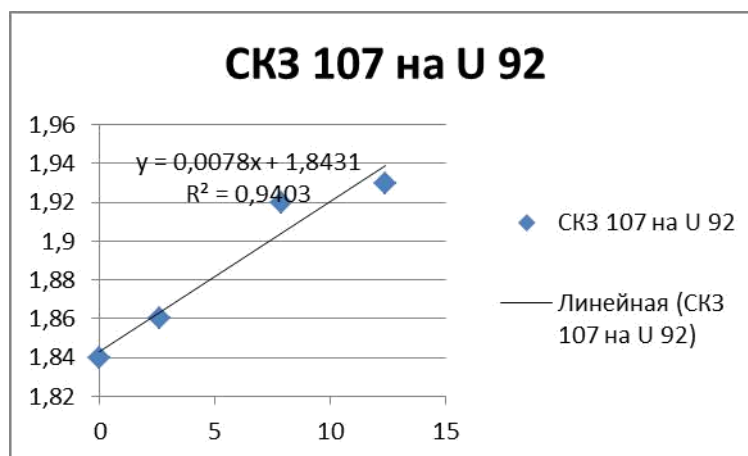


Рисунок 4.5 – Влияние СКЗ на 107 километре на потенциал на 92 километре МГ

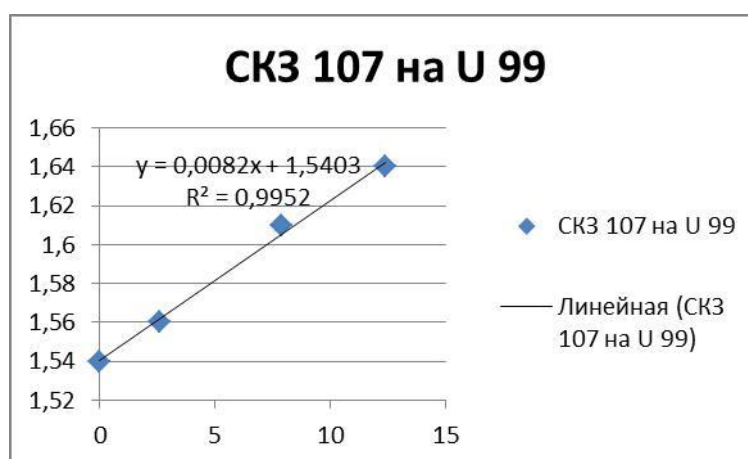


Рисунок 4.6 – Влияние СКЗ на 107 километре на потенциал на 99 километре МГ

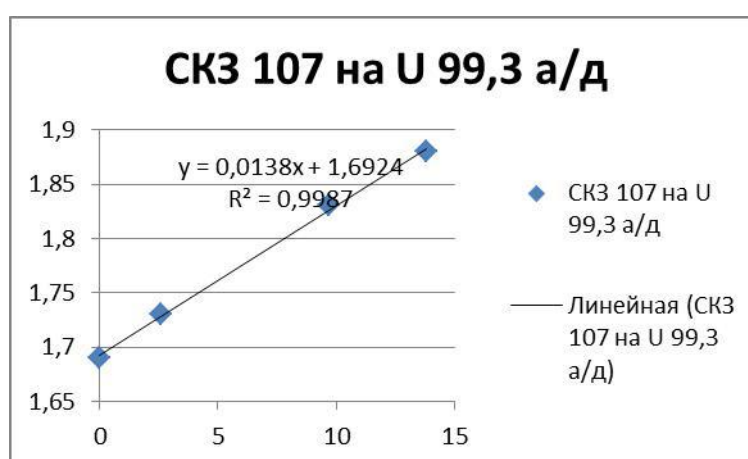


Рисунок 4.7 – Влияние СКЗ на 107 километре на потенциал на 99,3 километре МГ

По полученным коэффициентам была произведена идентификация модели «труба-земля». Была составлена матрица зависимостей, представленная в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Идентификация системы «труба-земля»

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	0,001
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

Далее методами структурной оптимизации, описанными в главе 2 и используя алгоритмы из главы 3 был проведен расчет оптимальных режимов работы станций катодной защиты на исследуемом участке. Полученные данные показали, что на участке трубопровода можно вывести в резерв 5 станций катодной защиты, 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.

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

По результатам измерений были получены следующие графики (рисунок 4.8).

