

УХТИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
Кафедра «Проектирование и эксплуатация магистральных газонефтепроводов»

На правах рукописи



ИСУПОВА ЕКАТЕРИНА ВЛАДИМИРОВНА

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ
ПОДЗЕМНЫХ НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ
НА ТЕРРИТОРИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЛОЩАДОК

Специальность 25.00.19 – Строительство и эксплуатация
нефтегазопроводов, баз и хранилищ

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
д-р техн. наук, профессор
Руслан Викторович Агиней

Ухта - 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СРЕДСТВ И МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ ТРУБОПРОВОДОВ НА ТЕРРИТОРИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЛОЩАДОК	14
1.1 Принципы проектирования и проведения пусконаладочных работ средств ЭХЗ трубопроводов, работающих на территории промышленных площадок....	14
1.2 Примеры негативного влияния защитных заземлений энергоустановок на эффективность защиты трубопроводов от коррозии.....	26
1.3 Обзор методов снижения негативного влияния защитных заземлений на работу анодных заземлений трубопроводов	29
1.4 Выводы по главе 1. Цель и задачи исследования	45
ГЛАВА 2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ ПРИ ВЗАИМНОМ ВЛИЯНИИ АНОДНЫХ И ЗАЩИТНЫХ ЗАЗЕМЛЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ ПРОМЫШЛЕННОЙ ПЛОЩАДКИ.....	48
2.1 Создание математической модели токораспределения в грунте от работы катодной защиты при наличии системы защитного заземления или молниезащиты.....	48
2.2 Разработка программного обеспечения для моделирования параметров катодного тока на территории промышленной площадки с учетом влияния защитных заземлений	56
2.3 Исследование влияния защитного заземления на распределения вдоль трубопровода силы тока катодной защиты и разности потенциалов между трубопроводом и грунтом	59
2.4 Исследование влияния взаимного расположения станции катодной защиты и защитного заземления на распределения вдоль трубопровода силы тока катодной защиты и разности потенциалов между трубопроводом и грунтом.....	61
2.5 Исследование влияния характеристик станции катодной защиты, защитного заземления и грунта на распределения вдоль трубопровода силы тока катодной защиты и разности потенциалов между трубопроводом и грунтом.....	65
2.6 Выводы по главе 2.....	68

ГЛАВА 3 ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ЗАЩИТНЫХ ЗАЗЕМЛЕНИЙ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЛОЩАДОК 71

3.1 Проведения экспериментальных лабораторных исследований влияния защитных заземлений электроустановок на эффективность электрохимической защиты подземных трубопроводов 71

3.2 Определение количественных параметров, характеризующих экранирование тока катодной защиты при наличии влияния защитных заземлений 88

3.3 Выводы по главе 3 91

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИСПЫТАНИЕ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА УСТРОЙСТВА ДЛЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО РАЗДЕЛЕНИЯ СИСТЕМ ЗАЩИТНОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ И КАТОДНОЗАЩИЩАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ НА ТЕРРИТОРИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЛОЩАДОК 93

4.1 Разработка требований к техническим параметрам, конструктивным элементам и материалам, используемым при изготовлении устройства 93

4.2 Разработка и обоснование конструктивных элементов устройства 95

4.3 Изготовление и лабораторные испытания образцов устройства 103

4.4 Испытания образцов устройства на действующих объектах 113

4.5 Выводы по главе 4 127

ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО СНИЖЕНИЮ НЕГАТИВНОГО ВЛИЯНИЯ ЗАЩИТНЫХ ЗАЗЕМЛЕНИЙ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ТРУБОПРОВОДОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЛОЩАДОК 129

5.1 Разработка принципов проектирования и проведения пусконаладочных работ средств ЭХЗ трубопроводов с учетом влияния защитных заземлений энергоустановок..... 129

5.2 Определение требуемых параметров устройства для гальванического разделения систем заземления и катоднозащищаемых объектов 137

5.3 Реализация алгоритма выбора мероприятия по снижению экранирующего влияния, оказываемого контурами защитного заземления на распространение катодного тока, при проектировании компрессорной станции..... 147

5.4 Выводы по главе 5 150

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	151
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	153
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	154
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	165
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	166

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы.

Эффективность защиты от коррозии подземных трубопроводов является одним из основных факторов, определяющих надежность и долговечность эксплуатации нефтегазопроводных систем. Коррозионные процессы, протекающие вследствие электрохимического взаимодействия металлов с окружающей средой, являются основной причиной разрушения металлов или изменения их свойств, что представляет опасность разгерметизации нефтегазопроводов и, как следствие, образования утечек транспортируемой среды, а также возникновения угрозы для жизни и здоровья обслуживающего персонала.

Подземные участки трубопроводов, расположенных на территории промышленных площадок, относятся к зонам повышенной коррозионной опасности, характеризующимися скоростью коррозии более 0,3 мм/год [18, 68]. По этой причине подземные технологические трубопроводы подлежат комплексной защите от коррозии с применением пассивных (использование изоляционных покрытий) и активных (протекторная, электродренажная и катодная защита) методов.

Основным критерием защищенности подземных трубопроводов от коррозии является уровень защитного потенциала на сооружении, который должен находиться в нормируемых пределах [18].

Конфигурация трубопроводных систем и оборудования, расположенного на территории промышленных площадок, как правило, представляет собой сложную систему, элементы которой находятся в условиях взаимного влияния. Подземные трубопроводы и другие коммуникации, расположенные на территории промышленной площадки, обычно защищены несколькими станциями катодной защиты (СКЗ), анодные заземления которых расположены по периметру объекта.

Как показывает опыт эксплуатации, при наличии сложноразветвленной системы подземных металлических коммуникаций, контуров защитных

заземлений и заземлений молниезащиты [31], а также при воздействии классических и неклассических источников блуждающих токов [13, 79] в ряде случаев могут наблюдаться непроектные смещения защитного потенциала трубопроводов в положительную или отрицательную область. Так, при проведении электрометрических обследований трубопроводов на территории промышленных площадок установлено, что снижение потенциалов «труба – земля» связано с явлением экранирования тока катодной защиты контурами защитных заземлений, вызванным отсутствием гальванической развязки между защищаемыми трубопроводами и другими металлоконструкциями площадного объекта [31].

Учитывая разветвленность трубопроводных систем площадных объектов, а также большое количество электрооборудования, подлежащего заземлению, совокупность элементов представляет собой сложное сооружение [71], в котором внешние электроды (заземлители, свайный фундамент, стальная арматура и пр.) зачастую являются катодными элементами рассматриваемой системы, что влечет за собой рост потребления тока катодной защиты, а также создает дополнительные препятствия для его равномерного распределения. Такие условия работы приводят локальной неэффективной защите трубопроводов, а также сокращению ресурса анодных заземлений.

Таким образом, можно сделать вывод о необходимости разработки и внедрения мероприятий по минимизации эффекта экранирования токов катодной защиты контурами защитных заземлений и молниезащиты с привлечением представителей подрядчиков, заказчиков, специалистов по проектированию, сооружению и эксплуатации площадных объектов нефтегазотранспортной системы на этапах проектирования, сооружения, проведения пусконаладочных работ и эксплуатации. При этом важно учитывать, что выбор наиболее целесообразных мер по снижению влияния защитных заземлений зависит от различных факторов, учет и классификация которых позволяет обеспечить эффективную защиту подземных трубопроводов от коррозии.

Вышесказанное указывает на необходимость проведения оценки влияния контуров защитных заземлений на защищенность подземных трубопроводов от

коррозии, на результатах которой могут быть основаны рекомендации по внедрению тех или иных мероприятий, направленных на повышение эффективности электрохимической защиты от коррозии подземных трубопроводов площадных объектов, разработка которых является важной научно-технической задачей.

Степень разработанности темы исследования.

Вопросам повышения эффективности противокоррозионной защиты трубопроводов, расположенных на территории промышленных площадок, в своих работах значительное внимание уделяли Р. В. Агинеи, И. В. Глотов, А. Г. Коротяев, Л. А. Селина, И. Г. Телетьен, Ф. К. Фатрахманов, В. Н. Юшманов, З. Х. Ягубов, A. Gummow, B. R. Husock, E. L. Kirkpatrick и др [11, 13, 31, 52, 60, 71, 76, 77, 81, 82, 86-96, 104]. В настоящее время разработаны методики оптимизации совместной работы нескольких станций катодной защиты трубопроводов, в т.ч. на территории промышленных площадок [11, 13, 62, 77]. Несмотря на неоспоримую практическую значимость данных работ, реализация методик на действующих объектах в некоторых случаях не позволяет устранить некоторые участки, на которых наблюдается снижение потенциала «труба – земля» по абсолютной величине. Специалистами нефтегазовой отрасли отмечены неоднократные случаи несоответствия значений защитного потенциала на участках технологической обвязки оборудования, подлежащего заземлению [31, 51, 60]. Однако, на сегодняшний день не разработаны методики проектирования и эксплуатации систем ЭХЗ трубопроводов промышленных площадок, позволяющие учитывать негативное влияние, оказываемое на эффективность противокоррозионной защиты контурами защитного заземления и молниезащиты. Также отсутствуют рекомендации по минимизации и ликвидации эффекта экранирования тока катодной защиты на стадиях проектирования и ввода объектов в эксплуатацию.

Цель работы.

Повышение эффективности противокоррозионной защиты трубопроводов, расположенных на территории промышленных площадок, путем внедрения научно-обоснованных технико-технологических решений в области

проектирования, сооружения и эксплуатации систем противокоррозионной защиты нефтегазопроводов.

Задачи исследования:

1. Проведение исследования влияния системы защитного заземления, электрически соединенной с трубопроводом, на изменение параметров катодной защиты путем математического моделирования процесса токораспределения в системе противокоррозионной защиты трубопровода.

2. Разработка стенда и методики проведения экспериментальных исследований по оценке экранирующего эффекта от точечного защитного заземления.

3. Исследование изменения экранирующего эффекта в зависимости от материала защитного заземления, геометрических параметров его расположения относительно защищаемого сооружения и анодного заземления.

4. Совершенствование устройства для разделения контуров защитного заземления и катоднозащищаемых объектов, проведение лабораторных и опытно-промышленных испытаний образцов устройства на действующих площадочных объектах.

5. Разработка практических рекомендаций по повышению эффективности противокоррозионной защиты трубопроводов промышленных площадок на стадии проектирования, ввода в эксплуатацию и эксплуатации.

Соответствие паспорту специальности.

Представленная диссертационная работа соответствует паспорту специальности 25.00.19 – «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ», а именно областям исследования «Разработка и усовершенствование методов эксплуатации и технической диагностики оборудования насосных и компрессорных станций, линейной части трубопроводов и методов защиты их от коррозии» (п. 6) и «Разработка и оптимизация методов проектирования, сооружения и эксплуатации сухопутных и морских нефтегазопроводов, нефтебаз и газонефтехранилищ с целью усовершенствования технологических процессов с учетом требований промышленной экологии» (п. 2).

Научная новизна.

1. Введен критерий для оценки степени влияния контуров защитного заземления на параметры ЭХЗ трубопроводов - коэффициент экранирования тока катодной защиты, равный отношению разности значений потенциалов «труба – земля» при отсутствии и при наличии влияния защитных заземлений и наложенного потенциала «труба – земля» при отсутствии влияния защитных заземлений.

2. Разработана математическая модель распределения тока катодной защиты подземных трубопроводов, учитывающая влияние защитных заземлений в условиях промышленных площадок, позволяющая осуществлять выбор оптимальных параметров систем катодной защиты и мест установки защитных заземлений на проектируемых объектах, а также определение параметров и мест установки устройств для гальванической развязки между трубопроводом и защитными заземлениями.

3. Разработан алгоритм выбора мероприятий по минимизации и устранению негативного влияния контуров защитного заземления и молниезащиты, учитывающий основные параметры, характеризующие экранирование тока катодной защиты трубопроводов на территории промышленных площадок.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

Доказано, что одной из причин снижения эффективности ЭХЗ трубопроводов промышленных площадок, проявляющейся в несоответствии значений потенциала «труба – земля» установленным требованиям, является экранирование токов катодной защиты контурами защитных заземлений.

Получены уравнения для расчета внешнего электрического поля, действующего на участок трубопровода, подключенный к произвольному количеству станций катодной защиты и имеющий электрический контакт с произвольным количеством защитных заземлений электроустановок.

Установлена зависимость величины КЭТКЗ от материала и расположения защитного заземления относительно защищаемого сооружения и анодного

заземления, а также угловой пространственной ориентации защитного заземления относительно защищаемого сооружения и анодного заземления.

Проведена систематизация основных направлений по минимизации негативного влияния на распределение параметров ЭХЗ трубопроводов, работающих в условиях взаимовлияния с контурами защитных заземлений промышленных площадок.

Практическая значимость работы определяется тем, что:

Разработано программное обеспечение «PPE Modeller», позволяющее производить расчет распределения силы тока в трубопроводе и разности потенциалов между трубопроводом и грунтом при наличии подключенных к трубопроводу станций катодной защиты и электрического контакта между трубопроводом и защитными заземлениями электроустановок.

Разработана конструкция устройства для разделения контуров катодной защиты и контуров защитных заземлений, позволяющего обеспечить уменьшение величины катодного тока, натекающего на защитные заземления.

Приведены результаты испытаний разработанного устройства, свидетельствующие о повышении абсолютной величины защитного потенциала на трубопроводах промышленных площадок при установке устройства в разрыв цепи защитного заземления.

Представлены результаты внедрения на стадии проектирования системы ЭХЗ трубопроводов КС «Дивенская» разработанного алгоритма выбора мероприятий, позволяющих обеспечить требуемые параметры противокоррозионной защиты трубопроводов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Реализация при проектировании и эксплуатации нефтегазопроводов разработанного алгоритма управления параметрами электрохимической противокоррозионной защиты в условиях влияния защитных заземлений и заземлений молниезащиты позволяет с учетом местоположения контура защитного заземления относительно трубопровода и анода, материала электродов и гальванической развязки между электрическими цепями обеспечить оптимальный

уровень защиты от коррозии подземных трубопроводов промышленных площадок. При этом обеспечивается минимизация потребляемой станциями катодной защиты электроэнергии и повышение срока службы анодных заземлителей (в отдельных случаях на порядок и более), снижается опасность выхода из строя преобразователей защиты и создается необходимый резерв запаса преобразователей по току и мощности.

2. Применение при проектировании новых и реконструируемых трубопроводов разработанного и научно-обоснованного технического решения, представленного устройством, служащим для гальванической развязки электрических цепей анодных и защитных заземлений, позволяет исключить негативное влияние защитных заземлений и обеспечить требуемую величину защитного потенциала на трубопроводах. Тип и количество полупроводниковых диодов в устройстве выбирают в соответствии с разработанной методикой в зависимости от величины и условий протекания тока, материала электродов заземлений и других параметров.

Методология и методы исследования.

При выполнении диссертационного исследования применялся комплексный подход, включающий научный анализ, планирование и проведение экспериментальных исследований, измерение, сравнение, абстрагирование, индукцию, методы статистической обработки результатов измерений.

Степень достоверности и апробация результатов.

Основные научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в работе, базируются на экспериментальных данных, полученных с применением современных теоретических и экспериментальных методов исследований, имитационного моделирования с использованием современной измерительной техники, научно-исследовательского оборудования и компьютерного обеспечения.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на VIII научно-практической конференции молодых работников ООО «Газпром трансгаз Ухта» (г. Ухта, 05-09 декабря 2016 г.), международной конференции «Рассохинские чтения» (г. Ухта, 2017-2018 гг.), конференции

«Трубопроводный транспорт. Теория и практика - 2017» (г. Москва, 7-8 февраля 2017 г.), международной научно-практической конференции обучающихся, аспирантов и ученых «Опыт, актуальные проблемы и перспективы развития нефтегазового комплекса» (г. Нижневартовск, 20 апреля 2017 г.), XVIII международной молодежной научной конференции «СЕВЕРГЕОЭКОТЕХ-2017» (г. Ухта, 12-14 апреля 2017 г.), XII международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт – 2017» (г. Уфа, 24-25 мая 2017 г.), IV научно-практической конференции молодых специалистов АО «Гипрогазцентр» (г. Нижний Новгород, 22-23 августа 2017 г.), видеосовещании ООО «Газпром трансгаз Ухта» и АО «Гипрогазцентр» «Вопросы повышения эффективности противокоррозионной защиты объектов ПАО «Газпром» (г. Ухта, 30 августа 2017 г.), XII Всероссийской конференции молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности» (г. Москва, 24-27 октября 2017 г.), X научно-практической конференции молодых специалистов ОМК им. С. З. Афолина (г. Выкса, 27-29 ноября 2017 г.), VII научно-практической конференции молодых работников Сосногорского ЛПУМГ филиала ООО «Газпром трансгаз Ухта» (г. Ухта, 29 ноября – 1 декабря 2017 г.), VII научно-практической конференции молодых работников Инженерно-технического центра филиала ООО «Газпром трансгаз Ухта» (г. Ухта, 5-8 декабря 2017 г.), Международной конференции «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса» (г. Москва, 12-14 февраля 2018 г.), межрегиональных вебинарах «Актуальные вопросы нефтегазотранспортной отрасли (г. Ухта, 2016-2018 гг.).

Результаты диссертационного исследования **внедрены** в учебный процесс обучающихся по направлениям подготовки 21.03.01 и 21.04.01 Нефтегазовое дело в рамках дисциплин «Электрохимические методы защиты» и «Пусконаладочные работы при сооружении систем ЭХЗ» (приложение А).

Разработанный алгоритм выбора мероприятий по повышению эффективности защиты от коррозии подземных трубопроводов в условиях экранирования катодного тока защитными заземлениями электрооборудования на

стадиях проектирования, проведения пусконаладочных работ и эксплуатации систем ЭХЗ промышленных площадок был **использован** при проектировании компрессорной станции «Дивенская» в рамках проекта «Развитие газотранспортных мощностей ЕСГ Северо-Западного региона, участок «Грязовец - КС Славянская» (приложение Б).

Сведения о публикациях автора.

По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ, из них 6 - в ведущих рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки РФ.

Структура и объем работы: диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, содержит 166 страниц с учетом приложений. Текст включает 55 рисунков, 34 таблиц, список литературы из 104 наименований.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования, изучении отечественных и зарубежных достижений в соответствующей области науки, проведении теоретических и экспериментальных исследований, анализе полученных результатов, их апробации, подготовке публикаций по выполненной работе.

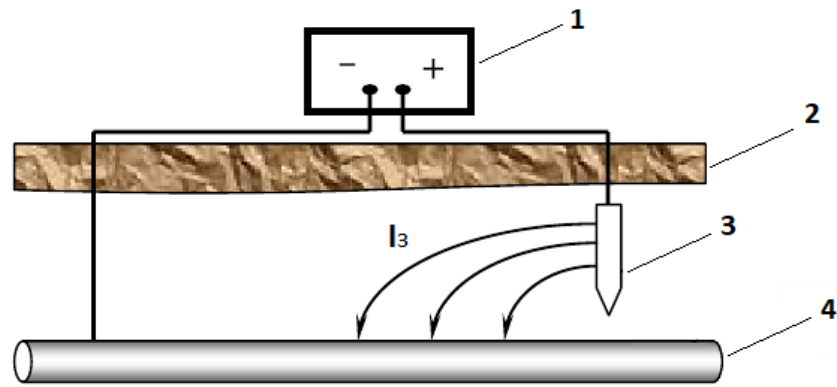
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СРЕДСТВ И МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ ТРУБОПРОВОДОВ НА ТЕРРИТОРИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЛОЩАДОК

1.1 Принципы проектирования и проведения пусконаладочных работ средств ЭХЗ трубопроводов, работающих на территории промышленных площадок

Обеспечение надежной и безопасной работы нефтегазопроводов промышленных площадок нефтеперекачивающих и компрессорных станций (НПС и КС) и предотвращение их разрушения по причине коррозии является важнейшей задачей нефтегазотранспортных предприятий, решение которой позволяет снизить риск разгерметизации оборудования, утечек продукта и возможного негативного воздействия на окружающую среду. При подземной прокладке трубопроводы подлежат комплексной защите от коррозии защитными покрытиями и средствами электрохимической защиты (ЭХЗ) независимо от коррозионной активности грунта.

Средства ЭХЗ должны обеспечивать степень защиты трубопроводов от коррозии в интервале потенциалов «труба – земля» в соответствии с требованиями [18]. ЭХЗ подземных коммуникаций площадных объектов осуществляется методом катодной поляризации (рисунок 1.1), основным принципом которой является катодная поляризация сооружения при помощи источника постоянного тока с целью достижения эквипотенциального влияния анодных заземлений на всю поверхность защищаемого объекта [19, 22, 23, 49, 61].

Конфигурация трубопроводных систем и оборудования, расположенного на территории промышленных площадок, как правило, представляет собой сложную систему, элементы которой находятся в условиях единого токопроводящего грунта, что предопределяет влияние каждого единичного элемента на остальные.



1 – станция катодной защиты; 2 -поверхность грунта; 3 – анодное заземление; 4 – подземный трубопровод; I_z – защитный ток

Рисунок 1.1 – Схема катодной поляризации подземных трубопроводов

Подземные трубопроводы и другие коммуникации, расположенные на территории промышленной площадки, обычно защищены несколькими станциями катодной защиты (СКЗ), анодные заземления которых расположены по периметру площадки (рисунок 1.2).

Подземные участки технологических трубопроводов на территории промышленных площадок относятся к зонам повышенной коррозионной опасности. При подземной прокладке трубопроводы подлежат комплексной защите от коррозии защитными покрытиями и средства электрохимической защиты независимо от коррозионной активности грунта. Средства электрохимической защиты должны обеспечивать высокую степень защиты трубопроводов от коррозии по протяженности и во времени в соответствии с нормативными требованиями [18, 35, 67]. Основными направлениями повышения эффективности защиты от коррозии на территории промышленных площадок являются улучшение качества изоляционного покрытия трубопроводов, обеспечение высокой продольной проводимости трубопровода, устранение контактов с заземленными сооружениями [58, 85].

Главным принципом катодной защиты на площадных объектах является достижение эквипотенциального влияния анодных заземлений на всю поверхность площадки.

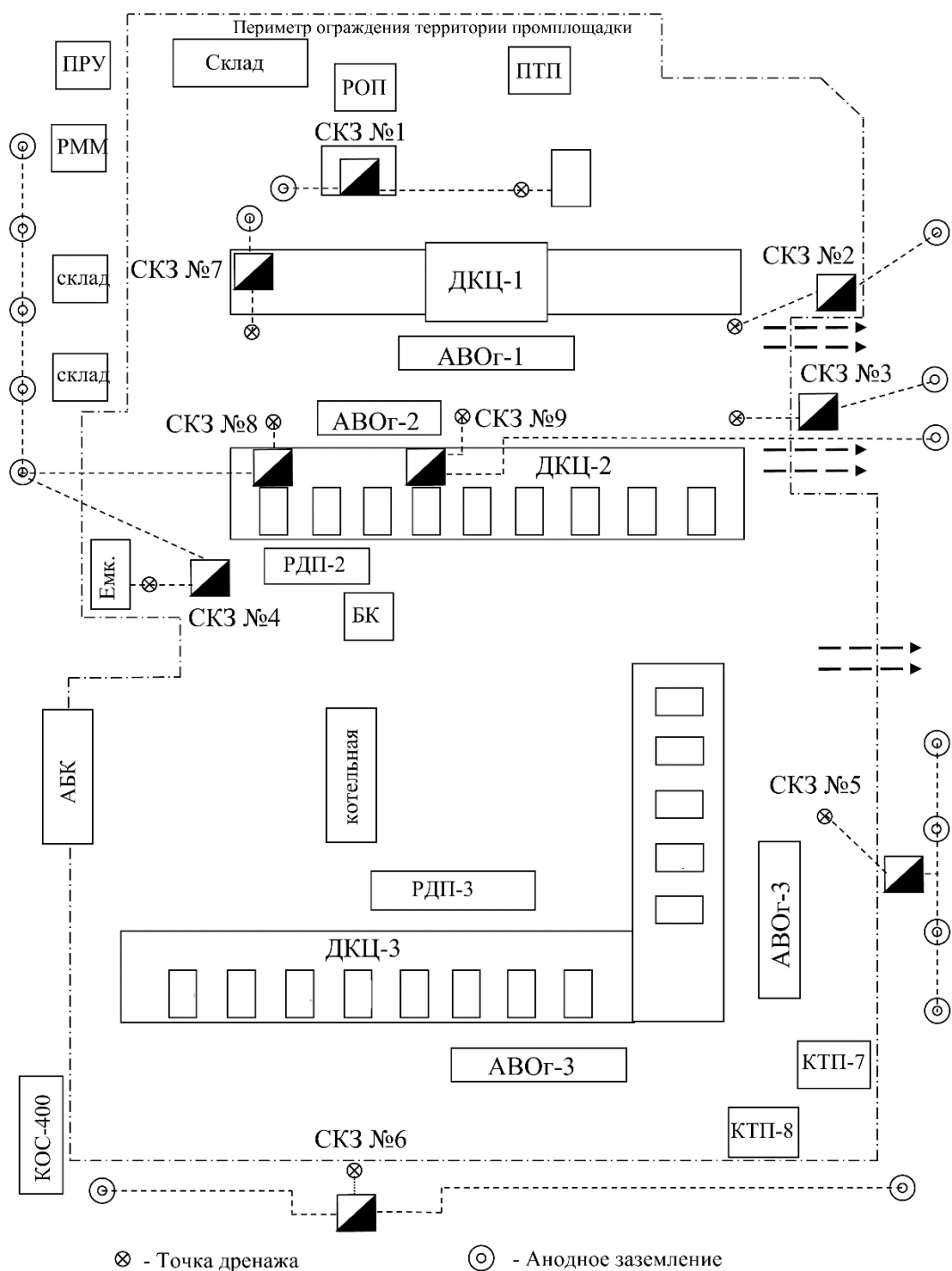


Рисунок 1.2 – Схема расположения элементов системы ЭХЗ на территории промышленной площадки (на примере ДЭС Вуктыльского ЛПУМГ)

Для достижения эквипотенциальности земли на территории промышленной площадки могут быть использованы поверхностные сосредоточенные анодные заземления, вынесенные за пределы площадки; глубинные анодные заземления, размеры которых являются точечными по сравнению с глубиной заложения;

глубинные анодные заземления, размеры которых соизмеримы с глубиной заложения; глубинные анодные заземления скважинного типа; поверхностные анодные заземления, распределенные по территории промышленной площадки [42, 50].

Оптимальной схемой ЭХЗ промплощадок в умеренных и южных районах является совместная схема защиты с одной или несколькими установками катодной защиты (УКЗ) с сосредоточенными глубинными анодами. В случае необходимости, проектом могут быть предусмотрены дополнительные распределенные аноды для обеспечения равномерного распределения токов защиты. В условиях вечной мерзлоты и/или при наличии многочисленных фундаментных свай, предпочтительной является схема защиты с распределёнными или протяженными анодами.

УКЗ включает следующие элементы: источник электроснабжения, преобразователь, анодное заземление, линии постоянного тока и контрольно-измерительные пункты (КИП). Для трубопроводов, проектируемых в северных регионах, монтаж преобразователей катодной защиты следует предусматривать в блок-боксах.

При осуществлении катодной защиты на коммуникациях промышленных площадок их следует объединять в отдельные электрически замкнутые контуры, отличающиеся величинами входных сопротивлений. Эти контуры должны быть параллельно подключены через регулирующие сопротивления к отрицательному полюсу установки катодной защиты. Для электрического разделения подземных технологических коммуникаций площадных объектов с подземными коммуникациями узла подключения предусмотрена установка электроизолирующих вставок [16].

Защита подземных коммуникаций площадных объектов и узла подключения обеспечивается устройством коррозионного мониторинга. Блок-бокс с установленной в заводских условиях стойкой, освещением и отоплением размещается на промышленной площадке. Система коррозионного мониторинга за состоянием подземных коммуникаций и дистанционным управлением режимами

катодных станций включена в общую систему АСУ ТП. По каналам технологической связи информация передается на диспетчерский пункт ЛПУ и далее на рабочее место оператора службы ЭХЗ для возможности регулирования режимами работы катодных станций.

Для контроля за состоянием комплексной защиты подземных трубопроводов установлены КИП [16]. В точках дренажа КИП оборудуются датчиками коррозии, устройством для измерения поляризационного потенциала, вспомогательным электродом. Защищенность подземных коммуникаций определяют ежеквартально путем измерения потенциала сооружения в контрольных точках.

Как показывает опыт эксплуатации, при наличии сложноразветвленной системы подземных металлических коммуникаций, контуров защитных заземлений и заземлений молниезащиты могут наблюдаться непроектные смещения защитного потенциала трубопроводов в положительную или отрицательную область. Причинами появления зон недостаточной защищенности участков трубопроводов от коррозии, являются:

- воздействие классических и неклассических источников блуждающих токов;
- неравномерность распределения параметров системы ЭХЗ трубопроводов при наличии нескольких СКЗ, вызванная сложностью регулирования напряжения и силы защитного тока для достижения равномерного распределения защитного потенциала на территории промышленной площадки;
- экранирование тока катодной защиты контурами защитных заземлений.

Если система ЭХЗ не обеспечивает полной защиты всех коммуникаций от коррозии, реализуют следующие мероприятия (или комплекс мероприятий) (рисунок 1.3):

- Оптимизация параметров системы ЭХЗ (определение такого режима работы УКЗ, при котором все коммуникации промышленной площадки будут защищены от почвенной коррозии, а суммарная электрическая мощность, расходуемая на защиту, будет минимальной);

- Реконструкция средств ЭХЗ: ремонт или дополнительная установка глубинных или распределенных анодных заземлений, увеличение мощности СКЗ, установка дополнительных УКЗ, реализация протекторной защиты в качестве дополнительной меры повышения эффективности ЭХЗ;
- Реализация отдельной защиты коммуникаций площадного объекта;
- Реализация мероприятий по реконструкции контура защитного заземления электрооборудования с применением оцинкованных материалов;
- Разработка и реализация технических решений по ремонту изоляционного покрытия.

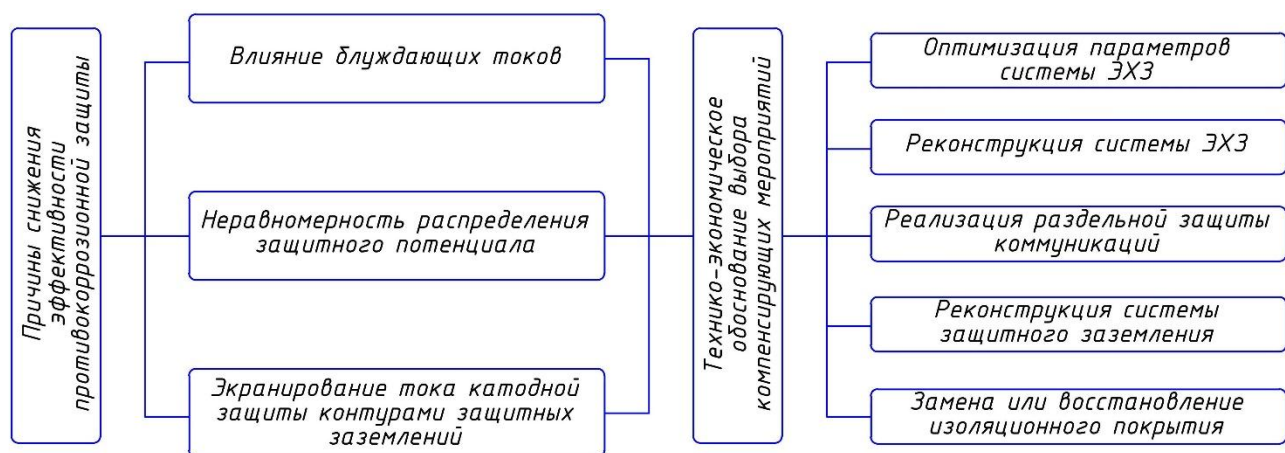


Рисунок 1.3 – Классификация причин снижения эффективности ЭХЗ трубопроводов и способов их ликвидации

Основным способом защиты человека от поражения электрическим током при прикосновении к металлическим нетоковедущим частям, которые могут оказаться под напряжением в результате повреждения изоляции, является защитное заземление [34].

На территории промышленных площадок заземлению подлежат следующие объекты:

- электроустановки, питающиеся от сетей с эффективным сопротивлением;
- электроустановки, питающиеся от сетей с изолированной нейтралью;

- электроустановки, питающиеся от источников с глухозаземленной нейтралью;
- металлические и железобетонные опоры ВЛ.

Защитное заземление выполняется преднамеренным электрическим соединением металлических не токоведущих частей электроустановок с «землей» или её эквивалентом. В качестве заземляющих проводников могут быть использованы специально предназначенные для этой цели проводники, металлические строительные, производственные и электромонтажные конструкции. Для выравнивания потенциалов металлические строительные и производственные конструкции присоединяются к сети заземления [46].