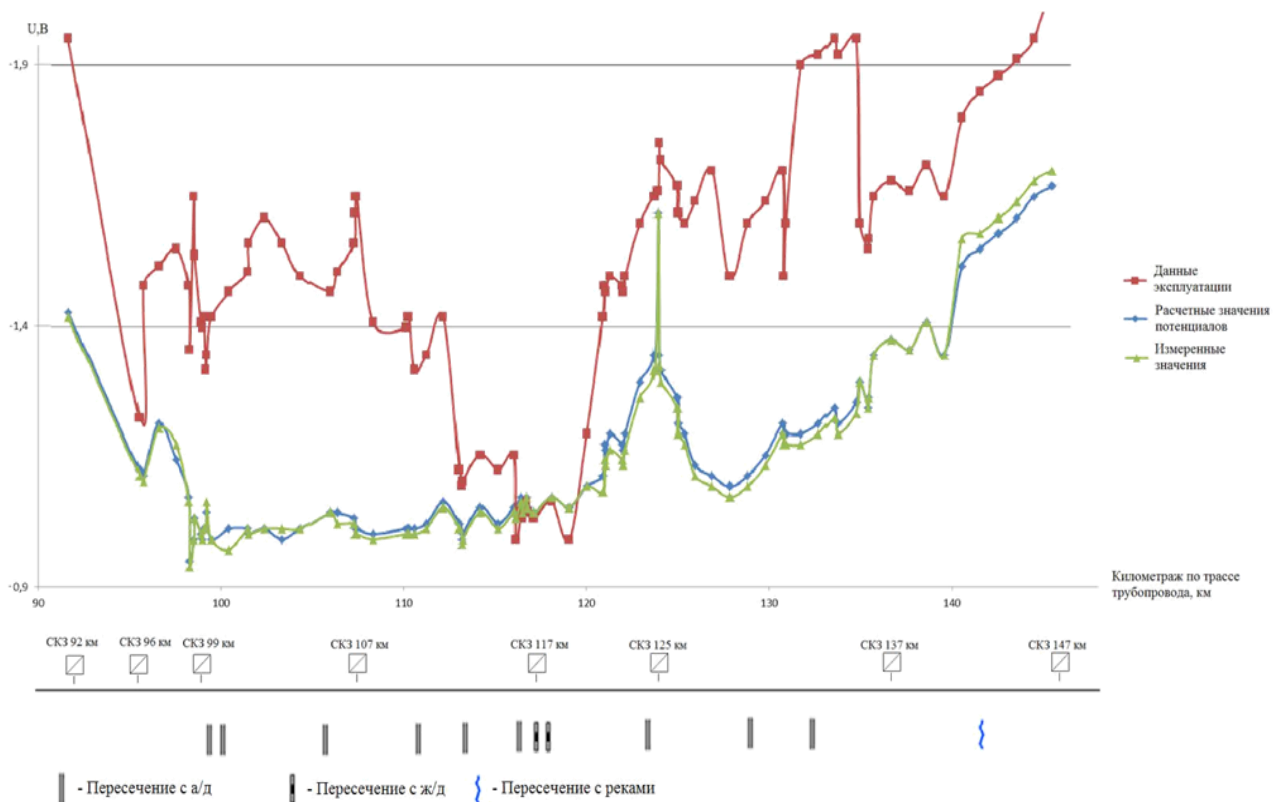


Рисунок 4.8 – Распределение потенциалов на исследуемом участке до и после оптимизации режимов работы СКЗ

4.3 Выводы по главе

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

Экспериментально проверена методика нахождения наложенного неопределенными источниками потенциала в точке измерения;

Произведен расчет оптимальных режимов работы СКЗ методами структурной оптимизации. 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

1. Введено понятие стороннего потенциала наложенного неизвестными источниками, определяющего стационарный потенциал в совокупности с 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 оптимизации.

2. Экспериментально проверена методика нахождения наложенного неопределенными источниками потенциала в точке измерения. Полученные данные показывают, что найденный данным методом потенциал, совпадает с действительно измеряемым потенциалом с достаточной для инженерных нужд точностью;

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

4. Разработанные алгоритмы оптимизации дают возможность выбора режимов работы СКЗ, позволяющих учесть как внешние влияющие факторы, так и параметры системы «труба-земля» для определения оптимального режима работы.

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

6. Произведен расчет оптимальных режимов работы СКЗ методами структурной оптимизации. 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.

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. Оценка зависимостей совокупного влияния внешних факторов на коррозию.
6. Решение обратных задач по определению электрических характеристик системы «труба-земля».
7. Мониторинг (автоматическое обнаружение тенденций) изменения характеристик системы «труба-земля».
8. Прогноз изменения (во времени):
 - 8.1. параметров ЭХЗ и трубопровода;
 - 8.2. коррозионного состояния трубопровода.
9. Прогнозирование состояния участков трубопровода и оборудования ЭХЗ для проведения ТОиР.
10. Поддержка принятия и контроль диспетчерских решений.
11. Определение остаточного ресурса (СКЗ, АЗ, изоляции и др.).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 проявления КРН // Физика металлов. – 1992. - № 6. - С. 18-20.
- 2 Ажогин Ф.Ф. Коррозионное растрескивание и защита высокопрочных сталей. – М.: Металлургия, 1974. – 256 с.
- 3 Ажогин Ф.Ф., Иванов С.С. // Новые достижения в области теории и практики противокоррозионной защиты металлов / Сб. докл. семинара по коррозии – Звенигород, 1980. - М., 1981. – С. 93.
- 4 Акимов Г.В. Теория и методы исследования коррозии металлов. – М.: Изд. АН СССР, 1945. – 414 с.
- 5 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.
- 6 Алимов С.В. Оценка технического состояния и определение сроков безопасной эксплуатации трубопроводов / С. В. Алимов, Б. Н. Антипов, А. В. Захаров, А. Н. Кузнецов // Газовая промышленность – 2009. – №1. – С 24-25.
- 7 Андрианов В.Р. Берман Э.А. Дефектоскоп для контроля сплошности изоляционных покрытий магистральных трубопроводов "Крона-1Р". - М.: МГЦТНИ, 1984 - 78 с.
- 8 Андрияшин В.А., Костюченко А.А., Комаров А.И. Коррозионное разрушение поверхностей магистральных труб нефтепровода после длительное эксплуатации // Защита металлов. – 2006. – т. 42. - №1. – С. 52-56.
- 9 АНТИКОРРОМКОМПЛЕКС-ХИМСЕРВИС. Методы обследований состояния ЭХЗ подземных трубопроводов. URL http://www.chs.ru/3_info/methods.html.
- 10 Антонов В.Г., Алексагин А.В., Фатрахманов Ф.К., Карпов С.В., Ляшенко А.В. Состояние нормативной базы по противокоррозионной защите транспорта, добычи и переработки газа и пути ее совершенствования // М-лы НТС. – М.: ИРЦ Газпром. – 2002. - С. 10-15.

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

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

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

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

15 Васильев В.С., Покровский С.Ю. 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.

16 Велиюлин И.И. Современные технические решения по ремонту газопроводов // 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 "Газ-пром", г.Ухта, ООО "Севергазпром", 28-30 окт. 2003г. - Т.1. - М.: ООО "ИРЦ Газпром", 2004. - С. 8-15.

17 ВРД 39-1.10-004-99. Методические рекомендации по количественной оценке состояния магистральных газопроводов с коррозионными дефектами, их ранжирования по степени опасности и определению остаточного ресурса; Введ. 05.03.2000. – М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2000. – 48 с.

18 ВРД 39-1.10-026-2001 Методика оценки фактического положения и состояния подземных трубопроводов. – Взамен Методики оценки фактического положения

и состояния подземных трубопроводов (ООО «ВНИИГАЗ», 1992)
; Введ. 29.01.2001. – М. : ООО «ВНИИГАЗ», 2001. – 62 с.

19 Гарбер Ю.И. Параметры работоспособности противокоррозионных покрытий подземных трубопроводов за рубежом – М.: ВНИИОЭНГ, 1983.

- 20 Гарбер Ю.И. Эффективность изоляционных покрытий, нанесенных в трассовых условиях // Строительство трубопроводов. – 1992. - №7. - С.21-24.
- 21 Гарбер Ю.И., Серафимович В.В. Критерии работы изоляционных покрытий трубопроводов – М.: ВНИИОЭНГ, 1987. – 82 с.
- 22 Герасименко, А.А. Защита от коррозии, старения и биоповреждений машин, оборудования и сооружений. Т. 1. Справочник. – М.: Машиностроение, 1987. – 687с.
- 23 Глазков В.И., Котик В.Г., Глазов Н.П. Определение переходного сопротивления подземных металлических трубопроводов // Коррозия и защита в нефтедобывающей промышленности. – 1967. - № 5. - С. 29-34.
- 24 Глазов Н.П. Разработка методики прогнозирования параметров комплексной защиты трубопроводов от коррозии // Отчет о НИР – М.: ВНИИЦ, 1986.
- 25 Глазов Н.П. Об измерении поляризационного потенциала на подземных стальных трубопроводах // Практика противокоррозионной защиты. – 2000. №2 – С. 24 – 29.
- 26 Глазов Н.П., Шамшетдинов К.Л. и др. Оценка коррозионного состояния и защищенности нефтепроводов средней и поздней стадий эксплуатации // Трубопроводный транспорт. 1999. №8 – С. 18 – 20.
- 27 Глазов, Н.П. Моделирование электрохимической защиты трубопроводов // Труды ВНИИСТ, 1987, С. 137 –142.
- 28 Годовой отчет о деятельности федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2007 году / Колл. авт. – Под общ. ред. К.Б. Пуликовского. – М.: Открытое акционерное общество «Научно-технический центр по безопасности в промышленности», 2008. – 548 с.
- 29 ГОСТ 17792-72*. Электрод сравнения хлорсеребряный насыщенный образцовый 2-го разряда; Введ. 01.07.1973. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1972. – 9 с.
- 30 ГОСТ 9.602–89 Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. - М.: Изд-во стандартов, 1989. – 56 с.