В качестве основных заземляющих устройств используются естественные заземлители (металлические подземные конструкции, фундаменты зданий и сооружений). Искусственные заземлители (вертикальные металлические стержни, соединенные между собой стальной полосой, два глубинных заземлителя глубиной 200 м) предусматриваются как дополнительные мероприятия для достижения требуемой величины сопротивления заземляющего устройства не более 4 Ом [48].

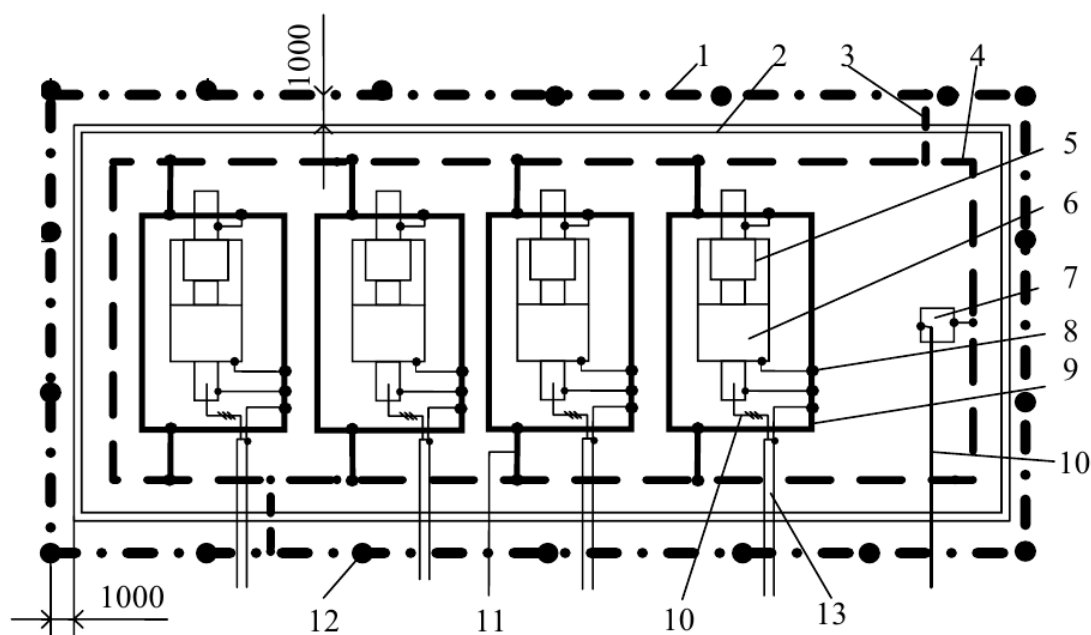
Для заземления электроустановок различных назначений и различных напряжений, территориально приближенных друг к другу, используются общие заземляющие устройства. Пример выполнения защитного заземления объекта на территории промышленной площадки представлен на рисунке 1.4.

Стальные каркасы строительных конструкций зданий объединены в единую систему уравнивающих проводников, присоединенных к заземляющему зажиму главной шины заземления.

В качестве дополнительных мер защиты человека предусматривается установка устройств защитного отключения.

Защитное заземление корпусов щитов и доступных для прикосновения элементов, устройств, датчиков, сигнализаторов выполняется путем присоединения специальных заземляющих болтов к защитным электротехническим магистралям заземления. Некоторое оборудование присоединяется к магистрали функционального заземления (электронные,

микропроцессорные устройства и т.д.). Функциональная магистраль (выполнена изолированными проводами и силовыми кабелями) присоединяется к заземлителю электротехнического заземления [54].



1 – внешний контур заземления; 2 – здание насосной; 3 – соединение магистрали заземления с контуром; 4 – магистраль заземления; 5 – насос; 6 – электродвигатель; 7 – электроприемник; 8 – разъемное соединение; 9 – шина уравнивания потенциалов; 10 – кабель; 11 – соединение шины уравнивания потенциалов с магистралью заземления внутри здания; 12 – электрод заземления; 13 – трубопровод

Рисунок 1.4 – Схема заземления здания магистральной насосной

Пуск и опробование системы электрохимической защиты от коррозии подземных металлических сооружений необходимо осуществлять до промерзания или после оттаивания грунта в два этапа [63, 66]:

1 этап - пуск, опробование и ПНР отдельных средств и установок электрохимической защиты от коррозии (индивидуальное опробование);

2 этап - пуск, опробование и оптимизация системы электрохимической защиты от коррозии подземного металлического сооружения (комплексное опробование).

Перед пуском и опробованием установки катодной защиты необходимо выполнить следующие подготовительные работы:

- отключить временную защиту сооружения и провести его деполяризацию;
- измерить при выключенных установках катодной защиты естественную разность потенциалов «труба – земля» в точке дренажа;
- визуальным осмотром, а также, используя акты на скрытые работы, установить соответствие выполненных монтажных работ проектным решениям;
- измерить величину сопротивления растеканию постоянному току $R_{зз}$, Ом, защитного заземления УКЗ (величина не должна превышать величину, установленную ПУЭ). Измерения производятся приборами типа М-416 или аналогичными. При измерении следует руководствоваться инструкцией, прилагаемой к измерителю сопротивления заземления. Измерение величины сопротивления следует проводить: «земля – защитное заземление»; «земля – шкаф преобразователя катодной защиты». Заполняется акт индивидуальных испытаний УКЗ;
- измерить величину сопротивления растеканию постоянному току анодного заземления $R_{аз}$, Ом, не ранее, чем через 8 дней после окончания монтажа анодного заземления). Заполняется акт индивидуальных испытаний УКЗ;
- измерить величину сопротивления изоляции анодных, дренажных кабелей, величина сопротивления должна соответствовать указанной в акте на приемку строительно-монтажных работ.

Пуск и опробование установок катодной защиты необходимо осуществлять в приведенной последовательности:

- установить регулятор выходного напряжения источника тока (преобразователя) катодной защиты в положение, соответствующее минимальному напряжению. Если преобразователи имеют два или больше диапазонов регулирования, то необходимо установить диапазон, соответствующий меньшим значениям напряжений;

- перевести преобразователи катодной защиты с автоматическим поддержанием тока или потенциала в режим ручного регулирования;
- собрать электрическую схему для измерения разности потенциалов «труба – земля» в точке дренажа УКЗ;
- неполяризуемый медно-сульфатный электрод сравнения следует устанавливать на поверхности земли над трубопроводом;
- измерения производятся прибором со входным сопротивлением не менее 10 МОм. Измерительный прибор должен быть подключен к трубопроводу через контрольно-измерительный пункт;
- проверить правильность подключения выходных клемм источников тока катодной защиты к трубопроводу и анодному заземлению путем поочередного включения и выключения преобразователя катодной защиты и синхронного измерения разности потенциалов «труба – земля» в точке дренажа;
- при правильном подключении преобразователя разность потенциалов «труба – земля» должна иметь более отрицательные значения при включении преобразователя. Если наблюдается обратная картина, то полярность подключения преобразователя к трубопроводу и анодному заземлению следует изменить на противоположную и повторить измерения;
- включить преобразователь катодной защиты и, плавно изменяя положение регулятора выходного напряжения, проверить работоспособность преобразователя во всех диапазонах регулирования. Выходное напряжение должно плавно изменяться от минимального до максимального значения, которые указаны в прилагаемой к преобразователю инструкции. Контролировать изменения выходного напряжения следует по показаниям вольтметра преобразователя;
- провести испытания УКЗ в максимальном режиме в течение не менее 72 ч. Для этого следует установить регулятором выходного напряжения максимальную силу тока, на которую рассчитан преобразователь. Если на момент испытания сопротивление цепи постоянного тока не позволяет установить максимальную силу тока даже при максимальном выходном напряжении преобразователя и разность потенциалов «труба – земля» приобретает более

отрицательное значение, чем максимально допустимое, то следует параллельно выходу преобразователя включить нагрузочное сопротивление, рассчитанное на максимальную силу тока преобразователя;

- установить проектное значение силы тока на выходе УКЗ, зафиксировать по приборам преобразователя значение выходного напряжения и через 24 ч. измерить разность потенциалов «труба – земля» в точке дренажа, при необходимости провести оптимизацию параметров УКЗ до достижения проектных значений разности потенциалов;

- провести проверку работоспособности КИП в зоне защиты УКЗ. Проверку исправности контрольно-измерительного пункта, оборудованного медно-сульфатным электродом сравнения длительного действия и вспомогательным электродом, осуществляют измерением разности потенциалов между выводами «электрод сравнения длительного действия – вспомогательный электрод» (не менее U_e), «электрод сравнения длительного действия – электрод сравнения» (не более 0,2-0,3 В) и «электрод сравнения длительного действия – трубопровод» ($U_{Т-З}$ вкл.). КИП считается исправным, если удовлетворяет изложенным требованиям. Заполняется акт о работоспособности КИП;

- выключить УКЗ до проведения пуска и опробования системы электрохимической защиты участка трубопровода.

Учитывая разветвленность трубопроводных систем площадных объектов, а также большое количество электрооборудования, подлежащего заземлению, совокупность элементов представляет собой сложное сооружение [70, 84], в котором внешние электроды (заземлители, свайный фундамент, стальная арматура и пр.) зачастую являются катодными элементами рассматриваемой системы. Данный факт существенно усложняет процедуру ввода объектов, подлежащих электрохимической защите, в эксплуатацию по причине негативного воздействия контуров защитного заземления. Эффект экранирования тока катодной защиты контурами защитных заземлений, вызывающий увеличение потребления электроэнергии установками катодной защиты и сокращение ресурса анодных заземлителей, поясняется рисунком 1.5.

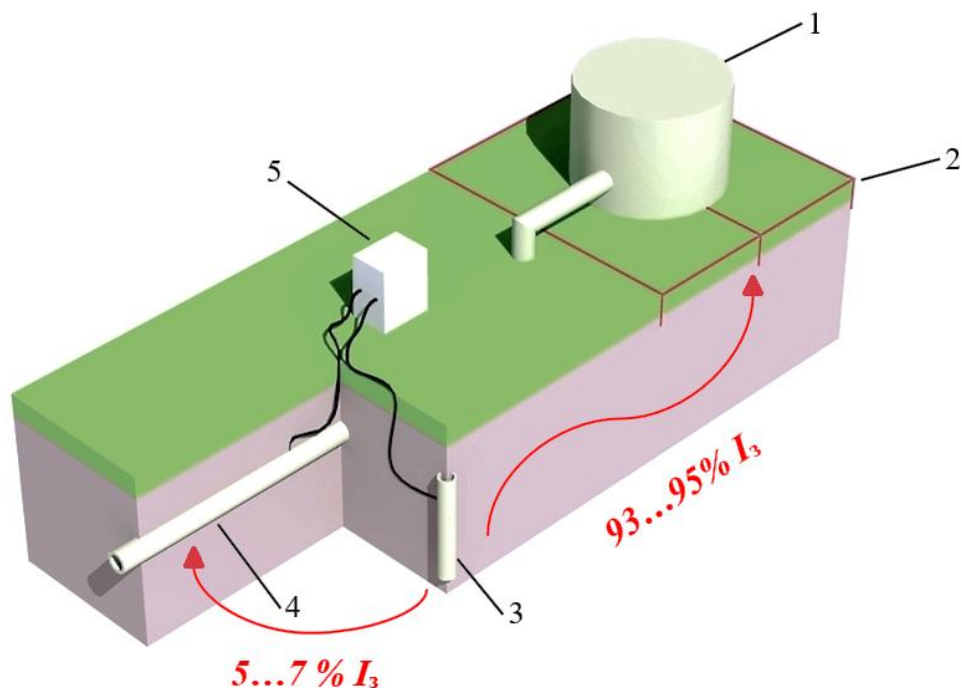


Рисунок 1.5 – Схема распространения катодного тока при наличии защитных заземлений электроустановок

В штатном режиме функционирования станции катодной защиты 5 катодный ток I_3 в полном объеме расходуется на защиту трубопровода 4 от коррозии. Однако при наличии гальванической связи между катоднозащищаемым трубопроводом и заземляемым оборудованием (в данном случае, резервуаром 1) в результате проявления эффекта экранирования большая часть катодного тока натекает на контур защитного заземления 2, который выражается в появлении незащищенных зон трубопровода и, как следствие, нерациональном расходе электроэнергии и металла анодного заземления 3.

Однако, даже в случае, если все известные влияния приняты во внимание при проектировании системы катодной защиты, опыт показывает, что на стадии ввода в эксплуатацию может быть выявлена необходимость монтажа дополнительных установок катодной защиты или анодных заземлителей. По этим причинам не всегда точно можно определить требуемые параметры системы электрохимической защиты трубопроводных систем площадных объектов на стадии проектирования.

1.2 Примеры негативного влияния защитных заземлений энергоустановок на эффективность защиты трубопроводов от коррозии

Установлено, что причинами негативного влияния контуров защитных заземлений на систему ЭХЗ являются:

1. Близость расположения оборудования вследствие пространственной ограниченности;
2. Применение большого количества вертикальных и горизонтальных заземляющих устройств;
3. Отступления от проектных решений вследствие недостаточного контроля выполнения строительно-монтажных работ средств ЭХЗ;
4. Отсутствие контроля и оценки качества выполняемых пусконаладочных работ;
5. Отсутствие при проектировании расчетов по определению оптимальных параметров катодной защиты при наличии негативного влияния защитных заземлений.

Основные причины снижения эффективности противокоррозионной защиты трубопроводов промышленных площадок, вызванные явлением экранирования тока катодной защиты контурами защитного заземления, представлены на рисунке 1.6.

Такие условия работы приводят локальной неэффективной защите трубопроводов, а также сокращению ресурса анодных заземлений и увеличению потребления электроэнергии установками катодной защиты, что влечет за собой повышение финансовых затрат, связанных с разработкой дополнительных мероприятий по обеспечению требуемого уровня защиты трубопроводов от коррозии (проведение дополнительных обследований с целью выявления и устранения видимых электрических контактов трубопроводов и контуров защитных заземлений, размещение дополнительных анодных полей в области недозащиты подземных трубопроводов, организация дополнительных точек дренажа и пр.) [60].

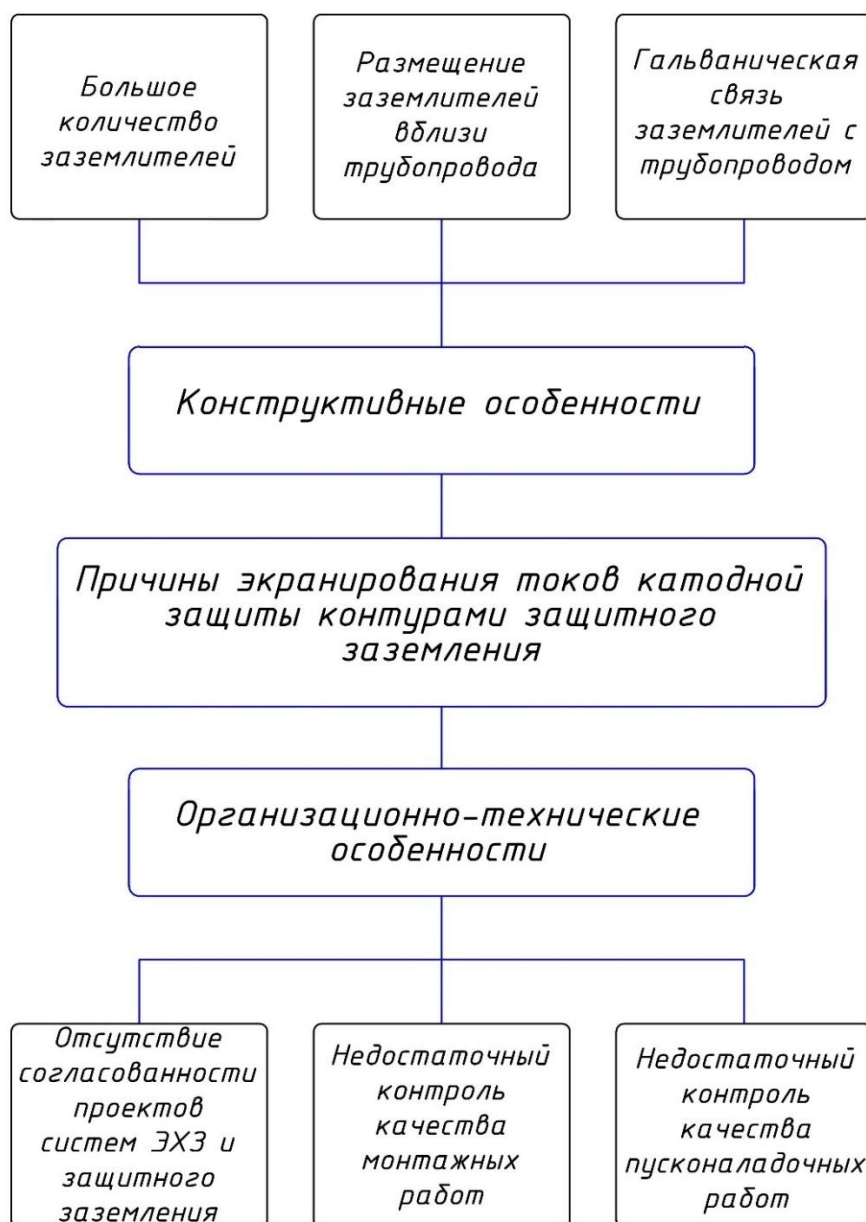


Рисунок 1.6 – Классификация причин негативного влияния контуров защитного заземления на систему ЭХЗ трубопроводов промышленных площадок

Примером такого негативного влияния могут служить результаты электрометрических обследований трубопроводов на территории компрессорной станции КС-13. Значения потенциалов «труба – земля» на подземных технологических коммуникациях и шлейфах промплощадки при выключенных внутриплощадочных СКЗ и СКЗ магистрального газопровода составили от минус 0,74 В до минус 0,87 В. Данные значения несколько выше собственного потенциала стали в грунтах, что свидетельствует о воздействии на подземные коммуникации

промплощадки стороннего источника поляризации. Проведенный анализ результатов контроля показал, что источником электрической поляризации подземных коммуникаций промплощадки являются защитные заземления электроустановок. Между защитным заземлением компрессорного цеха и подземными коммуникациями сопротивление находилось в пределах от 1,0 до 3,0 Ом, также был отмечен повышенный уровень переменной составляющей, что указывает на наличие электрической цепи между подземными трубопроводами и защитным заземлением компрессорных цехов.

Другим примером подобного явления служат результаты измерений потенциала «труба – земля» при максимальных режимах СКЗ, проведенных специалистами АО «Гипрогазцентр» на КС «Писаревская». В результате проведения измерений выявлено несоответствие значений защитного потенциала требованиям [18], основной причиной которого специалистами признано экранирующее влияние контуров защитных заземлений электрооборудования, установленного на территории промышленной площадки.

Проблема негативного влияния контуров защитных заземлений на эффективность катодной защиты объектов площадных объектов наиболее часто проявляется на стадии ввода объектов в эксплуатацию. Например, при проведении пусконаладочных работ на площадках компрессорных цехов станций «Усинская» и «Чикшинская» в 2016 г. была выявлена недозащита на отдельных участках. Решением данной проблемы послужило устранение видимых электрических контактов трубопроводов, находящихся под катодной защитой, и контуров защитного заземления, а также разработка технических решений по размещению дополнительных анодных полей в местах недозащиты, организация дополнительных точек дренажа [60].

В работах [8, 20, 31, 51] также отмечено, что данная проблема носит систематический характер при вводе в эксплуатацию компрессорных, газораспределительных и нефтеперекачивающих станций, при этом основной причиной недостаточной защищенности подземных сооружений от коррозии является отсутствие согласования проектов систем электрохимической защиты и

защитных заземлений электроустановок.

Подобные случаи встречаются и в зарубежной практике защиты трубопроводов производственных площадок от коррозии. Например, на территории нефтебазы в Пакистане [94] после реконструкции системы защитного заземления путем увеличения количества и протяженности вертикальных и горизонтальных заземлителей участились случаи выявления коррозионных повреждений подземных металлических сооружений, что привело к необходимости проведения аварийно-восстановительных работ, реконструкции системы электрохимической защиты путем установки дополнительных катодных установок, повторной реконструкции системы защитных заземлений путем уменьшения количества заземлителей на территории промышленной площадки.

1.3 Обзор методов снижения негативного влияния защитных заземлений на работу анодных заземлений трубопроводов

Задача повышения эффективности противокоррозионной защиты трубопроводов промышленных площадок становится все более актуальной, а ее решение – все более востребованным. Анализ текущего состояния и тенденций в области разработки мероприятий по минимизации и ликвидации эффекта экранирования катодного тока показал необходимость изучения зарубежного и российского опыта выработки обязательных и рекомендованных правил, которые необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации ЭХЗ трубопроводов в условиях влияния систем защитного заземления оборудования, расположенного на территории промышленных площадок.

По результатам обзора нормативных документов в области защиты трубопроводных систем от коррозии ассоциации инженеров-коррозионистов - National Association of Corrosion Engineers (NACE) [97, 98] - сформулируем следующие основные положения, касающиеся взаимовлияния катоднозащищаемых объектов и систем защитного заземления:

- в случае, если сооружения (трубопроводы, резервуары и пр.), для

защиты которых от коррозии применяется катодная защита, электрически связаны с электрооборудованием, для обеспечения электробезопасности могут быть использованы только заземлители из оцинкованных материалов (в противном случае рекомендуется установка протекторов);

– в случае снижения эффективности катодной защиты, вызванной неравномерным распределением катодного тока вследствие воздействия сторонних систем и сооружений, рекомендуется использование поляризационных ячеек, разрядников и т.п.;

– на компрессорных и нефтеперекачивающих станциях в местах пересечения либо взаимного влияния трубопроводных систем и других металлических сооружений (опор, железобетонных свай, контуров защитных заземлений и т.п.) должны применяться электроизолирующие вставки.

Рассмотрим основные положения Saudi Aramco Engineering Standard (SAES) – национальных стандартов крупнейшей нефтяной компании Саудовской Аравии, посвященных вопросам катодной защиты подземных сооружений и системам заземления электрооборудования на территории промышленных площадок.

Согласно требованиям [101, 102], рекомендуется использование вставок электроизолирующих с целью ограничения гальванической связи между катоднозащищаемыми объектами и другими металлическими сооружениями (рисунок 1.7). В соответствии с требованиями данного стандарта также необходима изоляция сооружений, выполненных из меди, по крайней мере, на расстоянии 6 метров по обе стороны от трубопровода, находящегося под катодной защитой.

Известно также устройство для разделения контуров катодной защиты и контуров защитных заземлений и молниезащиты, выполненное в виде вставки электроизолирующей [10, 45, 78, 99].



Рисунок 1.7 – Пример установки электроизолирующих вставок на трубках отбора импульсного газа блока управления запорной арматурой

К недостаткам известного устройства относят следующее: высокая стоимость вставки электроизолирующей и ее монтажа, более низкая надежность вставки электроизолирующей по отношению к трубе, вызванная сложностью конструкции и большим количеством элементов, низкая стойкость к декомпрессии, а также возможность применения вставок электроизолирующих только при новом строительстве или при реконструкции эксплуатируемых трубопроводов или резервуаров.

В пределах промышленных зон рекомендуется использовать протекторную защиту подземных трубопроводов [102], причем особое внимание уделяется участкам, на которых расположены заземления, выполненные из меди. Кроме того, стандартом рекомендуется использование дополнительных установок катодной защиты на насосных станциях. В случае, если на отдельных участках наблюдается недозащита, необходимо предусматривать дополнительные анодные заземления

либо использовать протяженные анодные заземлители. Это касается трубопроводов, имеющих сложную конфигурацию, а также мест сближения трубопроводов с защитными заземлениями, выполненными из меди или стальными сооружениями (ограждениями) и т.п.

Анализ требований [48, 54, 100, 103] в части обеспечения электробезопасности путем устройства систем защитных заземлений позволяет отметить следующее:

- подземные сооружения и объекты, выполненные из меди (защитные заземления, проводники), оказывают негативное влияние на эффективность катодной защиты;
- в зонах, в которых расположены катоднозащищаемые трубопроводы, рекомендуется использовать оцинкованные стальные заземлители;
- все вертикальные и горизонтальные заземлители должны быть объединены в единую систему защитного заземления.

Согласно положениям европейских нормативных документов [83, 84, 97, 98] при электрохимической защите сложных конструкций наличие внешних электродов, которые могут выступать как катод, приводит к увеличению потребления защитного тока, в связи с этим должны применяться оцинкованные заземляющие устройства, которые потребляют меньше защитного тока, чем медь, нержавеющая и углеродистая сталь. На практике данный способ применяется наиболее часто для снижения влияния защитных заземлений на работу катодной защиты, однако недостатком такого решения является его низкая эффективность, поскольку вследствие ряда причин применяют не чистые металлы, а их сплавы, что позволяет сместить потенциал защитного заземления в отрицательную сторону на величину порядка 0,5-1,0 В, однако в ряде случаев этого недостаточно для обеспечения эффективной катодной защиты подземных сооружений.

В соответствии с национальными европейскими стандартами безопасности в целях предотвращения риска поражения электрическим током, а также для поддержания эффективной катодной защиты должны быть приняты меры, перечисленных ниже:

- изоляция электрически управляемого оборудования от катоднозащищаемого сооружения;
- выделение отдельных элементов, имеющих электрический привод, от остальной части трубопровода посредством изолирующих соединений;
- установка выключателей тока короткого замыкания (предохранителей) в сочетании с локальной системой заземления, изготовленной из оцинкованной стали, цинка или магния;
- если допускается национальными правилами техники безопасности, возможна установка устройств развязки постоянного тока между установками с электрическим приводом и общей системой заземления.

В зарубежной практике защиты трубопроводных систем от коррозии имеется достаточно большой опыт использования устройств, предназначенных для гальванического разделения объектов, объединенных в общую систему. Такие устройства можно классифицировать на три типа (рисунок 1.8) [71, 99]. Большой опыт производства и внедрения данных устройств накоплен компанией «Dairyland Electrical Industries», США.



Рисунок 1.8 – Классификация устройств для гальванической развязки различных систем

1) Поляризационная ячейка («polarization cell», PC) – устройство, представляющее собой электрохимический переключатель, состоящий из пар из нержавеющей стали или никелевых пластин, погруженных в раствор гидроксида калия. Основное назначение поляризационной ячейки – препятствие протеканию постоянного тока и обеспечение беспрепятственного протекания переменного тока.

2) Заменитель поляризационной ячейки («polarization cells replacement», PCR; «DC decoupling device», DCDD) представляет собой устройство, построенное на полупроводниковых дискретных элементах. Его назначение — одновременное обеспечение высокого сопротивления по постоянному току и низкого сопротивления/неразрывности по переменному току цепей заземления. За счет развязки цепей системы катодной защиты от системы заземления создаются условия для снижения величины протекающего в цепи заземления тока катодной защиты до минимально необходимого уровня. Внутри корпуса устройства размещены ограничительные диоды и конденсаторы. По сравнению с поляризационными ячейками не имеет в составе опасных электролитов и не нуждается в техническом обслуживании.

3) Полупроводниковое устройство развязки («solid state decoupler», SSD) предназначено для предотвращения протекания тока до заданного порога напряжения при прохождении любого тока любого рода. В случае возникновения напряжения, превышающего пороговое значение, устройство мгновенно переключается в режим короткого замыкания, обеспечивая защиту от перенапряжения. Основное назначение SSD – гальваническое разделение заземляющие шины от трубопроводов (для повышения эффективности катодной защиты), а также обеспечение защиты от перенапряжения для обслуживающего персонала. Подобные устройства могут быть выполнены на диодах или варисторах [34].

На практике рассмотренные типы устройств выполняют, как правило, функцию защиты изолирующих фланцевых соединений от разрушения, например, при ударе молнии. Сравнительный анализ технических характеристик устройств

для гальванической развязки (таблица 1.1) позволил выявить их особенности и недостатки.

Таблица 1.1 – Основные характеристики устройств, предназначенных для гальванической развязки

Характеристики	Поляризационная ячейка	Заменитель поляризационной ячейки	Полупроводниковое устройство развязки
Область применения	защита изолирующих соединений		
	снижение уровня наведенного переменного тока		
	защита от перепадов переменного тока		
	-	разделение систем катодной защиты и защитного заземления	
Напряжение блокировки, В	от 1,2 до 1,7	2	до 3
Ток утечки через устройство, мА	от 1 до 40	от 0,005 до 0, 5	от 0,005 до 0, 5
Ток короткого замыкания, кА	5	от 3,7 до 15	от 1,2 до 5
Максимальная величина ударного тока, кА	100	100	100
Необходимость технического обслуживания	да	нет	нет
Возможность использования во взрывоопасных зонах	нет	да	да

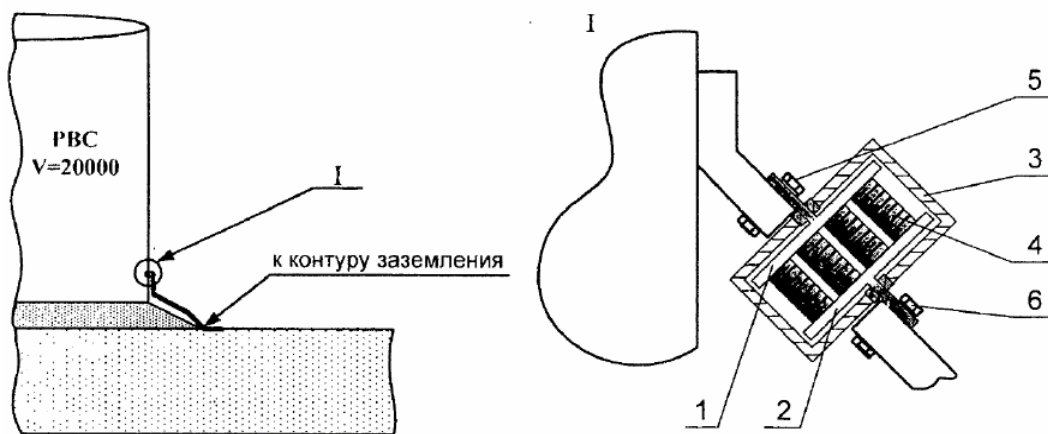
Так, устройства в виде поляризационных ячеек требуют постоянного контроля уровня раствора гидроксида калия, а также его периодическую замену, в связи с этим данный тип устройств не может использоваться на территории опасных производственных объектов. Устройства, выполненные в виде полупроводниковых элементов, не требуют специального технического обслуживания, могут быть использованы во взрывоопасных зонах, обеспечивают неразрывность цепи, в которую они устанавливаются, однако варианты различных конфигураций данных устройств ограничены производителями по величине порогового напряжения срабатывания и току короткого замыкания, что затрудняет

и ограничивает выбор параметров, требуемых для конкретной задачи – разделения контуров защитного заземления и системы катодной защиты подземных трубопроводов.

Отечественные стандарты не предусматривают применение подобных устройств. Однако, регламент по организации работ по контролю, техническому обслуживанию и ремонту средств ЭХЗ нефтепровода Каспийского трубопроводного консорциума [9] содержит рекомендации по применению поляризационных ячеек для обеспечения развязки по постоянному току оборудования с катодной защитой от заземления энергосистемы общего пользования.

В качестве отечественного аналога рассмотрим устройство для разделения контуров катодной защиты и контуров защитного заземления и молниезащиты, выполненное с применением последовательно и параллельно соединенных варисторов (рисунок 1.9) [43, 64].

Устройство устанавливается в контур защитного заземления, смещая потенциал «труба – земля» в отрицательную сторону, вследствие чего возможно снижение расхода электроэнергии на катодную защиту объектов и потерь защитного тока. Недостатком устройства является относительно высокое значение перенапряжения, необходимое для срабатывания варистора, поэтому возможна ситуация, когда на корпусе оборудования (например, резервуара или трубопровода) потенциал относительно земли будет недостаточным для срабатывания варистора, но опасным для жизни и здоровья персонала, например, 100 В. Кроме этого, недостатком устройства является отсутствие средств индикации, которые позволили бы судить о режимах работы и состоянии устройства.



1 – вывод к точке дренажа резервуара, 2 – вывод к контуру заземления,
3 – корпуса, 4 – набор варисторов, 5,6 – болтовые соединения

Рисунок 1.9 - Схема устройства разделения контуров (патент РФ №104394)

[43]

Несмотря на широкое распространение проблемы снижения эффективности электрохимической защиты трубопроводов при наличии гальванической связи с другими металлическими сооружениями, в нормативной базе Российской Федерации в области защиты от коррозии данному вопросу практически не уделяется внимание. В частности, отсутствуют требования к соблюдению расстояний между рассматриваемыми системами, рекомендации по обеспечению равномерного распределения защитных потенциалов, способы снижения негативного влияния сторонних сооружений на эффективность электрохимической защиты трубопроводов и оборудования, а также отсутствуют методики проведения пусконаладочных работ средств ЭХЗ на территории промышленных площадок с учетом влияния защитных заземлений и заземлений молниезащиты.

Рассмотрим требования отраслевых стандартов в области нефтегазовой промышленности, в которых затрагивается проблема снижения эффективности защиты от коррозии по причине негативного влияния сторонних сооружений и систем.