- 31 ГОСТ 9.908-85 Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости – М.: Изд-во стандартов, 1985.
- 32 ГОСТ ИСО 9.602-2005. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. – Взамен ГОСТ 9.602-89; Введ. 01.01.2007. – М.: Стандартиформ, 2006. – 59 с.
- 33 ГОСТ Р 51164-98. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии; Введ. 01.07.99. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. – 45 с.
- 34 Гумеров Р.С. Изоляционные материалы для трубопроводов / Р.С. Гумеров, М.К. Рамеев, М.Ш. Ибрагимов // Трубопроводный транспорт нефти. – 1996. – №1. – С.22.
- 35 Делекторский А.А. Особенности работы эластомерных анодов // Территория нефтегаз. – 2006 г, №6, С. 44 – 55.
- 36 Дуэйн Тр. Влияние отслоения изоляции трубопровода на катодную защиту // Нефтегазовые технологии. - №3. – 1997. - С.41-45.
- 37 Жук Н.П. Курс теории коррозии и защиты металлов. – М.: Metallurgy, 1976. - 472 с.
- 38 Защита оборудования от коррозии: Справочник / Под ред. Строкана Б.В. – Л.: Химия, 1987. – 505 с.
- 39 Зиневич А.М. Прогнозирование долговечности защитных покрытий подземных трубопроводов // Строительство трубопроводов. - 1971. - №11. - С. 13-14.
- 40 Зиневич А.М., Глазков В.М., Котик В.Г. Защита трубопроводов и резервуаров от коррозии. - М.: Недра, 1975. - 288 с.
- 41 Зорин А.А. Бесконтактная диагностика металла при электрометрическом обследовании трубопроводов / А. А. Зорин, В. В. Першуков, В. В. Мартынов // Газовая промышленность. – 2007. – №5. – С.68-69.
- 42 Инструкция по контролю состояния изоляции законченных строительством участков трубопроводов катодной поляризацией. – М.: ВНИИСТ, 1976. 47 с.

43 Инструкция по оптимизации режимов УКЗ промплощадок, утв. Мингазпромом СССР 21.03.86. ВНИИГАЗ. 1986г.

44 Колотовский, А.Н., Ахтимиров Н.Д. Разрушение газопроводов по причине коррозионного растрескивания под напряжением по предприятию Севергазпром // Материалы семинара по проблемам коррозионного растрескивания под напряжением. – Ухта.: Севернипигаз. – 1996, С. 14 – 25.

45 Корбачков, Л.А. Коррозионное разрушение металла подземного трубопровода по механизму макропар – М.: ИРЦ Газпром. – 1999. – 64с.

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

47 Кузнецов М.В., Новоселов В.Ф., Тугунов П.И., Котов В.Ф. Противокоррозионная защита трубопроводов и резервуаров / М.: Недра, 1992. – 187 с.

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.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Расчет оптимальных режимов работы 3 СКЗ, по экспериментальным данным, методами структурной оптимизации.

ORIGIN:= 1

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

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

$$\Pi =$$

	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

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

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

ORIGIN:= 1

Исходные данные

$$A := \begin{pmatrix} 0.0818 & 6.3297 \times 10^{-3} & 9.3801 \times 10^{-4} \\ 9.4939 \times 10^{-3} & 0.0839 & 9.4284 \times 10^{-3} \\ 6.0894 \times 10^{-3} & 8.1015 \times 10^{-3} & 0.2322 \\ 1.4184 & 1.2168 & 1.2344 \end{pmatrix} \quad U_{\min} := \begin{pmatrix} 0.9 \\ 0.9 \\ 0.9 \end{pmatrix} \quad U_{\max} := \begin{pmatrix} 2.5 \\ 2.5 \\ 2.5 \end{pmatrix}$$

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

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

$$U_{\min} = \begin{pmatrix} 0.9 \\ 0.9 \\ 0.9 \end{pmatrix} \quad A^T \cdot \text{stack}(I_{\min}, 1) = \begin{pmatrix} 1.418 \\ 1.217 \\ 1.234 \end{pmatrix} \quad U_{\max} := \begin{pmatrix} 2.5 \\ 2.5 \\ 2.5 \end{pmatrix}$$

Значение целевой функции

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