В соответствии с [52] в случае, если по результатам электрометрического обследования подземных трубопроводов промышленной площадки выявлено

несоответствие значений защитных потенциалов нормативным [18], необходимо разработать комплекс мероприятий по реконструкции системы ЭХЗ, которые включают в себя:

- ремонт или дополнительную установку глубинных или протяженных анодных заземлений;
- замену станций катодной защиты или увеличение их мощности;
- мероприятия по реализации отдельной защиты коммуникаций площадных объектов (в частности, применение вставок электроизолирующих);
- мероприятия по ремонту контура защитных заземлений электрооборудования с применением оцинкованных материалов.

Требования к использованию цинковых материалов при устройстве систем защитных заземлений содержатся также и в нормативных документах нефтяной отрасли [54], при этом указывается, что толщина оцинкованного покрытия должна составлять не менее 200 мкм. Также необходимо объединять отдельные элементы системы заземления электрооборудования в единый контур для выравнивания потенциала.

В целом, требования зарубежной и отечественной нормативной документации в части использования материалов защитных заземлений, необходимости реконструкции систем электрохимической защиты и защитных заземлений, а также применения устройств гальванической развязки катоднозащищаемых объектов и защитных заземлений, совпадают. Классификация мероприятий, направленных на снижение экранирования токов катодной защиты контурами защитных заземлений, в зависимости от стадии, на которой возможно их внедрение, представлена на рисунке 1.10.

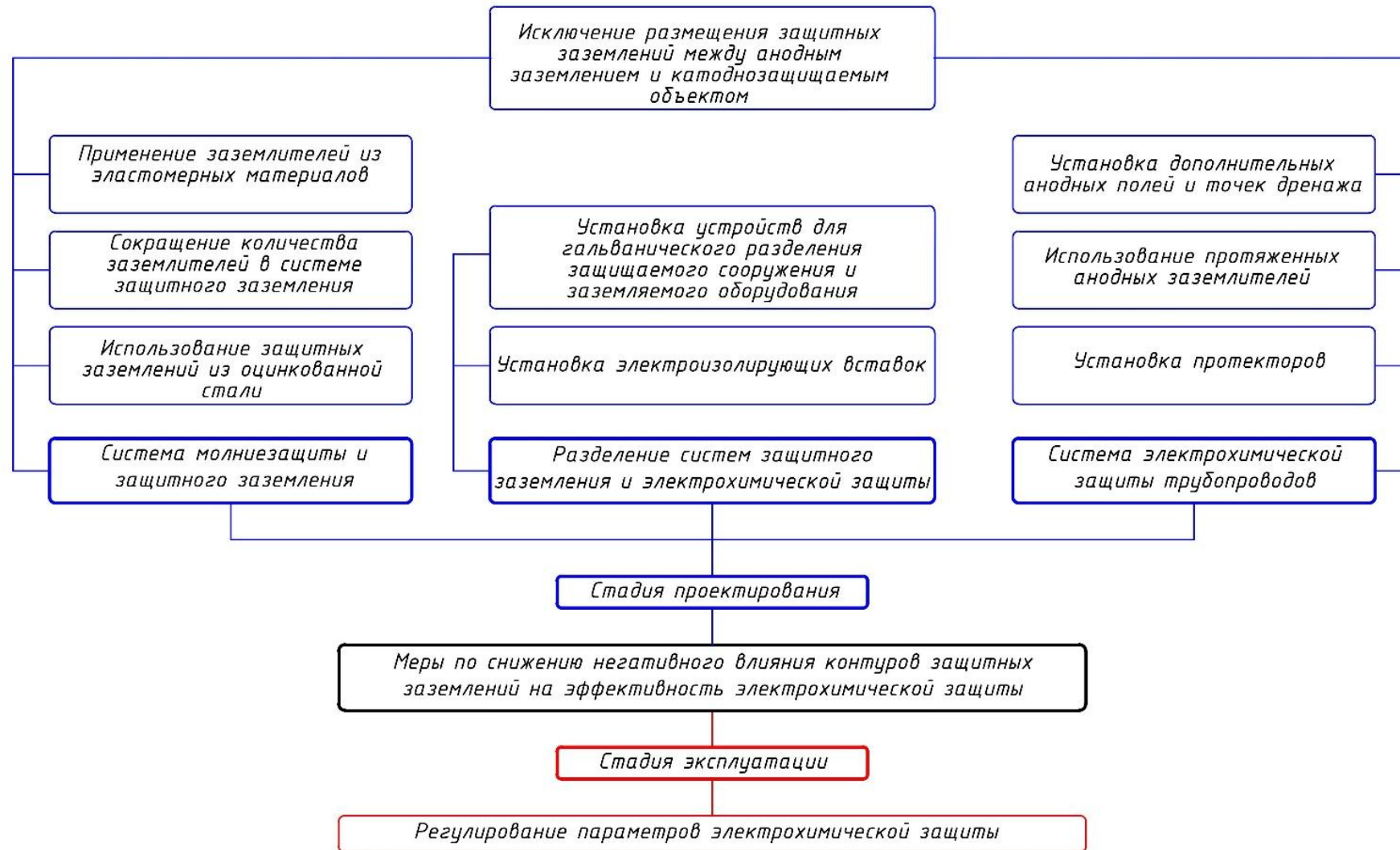


Рисунок 1.10 – Классификация мероприятий, направленных на снижение экранирования токов катодной защиты контурами защитных заземлений

Рассмотрим достоинства и недостатки наиболее часто встречающихся в отечественной нормативной документации рекомендаций по повышению эффективности катодной защиты в условиях промышленных площадок.

В случае, если влияние контуров защитных заземлений на параметры ЭХЗ выявлено на стадии эксплуатации трубопроводных систем площадных объектов, повышение эффективности защиты от коррозии возможно путем регулирования выходного тока и напряжения станций катодной защиты, при этом необходимо добиться такого режима работы системы ЭХЗ, при котором все коммуникации промышленной площадки будут защищены от почвенной коррозии, а суммарная электрическая мощность, расходуемая на защиту, будет минимальной [11, 27, 44, 56].

На этапе проектирования системы ЭХЗ необходимо учитывать, что контур защитного заземления либо его отдельные элементы не должны находиться между защищаемым сооружением и анодными заземлителями.

Кроме того, при проектировании или реконструкции системы ЭХЗ с целью повышения эффективности катодной защиты в условиях влияния защитных заземлений на уровень защищённости трубопроводов от коррозии возможно использование следующих решений:

- 1) Установка дополнительных анодных заземлителей;
- 2) Установка протяженного гибкого заземлителя (ПГА);
- 3) Комбинация из вышеперечисленных решений.

Отметим, что установка дополнительных анодных заземлений или анодных полей влечет за собой увеличение затрат, связанных с разработкой дополнительных мероприятий по обеспечению требуемого уровня защиты трубопроводов от коррозии (корректировка проектной документации, закупка оборудования и выполнение дополнительных строительно-монтажных и пусконаладочных работ). Использование ПГА обеспечивает создание равномерного цилиндрического поля защитного тока (в отличие от сферического поля при использовании сосредоточенных анодов), однако, данный способ имеет ряд недостатков: ограниченный срок эксплуатации ПГА, высокая стоимость

материалов и строительно-монтажных работ; вероятность повреждения ПГА при земляных работах в процессе эксплуатации и ремонта трубопроводов [30].

Как показывает анализ существующих технических решений, направленных на сведение к минимуму или устранению негативного влияния контуров защитных заземлений и молниезащиты на эффективность ЭХЗ, все рассмотренные в рамках данной работы мероприятия имеют как преимущества, так и недостатки. В связи с этим, выбор того или иного способа должен основываться на предварительной оценке степени влияния контуров защитных заземлений и молниезащиты, позволяющей выявить наиболее значимые факторы, имеющие первостепенное значения в условиях конкретной промышленной площадки.

Например, учет влияния защитных заземлений электроустановок на характеристики ЭХЗ объектов системы магистрального транспорта нефти и нефтепродуктов проводится в соответствии со следующей методикой [54]:

1) Определение входного сопротивления трубопровода

$$Z_{Ti} = \operatorname{cth}(\alpha_i \cdot l_i) \cdot \sqrt{R_{Ti} \cdot R_{ii}}, \quad (1.1)$$

где α_i – коэффициент распространения тока по i -му трубопроводу, 1/м;

l_i – длина i -го трубопровода, м;

R_{Ti} – продольное сопротивление i -го трубопровода, Ом/м;

R_{ii} – переходное сопротивление i -го трубопровода, Ом·м².

2) Определение входного сопротивления локальных объектов

$$Z_{oj} = \frac{R_{uzj}}{S_j} + \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\rho_r}{\sqrt{2 \cdot (a \cdot b + a \cdot c + b \cdot c)}}, \quad (1.2)$$

где R_{uzj} – удельное сопротивление локального объекта, Ом;

S_j – площадь наружной поверхности локального объекта, м²;

a, b, c – габаритные размеры локального сооружения, м;

ρ_{rp} – удельное электрическое сопротивление грунта, Ом·м.

3) Определение результирующего входного сопротивления

$$Z = \left(\sum \frac{1}{Z_{Ti}} + \sum \frac{1}{Z_{oi}} \right)^{-1}, \quad (1.3)$$

где Z_{Ti} – входное сопротивление трубопровода, Ом;

Z_{oi} - входное сопротивление локального объекта, Ом.

4) Определение результирующего сопротивления растеканию всех контуров защитного заземления

$$R_з = \left(\sum_{i=1}^n R_i \right)^{-1}. \quad (1.4)$$

5) Определение доли катодного тока, используемого по основному назначению

$$\alpha = \frac{R_з}{R_з + Z}, \quad (1.5)$$

где $R_з$ - сопротивление растеканию защитного заземления, Ом;

Z - результирующее входное сопротивление, Ом.

6) Определение доли катодного тока, ответвляющегося на защитные заземления

$$\beta = \frac{Z}{R_з + Z}, \quad (1.6)$$

при этом $\alpha + \beta = 1$.

7) Определение коэффициента влияния защитных заземлений на ЭХЗ, отражающего, во сколько раз снижается эффективность защиты от коррозии при подключении защитного заземления

$$\zeta = \frac{Z}{R_з} + 1. \quad (1.7)$$

По результатам расчетов в соответствии с данной методикой в зависимости от величины коэффициента использования катодного тока принимается одно из решений, указанных в таблице 1.2.

Недостатки данной методики заключаются в следующем:

- оценка дается только на основании расчетных данных, не отражающих фактические параметры катоднозащищаемых объектов и системы защитных заземлений;

- отсутствует информация о том, как определяется сопротивление растеканию защитных заземлений и как изменяется эта величина в зависимости от материала защитного заземления;

- не учитывается влияние контуров защитных заземлений на снижение потенциала «труба – земля» на локальных участках;

- в качестве мероприятий, направленных на снижение негативного влияния контуров защитных заземлений, предложена установка дополнительных анодных заземлений и использование заземлений из оцинкованных материалов, однако перечень данных мер не является полным. Кроме того, в методике не приводится информация о том, на каком этапе - проектирование, сооружение или эксплуатация - рекомендуется внедрение указанных мероприятий, ограничивающих влияние защитных заземлений на эффективность ЭХЗ. С целью минимизации данного влияния в методике предложена реконструкция системы ЭХЗ и защитных заземлений, однако неясно, в чем именно состоит суть изменений параметров указанных систем.

Таблица 1.2 - Технические решения по устранению отрицательного влияния защитных заземлений на эффективность ЭХЗ

Мероприятия	Коэффициент использования β	Эффективность мероприятия
Установка дополнительных анодных заземлителей в районе защитного заземления с наименьшим сопротивлением	0,51-0,75	Локальное экранирование участка защитного заземления с наименьшим сопротивлением
Установка дополнительных анодных заземлителей, применение защитных заземлений из оцинкованной стали	0,26-0,50	Повышение защитного потенциала ЭХЗ
Реконструкция системы ЭХЗ и защитных заземлений	0-0,25	Обеспечение ЭХЗ реконструируемых объектов

Методика, изложенная в [53], предполагает оценку экранирующего влияния на основании результатов измерений потенциала контура защитного заземления относительно поверхности земли при всех включенных установках катодной защиты (УКЗ), затем при последовательном отключении по одной УКЗ на территории нефтеперекачивающей станции и через сутки после отключения всех

УКЗ. По результатам каждой группы измерений определяются средние арифметические величины потенциалов каждого контура с включенными и с отключенными защитными установками. Средняя величина экранирующего влияния \bar{K}_j , %, определяется по формуле

$$\bar{K}_j = \frac{1}{n} \cdot \sum_{p=n}^{p=1} \frac{\bar{\varphi}_{i3} - \bar{\varphi}_{ik}}{\bar{\varphi}_{ik}} \cdot 100, \quad (1.8)$$

где n – количество установок катодной защиты на НПС;

$\bar{\varphi}_{i3}$ и $\bar{\varphi}_{ik}$ – средние арифметические величины потенциалов каждого контура с включенными защитными установками и с отключенными защитными установками соответственно.

Средняя величина экранирующего влияния контуров защитных заземлений на НПС \bar{q} , %, определяется по формуле

$$\bar{q} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^{j=m} \bar{K}_j \cdot 100, \quad (1.9)$$

где m – количество контуров защитных заземлений на НПС.

По результатам расчетов в зависимости от величины \bar{q} принимается одно из перечисленных решений:

а) $\bar{q} < 10$ % - допустимое значение, корректирующие мероприятия не требуются;

б) 10 % $< \bar{q} < 20$ % - повышенный уровень влияния;

в) $\bar{q} > 20$ % - недопустимый уровень влияния, требуется реконструкция защитных контуров либо анодных заземлений.

Анализ вышеприведенной методики позволяет отметить следующие недостатки:

- величина потенциала контура защитного заземления относительно земли не является показателем степени экранирования, поскольку чем больше разность средних арифметических величин потенциалов каждого контура с включенными и отключенными защитными установками соответственно, тем менее выражено влияние защитных заземлений на параметры ЭХЗ;

- в методике отсутствуют рекомендации по снижению повышенного влияния системы защитного заземления на работу средств ЭХЗ, а также не раскрыта суть требуемой реконструкции контуров защитных заземлений или анодных заземлений при регистрации недопустимого уровня влияния.

Стоит также отметить, что рассмотренные методики не учитывают следующие факторы:

- тип, материал и расположение защитного заземления относительно защищаемого сооружения и анодного заземления;

- изменение величины потенциала «труба – земля» при отсутствии и при наличии влияния защитного заземления;

- влияние количества и мест расположения точек подключения к трубопроводу станций катодной защиты и защитных заземлений электроустановок на степень экранирования токов катодной защиты защитными заземлениями.

1.4 Выводы по главе 1. Цель и задачи исследования

1. На основании проведенного обзора и анализа требований действующей отечественной и зарубежной нормативной документации разработана классификация, позволяющая систематизировать основные направления повышения эффективности в условиях промышленных площадок.

2. Обзор устройств, предназначенных для гальванического разделения контуров катодной защиты и защитных заземлений показал, что существующие разработки имеют ряд недостатков, наличие которых позволяет сделать вывод о необходимости создания нового устройства, позволяющего осуществлять гальваническую развязку катоднозащищаемых объектов и контуров защитного заземления, расположенных на территории промышленных площадок, с целью повышения эффективности электрохимической защиты подземных сооружений от коррозии, а также рекомендаций по его применению на территории промышленных площадок.

3. Установлено, что регламентированные в действующей нормативной документации методики оценки степени влияния контуров защитных заземлений и молниезащиты не учитывают влияние ряда важных факторов. Данный недостаток предлагается решить путем совершенствования методики оценки коэффициента экранирования токов катодной защиты.

4. Показано, что для выработки единых подходов при проектировании и эксплуатации средств электрохимической защиты в условиях промышленных площадок необходимо совершенствование принципов проектирования средств электрохимической защиты трубопроводов, а также разработка методики проведения пуска, опробования и оптимизации работы установок катодной защиты трубопроводов с учетом влияния контуров защитных заземлений.

На основании выводов по главе 1 можно сформулировать цель и задачи настоящего исследования.

Цель работы – повышение эффективности противокоррозионной защиты трубопроводов, расположенных на территории промышленных площадок.

Задачи исследования:

1. Разработать математическую модель токораспределения в системе противокоррозионной защиты трубопровода при наличии влияния системы защитного заземления, электрически соединенной с трубопроводом.

2. Разработать стенд и методику проведения экспериментальных исследований по определению экранирующего эффекта точечного защитного заземления, расположенного между анодным заземлением и катоднозащищаемым трубопроводом.

3. Получить и проанализировать результаты оценки степени экранирующего воздействия в зависимости от материала защитного заземления, геометрических параметров его расположения относительно защищаемого сооружения и анодного заземления.

4. Разработать подходы к созданию устройства для разделения контуров защитного заземления и катоднозащищаемых объектов, провести испытания образцов разработанного устройства.

5. Разработать рекомендации по повышению эффективности противокоррозионной защиты трубопроводов промышленных площадок на стадии проектирования, ввода в эксплуатацию и эксплуатации.

ГЛАВА 2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ ПРИ ВЗАИМНОМ ВЛИЯНИИ АНОДНЫХ И ЗАЩИТНЫХ ЗАЗЕМЛЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ ПРОМЫШЛЕННОЙ ПЛОЩАДКИ

2.1 Создание математической модели токораспределения в грунте от работы катодной защиты при наличии системы защитного заземления или молниезащиты

Исходными данными для построения расчетной модели токораспределения в грунте служат геометрические, электрохимические и электрические параметры рассматриваемых объектов, объединенных общей схемой взаимовлияния [28].

Рассмотрим задачу о распространении постоянного электрического тока в участке подземного трубопровода с изоляционным покрытием, находящегося под воздействием внешнего электрического поля. Для решения этой задачи составим систему дифференциальных уравнений, определяющих изменение силы тока в трубопроводе и изменение разности потенциалов между трубопроводом и грунтом [25]. Рассмотрим элементарный участок трубопровода длиной dl , расположенный вблизи точки с линейной координатой l (рисунок 2.1).

Уравнение, позволяющее определить изменение разности потенциалов между трубопроводом и грунтом на элементарном участке длиной dl

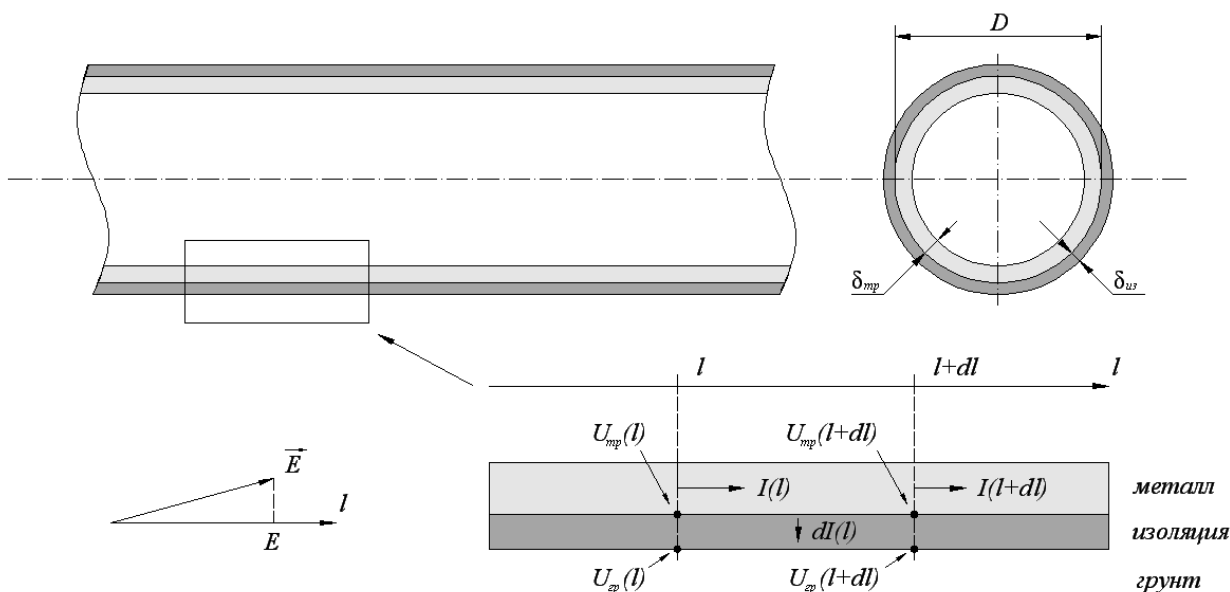
$$\frac{dU(l)}{dl} + Z(l)I(l) = E(l), \quad (2.1)$$

где $\frac{dU(l)}{dl}$ - разность потенциалов «труба – земля» на элементарном участке длиной dl , В;

$Z(l)$ - продольное сопротивление на единицу длины трубопровода, Ом/м;

$I(l)$ - сила тока, протекающего по трубопроводу, А;

$E(l)$ - проекция вектора напряженности внешнего электрического поля на ось l , В/м.



D – внешний диаметр трубопровода, м; $\delta_{\text{тр}}$ – толщина стенки трубопровода, м; $\delta_{\text{из}}$ – толщина изоляционного покрытия, м; E - проекция вектора напряженности внешнего электрического поля на ось l , В/м;
 $I(l)$ – сила тока в трубопроводе, А; $U_{\text{мп}}(l)$ – потенциал трубопровода, В; $U_{\text{гр}}(l)$ – потенциал грунта, В

Рисунок 2.1 – К задаче о распространении постоянного электрического тока в участке подземного трубопровода с изоляционным покрытием

Изменение силы тока на элементарном участке длиной dl за счет омической утечки тока через изоляцию пропорционально разности потенциалов между трубопроводом и грунтом

$$\frac{dI(l)}{dl} = -Y(l)U(l), \quad (2.2)$$

где $Y(l)$ – проводимость изоляционного покрытия на единицу длины трубопровода, См/м.

Рассмотрим задачу определения проекции вектора напряженности внешнего электрического поля на ось элементарного участка трубопровода $E(l)$. Будем считать, что источниками внешнего электрического поля являются анодные

заземления установок катодной защиты и защитные заземления электроустановок, имеющих электрический контакт с трубопроводом. Влияние токов утечки трубопровода на внешнее электрическое поле в рамках данной задачи не рассматривается, поскольку влияние этих токов при удовлетворительном качестве защитного покрытия пренебрежимо мало по сравнению с влиянием анодных заземлений и защитных заземлений.

В первом приближении анодные заземления установок катодной защиты могут быть представлены в виде точечных источников тока [73, 74]. Известно, что потенциал, создаваемый точечным источником, расположенным на поверхности грунта $U_{rp}(r)$, В, определяется следующим соотношением [5]

$$U_{rp}(r) = I_0 \frac{\rho_{rp}}{2\pi r}, \quad (2.3)$$

где I_0 – сила тока, протекающего через источник, А;

ρ_{rp} – удельное сопротивление грунта, Ом·м;

r – расстояние от источника до точки наблюдения, м.

Введем декартову систему координат, в которой оси x и y лежат в горизонтальной плоскости (рисунок 2.2).

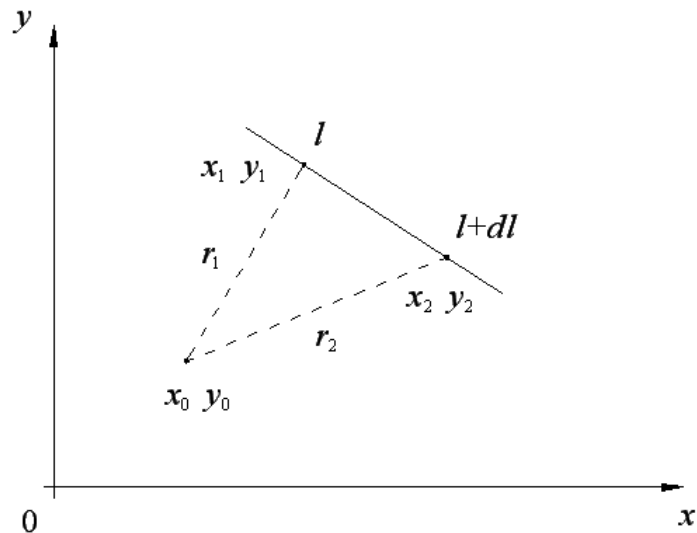
Потенциалы $U_{zp}(l)$, В и $U_{zp}(l + dl)$, В, создаваемые источником тока соответственно в начале и конце рассматриваемого элементарного участка трубопровода, определяются следующими соотношениями

$$U_{rp}(l) = I_0 \frac{\rho_{rp}}{2\pi r_1}, \quad (2.4)$$

$$U_{rp}(l + dl) = I_0 \frac{\rho_{rp}}{2\pi r_2}. \quad (2.5)$$

Проекция $E(l)$ вектора напряженности электрического поля источника тока на ось l определяется с учетом (2.4) и (2.5)

$$E(l) = \frac{I_0 \rho_{rp}}{dl 2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (2.6)$$



x_0 и y_0 – координаты источника тока, м; x_1 и y_1 – координаты начала рассматриваемого элементарного участка трубопровода, м; x_2 и y_2 – координаты конца рассматриваемого элементарного участка трубопровода, м; r_1 и r_2 – расстояние от источника тока до соответственно начала и конца рассматриваемого элементарного участка трубопровода, м.

Рисунок 2.2 – К расчету электрического поля точечного источника тока

Если рассматривается несколько источников тока, то для расчета $E(l)$ используется принцип суперпозиции

$$E(l) = \frac{1}{dl} \frac{\rho_{rp}}{2\pi} \sum_{p=1}^m I_{0p} \left(\frac{1}{r_{1p}} - \frac{1}{r_{2p}} \right), \quad (2.7)$$

где p – номер источника тока, $p = 1, 2, \dots, m$;

m – количество источников тока, ед.;

I_{0p} – сила тока, протекающего через источник с индексом p , А;

r_{1p} и r_{2p} – расстояния от источника с индексом p до соответственно начала и конца рассматриваемого элементарного участка трубопровода, м, определяемые следующим образом

$$r_{1p} = \sqrt{(x_1 - x_{0p})^2 + (y_1 - y_{0p})^2}, \quad (2.8)$$

$$r_{2p} = \sqrt{(x_2 - x_{0p})^2 + (y_2 - y_{0p})^2}, \quad (2.9)$$

где x_{0p} и y_{0p} – координаты источника с индексом p , м.

При составлении системы дифференциальных уравнений, определяющих изменение силы тока в трубопроводе и изменение разности потенциалов между трубопроводом и грунтом, использован метод конечных элементов [26, 62]. Для решения системы дифференциальных уравнений (2.1) и (2.2) с учетом (2.7) необходимо использовать численные методы. Принцип расчета заключается в том, что рассматриваемый участок трубопровода разбивается на элементарные участки конечной длины, для каждого из которых вычисляются значения E на основании данных о взаимном расположении рассматриваемого элемента и источников тока. В пределах каждого элементарного участка параметры Z и Y считаются постоянными.

Рассмотрим участок трубопровода, разделенный на n элементарных участков (рисунок 2.3). Точки, расположенные на границах элементарных участков, будем называть узловыми точками (узлами). Каждой узловой точке присвоим индекс i , $i = 0, 1, \dots, n$. Элементарные участки будем характеризовать индексом узловой точки, представляющей собой начало данного участка. Таким образом, первый элементарный участок будет иметь индекс $i = 0$, последний элементарный участок будет иметь индекс $i = n - 1$. Введем следующие обозначения:

h_i – длина i -го элементарного участка, м;

l_i – линейная координата i -й узловой точки, м;

I_i – сила тока трубопроводе в i -й узловой точке, А;

U_i – разность потенциалов между трубопроводом и грунтом в середине i -го элементарного участка, В;

Z_i – продольное сопротивление участка трубопровода единичной длины на участке с координатами от $l_i - h_{i-1} / 2$ до $l_i + h_i / 2$ (при $i = 1, 2, \dots, n - 1$), Ом/м;

Y_i – проводимость изоляционного покрытия на единицу длины трубопровода на i -м элементарном участке, См/м;

E_i – проекция вектора напряженности внешнего электрического поля на ось l на участке с координатами от $l_i - h_{i-1} / 2$ до $l_i + h_i / 2$ (при $i = 1, 2, \dots, n - 1$), В/м.

Разделение трубопровода на элементарные участки должно производиться таким образом, чтобы участки с координатами от $l_i - h_{i-1} / 2$ до $l_i + h_i / 2$ (при $i = 1, 2, \dots, n - 1$) были прямолинейными.

Конечно-разностные аналоги уравнений (2.1) и (2.2) для узла с индексом i , лежащим в диапазоне от 1 до $n - 1$, могут быть записаны в следующем виде:

$$2 \frac{U_i - U_{i-1}}{h_i + h_{i-1}} + Z_i I_i = E_i, \quad (2.10)$$

$$\frac{I_{i+1} - I_i}{h_i} = -Y_i U_i. \quad (2.11)$$

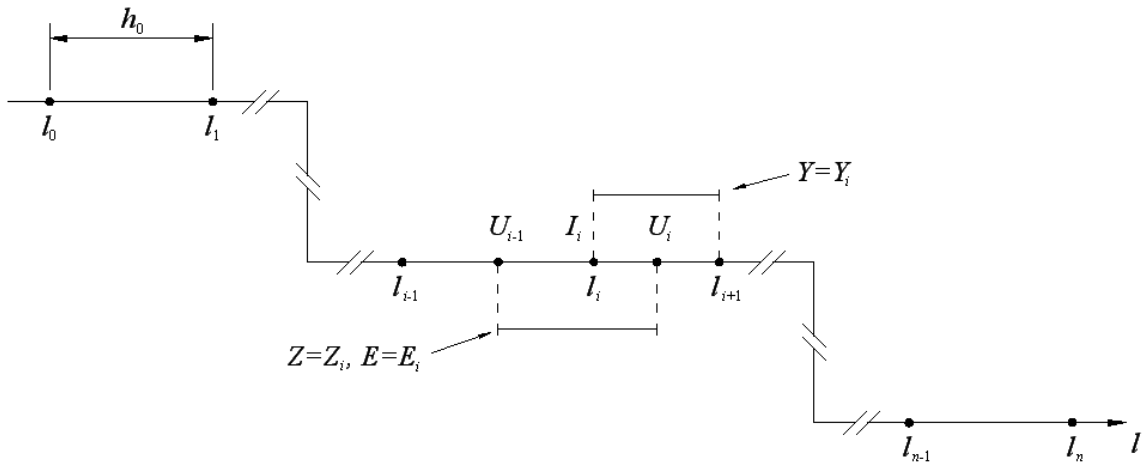


Рисунок 2.3 – Элементарные участки и узловые точки

Выразим величины U_i и U_{i-1} через I_i , I_{i-1} и I_{i+1} на основании соотношения (2.11)

$$U_i = -\frac{I_{i+1} - I_i}{h_i Y_i}, \quad (2.12)$$

$$U_{i-1} = -\frac{I_i - I_{i-1}}{h_{i-1} Y_{i-1}}. \quad (2.13)$$

Подставив соотношения (2.12) и (2.13) в (2.10), получим следующее уравнение

$$\frac{2}{h_i + h_{i-1}} \left(\frac{I_i - I_{i-1}}{h_{i-1} Y_{i-1}} - \frac{I_{i+1} - I_i}{h_i Y_i} \right) + Z_i I_i = E_i. \quad (2.14)$$

Пусть на элементарный участок с индексом j подводится электрический ток I_{0j} (такая ситуация имеет место для элементарных участков, подключенных к станции катодной защиты). Для элементарного участка с индексом j уравнение (2.11) принимает следующий вид

$$\frac{I_{j+1} - I_j}{h_j} = -Y_j U_j + \frac{I_{0j}}{h_j}. \quad (2.15)$$

Выразим величину U_j через I_j и I_{j+1} на основании соотношения (2.15)

$$U_j = -\frac{I_{j+1} - I_j - I_{0j}}{h_j Y_j}. \quad (2.16)$$

Запишем соотношения (2.10) для узлов с индексами j и $j + 1$ с учетом (2.16)

$$\frac{2}{h_j + h_{j-1}} \left(\frac{I_j - I_{j-1}}{h_{j-1} Y_{j-1}} - \frac{I_{j+1} - I_j}{h_j Y_j} \right) + Z_j I_j = E_j - \frac{2}{h_j + h_{j-1}} \frac{I_{0j}}{h_j Y_j}, \quad (2.17)$$

$$\frac{2}{h_{j+1} + h_j} \left(\frac{I_{j+1} - I_j}{h_j Y_j} - \frac{I_{j+2} - I_{j+1}}{h_{j+1} Y_{j+1}} \right) + Z_{j+1} I_{j+1} = E_{j+1} + \frac{2}{h_{j+1} + h_j} \frac{I_{0j}}{h_j Y_j}. \quad (2.18)$$

Величина I_{0j} считается известной (эта величина представляет собой силу тока станции катодной защиты).

Пусть элементарный участок с индексом k имеет электрическое соединение с защитным заземлением. В этом случае будем считать, что изменение силы тока на элементарном участке с индексом k происходит не только за счет утечки тока через изоляционное покрытие, но и за счет утечки тока через защитное заземление.

Выразим величину U_k через I_k и I_{k+1}

$$U_k = -\frac{I_{k+1} - I_k}{h_k Y_k + R_{0k}^{-1}}. \quad (2.19)$$

Для узлов с индексами k и $k + 1$ с учетом (2.19)

$$\frac{2}{h_k + h_{k-1}} \left(\frac{I_k - I_{k-1}}{h_{k-1} Y_{k-1}} - \frac{I_{k+1} - I_k}{h_k Y_k + R_{0k}^{-1}} \right) + Z_k I_k = E_k, \quad (2.20)$$

$$\frac{2}{h_{k+1} + h_k} \left(\frac{I_{k+1} - I_k}{h_k Y_k + R_{0k}^{-1}} - \frac{I_{k+2} - I_{k+1}}{h_{k+1} Y_{k+1}} \right) + Z_{k+1} I_{k+1} = E_{k+1}. \quad (2.21)$$

Сила тока I_{0k} , протекающего через защитное заземление, определяется следующим образом

$$I_{0k} = \frac{U_k}{R_{0k}}. \quad (2.22)$$

Сила тока на концах рассматриваемого участка трубопровода определяется используемыми граничными условиями. Например, если рассматривается электрически изолированный участок трубопровода, то сила тока на его концах равна нулю. В этом случае для узлов с индексами $i = 0$ и $i = n$ могут быть записаны следующие уравнения

$$I_0 = 0; \quad I_n = 0. \quad (2.23)$$

Таким образом, значения силы тока в узлах могут быть определены путем решения системы линейных уравнений, в которую входят уравнения вида (2.14) для узлов, разделяющих элементарные участки, не подключенные к станциям катодной защиты или к защитным заземлениям электроустановок, уравнения вида (2.17) и (2.18) для узлов на границах элементарных участков, подключенных к станциям катодной защиты, уравнения вида (2.20) и (2.21) для узлов на границах элементарных участков, подключенных к защитным заземлениям электроустановок и уравнения вида (2.23) для узлов, расположенных на границах рассматриваемого участка трубопровода. Рассматриваемая система линейных уравнений может быть представлена в матричном виде

$$AI=B, \quad (2.24)$$

где A – матрица коэффициентов (размерность $n + 1 \times n + 1$);

B – вектор правой части (размерность $n + 1$);

I – вектор неизвестных значений силы тока в узлах (размерность $n + 1$).

$$A = \begin{pmatrix} a_{00} & a_{01} & \dots & a_{0n} \\ a_{10} & a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n0} & a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \dots \\ b_n \end{pmatrix}, \quad I = \begin{pmatrix} I_0 \\ I_1 \\ \dots \\ I_n \end{pmatrix}. \quad (2.24)$$

Коэффициенты a_{ij} и b_i определяются в соответствии с уравнениями (2.14), (2.17), (2.18), (2.20), (2.21) и (2.23).

При известных значениях силы тока в узлах значения разности потенциалов между трубопроводом и грунтом в середине элементарных участков определяются в соответствии с уравнениями вида (2.12).

Предложенная математическая модель позволяет производить расчет распределения силы тока в трубопроводе и разности потенциалов между трубопроводом и грунтом при наличии подключенных к трубопроводу станций катодной защиты и электрического контакта между трубопроводом и защитными заземлениями электроустановок. Исходными данными для расчетов служат электрические параметры трубопровода (продольное сопротивление трубопровода, удельное сопротивление изоляционного покрытия), информация о расположении трубопровода (координаты точек поворота), координаты анодных заземлений станций катодной защиты, координаты защитных заземлений электроустановок, координаты точек подключения к трубопроводу станций катодной защиты и защитных заземлений электроустановок, сила тока станций катодной защиты, сопротивления растеканию защитных заземлений, удельное сопротивление грунта.

2.2 Разработка программного обеспечения для моделирования параметров катодного тока на территории промышленной площадки с учетом влияния защитных заземлений

При наличии электрического контакта между подземными трубопроводами и защитными заземлениями электроустановок на территории промышленных площадок (компрессорные станции, газораспределительные станции и т. п.) в ряде случаев наблюдается эффект экранирования тока катодной защиты контурами защитных заземлений, что приводит к снижению эффективности систем электрохимической защиты подземных трубопроводов. Для разработки рекомендаций по минимизации негативного влияния эффекта экранирования тока катодной защиты контурами защитных заземлений необходимо проведение исследования особенностей влияния защитных заземлений на распределение силы

тока в подлежащем электрохимической защите подземном трубопроводе, а также на значения разности потенциалов между трубопроводом и грунтом.

Компьютерное моделирование дает возможность автоматизировать однотипные вычисления, выполняемые с использованием разработанной математической модели с целью определения наиболее оптимального варианта геометрических, электрохимических и электрических параметров проектируемых систем катодной защиты и защитного заземления [4].

В данном разделе представлены результаты разработки программного обеспечения на основании указанной математической модели, позволяющей проводить расчеты распределения силы тока в подземном трубопроводе и разности потенциалов между трубопроводом и грунтом при наличии электрического контакта трубопровода с защитными заземлениями электроустановок. Рассматриваемое программное обеспечение предназначено для численного моделирования эффекта экранирования тока катодной защиты подземного трубопровода контурами защитных заземлений, имеющих электрический контакт с трубопроводом (рисунок 2.4).

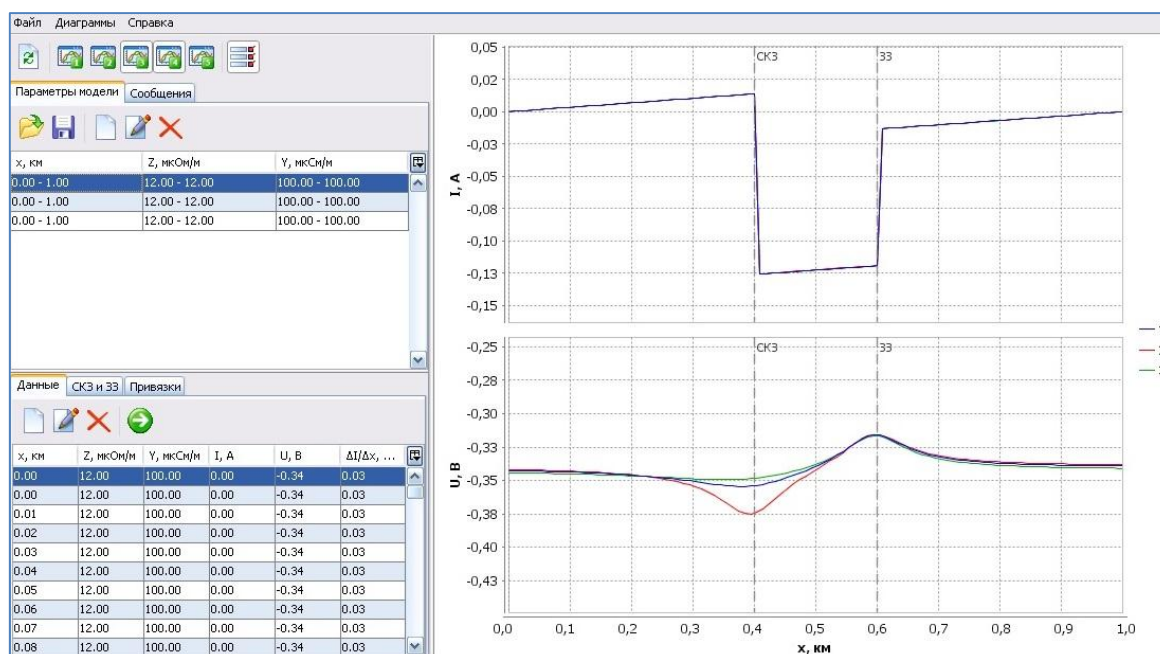


Рисунок 2.4 – Главное окно программного обеспечения для моделирования эффекта экранирования тока катодной защиты контурами защитных заземлений

Программное обеспечение позволяет проводить исследование закономерностей влияния защитного заземления, имеющего электрический контакт с трубопроводом, на распределения вдоль трубопровода силы тока катодной защиты и разности потенциалов между трубопроводом и грунтом при различных значениях следующих параметров: продольное сопротивление трубопровода Z , проводимость изоляционного покрытия Y , длина рассматриваемого участка трубопровода L , линейная координата точки подключения к трубопроводу станции катодной защиты $x_{СКЗ}$, расстояние от трубопровода до анодного заземления станции катодной защиты $u_{СКЗ}$, линейная координата точки подключения к трубопроводу защитного заземления $x_{ЗЗ}$, расстояние от трубопровода до защитного заземления $u_{ЗЗ}$, удельное сопротивление грунта $\rho_{гр}$, сила тока станции катодной защиты $I_{СКЗ}$, сопротивление растеканию тока защитного заземления $R_{ЗЗ}$.

Рассматривается прямолинейный участок трубопровода. При расчетах приняты следующие предположения и допущения:

- защита участка трубопровода от коррозии осуществляется путем подключения к одной станции катодной защиты;
- на рассматриваемом участке трубопровода отсутствуют электроизолирующие вставки и переходы «земля-воздух»;
- линейная координата анодного заземления станции катодной защиты совпадает с линейной координатой точки подключения к трубопроводу станции катодной защиты;
- линейная координата защитного заземления совпадает с линейной координатой точки подключения к трубопроводу защитного заземления;
- величина удельного электрического сопротивления грунта на рассматриваемом участке постоянна;
- величина продольного сопротивления трубопровода на рассматриваемом участке постоянна;
- величина проводимости изоляционного покрытия на рассматриваемом участке постоянна;

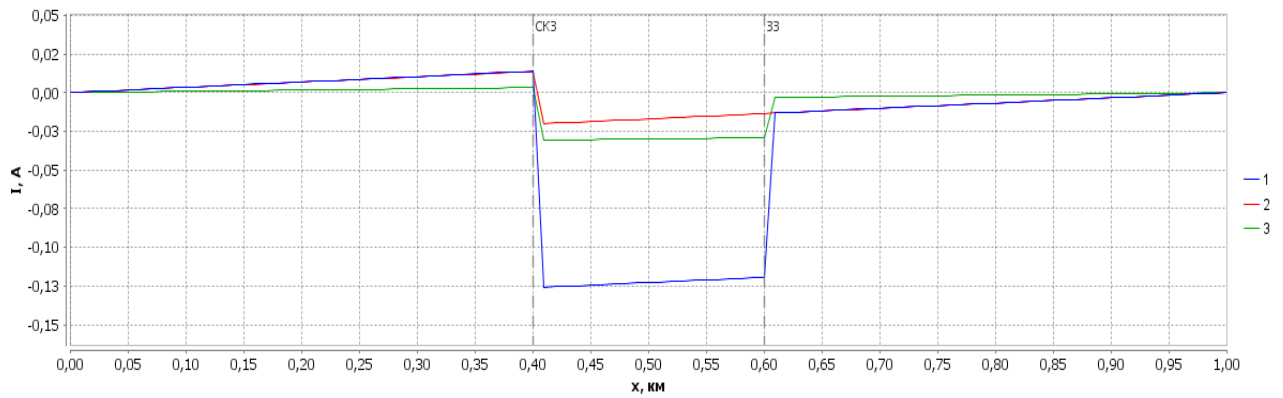
– на рассматриваемом участке отсутствует влияние классических или неклассических источников блуждающих токов.

Программное обеспечение позволяет проводить расчет и визуализацию зависимостей от линейной координаты силы тока в трубопроводе $I(x)$ и разности потенциалов между трубопроводом и грунтом $U(x)$. Предусмотрена возможность сохранения исходных данных и результатов выполненных расчетов, а также возможность работы с ранее сохраненными данными.

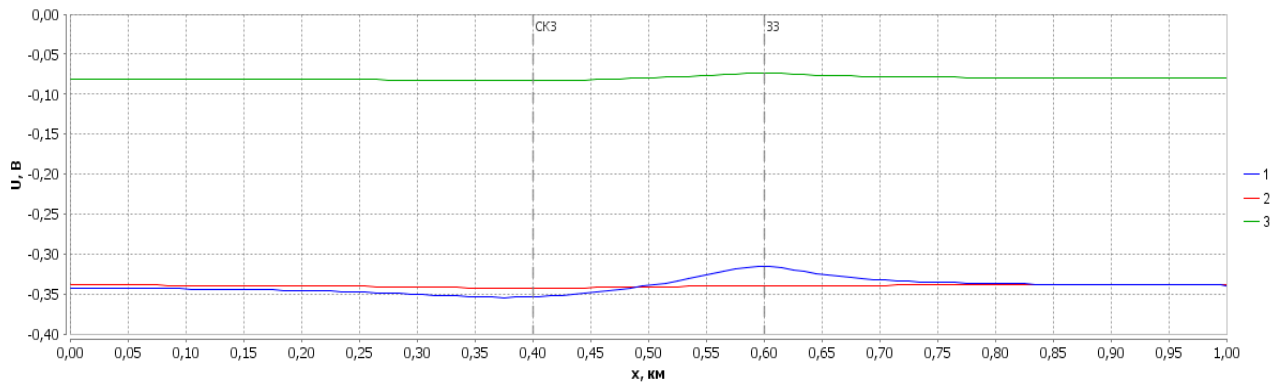
2.3 Исследование влияния защитного заземления на распределения вдоль трубопровода силы тока катодной защиты и разности потенциалов между трубопроводом и грунтом

Рассмотрим участок подземного трубопровода со следующими параметрами: $Z = 12$ мкОм/м (такую величину продольного сопротивления имеет трубопровод с наружным диаметром 530 мм и толщиной стенки 8 мм, методика расчета Z приведена в работе [25]), $Y = 100$ мкСм/м (такая величина проводимости изоляционного покрытия, согласно [18], допускается для трубопровода с ленточным полимерно-битумным или мастичным изоляционным покрытием после 10 лет эксплуатации при наружном диаметре трубопровода 530 мм), $L = 1$ км.

Пусть в точке с линейной координатой $x_{СКЗ} = 0,40$ км к трубопроводу подключена станция катодной защиты, анодное заземление которой расположено на расстоянии $u_{СКЗ} = 0,10$ км от трубопровода, удельное сопротивление грунта $\rho_{гр} = 100$ Ом·м. Результаты расчета зависимостей $I(x)$ и $U(x)$ при силе тока станции катодной защиты $I_{СКЗ} = 0,034$ А представлены на рисунке 2.5 (кривые под номером 2).



а



б

Рисунок 2.5 – Зависимости $I(x)$ (а) и $U(x)$ (б) при $x_{СКЗ} = 0,40$ км, $y_{СКЗ} = 0,10$ км, $x_{ЗЗ} = 0,60$ км, $y_{ЗЗ} = 0,05$ км, $\rho_{zp} = 100$ Ом·м. $I_{СКЗ} = 0,14$ А, $R_{ЗЗ} = 3$ Ом (1), $I_{СКЗ} = 0,034$ А, без защитного заземления ($R_{ЗЗ} = \infty$) (2), $I_{СКЗ} = 0,034$ А, $R_{ЗЗ} = 3$ Ом (3)

Здесь и далее при анализе зависимостей $U(x)$ следует учитывать, что в ходе расчетов определяются значения разности потенциалов между трубопроводом и грунтом, связанные с наличием тока в трубопроводе. Иначе говоря, при расчетах не учитывается стационарный потенциал металла трубопровода $U_{см}$. Для получения оценочных значений потенциала трубопровода относительно медно-сульфатного электрода сравнения следует к величине $U(x)$ прибавить $U_{см} = -0,55$ В [74].

Пусть в точке с линейной координатой $x_{ЗЗ} = 0,60$ км к трубопроводу подключено защитное заземление, расположенное на расстоянии $y_{ЗЗ} = 0,05$ км от трубопровода, сопротивление растеканию тока защитного заземления $R_{ЗЗ} = 3$ Ом.

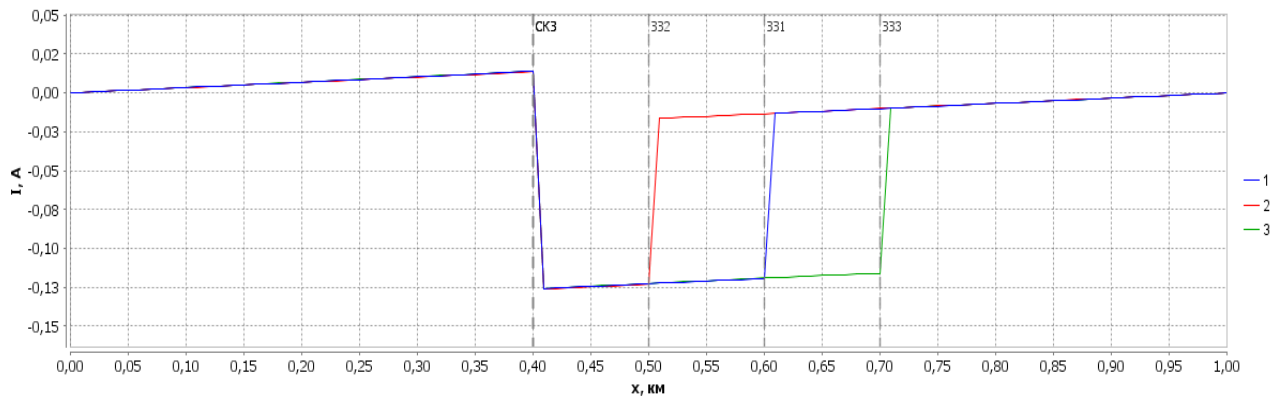
В этом случае при том же значении $I_{СКЗ}$ зависимости $I(x)$ и $U(x)$ существенно изменяются (кривые под номером 3 на рисунке 2.5). В частности, значения U на рассматриваемом участке трубопровода уменьшаются (по абсолютной величине) приблизительно на 0,26 В. Для возвращения U к прежнему уровню необходимо увеличить $I_{СКЗ}$ до 0,14 А (кривые под номером 1 на рисунке 2.5). При этом в районе точки подключения защитного заземления к трубопроводу наблюдается локальное уменьшение (по абсолютной величине) значений U .

Таким образом, наличие электрического контакта между трубопроводом и защитным заземлением приводит к изменению распределения силы тока катодной защиты в трубопроводе, что сопровождается уменьшением (по абсолютной величине) разности потенциалов между трубопроводом и грунтом, особенно выраженным в районе точки подключения защитного заземления к трубопроводу.

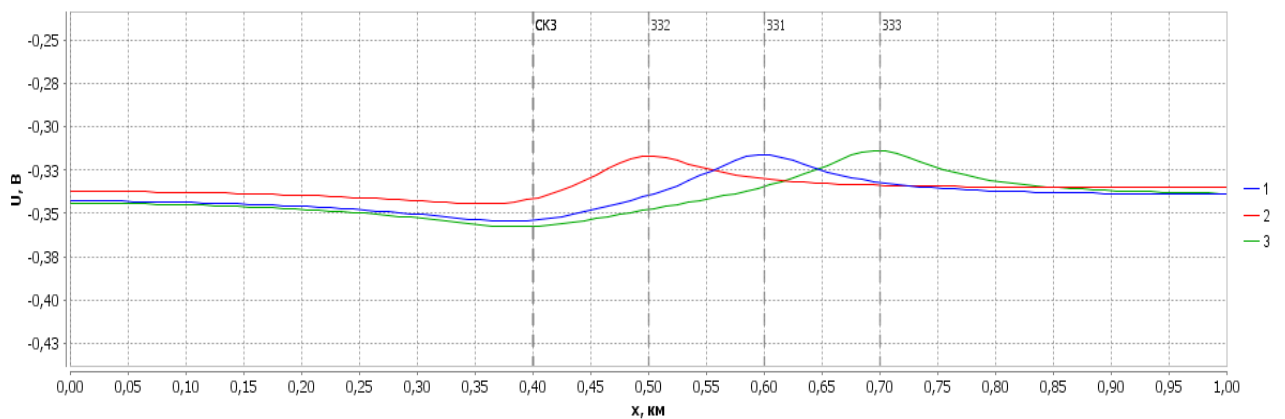
2.4 Исследование влияния взаимного расположения станции катодной защиты и защитного заземления на распределения вдоль трубопровода силы тока катодной защиты и разности потенциалов между трубопроводом и грунтом

В данном разделе представлены результаты расчетов зависимостей $I(x)$ и $U(x)$ для одного и того же участка трубопровода при различных вариантах взаимного расположения станции катодной защиты и защитного заземления, имеющего электрический контакт с трубопроводом (рисунки 2.6 – 2.8). При расчетах использованы следующие параметры: $Z = 12$ мкОм/м, $Y = 100$ мкСм/м, $L = 1$ км.

При изменении линейной координаты точки подключения защитного заземления к трубопроводу изменяется положение локального изменения разности потенциалов между трубопроводом и грунтом (рисунок 2.6).



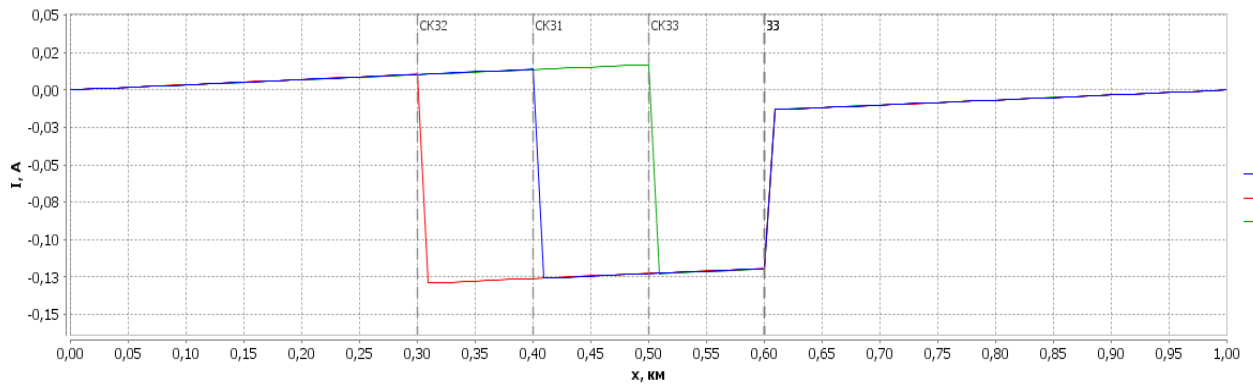
а



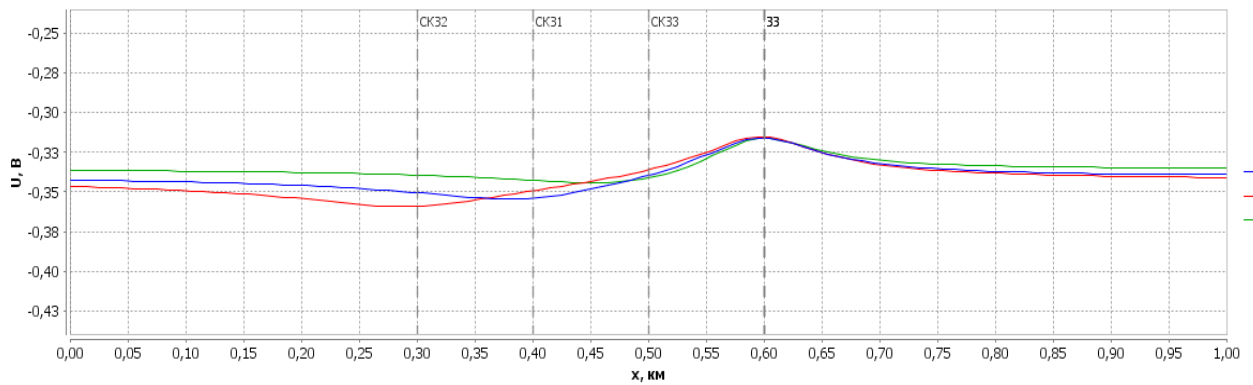
б

Рисунок 2.6 – Зависимости $I(x)$ (а) и $U(x)$ (б) при $x_{СКЗ} = 0,40$ км,
 $y_{СКЗ} = 0,10$ км, $y_{ЗЗ} = 0,05$ км, $R_{ЗЗ} = 3$ Ом, $I_{СКЗ} = 0,14$ А, $\rho_{\text{зр}} = 100$ Ом·м.
 $x_{ЗЗ} = 0,60$ км (1), $x_{ЗЗ} = 0,50$ км (2), $x_{ЗЗ} = 0,70$ км (3)

Чем больше расстояние между точками подключения к трубопроводу станции катодной защиты и защитного заземления, тем более отрицательными являются значения U (за исключением участка между точками подключения к трубопроводу станции катодной защиты и защитного заземления) (рисунок 2.7).



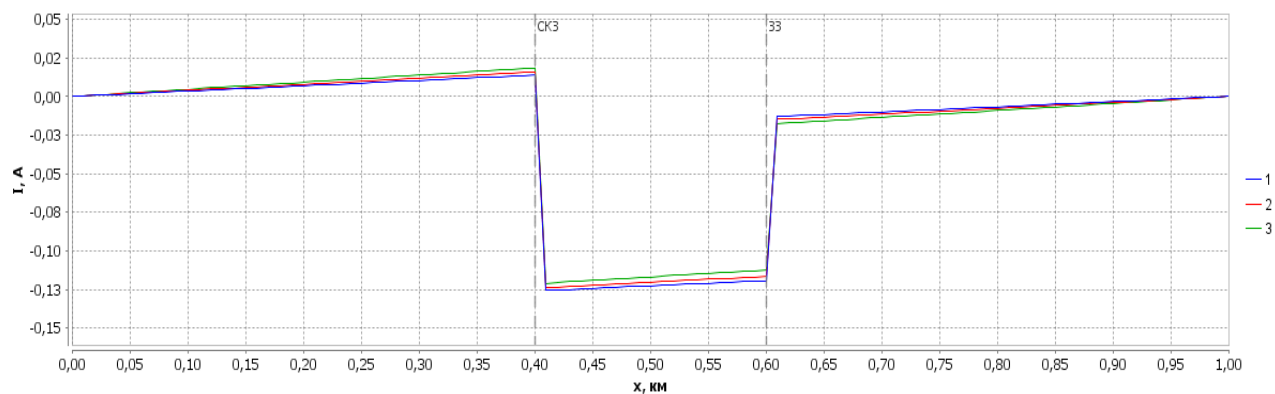
а



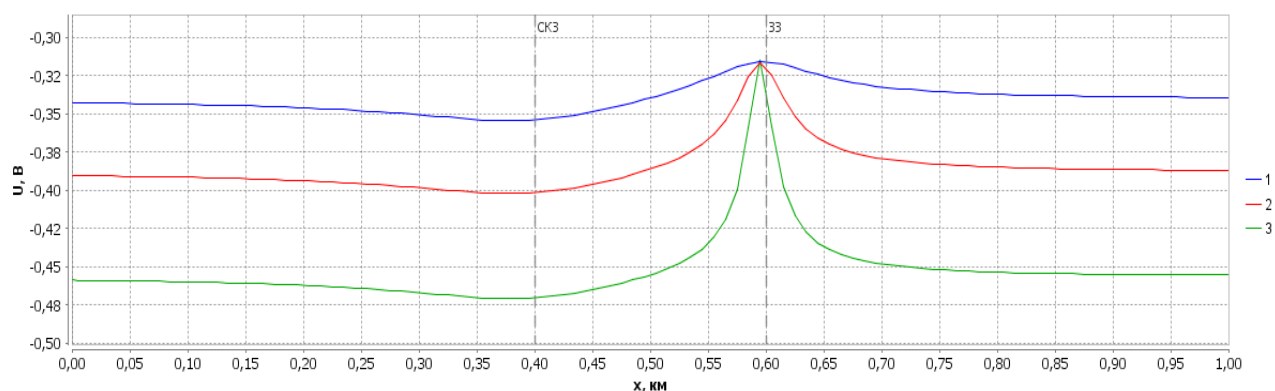
б

Рисунок 2.7 – Зависимости $I(x)$ (а) и $U(x)$ (б) при $x_{ЗЗ} = 0,60$ км,
 $u_{СКЗ} = 0,10$ км, $y_{ЗЗ} = 0,05$ км, $R_{ЗЗ} = 3$ Ом, $I_{СКЗ} = 0,14$ А, $\rho_{ep} = 100$ Ом·м.
 $x_{СКЗ} = 0,40$ км (1), $x_{СКЗ} = 0,30$ км (2), $x_{СКЗ} = 0,50$ км (3)

При уменьшении расстояния между защитным заземлением и трубопроводом уменьшается сила тока утечки через защитное заземление, в результате значения U при неизменной силе тока станции катодной защиты становятся более отрицательными (рисунок 2.8).



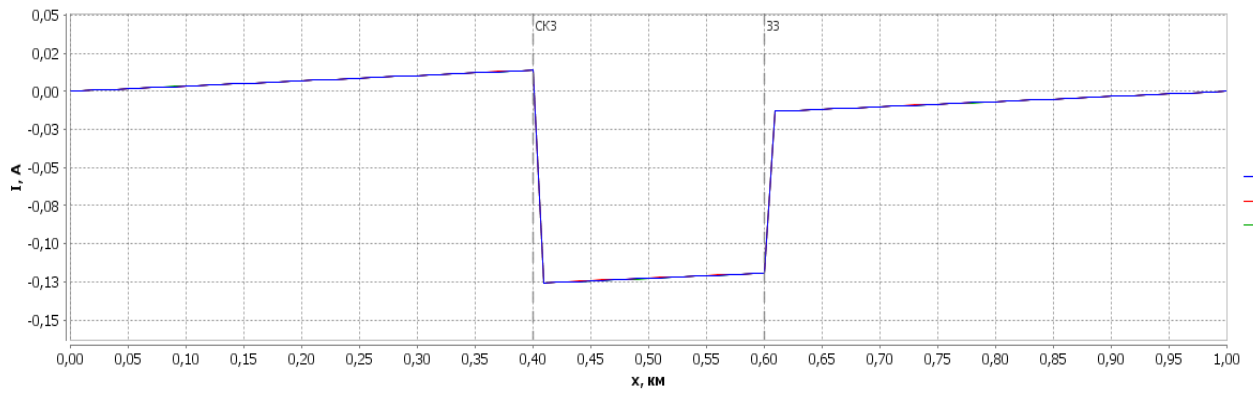
а



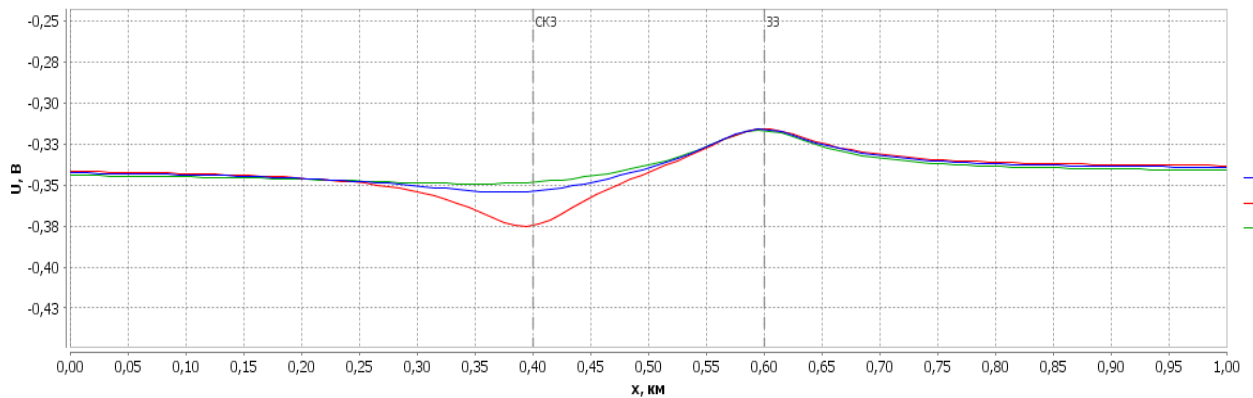
б

Рисунок 2.8 – Зависимости $I(x)$ (а) и $U(x)$ (б) при $x_{ЗЗ} = 0,60$ км, $x_{СКЗ} = 0,40$ км, $у_{СКЗ} = 0,10$ км, $R_{ЗЗ} = 3$ Ом, $I_{СКЗ} = 0,14$ А, $\rho_{cp} = 100$ Ом·м.
 $у_{ЗЗ} = 0,05$ км (1), $у_{ЗЗ} = 0,02$ км (2), $у_{ЗЗ} = 0,01$ км (3)

При уменьшении расстояния от анодного заземления до трубопровода наблюдается увеличение абсолютной величины разности потенциалов между трубопроводом и грунтом в районе точки подключения станции катодной защиты к трубопроводу и уменьшение абсолютной величины разности потенциалов между трубопроводом и грунтом вдали от точки подключения станции катодной защиты к трубопроводу (рисунок 2.9).



а



б

Рисунок 2.9 – Зависимости $I(x)$ (а) и $U(x)$ (б) при $x_{ЗЗ} = 0,60$ км, $x_{СКЗ} = 0,40$ км, $y_{ЗЗ} = 0,05$ км, $R_{ЗЗ} = 3$ Ом, $I_{СКЗ} = 0,14$ А, $\rho_{гр} = 100$ Ом·м.
 $y_{СКЗ} = 0,10$ км (1), $y_{СКЗ} = 0,05$ км (2), $y_{СКЗ} = 0,15$ км (3)

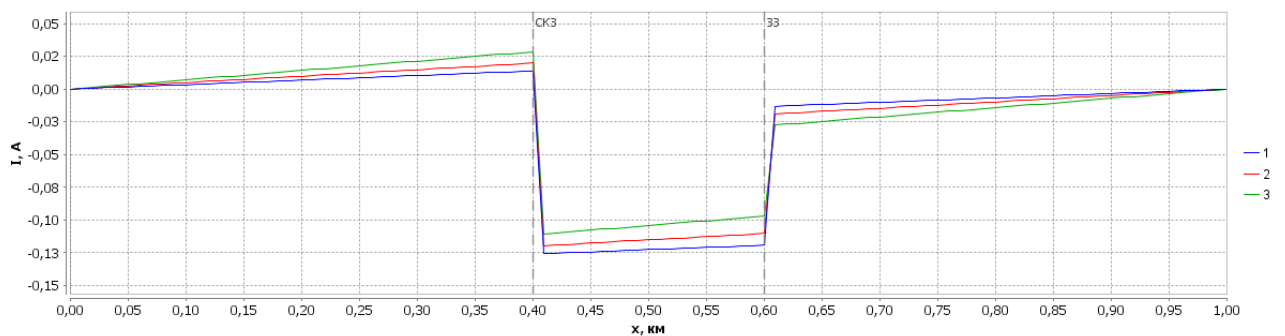
2.5 Исследование влияния характеристик станции катодной защиты, защитного заземления и грунта на распределения вдоль трубопровода силы тока катодной защиты и разности потенциалов между трубопроводом и грунтом

В данном разделе представлены результаты расчетов зависимостей $I(x)$ и $U(x)$ для одного и того же участка трубопровода при различных значениях сопротивления растеканию тока защитного заземления $R_{ЗЗ}$, силы тока станции катодной защиты $I_{СКЗ}$ и удельного сопротивления грунта $\rho_{гр}$ (рисунки 2.10 – 2.12).

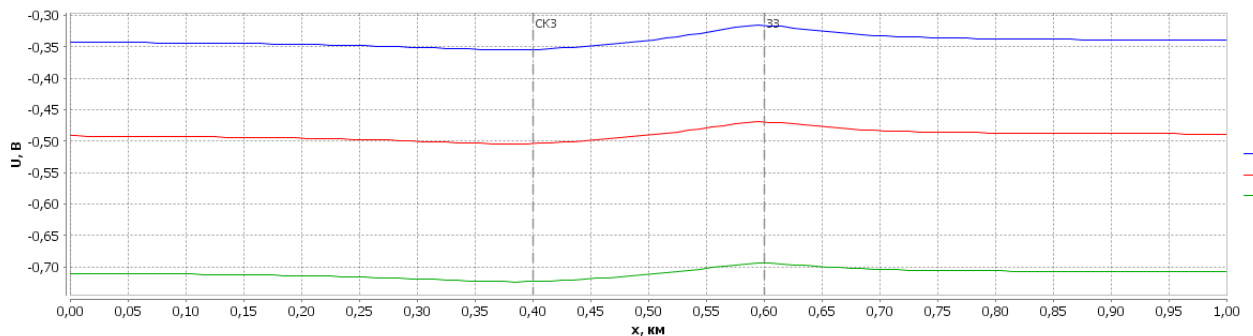
При расчетах использованы следующие параметры: $Z = 12$ мкОм/м, $Y = 100$ мкСм/м, $L = 1$ км.

При увеличении сопротивления растеканию тока защитного заземления уменьшается сила тока утечки через защитное заземление, в результате разность потенциалов между трубопроводом и грунтом при неизменной силе тока станции катодной защиты увеличивается по абсолютной величине (рисунок 2.10).

Увеличение силы тока станции катодной защиты приводит к увеличению абсолютной величины разности потенциалов между трубопроводом и грунтом (рисунок 2.11).



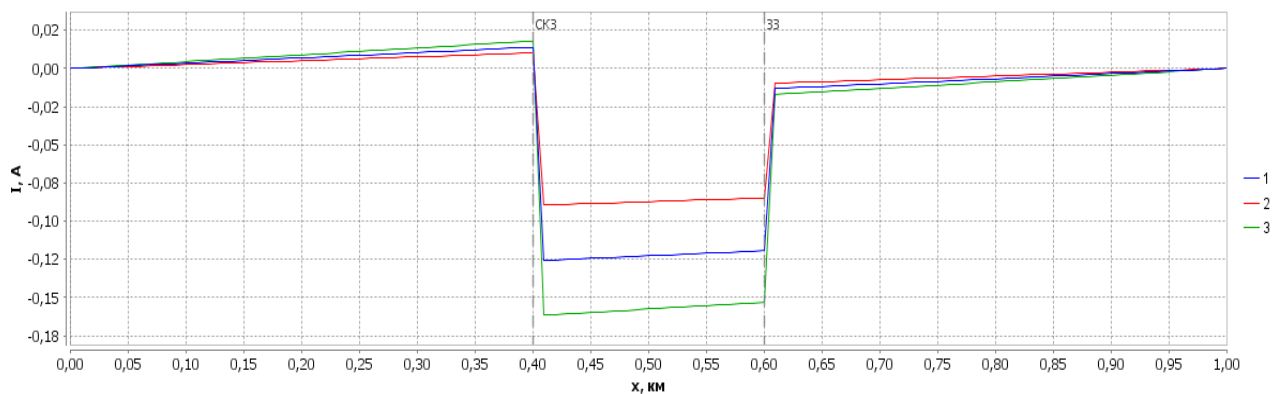
а



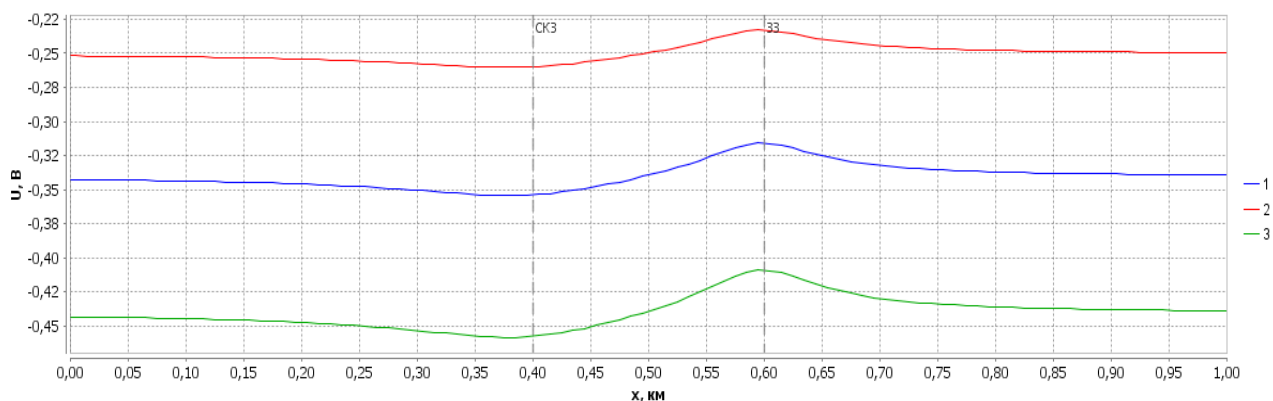
б

Рисунок 2.10 – Зависимости $I(x)$ (а) и $U(x)$ (б) при $x_{ЗЗ} = 0,60$ км, $x_{СКЗ} = 0,40$ км, $y_{СКЗ} = 0,10$ км, $y_{ЗЗ} = 0,05$ км, $I_{СКЗ} = 0,14$ А, $\rho_{zp} = 100$ Ом·м.

$$R_{ЗЗ} = 3 \text{ Ом (1)}, R_{ЗЗ} = 5 \text{ Ом (2)}, R_{ЗЗ} = 10 \text{ Ом (3)}$$



а

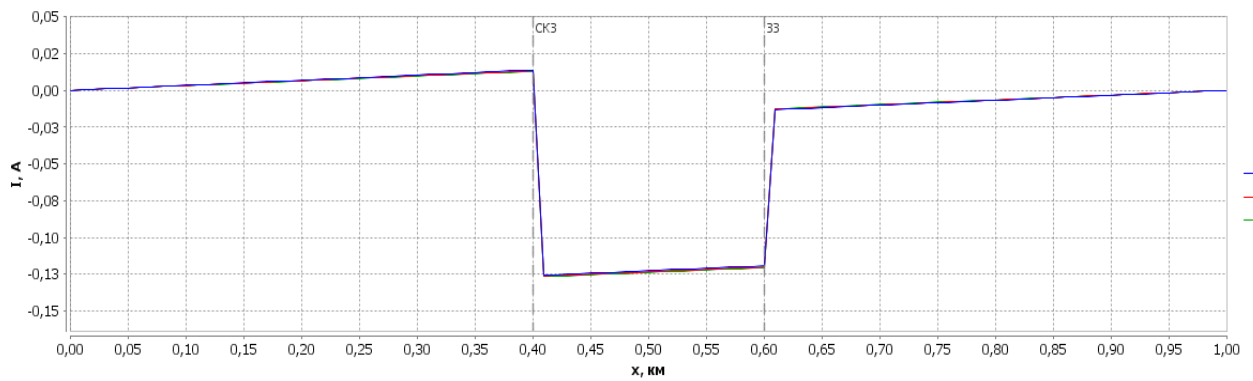


б

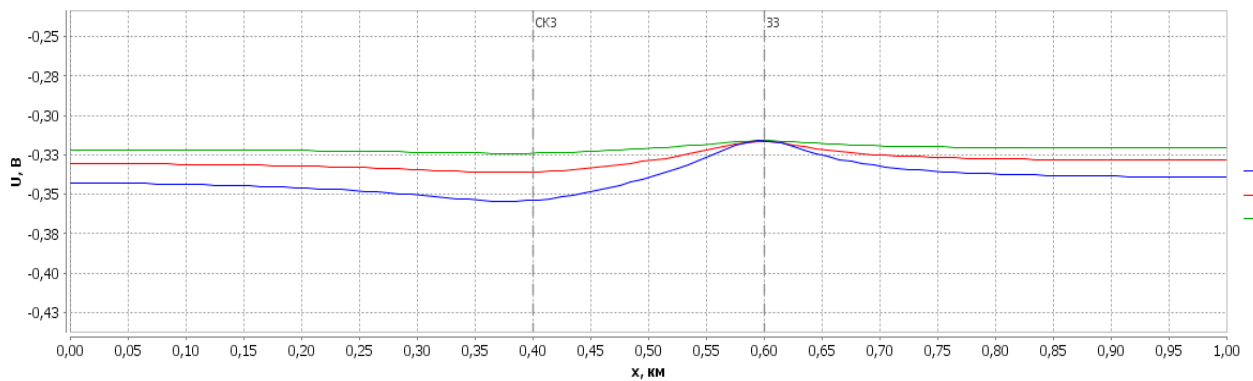
Рисунок 2.11 – Зависимости $I(x)$ (а) и $U(x)$ (б) при $x_{ЗЗ} = 0,60$ км, $x_{СКЗ} = 0,40$ км, $y_{СКЗ} = 0,10$ км, $y_{ЗЗ} = 0,05$ км, $R_{ЗЗ} = 3$ Ом, $\rho_{gp} = 100$ Ом·м.

$$I_{СКЗ} = 0,14 \text{ А (1)}, I_{СКЗ} = 0,10 \text{ А (2)}, I_{СКЗ} = 0,18 \text{ А (3)}$$

При уменьшении удельного сопротивления грунта наблюдается уменьшение абсолютного значения разности потенциалов между трубопроводом и грунтом на большей части рассматриваемого участка трубопровода. При этом сглаживается характерный экстремум зависимости $U(x)$ в районе точки подключения станции катодной защиты. Значения $U(x)$ в районе точки подключения защитного заземления не зависят от величины удельного сопротивления грунта (рисунок 2.12).



а



б

Рисунок 2.12 – Зависимости $I(x)$ (а) и $U(x)$ (б) при $x_{ЗЗ} = 0,60$ км, $x_{СКЗ} = 0,40$ км, $y_{СКЗ} = 0,10$ км, $y_{ЗЗ} = 0,05$ км, $R_{ЗЗ} = 3$ Ом, $I_{СКЗ} = 0,14$ А.

$$\rho_{zp} = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м (1)}, \rho_{zp} = 50 \text{ Ом}\cdot\text{м (2)}, \rho_{zp} = 20 \text{ Ом}\cdot\text{м (3)}$$

Таким образом, наиболее существенное влияние на зависимости $I(x)$ и $U(x)$ оказывают такие параметры, как сопротивление растеканию тока защитного заземления и расстояние от защитного заземления до трубопровода.

2.6 Выводы по главе 2

1. Показано, что распространение постоянного электрического тока в участке подземного трубопровода с изоляционным покрытием зависит от продольного омического сопротивления трубопровода, проводимости изоляционного покрытия и проекции вектора напряженности внешнего электрического поля на ось

трубопровода. Получены дифференциальные уравнения для расчета силы тока в трубопроводе и разности потенциалов между трубопроводом и грунтом (соотношения (2.1) и (2.2)).

2. Получены уравнения для расчета внешнего электрического поля, действующего на участок трубопровода, подключенный к произвольному количеству станций катодной защиты и имеющий электрический контакт с произвольным количеством защитных заземлений электроустановок (соотношение (2.7) с учетом (2.8) и (2.9)).

3. Рассмотрены способы учета точек подключения к трубопроводу станций катодной защиты и защитных заземлений электроустановок при численном решении задачи о распространении тока в подземном трубопроводе. Составлена система конечно-разностных уравнений для определения силы тока в трубопроводе и разности потенциалов между трубопроводом и грунтом (соотношения (2.14), (2.17), (2.18), (2.20), (2.21), (2.23)).

4. Разработано программное обеспечение, позволяющее производить расчет распределения силы тока в трубопроводе и разности потенциалов между трубопроводом и грунтом при наличии подключенных к трубопроводу станций катодной защиты и электрического контакта между трубопроводом и защитными заземлениями электроустановок.

5. Рассмотрен пример расчета влияния защитного заземления на распределения вдоль трубопровода силы тока катодной защиты и разности потенциалов между трубопроводом и грунтом. Показано, что для участка трубопровода с наружным диаметром 530 мм и толщиной стенки 8 мм подключение защитного заземления с сопротивлением растеканию 3 Ом приводит к снижению абсолютного значения разности потенциалов между трубопроводом и грунтом на 0,26 В. Для возвращения разности потенциалов к прежнему уровню необходимо увеличить силу тока станции катодной защиты более чем в 4 раза (с 0,034 А до 0,14 А).

6. Проведено исследование влияния взаимного расположения станции катодной защиты и защитного заземления на распределения вдоль трубопровода

силы тока катодной защиты и разности потенциалов между трубопроводом и грунтом. Показано, что при уменьшении расстояния между защитным заземлением и трубопроводом с 50 м до 10 м значения разности потенциалов между трубопроводом и грунтом вдали от точки подключения защитного заземления увеличиваются по абсолютной величине на 0,12 В.

7. Проведено исследование влияния характеристик станции катодной защиты, защитного заземления и грунта на распределения вдоль трубопровода силы тока катодной защиты и разности потенциалов между трубопроводом и грунтом. Показано, что при увеличении сопротивления растеканию тока защитного заземления с 3 Ом до 10 Ом разность потенциалов между трубопроводом и грунтом при неизменной силе тока станции катодной защиты увеличивается по абсолютной величине на 0,37 В.

ГЛАВА 3 ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ЗАЩИТНЫХ ЗАЗЕМЛЕНИЙ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЛОЩАДОК

3.1 Проведения экспериментальных лабораторных исследований влияния защитных заземлений электроустановок на эффективность электрохимической защиты подземных трубопроводов

Известно, что влияние параметров защитных заземлений электроустановок на характеристики катодной защиты подземных сооружений проявляется в снижении защитного потенциала защищаемых сооружений, расположенных в непосредственной близости от контура защитного заземления.

Целью проведения лабораторного исследования является получение сведений о влиянии защитных заземлений, выполненных из различных материалов, на функционирование катодной защиты подземного трубопровода с учетом изменения таких параметров, как расстояние между анодным и защитным заземлением, расстояние между защитным заземлением и подземным трубопроводом, свойства изоляционного покрытия подземного трубопровода.

Задачей лабораторного исследования является измерение и последующая обработка результатов измерения защитного потенциала на участке трубопровода, имитирующего подземный трубопровод, находящийся под действием катодной защиты.

Для проведения измерений необходимо обеспечить наличие:

- ровной грунтовой площадки, не имеющей посторонних предметов, вызывающих помехи и влияющих на показания измерительных приборов.
- участка трубопровода, расположенного в грунте.
- различных видов защитных заземлений (сталь, оцинкованная сталь, медь).
- анодного заземления, выполненного из стали, и действующей установки, имитирующей работу станции катодной защиты, обеспечивающей

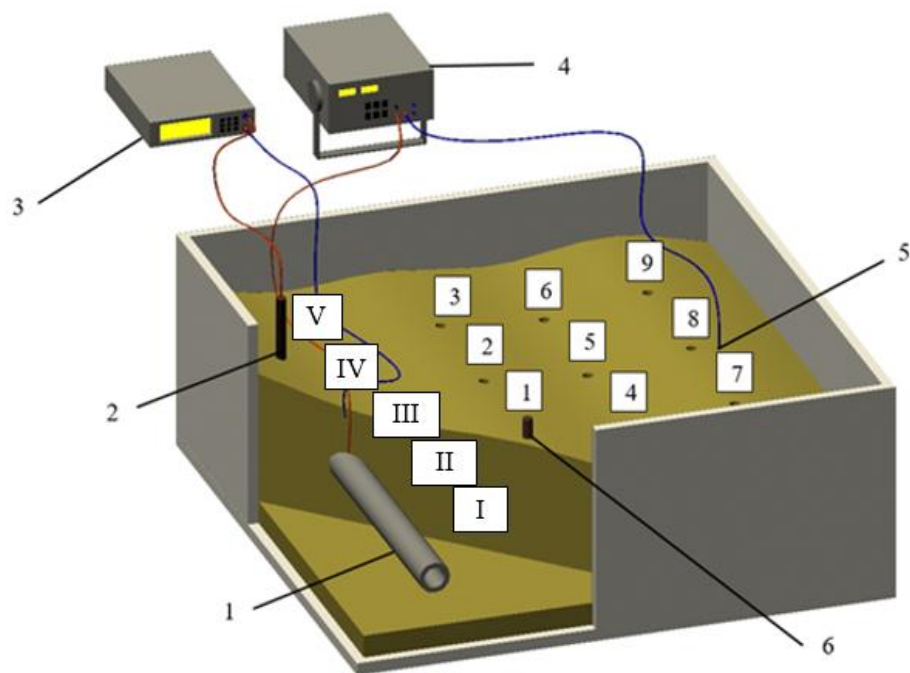
защитный потенциал на участке подземного трубопровода в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51164-98.

Для проведения лабораторных экспериментальных работ используются приборы и оборудование, перечень которых представлен в таблице 3.1 [41].

Таблица 3.1 – Приборы и оборудование, используемые для проведения лабораторных исследований

Поз.	Наименование	Технические характеристики
1	Прибор для измерения силы натекающего тока на ЗЗ РВ7-22А	$I_{\text{пост}}=0,1\text{мкА}...2\text{ А}$ $I_{\text{перем}}=0,1\text{ мкА}...2\text{ А}$ $R_{\text{пост}}=0,1\text{ Ом}-2000\text{ кОм}$
2	Прибор для измерения потенциала «труба – земля» - вольтметр универсальный В7-78/1	$U_{\text{пост}}=100\text{ мВ}...1000\text{ В}$ $U_{\text{перем}}=100\text{ мВ}...750\text{ В}$ $I_{\text{пост}}=10\text{ мА}...3\text{ А}$ $I_{\text{перем}}=1\text{ А}...3\text{ А}$
3	Хлорсеребряный электрод сравнения	
4	Стержни стальные	$L=150\text{мм}$
5	Источник постоянного тока	$U_{\text{вых}}: 0\text{ В}-30\text{ В}$ $I_{\text{вых}}: 1\text{ мА}-2\text{ А}$
6	Измеритель сопротивления ИС-10	$R:10-100\text{ Ом}$

Разработанный для проведения лабораторных экспериментальных работ стенд выполнен в виде емкости (50×50 см), заполненной увлажненным песчаным грунтом (рисунок 3.1). В емкость помещен предварительно изолированный полимерной лентой участок трубопровода ($L=480\text{ мм}$; $D_{\text{н}}=22\text{ мм}$; $\delta = 2,7\text{ мм}$). Имитация катодной защиты осуществляется путем подключения к трубопроводу источника питания постоянного тока (Б5-49) и анодного заземления, представляющего собой стальную пластину $S_{\text{Аз}}=38,4\text{ см}^2$. Расстояние между трубопроводом и анодным заземлением 400 мм. В качестве имитаторов защитных заземлений используются образцы из цинка, меди и алюминия, площадь поверхности каждого из которых составляет $S_{\text{ЗЗ}}=12,8\text{ см}^2$. На рисунке 3.1 точками 1-9 показаны места установки защитных заземлений.



1 – участок трубопровода; 2 – хлорсеребряный электрод сравнения, перемещаемый по точкам I...V; 3 – мультиметр; 4 – источник постоянного тока; 5 – анодное заземление (на схеме не показано); 6 – защитное заземление, перемещаемое последовательно по точкам 1...9

Рисунок 3.1 - Схема экспериментального стенда

Планирование эксперимента представляет собой процедуру выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью. При этом существенными являются вопросы минимизации общего числа опытов, что определяет время получения конечного решения и затраты на достижение цели. Для этого в каждом опыте одновременно варьируют всеми переменными, определяющими исследуемое явление, используют математический аппарат, формализующий действия экспериментатора при проведении и обработке результатов опытов и т.д.

Этапы планирования и реализации эксперимента [3, 7]:

- выбор параметров оптимизации и уровней их варьирования;
- кодирование факторов;
- составление матрицы планирования эксперимента;
- реализация плана эксперимента;

– проверка однородности дисперсий параллельных опытов, воспроизводимости результатов;

– расчет коэффициентов уравнения регрессии, их ошибок и значимости;

– проверка адекватности модели.

Из анализа литературных источников и по результатам однофакторных экспериментов [32, 33, 37] выделены для дальнейшего исследования следующие факторы (таблица 3.2):

- расстояние от трубопровода до места установки защитного заземления по вертикали X_1 , мм;

- расстояние до точки установки защитного заземления по горизонтали X_2 , мм.

Предположим, что рассматривается только случай измерения потенциала «труба-земля» в точке I при наличии точечного защитного заземления, выполненного из цинка, перемещаемого последовательно по точкам 1...9 (рисунок 3.1.). Следовательно, можно выделить факторы, являющиеся постоянными и неизменными при проведении измерений:

- удельное сопротивление грунта $50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$;

- параметры трубопровода $L=480 \text{ мм}$; $D_n=22 \text{ мм}$; $\delta = 2,7 \text{ мм}$;

- точка расположения анодного заземления и площадь его поверхности $S_{A3}=38,4 \text{ см}^2$;

- площадь поверхности точечного защитного заземления $S_{зз}=12,8 \text{ см}^2$;

- напряжение на выходе установки катодной защиты $U=1\text{В}$.

Таблица 3.2 - Уровни варьирования изменяемых факторов

Наименование и обозначение фактора	Уровни варьирования		
	-1	0	+1
Расстояние по вертикали X_1 , мм	130	260	390
Расстояние по горизонтали X_2 , мм	0	130	260

Проводился эксперимент типа 3^2 , где число факторов $k=2$, число уровней $p=3$, число опытов $N=9$. Число повторных опытов, позволяющих обеспечить приемлемую точность результата измерений $n=5$ [40, 75].

Таблица 3.3 – Матрица планирования эксперимента и результаты измерений

Номер опыта	X_0	X_1	X_2	X_1X_2	Y ($\Delta U_{T-3}, B$)	Среднее значение Y ($\Delta U_{T-3}, B$)
1	+1	-1	-1	-1	-1,205 -1,203 -1,206 -1,204 -1,205	-1,205
2	+1	-1	0	0	-1,265 -1,264 -1,265 -1,264 -1,265	-1,265
3	+1	-1	+1	-1	-1,336 -1,334 -1,336 -1,337 -1,336	-1,336
4	+1	0	-1	0	-1,275 -1,276 -1,276 -1,275 -1,274	-1,275
5	+1	0	0	0	-1,31 -1,312 -1,311 -1,309 -1,310	-1,31
6	+1	0	+1	0	-1,347 -1,349 -1,347 -1,346 -1,347	-1,347
7	+1	+1	-1	-1	-1,332 -1,335 -1,333 -1,332 -1,330	-1,332
8	+1	+1	0	0	-1,347 -1,343 -1,348 -1,347 -1,348	-1,347
9	+1	+1	+1	+1	-1,371 -1,370 -1,372 -1,371 -1,370	-1,371

После проведения опытов выполнена статистическая обработка результатов. Сначала определяли ошибки повторных (параллельных) опытов. Среднеквадратичное отклонение определяем по выражению

$$S_i^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}, \quad (3.1)$$

где \bar{y} - среднее арифметическое значение параметра оптимизации из пяти повторных измерений (таблица 3.3).

Таблица 3.4 – Результаты расчета среднеквадратичного отклонения

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9
S_i^2	$0,15 \cdot 10^{-5}$	$0,05 \cdot 10^{-5}$	$0,13 \cdot 10^{-5}$	$0,08 \cdot 10^{-5}$	$0,15 \cdot 10^{-5}$	$0,13 \cdot 10^{-5}$	$0,35 \cdot 10^{-5}$	$0,45 \cdot 10^{-5}$	$0,08 \cdot 10^{-5}$
S_i	0,0012	0,0007	0,0011	0,00087	0,00122	0,00111	0,00187	0,00212	0,00087

Для определения промахов используем критерий Стьюдента [29]

$$\frac{y_i - \bar{y}}{s} \geq t, \quad (3.2)$$

где t – критерий Стьюдента, для пяти повторных опытов и доверительной вероятности 0,95 равен 2,78.

Например, для первого опыта $Y_{\min} = -1,203$, $Y_{\max} = -1,206$, среднее значение $Y = -1,205$. Тогда $t_{\text{расч}} = 1,67$, следовательно $t_{\text{расч}} \geq t_{\text{табл}}$, поэтому результаты повторных опытов не являются ошибочными.

Проверку дисперсии воспроизводимости проверяемой по критерию Кохрена

$$G = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2}. \quad (3.3)$$

$$G = 0,000035.$$

Табличное значение критерия Кохрена [29] выбирается в зависимости от числа степеней свободы

$$f_1 = n_1 - 1 = 5 - 1 = 4 \text{ и } f_2 = N = 9$$

$$G_{табл} = 0,374$$

Поскольку условие $G < G_{табл}$, следовательно, дисперсии однородны.

Для двухфакторного эксперимента модель может быть представлена выражением

$$Y = \beta_0 X_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{12} X_1 X_2$$

Значения коэффициентов регрессии позволяют оценить степень влияния факторов и их взаимодействий на параметр оптимизации. Чем больше числовое значение коэффициента, тем большее влияние оказывает фактор.

Чтобы привести процедуру расчета коэффициентов в соответствие с формулой

$$\beta_u = \frac{\sum_{i=1}^N X_{ui} Y_i}{N}, \quad (3.4)$$

в матрицу планирования был введен столбец с фиктивной переменной X_0 , которая принимает во всех опытах значение +1 (таблица 3.3).

Коэффициенты регрессии, рассчитанные по формуле 3.4, составляют:

$$\beta_0 = 1,310, \beta_1 = 0,271, \beta_2 = 0,0269, \beta_{12} = -0,278.$$

Значение дисперсии воспроизводимости определяют по формуле

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_i^2}{N}, \quad (3.5)$$

$$S_{ал}^2 = 0,00000172$$

С учетом значения дисперсии воспроизводимости с доверительной вероятностью 0,95 находим границы доверительных интервалов для коэффициентов регрессии

$$\Delta\beta_i = \pm \frac{t \cdot S_y}{\sqrt{N}}, \quad (3.6)$$

$$\Delta\beta_i = \pm \frac{2,78 \cdot 0,0013}{\sqrt{9}} = \pm 0,0012.$$

Сравнивая значения коэффициентов регрессии с границами доверительных интервалов видим, что все полученные коэффициенты являются статистически значимыми, поэтому уравнение регрессии примет вид

$$Y=1,31 \cdot X_0+ 0,271 \cdot X_1+ 0,0269 \cdot X_2 - 0,278 \cdot X_1 X_2.$$

Проверяем адекватность полученного уравнения. Вычисляем теоретические значения параметра оптимизации \hat{Y} , величину ошибки $\Delta Y = \bar{Y} - \hat{Y}$.

Таблица 3.5 – Результаты расчета параметра оптимизации и величины отклонения

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9
\hat{Y}	1,29	1,039	1,344	1,283	1,31	1,337	1,83	1,581	1,33
ΔY	-0,0085	0,00226	-0,0008	-0,0008	0	0,001	-0,005	-0,00234	0,0041
ΔY^2	0,007	0,051	0,00006	0,00006	0	0,0001	0,25	0,0548	0,0017

Дисперсия адекватности определяется по формуле

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta Y_i^2}{f}. \quad (3.7)$$

$$S_{ад}^2 = 0,0000024$$

Адекватность математической модели определяем по критерию Фишера

$$F_{расч} = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2}, \quad (3.8)$$

$$F_{расч} = 1,4.$$

Поскольку $F_{расч} \leq F_{табл}$, следовательно, модель адекватна.

Таким образом, для случая измерения потенциала «труба-земля» в точке I при наличии защитного заземления, выполненного из цинка, необходимо произвести девять опытов с количеством измерений в каждой точке $n=5$.

Поскольку количество точек, по которым перемещается электрод сравнения для определения изменения величины потенциала «труба-земля» вдоль

трубопровода, равно пяти, следовательно, необходимо провести 45 опытов с количеством измерений в каждой точке $n=5$.

Учитывая, что тип материала, из которого выполнен имитатор защитного заземления, в процессе проведения эксперимента изменяется три раза (цинк, алюминий, медь), следовательно, необходимо выполнить 75 опытов с пятикратным повторением измерений потенциала «труба-земля» в каждом случае.

Экспериментальные работы проводятся в три этапа (таблица 3.2).

На первом этапе проведена оценка распределения разности потенциалов «труба – земля» путем его измерения при перемещения хлорсеребряного электрода сравнения последовательно по точкам I, II, III, IV, V, расположенным вдоль рассматриваемого участка трубопровода на расстоянии 80 мм друг от друга. Результаты проведения измерений разности потенциалов «труба – земля» представлены на рисунке 3.2:

- точка I: $\Delta U_{Т-З} = -1,562$ В;
- точка II: $\Delta U_{Т-З} = -1,563$ В;
- точка III: $\Delta U_{Т-З} = -1,564$ В;
- точка IV: $\Delta U_{Т-З} = -1,555$ В;
- точка V: $\Delta U_{Т-З} = -1,553$ В.

На втором этапе проводилось исследование влияния наличия имитатора защитного заземления (цинкового, алюминиевого или медного), последовательно располагаемого по точкам 1...9 на участке между трубопроводом и анодным заземлением, на величину потенциала «труба – земля» в пяти точках, расположенных вдоль рассматриваемого участка модели трубопровода. Результаты проведения измерений разности потенциалов «труба – земля», а также изменения данной величины при наличии защитного заземления, представленные на рисунке 3.2, позволяют заключить, что наиболее существенное влияние на изменение величины потенциала «труба – земля» оказывают заземления, расположенные вблизи подземного трубопровода.

Таблица 3.6 – Последовательность выполнения лабораторного эксперимента

№ Этапа	Содержание испытаний
Этап 1	Проведение измерений разности потенциалов «труба – земля» относительно хлорсеребряного электрода сравнения [36, 38, 80], возникающей в результате действия подключенного к участку трубопровода источника постоянного тока и стального образца, имитирующего работу анодного заземления. До начала проведения измерений в процессе выполнения всех этапов лабораторных исследований контролируется величина удельного сопротивления грунта. В случае необходимости грунт увлажняется, и измерения повторяются.
Этап 2	Проведение измерений разности потенциалов «труба – земля» относительно хлорсеребряного электрода сравнения [36, 38, 80] при наличии в зоне действия катодной защиты элементов, имитирующих защитные заземления, выполненные из меди, оцинкованной и черной стали.
Этап 3	Проведение измерений средней и максимальной величины силы тока, натекающего на защитные заземления от системы катодной защиты трубопровода [36, 38, 80].

Соответственно, чем ближе защитное заземление к анодному заземлению, тем менее выражено экранирующее влияние. Кроме того, установлено, что наличие защитных заземлений, выполненных из меди, приводит к значительному смещению потенциала «труба – земля» в положительную область, что приводит к несоответствию уровня защищенности трубопровода требованиям [18]. Такое экранирующее влияние, оказываемое защитными заземлениями из меди на защищенность участка трубопровода от коррозии, объясняется положением меди в ряду активностей металлов [21].

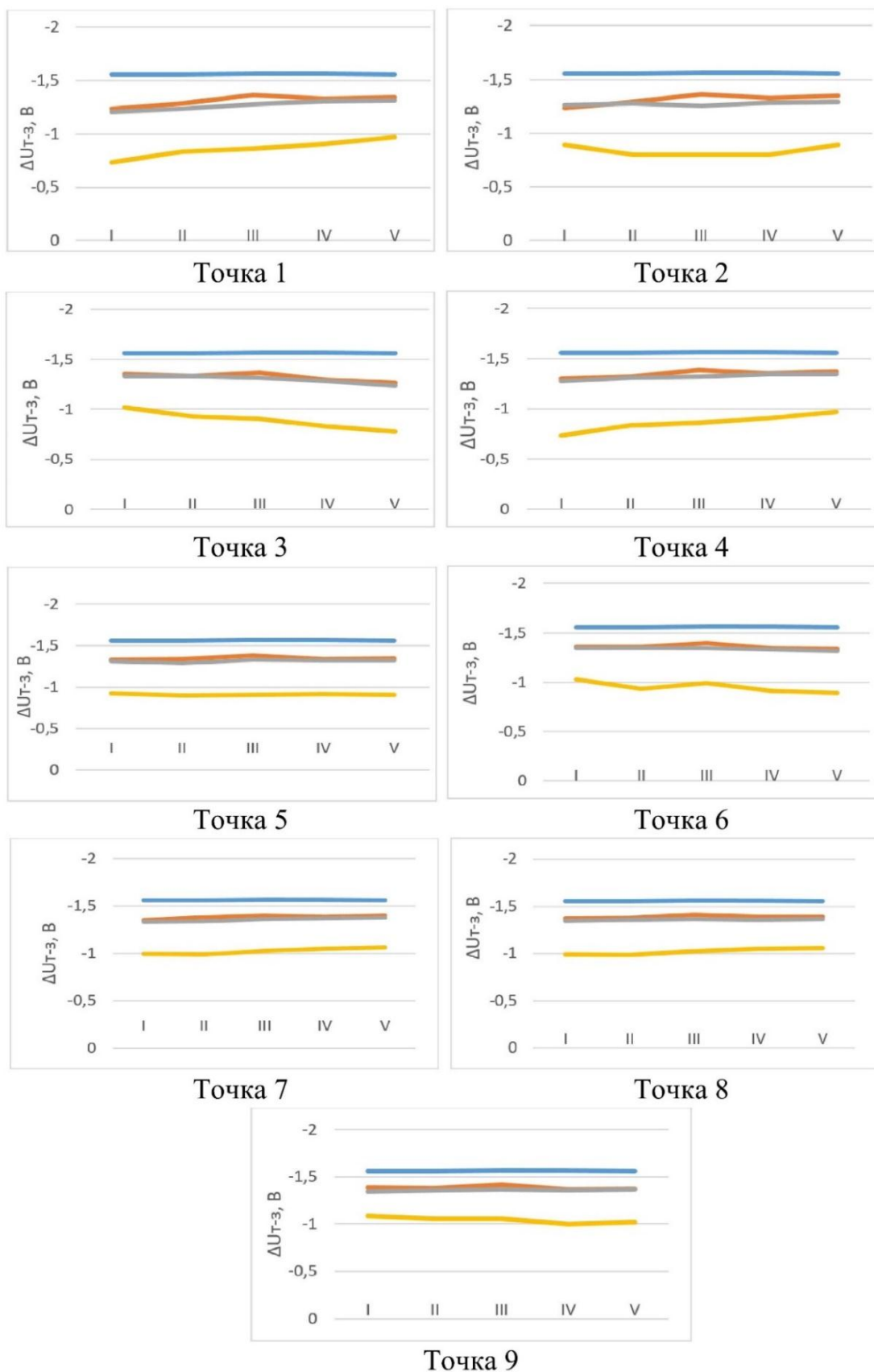


Рисунок 3.2 - Изменение величины потенциалов «труба – земля» вдоль рассматриваемого участка в точках 1–9:

— ΔU_{T-3} — ΔU_{T-3}^{Al} — ΔU_{T-3}^{Zn} — ΔU_{T-3}^{Cu}

С целью оценки негативного влияния защитных заземлений электроустановок на уровень защищенности подземных трубопроводов от коррозии введем понятие, отражающее степень влияния защитных заземлений и заземлений молниезащиты на эффективность катодной защиты подземных трубопроводов – коэффициент экранирования тока катодной защиты (КЭТКЗ).

Последовательность расчета КЭТКЗ:

1. Измерение естественного потенциала защищаемого сооружения U_e , В.
 2. Измерение разности потенциалов «труба – земля» при отсутствии в зоне действия катодной защиты экранирующих элементов $U_{т-з}$, В.

3. Измерение разности потенциалов «труба – земля» при наличии в зоне действия катодной защиты экранирующих элементов $U_{т-з}^{33}$, В.

4. Определение разности значений потенциалов «труба – земля» при отсутствии и при наличии защитных заземлений

$$\Delta U = U_{т-з} - U_{т-з}^{33}. \quad (3.9)$$

5. Определение разности значений потенциалов «труба – земля» при отсутствии защитных заземлений и естественного потенциала защищаемого сооружения

$$U^0 = U_{т-з} - U_e. \quad (3.10)$$

6. Определение коэффициента экранирования тока катодной защиты

$$K_{э} = \frac{|\Delta U|}{U^0}. \quad (3.11)$$

Для оценки величины КЭТКЗ необходимо руководствоваться величиной допустимой разности значений потенциалов «труба – земля» при отсутствии и при наличии защитных заземлений, исходя из требований [18]

$$\Delta U_{доп} = U_{т-з} - U_{т-з}^{\min}, \quad (3.12)$$

где $U_{т-з}$ – разность потенциалов «труба – земля» при отсутствии в зоне действия катодной защиты экранирующих элементов, В;

$U_{т-з}^{\min}$ – минимальный защитный потенциал в соответствии с требованиями [18],

В.

Соответственно, защитные заземления, расположенные в зоне действия катодной защиты подземных трубопроводов, не будут оказывать существенного негативного воздействия при условии

$$\frac{\Delta U_{\text{доп}}}{U^0} \geq K_{\text{э}}. \quad (3.13)$$

Результаты расчета КЭТКЗ при наличии в защищаемой зоне трубопровода защитных заземлений из различных материалов представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.7 – КЭТКЗ при наличии защитных заземлений, выполненных из различных материалов

Материал ЗЗ	Расчетные значения КЭТКЗ, полученные по результатам измерений потенциала «труба – земля» в точках I...V при перемещении защитного заземления по точкам 1...9														
	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V
Алюминий	1					2					3				
	0,28	0,24	0,18	0,20	0,19	0,23	0,22	0,19	0,23	0,22	0,18	0,20	0,17	0,23	0,26
	4					5					6				
	0,23	0,21	0,16	0,18	0,16	0,20	0,19	0,16	0,20	0,19	0,17	0,17	0,14	0,19	0,19
	7					8					9				
	0,18	0,16	0,14	0,15	0,14	0,16	0,16	0,13	0,15	0,15	0,15	0,16	0,13	0,17	0,17
Цинк	1					2					3				
	0,31	0,28	0,25	0,21	0,21	0,26	0,25	0,26	0,23	0,23	0,20	0,20	0,21	0,23	0,27
	4					5					6				
	0,25	0,22	0,21	0,18	0,18	0,22	0,24	0,20	0,20	0,20	0,19	0,19	0,19	0,20	0,20
	7					8					9				
	0,20	0,19	0,17	0,16	0,15	0,19	0,18	0,17	0,17	0,16	0,17	0,15	0,16	0,16	0,17
Медь	1					2					3				
	0,72	0,63	0,60	0,57	0,51	0,58	0,66	0,66	0,66	0,58	0,47	0,55	0,57	0,63	0,68
	4					5					6				
	0,61	0,59	0,54	0,50	0,50	0,55	0,58	0,57	0,56	0,57	0,46	0,55	0,49	0,56	0,58
	7					8					9				
	0,49	0,49	0,46	0,44	0,43	0,46	0,48	0,49	0,47	0,50	0,41	0,44	0,44	0,49	0,47

При оценке величины КЭТКЗ необходимо руководствоваться минимально допустимой величиной защитного потенциала, а также допустимой разностью значений потенциалов «труба – земля» при отсутствии и при наличии защитных заземлений исходя из требований [18]. Анализируя значения КЭТКЗ, приведенные в таблице 3.7, можно сделать вывод о существенном снижении уровня защищенности трубопровода при наличии защитных заземлений, выполненных из

меди. Например, в точках 1, 2, 3, 4, 5, 6 в некоторых точках измерения потенциала «труба – земля» наблюдаются значения $KЭТКЗ \geq 0,57$, что является следствием недозащиты рассматриваемого участка трубопровода, вызванной явлением экранирования со стороны медного защитного заземления.

С целью оценки влияния координаты точки расположения защитного заземления относительно рассматриваемого участка трубопровода на изменение величины потенциала «труба – земля» вдоль защищаемого сооружения рассмотрим угловую пространственную ориентацию точек установки имитаторов защитных заземлений на стенде (рисунок 3.4).

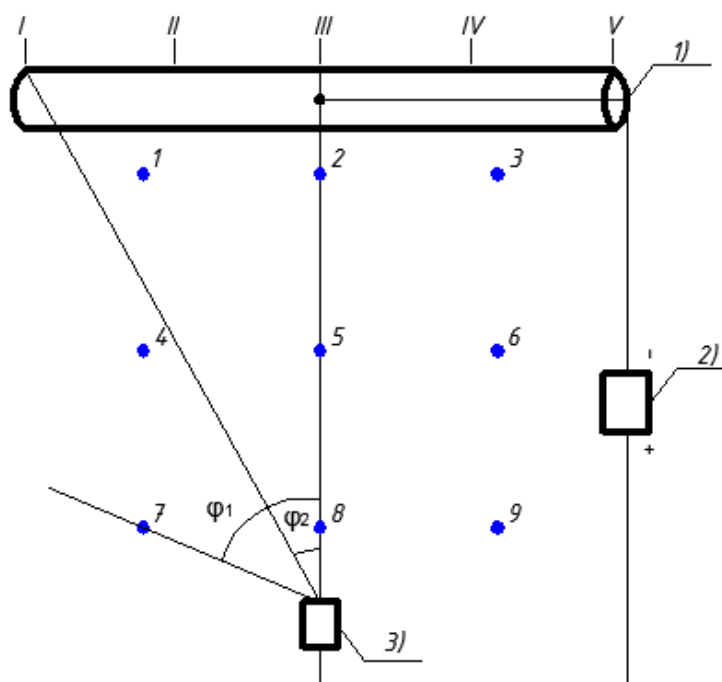


Рисунок 3.4 - Угловая пространственная ориентация точек установки защитных заземлений на стенде: 1) участок трубопровода; 2) источник постоянного тока; 3) анодное заземление; φ_1 – угол, определяющий координату расположения защитного заземления и его перемещения по точкам 1...9, °; φ_2 – угол, определяющий координату расположения электрода сравнения и его перемещения по точкам I...V с целью измерения потенциала «труба – земля», °. Остальные обозначения – см. рис. 3.1.

Для определения зависимости величины КЭТКЗ от степени удаленности защитного заземления от трубопровода и анодного заземления найдем величину $\Delta\varphi$ – разность углов φ_1 и φ_2 , определяющую угловую пространственную ориентацию точек установки защитных заземлений на стенде, вычисляемую по формуле

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2, \quad (3.14)$$

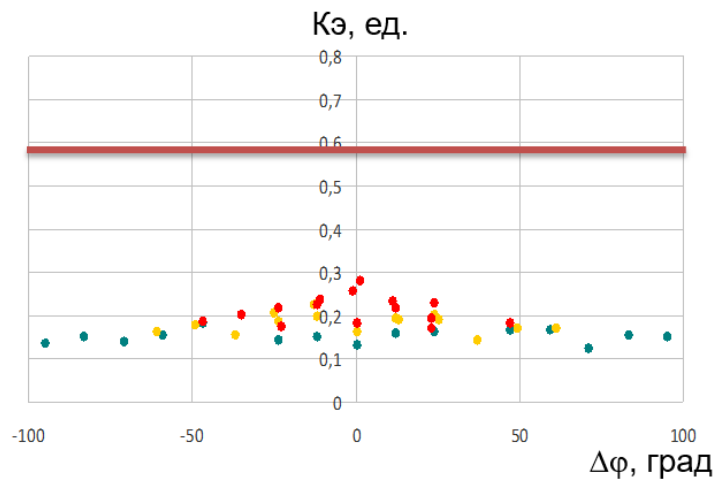
где φ_1 – угол, образующийся при пересечении прямой, соединяющей точку установки анодного заземления и точку установки защитного заземления, с перпендикуляром, восстановленным из точки установки анодного заземления к трубопроводу, °;

φ_2 – угол, образующийся при пересечении прямой, соединяющей точку установки анодного заземления и точку установки электрода сравнения, с перпендикуляром, восстановленным из точки установки анодного заземления к трубопроводу, °.

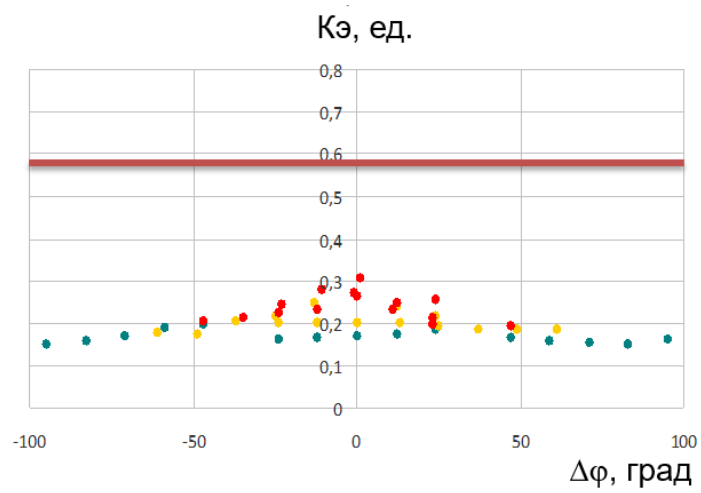
Графически зависимость КЭТКЗ от угловой пространственной ориентации защитного заземления представлена на рисунке 3.5 (красной горизонтальной линией отмечена область допустимых значений КЭТКЗ исходя из условия (3.13)).

Графические зависимости КЭТКЗ от $\Delta\varphi$ для различных точек расположения защитных заземлений, выполненных из алюминия, цинка и меди, иллюстрируют предположение о наиболее существенном экранирующем эффекте со стороны заземлений, расположенных вблизи подземного трубопровода. При этом установлено, что наибольшая величина КЭТКЗ в каждом из рассматриваемых случаев наблюдается при $\Delta\varphi \rightarrow 0$.

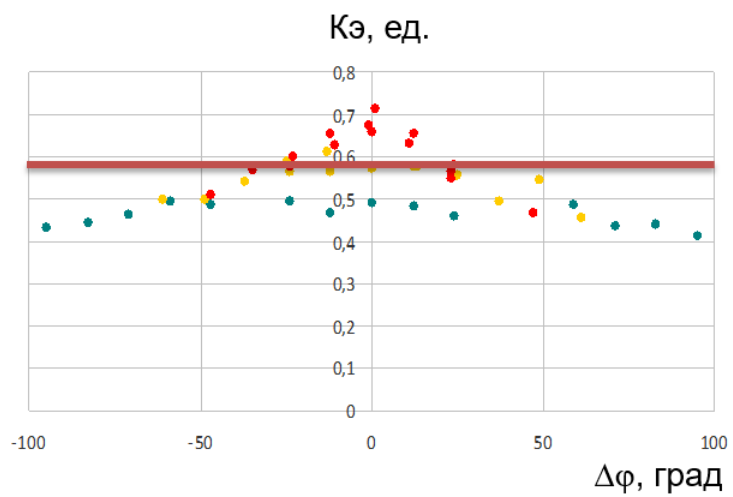
На третьем этапе экспериментального исследования были проведены измерения силы тока, натекающего на защитные заземления от системы катодной защиты трубопровода. Результаты измерений средней и максимальной величины силы тока, натекающего на защитные заземления, расположенные в точках 1-9, представлены в таблице 3.8.



а)



б)



в)

Рисунок 3.5 - Изменение КЭТКЗ в зависимости от $\Delta\phi$ для различных точек расположения защитного заземления из различных материалов (красным цветом отмечены точки 1, 2, 3; желтым цветом отмечены точки 4, 5, 6; зеленым цветом отмечены точки 7, 8, 9): а) алюминий; б) цинк; в) медь

Таблица 3.8 - Результаты измерений средней и максимальной величины силы тока, натекающего на защитные заземления из различных материалов

Тип ЗЗ	Средняя и максимальная величины силы тока, натекающего на защитное заземление, определенные при перемещении защитного заземления по точкам 1...9					
	И _{ср} , МА	И _{max} , МА	И _{ср} , МА	И _{max} , МА	И _{ср} , МА	И _{max} , МА
Алюминий	1		2		3	
	0,9066	0,954	0,927	1,032	0,894	0,977
	4		5		6	
	0,9636	1,038	1,0322	1,102	0,9582	1,055
	7		8		9	
	0,9774	1,034	1,2756	1,382	1,0664	1,158
Цинк	1		2		3	
	1,0676	1,095	1,0824	1,171	0,9604	1,009
	4		5		6	
	1,0654	1,1	1,1756	1,25	1,0572	1,106
	7		8		9	
	1,1354	1,185	1,5186	1,591	1,141	1,261
Медь	1		2		3	
	2,577	2,741	2,718	2,792	2,5148	2,649
	4		5		6	
	2,8102	2,883	3,1402	3,25	2,8604	2,907
	7		8		9	
	2,996	3,036	4,0388	4,475	3,2226	3,409

Установлено, что с увеличением расстояния между защищаемым трубопроводом и защитным заземлением увеличивается сила тока, натекающего на защитное заземление. Данный факт свидетельствует об увеличении нерационального потребления электроэнергии, используемой для катодной защиты трубопровода. В результате проведения экспериментальных исследований было установлено, что основными факторами, оказывающими влияние на степень экранирования тока катодной защиты контурами защитных заземлений, являются тип и материал защитного заземления, а также расположение защитного заземления относительно защищаемого трубопровода и анодного заземления системы катодной защиты.

3.2 Определение количественных параметров, характеризующих экранирование тока катодной защиты при наличии влияния защитных заземлений

Основными показателями эффективности работы и рационального энергопотребления СКЗ, расположенных на территории промышленных площадок, зависящими от степени влияния вышеперечисленных факторов, являются КЭТКЗ и сила тока, натекающего на защитное заземление. Сравнительный анализ данных показателей представлен в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Основные показатели эффективности работы и рационального энергопотребления СКЗ и их характеристики

Коэффициент экранирования тока катодной защиты	Сила тока, натекающего на защитное заземление
Возрастает при снижении эффективности катодной защиты трубопроводов	Увеличивается при нерациональном расходе электроэнергии, потребляемой СКЗ
С уменьшением расстояния от защитного заземления до защищаемого трубопровода КЭТКЗ возрастает	С уменьшением расстояния от защитного заземления до защищаемого трубопровода сила натекающего на защитное заземление тока уменьшается
Увеличение КЭТКЗ является следствием смещения потенциала «труба – земля» в положительную область	Величина силы натекающего на защитное заземление тока не влияет на величину потенциала «труба – земля»
Величины КЭТКЗ и силы натекающего на защитное заземление тока зависят от материала защитного заземления и координаты его расположения относительно рассматриваемого катоднозащищаемого объекта	

Выполним анализ взаимозависимости данных показателей. Предположим, что связь между рассматриваемыми переменными (силой тока, натекающего на защитное заземление, и характерным для рассматриваемых условий КЭТКЗ) является линейной. Основой данного предположения служат диаграммы рассеяния переменных (рисунок 3.10), построенные по результатам экспериментального определения максимальных значений рассматриваемых показателей. Максимальное значение силы тока, натекающего на защитное заземление (таблица

3.10), было получено в результате пятикратных измерений данной величины в каждой точке установки защитного заземления.

Таблица 3.10 – Максимальные значения силы тока, натекающего на защитные заземления из различных материалов, I_{\max} , мА

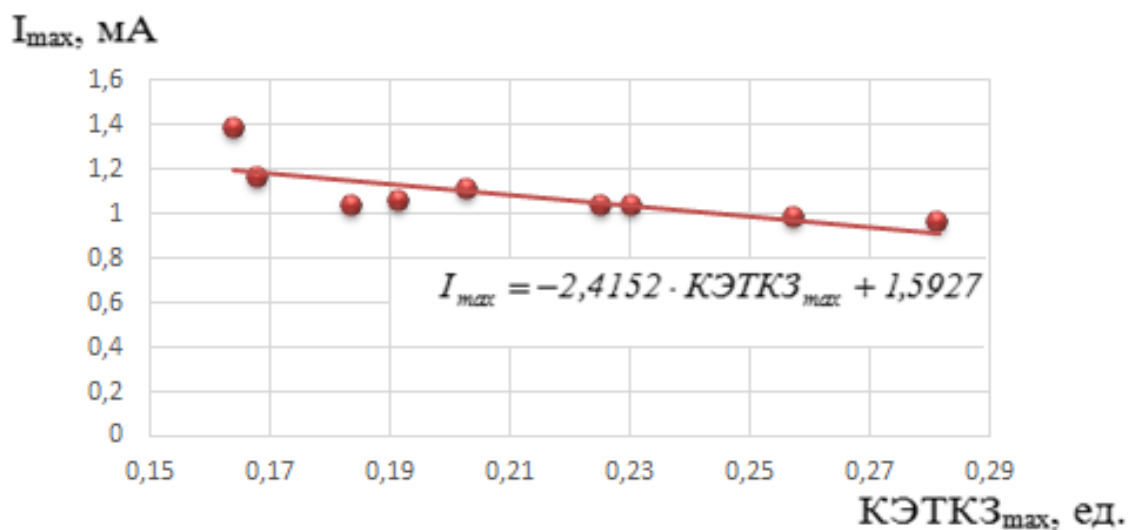
Точка установки защитного заземления	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Алюминий	0,954	1,032	0,977	1,038	1,102	1,055	1,034	1,382	1,158
Цинк	1,095	1,171	1,009	1,1	1,25	1,106	1,185	1,591	1,261
Медь	2,741	2,792	2,649	2,883	3,25	3,129	3,082	4,475	3,409

В таблице 3.11 представлены максимальные значения КЭТКЗ, определяемые расчетным путем на основании экспериментальных измерений потенциалов «труба – земля» в точках 1...9.

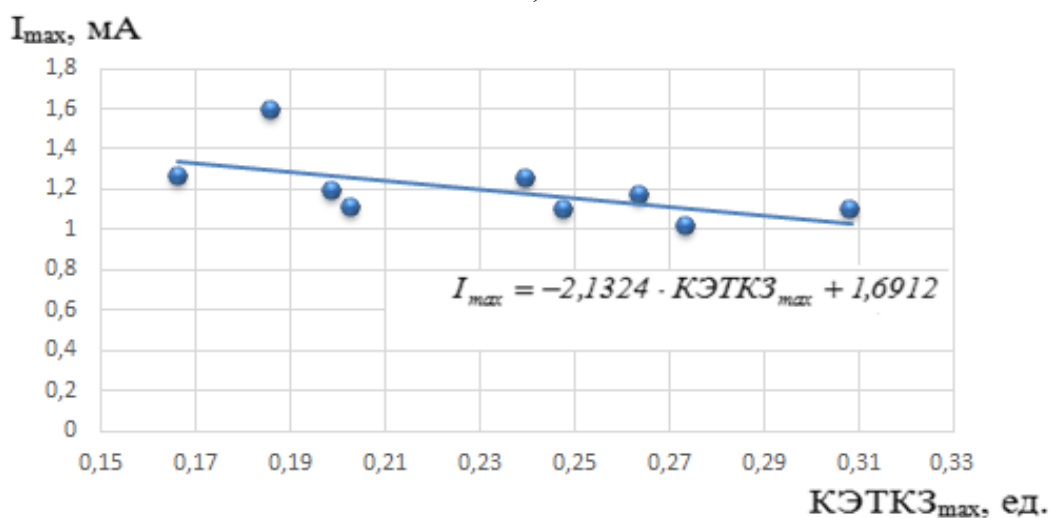
Таблица 3.11 - Максимальные значения КЭТКЗ для защитных заземлений из различных материалов, $KЭТКЗ_{\max}$, ед.

Точка установки защитного заземления	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Алюминий	0,282	0,231	0,257	0,225	0,203	0,192	0,184	0,164	0,168
Цинк	0,309	0,264	0,274	0,248	0,240	0,203	0,199	0,186	0,166
Медь	0,716	0,658	0,676	0,612	0,576	0,579	0,495	0,497	0,486

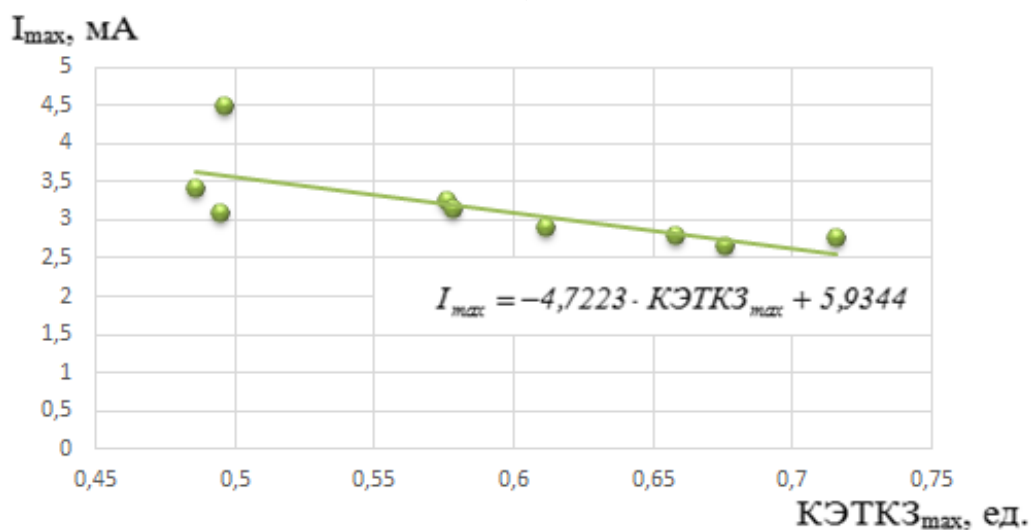
Для определения характера взаимосвязи между рассматриваемыми показателями проведем корреляционный анализ [6]. Результаты расчетов коэффициентов линейной корреляции между максимальными значениями силы тока, натекающего на защитное заземление, и максимальными значениями КЭТКЗ, характеризующими влияние защитных заземлений из различных материалов, представлены в таблице 3.12.



а)



б)



в)

Рисунок 3.6 – Диаграммы рассеяния максимальных значений силы тока, натекающего на защитное заземление, и КЭТКЗ для различных материалов защитного заземления: а) алюминий; б) цинк; в) медь

Таблица 3.12 – Результаты расчетов коэффициентов корреляции значений I_{\max} и $KЭТКЗ_{\max}$

Материал защитного заземления	Алюминий	Цинк	Медь
Коэффициент корреляции $I_{\max} - KЭТКЗ_{\max}$	-0,76	-0,59	-0,72
Характер связи между рассматриваемыми переменными	Сильная	Умеренная	Сильная

Сопоставление показателей, определяющих эффективность ЭХЗ трубопроводов в условиях промышленных площадок, позволяет сделать предположение о том, что КЭТКЗ и сила натекающего тока являются взаимозависимыми величинами.

При этом КЭТКЗ позволяет выявить снижение эффективности ЭХЗ, в то время, как сила натекающего на защитное заземление тока свидетельствует о нерациональном расходе электроэнергии, потребляемой системой ЭХЗ. Выбор определяющего фактора, оценка которого позволила бы судить о степени негативного влияния контуров защитных заземлений на ЭХЗ, должен производиться с учетом конкретных условий взаимовлияния систем ЭХЗ и защитных заземлений в условиях промышленной площадки.

3.3 Выводы по главе 3

1. Установлено, что наиболее существенное влияние на изменение величины потенциала «труба – земля» оказывают заземления, расположенные вблизи подземного трубопровода: чем ближе защитное заземление к анодному заземлению, тем менее выражено экранирующее влияние.

2. Применение защитных заземлений из меди значительно смещает потенциал «труба – земля» в положительную область и приводит к несоответствию уровня защищенности трубопровода нормативным требованиям.

3. Для оценки степени влияния защитных заземлений и заземлений молниезащиты на эффективность катодной защиты подземных трубопроводов по

результатам работы введен новый термин - коэффициент экранирования тока катодной защиты (КЭТКЗ) и предложена формула для его расчета.

4. Экспериментально установлено, что с увеличением расстояния между защищаемым трубопроводом и защитным заземлением увеличивается сила тока, натекающего на защитное заземление, что обуславливает нерациональное потребление электроэнергии и повышенный расход материала анодных заземлений.

3. В экспериментальных условиях установлены графические зависимости коэффициента экранирования от расположения защитного заземления относительно подземного трубопровода, а именно от угловой пространственной ориентации защитного заземления относительно защищаемого сооружения и анодного заземления.

5. По результатам работы сформулированы основные факторы, оказывающие влияние на степень экранирования тока катодной защиты контурами защитных заземлений.

6. Проведен сравнительный анализ показателей эффективности работы и рационального энергопотребления средств катодной защиты от коррозии, расположенных на территории промышленных площадок.

7. Обнаружена сильная корреляционная связь между максимальными значениями КЭТКЗ и соответствующими им значениями силы тока, что требует учета при разработке и реализации технических мероприятий, направленных на исключение негативного влияния контуров защитных заземлений энергоиспользующих установок на защиту от коррозии трубопроводов промышленных площадок.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИСПЫТАНИЕ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА УСТРОЙСТВА ДЛЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО РАЗДЕЛЕНИЯ СИСТЕМ ЗАЩИТНОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ И КАТОДНОЗАЩИЩАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ НА ТЕРРИТОРИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЛОЩАДОК

4.1 Разработка требований к техническим параметрам, конструктивным элементам и материалам, используемым при изготовлении устройства

Обзор существующих устройств (глава 1), предназначенных для гальванической развязки систем защитного заземления и катоднозащищаемых объектов, позволил выявить ряд недостатков, определяющих необходимость разработки подходов к созданию новой конструкции устройства.

Сформулируем основные требования, которым должно соответствовать разрабатываемое устройство:

1) Требуемые технические параметры:

- отсутствие необходимости подключения источника питания для обеспечения работы устройства;
- обеспечение падения напряжения постоянного и переменного тока на устройстве, позволяющее привести величину потенциала «труба – земля» к требуемому значению [18];
- обеспечение протекания постоянного тока $I_{ном}$. Сила постоянного тока, протекающего через устройство, определяется в зависимости от типа электроустановки: однофазный ток замыкания на землю больше 500 А (установки трехфазного тока напряжением 110 кВ и выше с глухозаземленной нейтралью) либо однофазный ток замыкания на землю не превышает 500 А (установки трехфазного тока напряжением до 35 кВ включительно с изолированной нейтралью);
- срок службы устройства должен составлять не менее 30 лет;

- температурный диапазон эксплуатации должен находиться в пределах от минус 40 °С до плюс 40 °С;

- устройство должно обладать способностью сохранять свои параметры при механических внешних воздействиях (группа механического воздействия М43 по [15]).

2) Требования к конструктивным элементам и материалам, используемым при изготовлении устройства:

- подключение устройства в систему защитного заземления должно обеспечивать неразрывность электрической цепи;

- подключение устройства в цепь защитного заземления не должно оказывать воздействия на работоспособность системы защитного заземления. Сопротивление растеканию защитных заземлений должно оставаться в пределах, нормируемых ПУЭ [48];

- для изготовления основного блока устройства должны быть использованы твердотельные приборы;

- устройство должно иметь блок индикации, позволяющий идентифицировать режимы работы устройства;

- устройство должно иметь дополнительный блок защиты от перенапряжений;

- конструкция устройства должна исключать возможность изменения его рабочих характеристик путем внешнего воздействия;

- конструкция устройства должна исключать возможность его неправильного монтажа;

- конструкция устройства должна обеспечивать его пожарную безопасность и работоспособность как в нормальном режиме работы, так и при возникновении возможных неисправностей и нарушении правил эксплуатации;

- материалы, применяемые в конструкции устройства, не должны оказывать вредного влияния и не должны представлять опасность для окружающей среды и персонала. Не допускается использование материалов, не прошедших проверку стойкости к температурным и механическим воздействиям.

3) Требования безопасности при эксплуатации:

– устройство должно обеспечивать безопасность для персонала и окружающей среды при монтаже, эксплуатации и ремонте как отдельно, так и в составе комплексов и технологических схем, а также при транспортировании и хранении.

Кроме того, необходимо отдельно выделить требование к обеспечению приемлемой стоимости как используемых при изготовлении устройства материалов, так и конструкции устройства в целом.

4.2 Разработка и обоснование конструктивных элементов устройства

Исходя из заявленных требований, с целью использования при разработке основного блока устройства гальванической развязки систем защитного заземления и катоднозащищаемых объектов были выбраны полупроводниковые элементы [14, 47, 57, 65]. При этом, из всех рассмотренных разновидностей наиболее целесообразным является применение плоскостных диодов.

С точки зрения возможности использования в составе устройства для гальванической развязки диоды обладают следующими преимуществами:

- малые габариты и вес;
- высокий коэффициент полезного действия;
- отсутствие нагреваемых поверхностей;
- отсутствие необходимости технического обслуживания;
- высокая эксплуатационная надежность.

Максимальные (предельные) режимы диодов характеризуются следующими параметрами:

- а) максимальное обратное напряжение – напряжение любой формы и периодичности, обеспечивающее заданную надежность при длительной работе;
- б) максимальное значение прямого тока, обеспечивающее заданную надежность при длительной работе.

Полупроводниковый элемент должен быть рассчитан на ток, равный 1,5-кратному току короткого замыкания, который может протекать в электрической цепи при замыкании полупроводникового элемента. Данными изготовителя полупроводниковых элементов должно быть подтверждено следующее:

а) диоды должны быть рассчитаны на номинальный рабочий ток, в 1,5 раза превышающий максимально возможный ток короткого замыкания;

в) диоды должны иметь 1,5-кратный запас по напряжению, которое может быть приложено к диоду в обратном направлении.

Соединение элементов в основном блоке, содержащем диодную сборку, должно быть сконструировано таким образом, чтобы отключение одного из элементов вызывало отключение всего устройства.

Как в нормальных, так и в аварийных режимах работы любые элементы, от которых зависит безопасная эксплуатация устройства, должны быть нагружены не более чем на $2/3$ от номинальных значений тока, напряжения и мощности, с учетом условия монтажа и рабочего диапазона температур. Чтобы исключить возможность перегрузки элементов, устройство должно иметь дополнительный блок ограничения от перенапряжения, срабатывающий при разности потенциалов свыше 1 кВ.

Задачей изобретения является создание устройства для разделения контуров катодной защиты и контуров защитных заземлений и молниезащиты, падение напряжения постоянного и переменного тока на котором составляет до 5 Вольт, имеющего систему защиты от перенапряжения и систему индикации, что в целом обеспечивает безопасность и удобство эксплуатации оборудования.

В процессе решения поставленной задачи достигается технический результат, заключающийся в повышении эффективности электрохимической защиты подземных сооружений от коррозии путем использования предлагаемого устройства для разделения контуров катодной защиты и контуров защитных заземлений и молниезащиты, выполненного в виде полупроводниковых элементов, блока ограничителей от перенапряжения, срабатывающего при разности потенциалов свыше 1 кВ, при этом в качестве полупроводниковых элементов

используются силовые диоды, подключенные встречно-параллельно, количество и тип которых выбирают в зависимости от материала электродов защитного заземления и близости расположения защитного заземления к анодному заземлению. Устройство включает блок индикации состояния и режима работы, не требующий дополнительного источника питания.

На рисунке 4.1 изображен пример схемы блока, состоящего из четырех силовых диодов, представляющего собой две встречно-параллельно подключенные цепочки из соединенных последовательно двух силовых диодов.

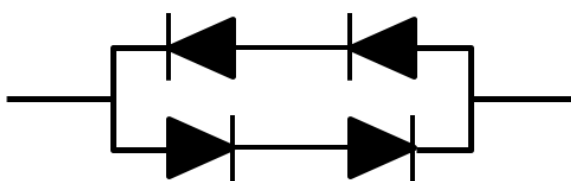


Рисунок 4.1 – Схема блока устройства, состоящего из четырех диодов

Устройство состоит из трех блоков (рисунок 4.2):

Блок I. Блок силовых диодов, обеспечивающий требуемое падение напряжения между защищаемым сооружением и защитным заземлением (порядка 1-5 Вольт), что позволяет минимизировать влияние защитных заземлений на эффективность катодной защиты, снижает расход электроэнергии на катодную защиту, снижает нагрузку на преобразователи станций катодной защиты и износ анодных заземлений. При этом, если на сооружении появляется напряжение переменного или постоянного тока свыше 1-5 Вольт, ток, протекающий через диоды и через защитное заземление, резко возрастает, что не допускает появления опасного для жизни и здоровья персонала напряжения на защищаемом сооружении.

Диоды включены встречно-параллельно, что, с одной стороны, позволяет пропускать через устройство переменный или пульсирующий ток, а также постоянный ток произвольной полярности, с другой стороны – позволяет изменять падение напряжения на устройстве путем изменения количества включенных последовательно диодов.

В зависимости от материала защитного заземления и близости его расположения к анодному заземлению выбирают требуемое минимальное падение напряжение на устройстве, которое может быть обусловлено типом и количеством диодов, включенных последовательно.

Требуемое падение напряжения на устройстве выбирают с учётом местоположения защитного заземления относительно анодного заземления и материала защитного заземления по следующей формуле

$$\Delta U = 2 \cdot k \cdot |U_{т-з}| - (|U_{ст}^{33}| - |U_{ст}^{TP}|), \quad (4.1)$$

где $|U_{т-з}|$ - разность потенциалов «труба – земля» при отключённом защитном заземлении, В;

$|U_{ст}^{33}|$ - собственный потенциал материала защитного заземления в грунте, В;

$|U_{ст}^{TP}|$ - собственный потенциал материала трубопровода, В;

k - коэффициент, учитывающий близость расположения защитного заземления к анодному заземлению, $k=0,1 \dots 1$.

Количество диодов, подключаемых последовательно, определяется по формуле

$$n \geq \frac{\Delta U}{U_{пр}}, \quad (4.2)$$

где ΔU - требуемое падение напряжения на устройстве на устройстве, В;

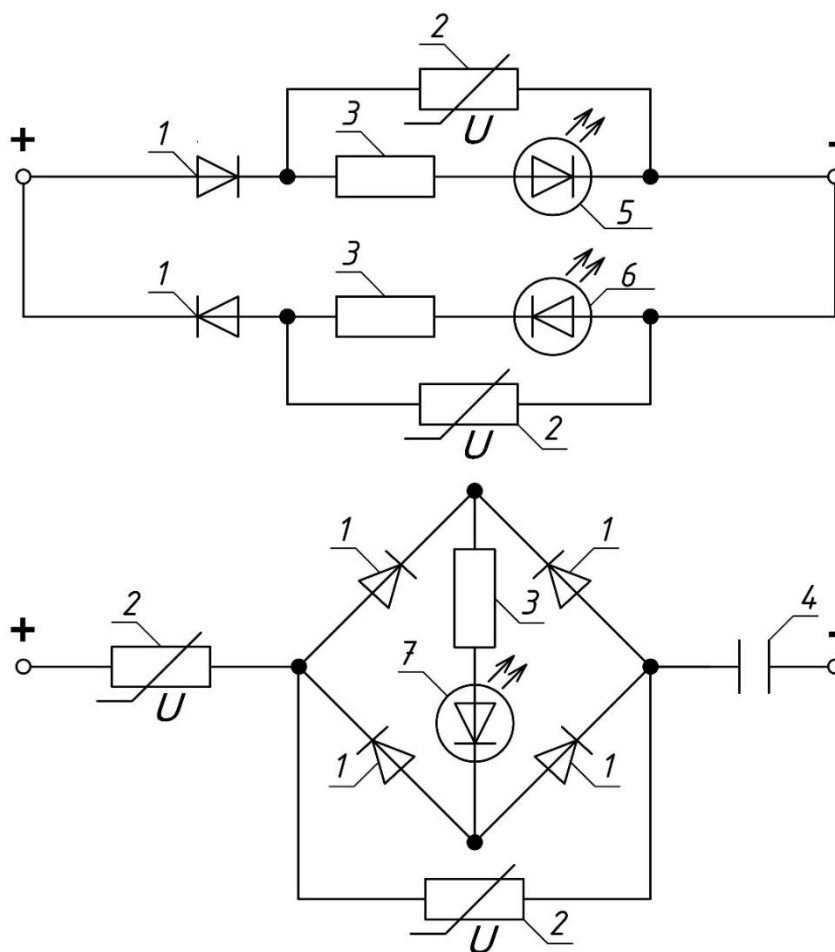
$U_{пр}$ - прямое напряжение на одном диоде, В.

Общее количество диодов в устройстве, подключаемых встречно-параллельно, определяется по формуле

$$n_{общ} = 2 \cdot n. \quad (4.3)$$

Блок II. Блок варисторов или ограничителей от перенапряжений, срабатывающий при существенной разности потенциалов (свыше 1 кВ), например, при ударе молнии.

Блок III. Блок индикации, состоящий из светодиодных сигнализаторов, позволяющий оценивать состояние и режим работы устройства.



- 1 – диод; 2 – варистор; 3 - резистор; 4 – конденсатор;
 5 – светодиод (цвет: зеленый); 6 – светодиод (цвет: желтый);
 7 - светодиод (цвет: красный)

Рисунок 4.2 – Схема подключения элементов, ходящих в основные блоки устройства для гальванического разделения систем защитного заземления и катоднозащищаемых объектов

Устройство для разделения контуров катодной защиты и контуров защитных заземлений и молниезащиты имеет пять режимов работы, которые соответствующими способами световой сигнализации:

Режим 1: при возникновении падения напряжения на устройстве вследствие протекания в цепи защитного заземления постоянного тока, обусловленного током катодной защиты, происходит включение зеленого светодиода.

Режим 2: при протекании постоянного тока в обратном направлении, происходит включение желтого светодиода.

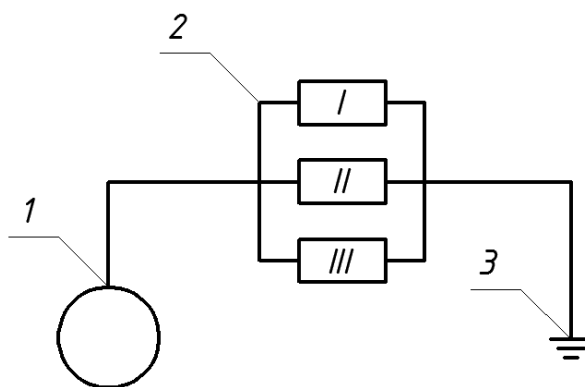
Режим 3: при протекании переменного тока в цепи защитного заземления происходит одновременное включение зеленого и желтого светодиодов.

Режим 4: при возникновении переменного напряжения на заземляемом сооружении, а также разрыве цепи диодной сборки происходит включение красного светодиода.

Режим 5: при возникновении пробоя силовых элементов устройства, например, при протекании грозового тока большой силы, сопротивление на диодной сборке снижается до нуля, следовательно, устройство не работает, все диоды при этом выключены.

Информация, получаемая с использованием блока индикации о режимах работы, может быть использована в системах линейной телемеханики трубопроводной обвязки, расположенной на территории промышленных площадок с целью удаленного контроля за состоянием устройств, установленных с целью предотвращения натекания катодного тока на защитные заземления.

Схема подключения устройства в цепь защитного заземления показана на рисунке 4.3.



1 – катоднозащищаемое сооружение (трубопровод), имеющее гальваническую связь с оборудованием, подлежащим заземлению; 2 - устройство для разделения контуров катодной защиты и контуров защитных заземлений и молниезащиты; 3 –защитное заземление

Рисунок 4.3 – Схема подключения устройства в цепь защитного заземления

Работа устройства поясняется рисунком 4.4. При наличии контура защитного заземления (5), расположенного между катоднозащищаемым объектом (1) и анодным заземлением (6), в штатном режиме работы станции катодной защиты (3) подземного сооружения защитный ток распределяется как на защищаемое сооружение (1), так и на контур защитного заземления (5), т.е. проявляется эффект экранирования токов катодной защиты контуром защитного заземления.

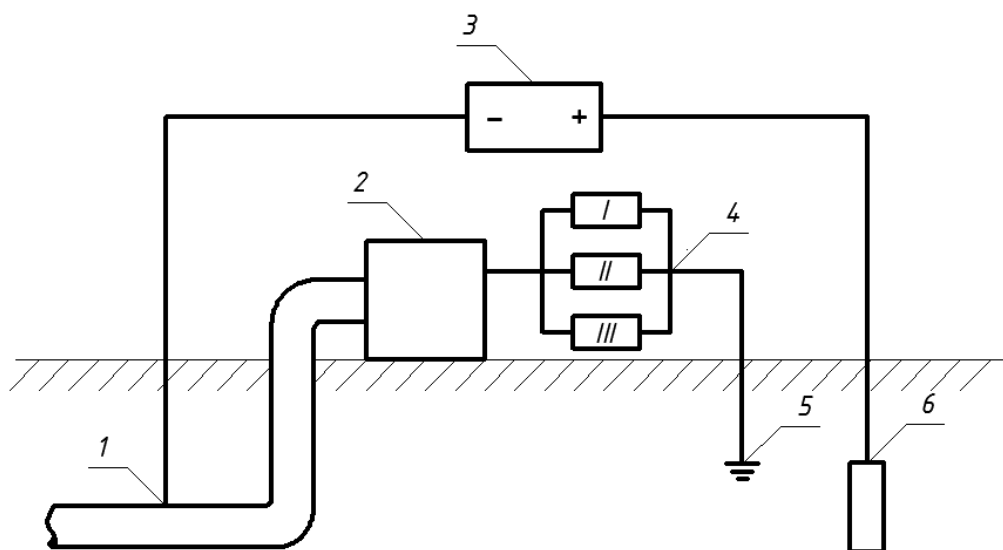


Рисунок 4.4 – Схема подключения устройства для гальванической развязки в разрыв цепи защитного заземления

Устройство для гальванического разделения контуров катодной защиты и защитного заземления (4) устанавливают в разомкнутую цепь защитного заземления. Блок силовых диодов обеспечивает требуемое падение напряжения между защищаемым сооружением и контуром защитного заземления (порядка 1-5 Вольт), что позволяет минимизировать влияние защитных заземлений на эффективность катодной защиты, снижает расход электроэнергии на катодную защиту, снижает нагрузку на преобразователи станций катодной защиты и износ анодных заземлений. После подключения устройства устанавливают, что подключение защитного заземления через устройство не привело к изменению режимов работы катодной защиты относительно разрыва цепи защитного заземления. В случае, если наблюдается падение напряжения постоянного тока,

обусловленного током катодной защиты, блок индикации свидетельствует о том, что устройство работает в штатном режиме.

Рассмотрим пример использования данного устройства с целью повышения эффективности противокоррозионной защиты участка трубопровода путем снижения экранирующего эффекта, оказываемого защитным заземлением. При выполнении пусконаладочных работ по вводу в действие средств электрохимической защиты трубопроводов компрессорной станции выяснилось, что на трубопроводах не обеспечивается поляризация в соответствии с ГОСТ Р 51164-98 вследствие натекания тока катодной защиты на защитное заземление, выполненное из оцинкованной стали. Защитное заземление расположено между защищаемым трубопроводом и анодным заземлением и равноудалено от них. Преобразователи станции катодной защиты работают с коэффициентом загрузки по мощности порядка 90%, происходит ускоренный износ анодных заземлений и перерасход электроэнергии.

Временно разъединяют цепь защитного заземления и измеряют наложенный потенциал «труба – земля», величина которого стала соответствовать нормативным требованиям и составила минус 1,0 В. При этом мощность, потребляемая преобразователями, уменьшилась в 10 раз. Требуемое падение напряжения на устройстве выбирают с учётом материала и местоположения защитного заземления относительно анодного заземления по формуле (4.1), при этом коэффициент k учитывает, что защитное заземление расположено между защищаемым трубопроводом и анодным заземлением и равноудалено от них, следовательно, $k=0,5$.

С учетом возможных значений силы тока в цепи защитного заземления выбирают для изготовления устройства диоды Д161-320 [65]. Характеристики диода: падение напряжения 0,85 В при температуре 25°C, максимальный ударный ток 8,8 кА. Тогда для обеспечения падения напряжения более 2,0 В необходимо последовательно соединить три диода Д161-320. Общее падение напряжения составит 2,55 В. Такая диодная сборка выдерживает обратное напряжение порядка 3 кВ.

Для предупреждения выхода из строя заземляемого электрооборудования при возникновении напряжения, превышающего допустимые значения, устройство содержит блок варисторов. В блоке варисторов выбран ограничитель перенапряжения ОПН-П-1/1,5/5/550 УХЛ1 со следующими характеристиками: напряжение срабатывания – 1 кВ, ток грозового импульса – до 10 кА.

Устройство устанавливают в разомкнутую цепь защитного заземления. Устанавливают, что подключение защитного заземления через устройство не привело к изменению режимов работы катодной защиты относительно разрыва цепи защитного заземления. Индикация устройства сигнализирует о наличии только постоянного тока катодной защиты, т.е. система работает в штатном режиме.

4.3 Изготовление и лабораторные испытания образцов устройства

Для лабораторных испытаний были собраны 2-х, 4-х, 6-ти и 8-ми диодные прототипы устройства, состоящие из полупроводниковых элементов, в качестве которых используются диоды Д305 (германиевые, сплавные) [47], пластин из электроизоляционного материала и соединительных проводов. На рисунке 4.5 представлена схема используемого диода, в таблице 4.1 представлены его характеристики.

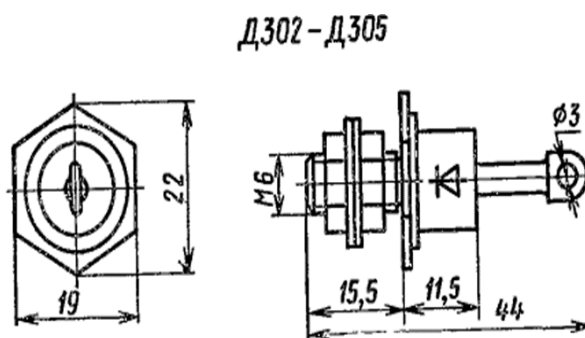


Рисунок 4.5 – Схема диода Д305

Таблица 4.1 – Характеристика диода Д305

Параметр	Обозначение	Значение
Максимальное постоянное обратное напряжение	$U_{обр\ max}, U_{обр\ и\ max}$	50 В
Максимальный постоянный прямой ток	$I_{пр\ max}, I_{пр\ ср\ max}, I_{пр\ и\ max}^*$	10 А
Максимальная рабочая частота диода	$f_{д\ max}$	1 кГц
Постоянное прямое напряжение	$U_{пр}$ не более (при $I_{пр}$, мА)	0,35 В (10)
Постоянный обратный ток	$I_{обр}$ не более (при $U_{обр}$, В)	2500 мкА (50)

На рисунке 4.6 представлены схемы и внешний вид прототипов устройств, в таблице 4.2 представлены их характеристики.

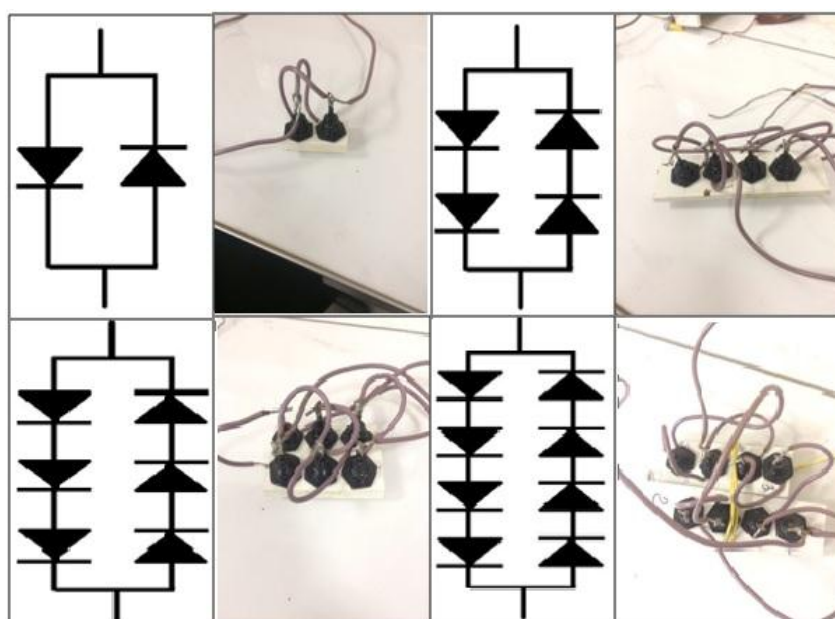


Рисунок 4.6 – Схемы 2-х, 4-х, 6-ти, 8-ми диодных прототипов устройства

Таблица 4.2 – Характеристики прототипов устройств с различной структурой

Кол-во диодов	Длина, мм	Ширина, мм	Высота, мм	Вес, г	$U_{пр}$, В
2	42	23	41	47	~ 0,35
4	109	36	43	78	~ 0,7
6	68	44	42	127	~ 1,0
8	116	66	43	154	~ 1,3

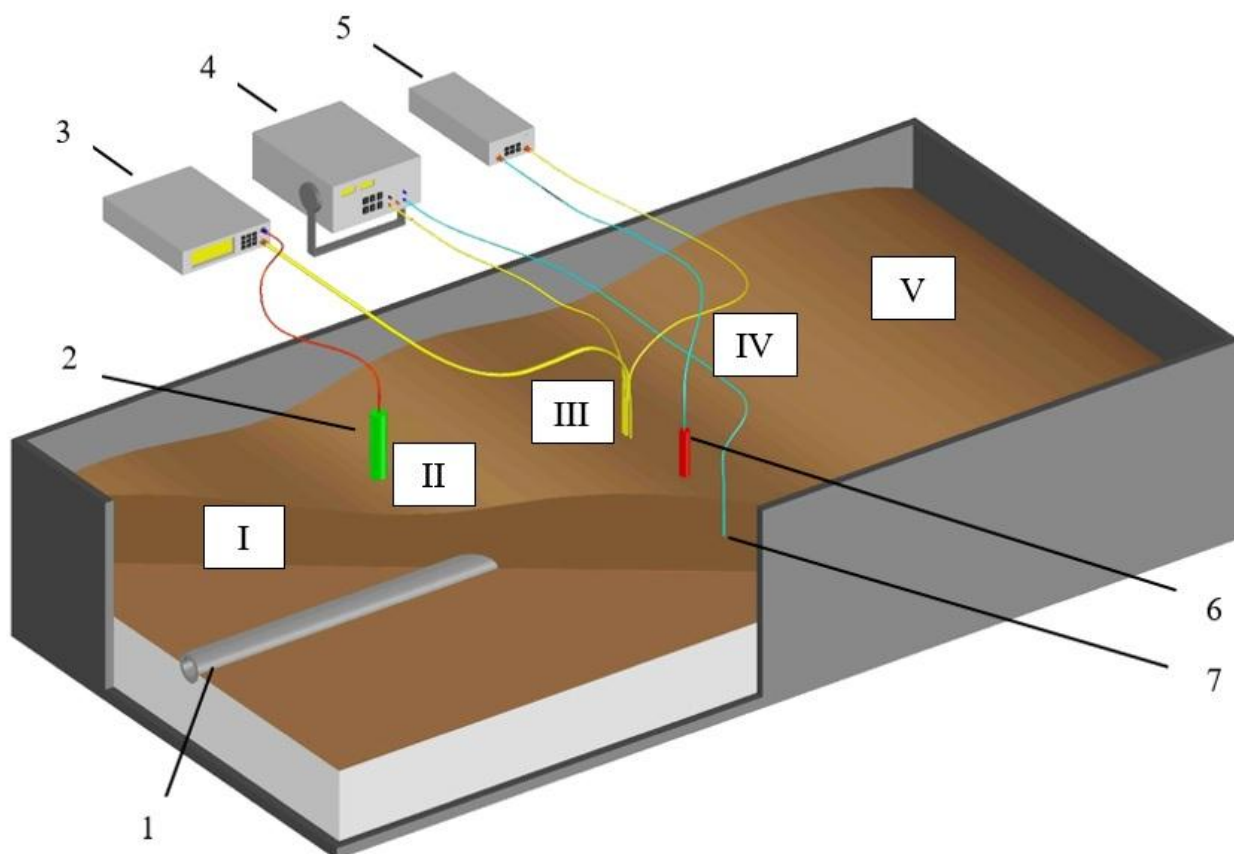
Цель проведения лабораторных испытаний – оценка влияния устройств с различной структурой подключенных в разрыв электрической цепи между защитным заземлением и защищаемым подземным сооружением на абсолютное значение потенциала «труба – земля» и величины силы тока, натекающего на защитное заземление.

Порядок проведения испытаний:

1. Выбор участка, на котором наблюдается наиболее выраженный эффект экранирования катодного тока защитными заземлениями;
2. Измерение электрометрических характеристик защищаемого трубопровода при работе ЭХЗ в штатном режиме;
3. Установка устройства в цепь защитного заземления энергоиспользующего оборудования (одним выводом к защитному заземлению, другим к защищаемому подземному сооружению);
4. Измерение электрометрических характеристик защищаемого трубопровода после подключения устройства.

Испытания проводились на экспериментальном стенде на базе ФГБОУ ВО «УГТУ», схема которого представлена на рисунке 4.7.

Стенд представляет собой емкость (2500×600 мм), заполненную увлажненным песчаным грунтом на глубину 115 мм. В емкость помещен предварительно изолированный полимерной лентой участок трубопровода ($L=2000$ мм; $D_n=25$ мм; $\delta = 2$ мм). Марка стали, из которой выполнен участок трубопровода – 09Г2С. Имитация катодной защиты осуществляется путем подключения источника питания постоянного тока и анодного заземления, представляющего собой стальную пластину площадью 100 см². В качестве имитаторов защитных заземлений использовались образцы из меди и оцинкованной стали, площадь поверхности которых составляет $S_{33} = 12,8$ см². Установка защитных заземлений производилась вблизи точки дренажа на расстоянии 50 мм от защищаемого трубопровода и 200 мм от анодного заземления.



1 – участок трубопровода; 2 – медносульфатный электрод сравнения, перемещаемый по точкам I...V; 3 – прибор для измерения потенциала «труба-земля»; 4 – источник постоянного тока; 5 – прибор для измерения силы тока, натекающего на защитное заземление;

6 – защитное заземление; 7 – анодное заземление (на схеме не показано)

Рисунок 4.7 – Схема экспериментального стенда

При проведении испытаний устройств используются оборудование и приборы, представленные в таблице 4.3.

Измерение удельного электрического сопротивления грунта проводят по симметричной четырехэлектродной схеме (рисунок 4.8) измерителем сопротивления ИС-10. Измерительные электроды А, В, М, N размещаются на одной параллельной или перпендикулярной оси трубопровода линии.

Таблица 4.3 – Состав оборудования и приборов, используемых для лабораторных испытаний устройств

Поз.	Наименование	Технические характеристики
1	Прибор для измерения силы натекающего тока на ЗЗ РВ7-22А	$I_{\text{пост}}=0,1\text{мкА}...2\text{ А}$ $I_{\text{перем}}=0,1\text{ мкА}...2\text{ А}$ $R_{\text{пост}}=0,1\text{ Ом}-2000\text{ кОм}$
2	Прибор для измерения потенциала «труба – земля» вольтметр универсальный типа В7-78/1	$U_{\text{пост}}=100\text{ мВ}...1000\text{ В}$ $U_{\text{перем}}=100\text{ мВ}...750\text{ В}$ $I_{\text{пост}}=10\text{ мА}...3\text{ А}$ $I_{\text{перем}}=1\text{ А}...3\text{ А}$
3	Медно-сульфатный электрод сравнения	
4	Стержни стальные	$L=150\text{мм}$
5	Источник постоянного тока СКЗ	$U_{\text{вых}}: 0\text{ В}-30\text{ В}$ $I_{\text{вых}}: 1\text{ мА}-2\text{ А}$
6	Измеритель сопротивления ИС-10	$R: 10 -100\text{ Ом}$
7	Имитатор защитного заземления – медь	$S_{\text{зз}}=16,6\text{ см}^2$ $\rho_{\text{медь}}=1,7\cdot 10^{-8}\text{ Ом}\cdot\text{м}$
8	Имитатор защитного заземления – сталь оцинкованная	$S_{\text{зз}}=16,6\text{ см}^2$ $\rho_{\text{ос}}=13,8\cdot 10^{-8}\text{ Ом}\cdot\text{м}$

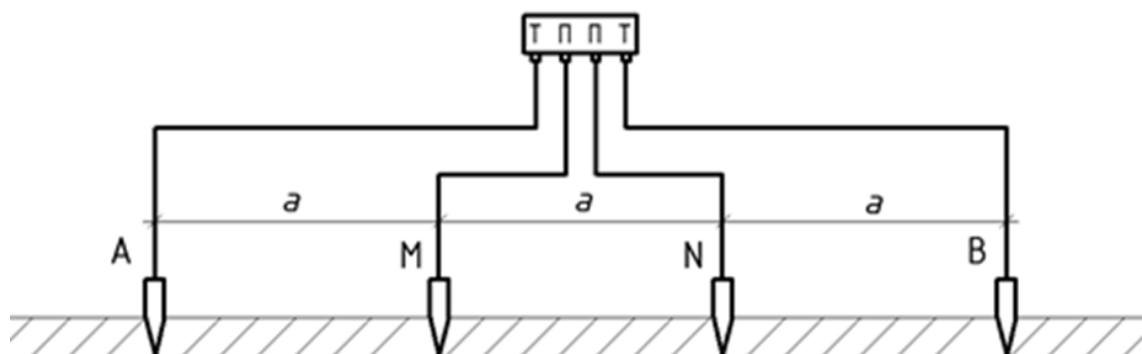


Рисунок 4.8 – Четырехэлектродная схема проведения измерения удельного электрического сопротивления грунта

Удельное электрическое сопротивление грунта определяется по формуле

$$\rho_{гр} = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R, \quad (4.4)$$

где R – сопротивление грунта по показанию прибора, Ом;

a – расстояние между электродами, м.

$$\rho_{гр} = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,6 \cdot 25 = 94 \text{ Ом.}$$

Измерение разности потенциалов «труба – земля» выполняли последовательно перемещая медносульфатный электрод сравнения по точкам I, II, III, IV, V вдоль рассматриваемого участка трубопровода (расстояние между точками составляет 400 мм) с использованием в качестве измерителя универсального вольтметра В7-78/1.

Результаты измерения показали, что распределения защитного потенциала «труба – земля» существенным образом зависит от наличия гальванической связи с заземлителями, но подключение в разрыв цепи разработанного устройства снижает влияние заземлителя, при этом эффект увеличивается с увеличением количества диодов (2d – два диода, 4d – четыре диода, 6d – шесть диодов, 8d – восемь диодов), обуславливающих величину падения напряжения на диодной сборке

Измерение силы тока, натекающего на защитное заземление, выполнялось с применением универсального вольтметра РВ7-22А и также показало зависимость от материала заземления и количества диодов в устройстве.

В таблицах 4.4-4.6 представлены результаты измерения электрометрических характеристик катоднозащищаемого трубопровода.

Таблица 4.4 – Результаты измерения потенциала «труба – земля» при отсутствии экранирующего воздействия защитного заземления

Напряжение на выходе СКЗ, U, В	Измеренная разность потенциала «труба – земля», $U_{т-з}$, В				
	точка I	точка II	точка III	точка IV	точка V
1	-1,3919	-1,39386	-1,39642	-1,35724	-1,351

Таблица 4.5 – Результаты измерения потенциала «труба – земля» при наличии экранирующего воздействия защитного заземления, выполненного из меди, с учетом подключения различных прототипов устройства в разрыв цепи защитного заземления

Способ подключения защитного заземления	Напряжение на выходе СКЗ, U, В	Измеренная разность потенциала «труба – земля», $U_{Т-З}$, В				
		точка I	точка II	точка III	точка IV	точка V
Напрямую	1	-1,175	-1,17418	-1,16962	-1,13324	-1,11614
Посредством устройства из двух диодов		-1,18206	-1,19228	-1,1852	-1,1485	-1,13804
То же из четырех диодов		-1,19518	-1,20732	-1,19784	-1,1628	-1,15358
То же из шести диодов		-1,21052	-1,22078	-1,21424	-1,17548	-1,15994
То же из восьми диодов		-1,22342	-1,23558	-1,23302	-1,18636	-1,17158

Таблица 4.6 – Результаты измерения потенциала «труба – земля» при наличии экранирующего воздействия защитного заземления, выполненного из оцинкованной стали, с учетом подключения различных прототипов устройства в разрыв цепи защитного заземления

Способ подключения защитного заземления	Напряжение на выходе СКЗ, U, В	Измеренная разность потенциала «труба – земля», $U_{Т-З}$, В				
		точка I	точка II	точка III	точка IV	точка V
Напрямую	1	-1,25586	-1,25446	-1,25624	-1,23598	-1,22356
Посредством устройства из двух диодов		-1,27222	-1,26604	-1,26822	-1,24224	-1,23786
То же из четырех диодов		-1,27824	-1,27882	-1,2886	-1,24758	-1,24658
То же из шести диодов		-1,2878	-1,28558	-1,29734	-1,2522	-1,2505
То же из восьми диодов		-1,29038	-1,29186	-1,28914	-1,25966	-1,25768

В таблице 4.7 представлены результаты измерения силы тока, натекающего на защитное заземление, выполненное из меди и оцинкованной стали, при подключении различных вариантов прототипов устройств.

Таблица 4.7 – Результаты измерения силы тока, натекающего на защитное заземление

Способ подключения защитного заземления	Сила тока, натекающего на защитное заземление, I, mA	
	Материал защитного заземления - медь	Материал защитного заземления - оцинкованная сталь
Напрямую	2,44	1,56
Посредством устройства из двух диодов	2,25	1,16
То же из четырех диодов	2,06	1,14
То же из шести диодов	1,88	1,13
То же из восьми диодов	1,37	1,15

Графики распределения защитного потенциала «труба – земля» при подключении прототипов устройств представлены на рисунках 4.9-4.10.

Результаты расчета коэффициента экранирования тока катодной защиты для различных условий с подключенными диодными устройствами представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Результаты расчета коэффициента экранирования катодного тока

Способ подключения защитного заземления	Точки измерения	Коэффициент экранирования, $K_{\text{Э}}$ (медь)	Коэффициент экранирования, $K_{\text{Э}}$ (оцинкованная сталь)
Напрямую	I	0,22	0,14
	II	0,22	0,14
	III	0,23	0,14
	IV	0,24	0,13
	V	0,25	0,13
Посредством устройства из двух диодов	I	0,21	0,12
	II	0,20	0,13
	III	0,21	0,13
	IV	0,22	0,12
	V	0,23	0,12
То же из четырех диодов	I	0,19	0,12
	II	0,19	0,12
	III	0,20	0,11
	IV	0,20	0,12
	V	0,21	0,11
То же из шести диодов	I	0,18	0,11
	II	0,18	0,11
	III	0,18	0,10
	IV	0,19	0,11
	V	0,20	0,11
То же из восьми диодов	I	0,17	0,10
	II	0,16	0,10
	III	0,16	0,11
	IV	0,18	0,10
	V	0,19	0,10

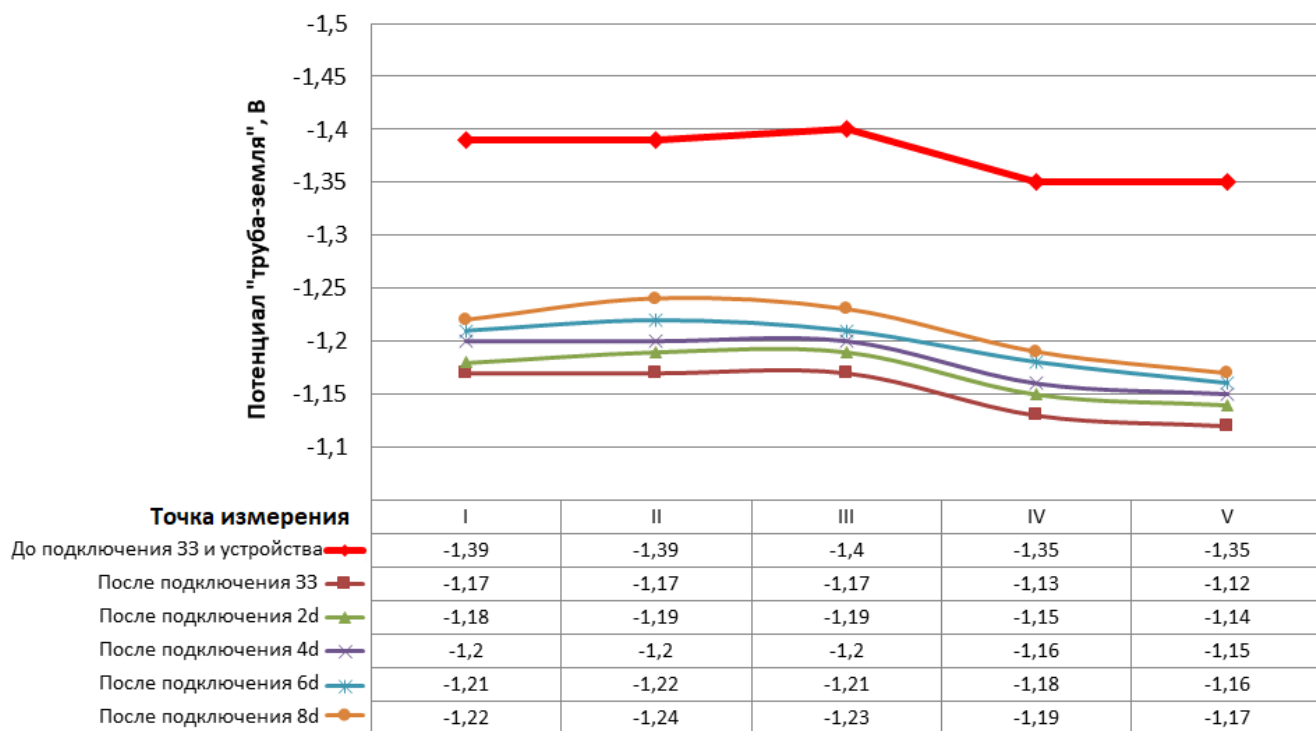


Рисунок 4.9 – Графики распределения величины потенциала «труба – земля» при установке устройств для гальванической развязки в разрыв цепи защитного заземления, выполненного из меди

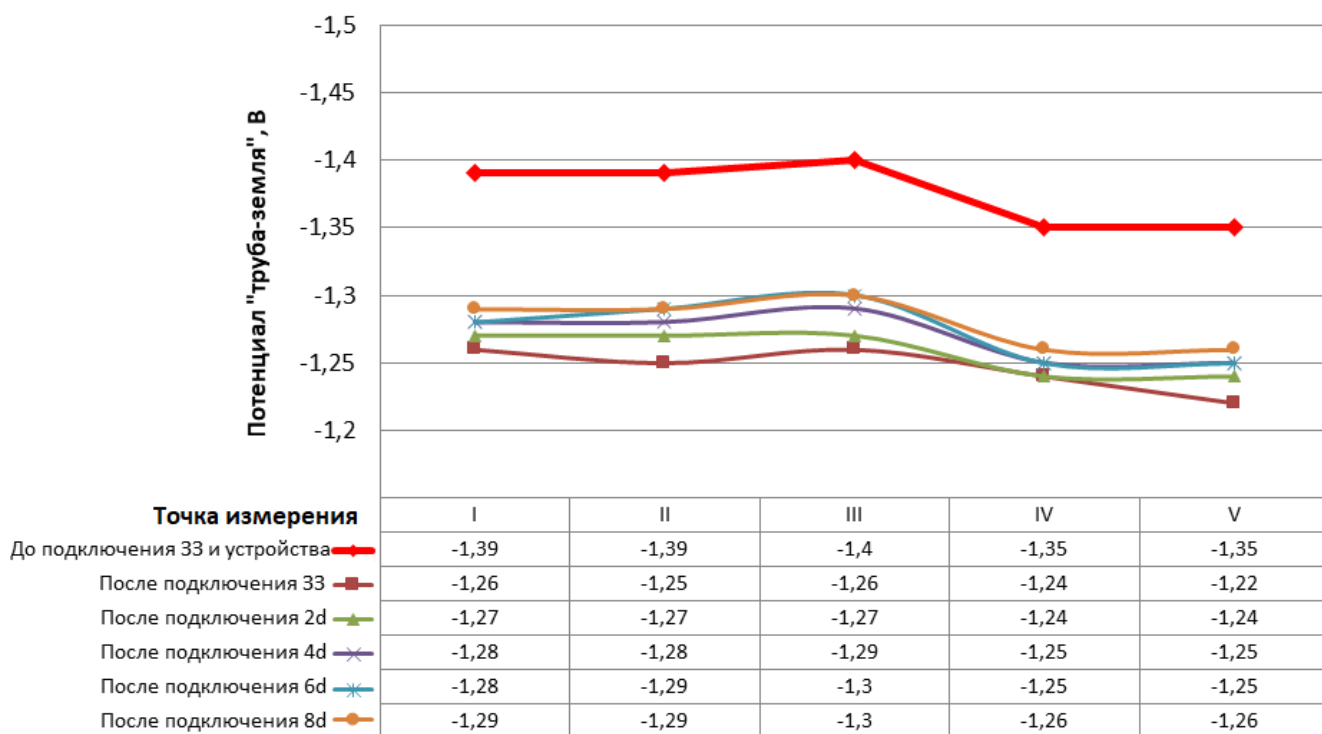


Рисунок 4.10 – Графики распределения величины потенциала «труба – земля» при установке устройств для гальванической развязки в разрыв цепи защитного заземления, выполненного из оцинкованной стали

4.4 Испытания образцов устройства на действующих объектах

Отмечено, что наиболее часто проблема негативного влияния контуров защитного заземления оборудования, расположенного на промышленных площадках, проявляется на стадии проведения пусконаладочных работ при вводе в эксплуатацию системы ЭХЗ технологических трубопроводов. Так, в работе [60] показано, что на площадках крановых узлов и компрессорных цехов компрессорных станций неоднократно отмечены случаи недостаточной эффективности ЭХЗ трубопроводов, проявляющейся в несоответствии значений потенциала «труба – земля» требованиям [18].

Для проведения испытаний устройства для гальванического разделения катоднозащищаемых объектов и контуров защитного заземления и молниезащиты, предназначенного для повышения эффективности работы средств противокоррозионной защиты подземных трубопроводов, работающих на территории промышленных площадок, разработана программа, согласованная с руководством ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород».

Цель проведения испытаний – оценка изменения параметров электрохимической защиты подземных трубопроводов, работающих на территории промышленных площадок, при подключении устройства для гальванического разделения катоднозащищаемых объектов и контуров защитного заземления и молниезащиты в разрыв электрической цепи системы защитного заземления.

Объектом проведения испытания является территория газораспределительной станции (ГРС) Арзамасского ЛПУМГ. Трубопроводная обвязка оборудования, входящего в состав ГРС, представлена надземными и подземными трубопроводами. Подземная часть трубопроводной системы подлежит электрохимической защите, которая осуществляется путем подключения СКЗ. Система защитного заземления представляет собой замкнутый контур, выполненный из стальной полосы (рисунок 4.11). К контуру подключены одиночные заземлители, представляющие собой стальные стержни или стальные

уголки. Подключение некоторых одиночных заземлителей к контуру выполнено в виде неразъемного соединения (рисунок 4.12).



Рисунок 4.11 – Контур защитного заземления оборудования, выполненный в виде стальной полосы



Рисунок 4.12 – Пример неразъемного соединения контура защитного заземления оборудования с общим контуром защитного заземления площадки ГРС

Испытания проводились при работе средств электрохимической защиты (ЭХЗ) в нормальном рабочем режиме. При проведении испытаний должна обеспечиваться безопасность персонала в соответствии с системой стандартов

безопасности труда и соблюдением норм пожарной безопасности. Все работы должны проводиться персоналом, прошедшим инструктаж.

В качестве опытного образца устройства для гальванического разделения катоднозащищаемых объектов и контуров защитного заземления и молниезащиты, выбран блок силовых диодов (рисунок 4.13), обеспечивающий требуемое падение напряжения постоянного тока между защищаемым сооружением и защитным заземлением (до 5 Вольт).



Рисунок 4.13 – Внешний вид опытного образца устройства

Таблица 4.9 – Характеристика диода Д161-320

Параметр	Обозначение	Значение
Импульсное прямое напряжение	$U_{пр и}$	1,5 В
Пороговое напряжение	$U_{пр}$	0,85 В
Максимально допустимый средний прямой ток	$I_{ср max}$	320 А
Максимально допустимый действующий прямой ток	$I_{пр и max}$	8,8 кА

При проведении испытаний Устройства используются оборудование и приборы, представленные в таблице 4.10.

Схема системы ЭХЗ ГРС представлена на рисунке 4.14.

Параметры СКЗ:

- выходное напряжение $U_{вых} = 7,8$ В;
- сила тока $I = 2,9$ А.

Таблица 4.10 – Состав оборудования и приборов

Поз.	Наименование	Технические характеристики		
1	Устройство для гальванического разделения катоднозащищаемых объектов и контуров защитного заземления и молниезащиты	$U_{пр} = 1,7 \text{ В}$ $I_{ном} = 200 \text{ А}$ $I_{max} = 8 \text{ кА}$		
2	Прибор для измерения защитного потенциала подземных трубопроводов на территории промышленных площадок (Мультиметр Fluke-27)	Параметр	Диапазон значений	Погрешность
		Uпост	320 мВ- 1 кВ	$\pm(0,1\%+1)$
		Uперем	320 мВ- 1 кВ	$\pm(0,5\%+3)$
		Iпост	320 мкА- 10 А	$\pm(0,75\%+2)$
		Iперем	320 мкА- 10 А	$\pm(1,5\%+2)$
		R	320 Ом- 32 МОм	$\pm(0,2\%+1)$
		G	32 нС	$\pm(2\%+10)$

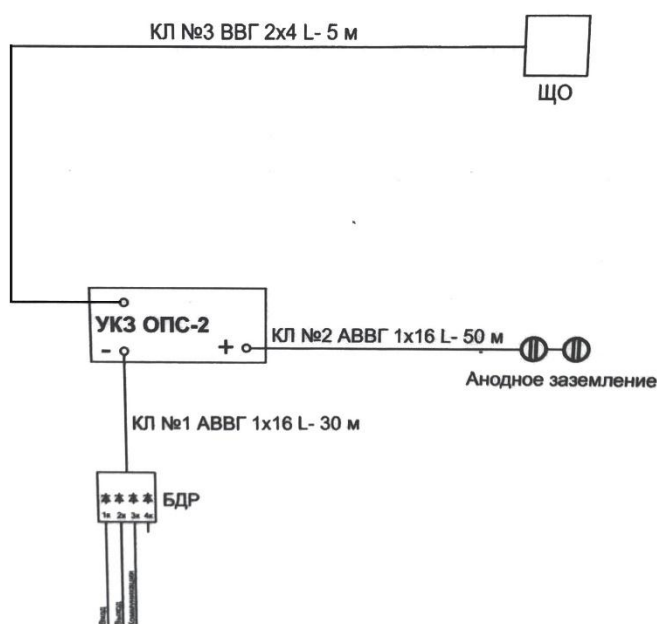


Рисунок 4.14 – Технологическая схема системы ЭХЗ ГРС

В ходе проведения испытаний выполняются следующие мероприятия:

1) Выбор на территории объекта участка, соответствующего следующим требованиям:

– функционирование системы электрохимической защиты участка должно осуществляться в штатном режиме;

– на территории объекта должен быть выявлен участок, на котором наблюдается снижение величины защитного потенциала по абсолютной величине, вызванное экранирующим влиянием системы защитного заземления;

– вблизи участка должно быть расположено энергоиспользующее оборудование, имеющее защитное заземление.

2) Измерение электрометрических характеристик трубопроводов, расположенных на территории объекта;

3) Установка Устройства в разрыв цепи защитного заземления на участке трубопровода, на котором наблюдается экранирование катодного тока;

4) Снятие электрометрических характеристик защищаемого трубопровода с учетом влияния установленного Устройства;

5) Обработка и анализ полученных результатов.

Испытания по настоящей программе испытаний проводятся в несколько этапов в соответствии с таблицей 4.11.

Таблица 4.11 – Порядок испытаний устройства на действующем объекте

№ Этапа	Содержание испытаний
Этап 1	На выбранном участке проводится измерение электрометрических характеристик защищаемого трубопровода при работе ЭХЗ в штатном режиме.
Этап 2	На участке проведения испытаний производится установка Устройства в контур защитного заземления энергоиспользующего оборудования. Проводится измерение электрометрических характеристик защищаемого трубопровода после подключения Устройства.
Этап 3	Регулирование параметров ЭХЗ после подключения Устройства с целью установления значений потенциалов «труба – земля», соответствующих критериям эффективной электрохимической защиты в соответствии с [18].

Испытания проводились при работе средств электрохимической защиты в нормальном рабочем режиме.

На первом этапе были проведены измерения потенциала «труба – земля» в различных точках трубопроводной системы ГРС (рисунок 4.15).

На втором этапе Устройство устанавливалось в разрыв цепи одиночного защитного заземления, подключенного к общему заземляющему контуру ГРС в точках 16, 17 (рисунок 4.16). После подключения устройства фиксировались выходные параметры СКЗ, а также проводились повторные измерения потенциала «труба – земля» в точках 1-17.

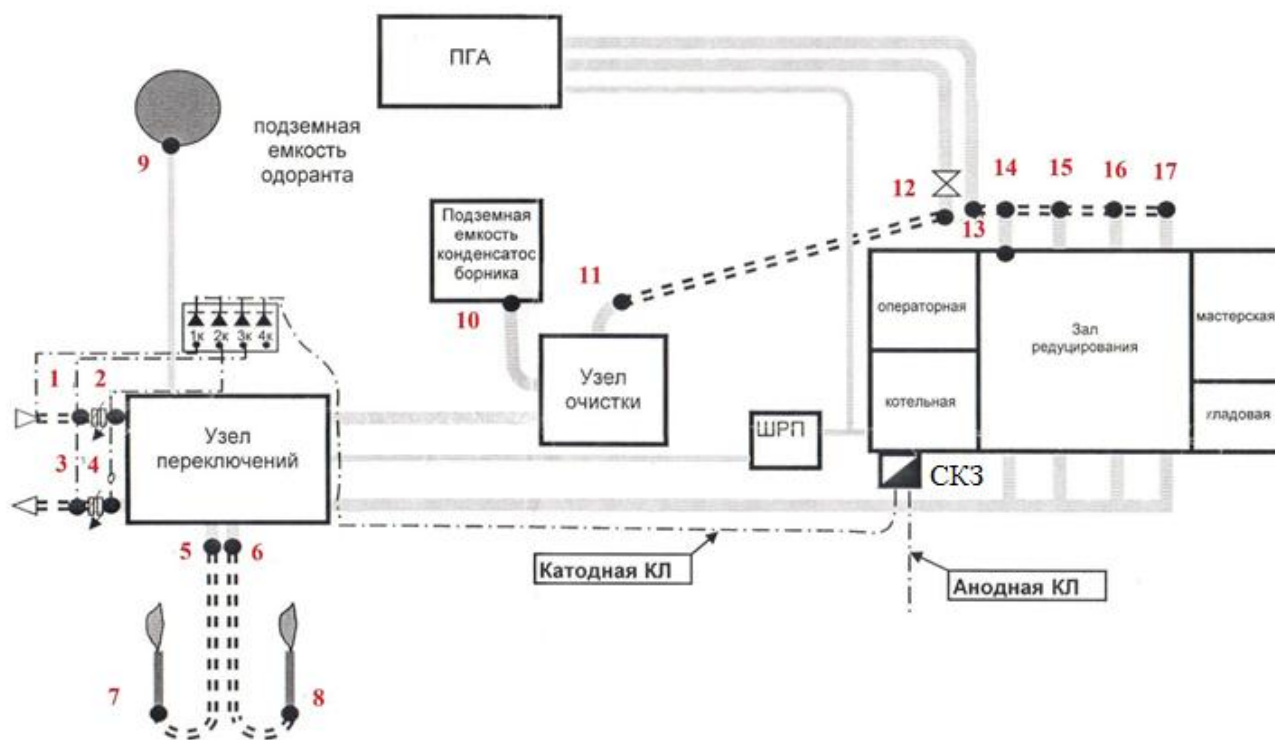


Рисунок 4.15 – Схема газораспределительной станции

Результаты измерений электрометрических характеристик представлены в таблице 4.12. Как видно из графика (рисунок 4.17), подключение устройства в разрыв цепи защитного заземления в точках 16 и 17 позволило добиться изменения величины потенциала «труба – земля» в среднем на 0,14 В.



Рисунок 4.16 – Подключение устройства для гальванической развязки в разрыв цепи защитного заземлителя, объединенного с заземляющим контуром

По результатам испытаний также установлено, что подключение защитного заземления через устройство не привело к изменению режимов работы катодной защиты.

Таблица 4.12 – Результаты измерений потенциала «труба–земля» и расчета КЭТКЗ в точках подключения устройства

Точка измерения	Значение защитного потенциала «труба – земля» $\Delta U_{Т-З}$, В		Результаты расчета коэффициента КЭТКЗ	
	До подключения устройства	После подключения устройства	До подключения устройства	После подключения устройства
16	-1,1	-1,24	0,27	0,08
17	-1,1	-1,24	0,27	0,08

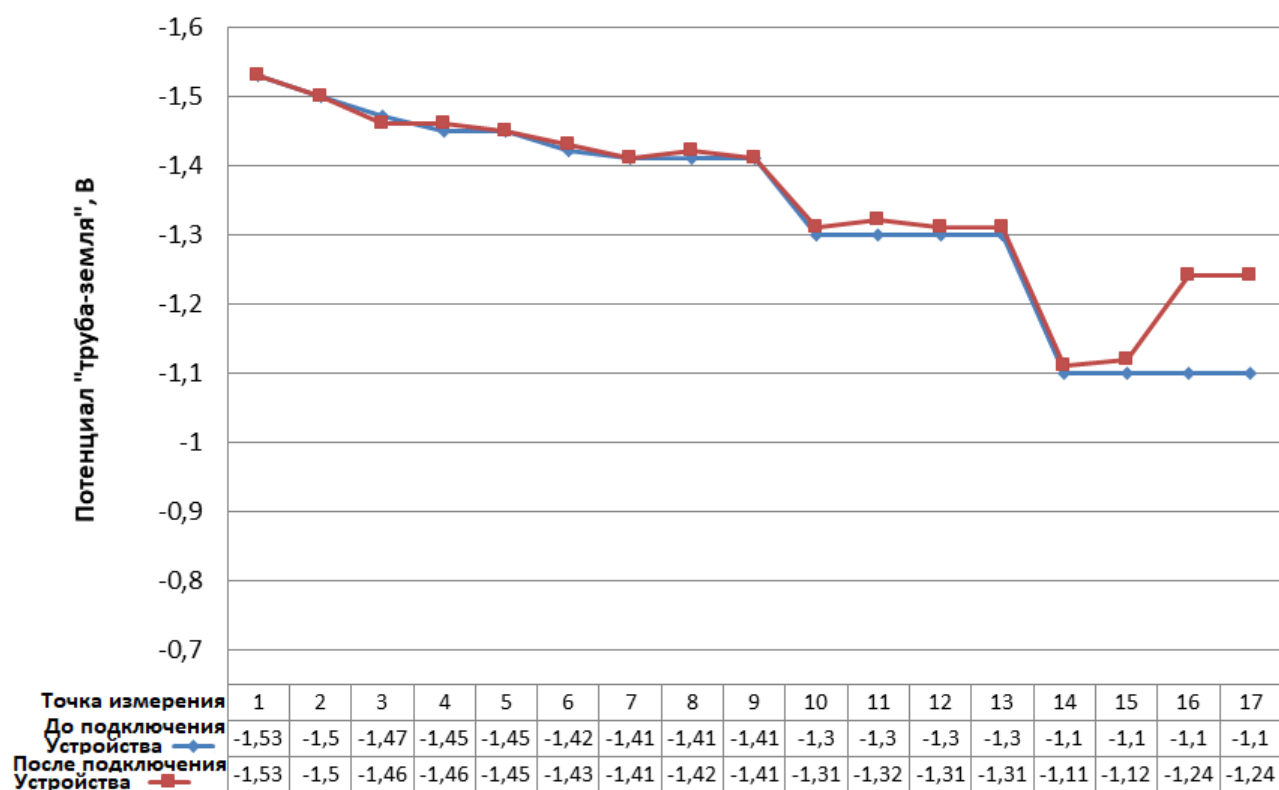


Рисунок 4.17 – Графики распределения величины потенциала «труба – земля» при отсутствии/наличии устройства для гальванической развязки в разрыве цепи защитного заземления

Повторные опытно-промышленные испытания разработанного устройства для гальванической развязки контуров защитного заземления и объектов, подлежащих электрохимической защите, проводились на площадке кранового узла, входящего в состав линейной части СМГ «Бованенково-Ухта».

При вводе в эксплуатацию на территории кранового узла отмечена недостаточная защищенность от коррозии, вызванная наличием контактов трубопроводов с контуром защитного заземления, выполненного в виде стальной полосы (контакты импульсных трубок и блоков управления кранами с корпусами кранов). Наибольшее экранирование токов катодной защиты отмечено на крановой обвязке КПП СОД (рисунок 4.18, а), поскольку результаты измерения потенциала «труба – земля» в данной точке составили $\Delta U_{T-3} = -0,71$ В, что не соответствует величине защитного потенциала, нормируемой [18]. При этом при разъединении

цепи защитного заземления (рисунок 4.18, б) наблюдалась нормализация величины потенциала «труба – земля» до нормируемых значений $\Delta U_{T-3} = -0,95 \text{ В}$.



а)



б)

Рисунок 4.18 – Камера пуска-приема средств очистки и диагностики (КПП СОД), расположенная на территории площадки кранового узла а); разъединение цепи защитного заземления, подключенного к катоднозащищаемому сооружению

б)

С целью оценки возможности снижения степени экранирования катодного тока контуром защитного заземления путем использования устройства для гальванической развязки катоднозащищаемого трубопровода и системы защитного заземления было разработано несколько вариантов опытных образцов устройств, конструкции которых состояли из четырех, шести, восьми, двенадцати и шестнадцати диодов Д243 [47]. Характеристики диодов представлены в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – Характеристика диода Д243

Параметр	Обозначение	Значение
Постоянное прямое напряжение	$U_{пр}$	1,25 В
Максимально допустимый средний прямой ток	$I_{ср\ max}$	10 А
Максимально-допустимое постоянное обратное напряжение диода	$U_{обр.\ max}$	200 В

При проведении испытаний Устройства используются оборудование и приборы, представленные в таблице 4.14.

Выходные параметры СКЗ кранового узла:

- $I_{вых}=10\text{ А};$
- $U_{вых}=9,2\text{ В};$
- $U_{т-з}\text{ в точке дренажа} = -0,97\text{ В}.$

Испытания устройства для гальванической развязки контуров защитного заземления и катоднозащищаемых объектов проводились в три этапа, аналогично методике, представленной в таблице 4.11.

На первом этапе проводилось электрометрическое обследование площадки кранового узла с целью оценки уровня защищенности технологических трубопроводов от коррозии.

Таблица 4.14 – Состав оборудования и приборов, используемых при испытании устройства на действующем объекте

Поз.	Наименование	Технические характеристики		
		Параметр		Значение
1	Устройство для гальванического разделения катоднозащищаемых объектов и контуров защитного заземления и молниезащиты	4 диода	$U_{пр}$	2,5 В
		6 диодов	$U_{пр}$	3,75 В
		8 диодов	$U_{пр}$	5 В
		12 диодов	$U_{пр}$	7,5 В
		16 диодов	$U_{пр}$	10 В
		Для всех типов	$I_{пр max}$	10 А
2	Прибор для измерения защитного потенциала подземных трубопроводов, а также силы тока в цепи защитного заземления ИПП-1 «Менделеевец»	Параметр	Диапазон значений	Погрешность
		Упост	от минус 0,2 В до 0,2 В	$\pm(0,01U+1k)$
			от минус 2 В до 2 В	$\pm(0,01U+1k)$
			от минус 10 В до 10 В	$\pm(0,01U+1k)$
			от минус 100 В до 100 В	$\pm(0,01U+2k)$
		Упол	от минус 2В до 2 В	$\pm(0,01U+1k)$
		Ут-з	от минус 10В до 10 В	$\pm(0,01U+1k)$
		Ипост	от минус 5 мА до 5 мА	$\pm(0,05I+5k)$

Измерения потенциала «труба – земля» проводились с использованием измерителя потенциала поляризационного ИПП-1 «Менделеевец» и переносных медносульфатных электродов сравнения. Результаты измерений приведены в таблице 4.15.

Очевидно, что снижение величины потенциала «труба – земля» по абсолютной величине в точке 3 связано с наличием гальванической связи с

контуром защитного заземления. Для подтверждения данного факта все видимые контакты заземленного оборудования с корпусами арматуры были устранены, результаты повторных измерений приведены в таблице 4.16.

Таблица 4.15 – Результаты измерений потенциала «труба – земля» на территории площадки кранового узла при наличии гальванической связи катоднозащищаемого объекта с системой защитного заземления

Точка измерения	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Delta U_{Т-З}$, В	-0,75	-0,76	-0,71	-0,84	-0,97	-0,9	-0,88	-0,85	-0,83

Таблица 4.16 – Результаты измерений потенциала «труба – земля» на территории площадки кранового узла при отсутствии гальванической связи катоднозащищаемого объекта с системой защитного заземления

Точка измерения	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Delta U_{Т-З}$, В	-0,85	-0,89	-0,95	-0,96	-0,97	-0,92	-0,87	-0,84	-0,83

На втором этапе испытаний в точке наиболее выраженного проявления экранирования токов катодной защиты (КПП СОД, кран 5с) в разрыв цепи защитного заземления подключались поочередно различные опытные образцы устройства. При этом в остальных рассматриваемых точках были устранены контакты с системой защитного заземления. Подключение осуществлялось в разрыв цепи защитного заземления в точке 3. После подключения каждого из типов устройств проводились измерения потенциала «труба – земля» (рисунок 4.19), результаты которых представлены в таблице 4.17.

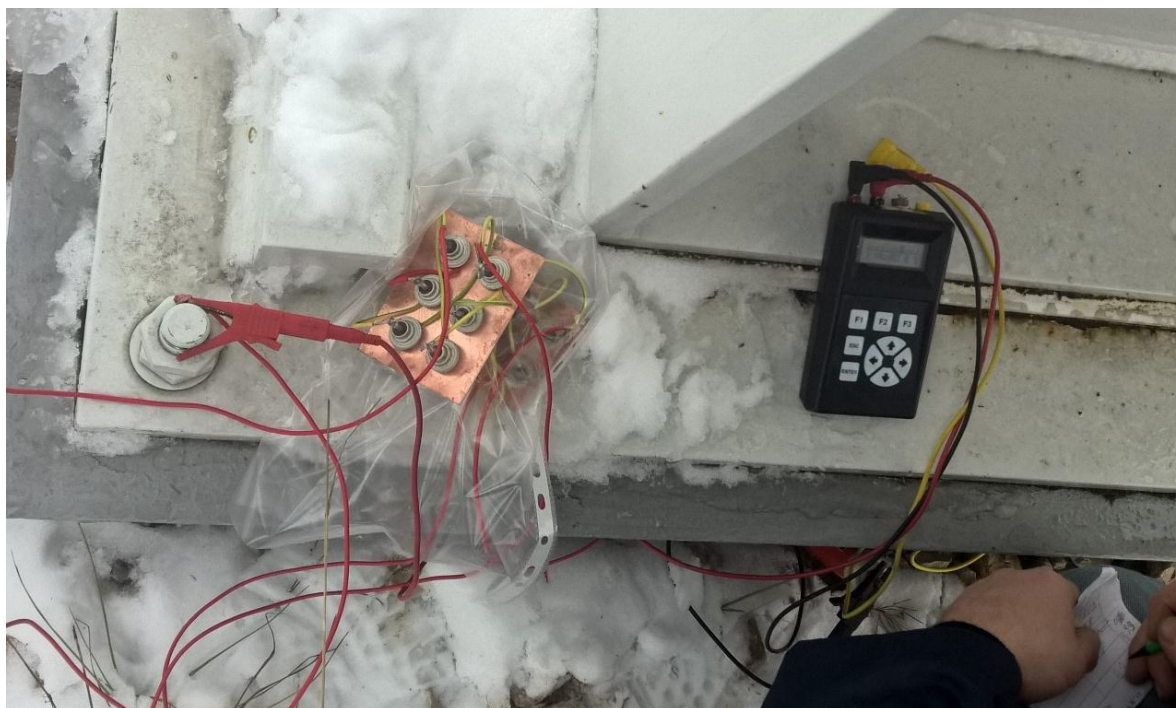


Рисунок 4.19 – Проведение измерений потенциала «труба-земля» при установке устройства в разрыв цепи защитного заземления

Таблица 4.17 – Результаты измерений потенциала «труба – земля» до и после подключения устройства в разрыв цепи защитного заземления

Точка измерения	1	2	3	4	5	6	7	8	9
До подключения устройств									
$\Delta U_{T-З}$, В	-0,75	-0,76	-0,71	-0,84	-0,97	-0,9	-0,88	-0,85	-0,83
После подключения устройств									
$\Delta U_{T-З(4d)}$, В	-0,84	-0,87	-0,73	-0,94	-0,97	-0,91	-0,88	-0,86	-0,84
$\Delta U_{T-З(6d)}$, В	-0,85	-0,89	-0,75	-0,94	-0,96	-0,9	-0,89	-0,86	-0,84
$\Delta U_{T-З(8d)}$, В	-0,86	-0,88	-0,78	-0,95	-0,97	-0,9	-0,89	-0,85	-0,84
$\Delta U_{T-З(12d)}$, В	-0,84	-0,86	-0,81	-0,93	-0,96	-0,89	-0,87	-0,84	-0,82
$\Delta U_{T-З(16d)}$, В	-0,85	-0,86	-0,85	-0,93	-0,95	-0,9	-0,86	-0,83	-0,82

Результаты измерений потенциала «труба – земля» могут быть представлены графически (рисунок 4.20), что позволит наглядно показать существенное уменьшение экранирующего влияния контура защитного заземления при установке различных типов устройств для гальванической развязки в точке 3.

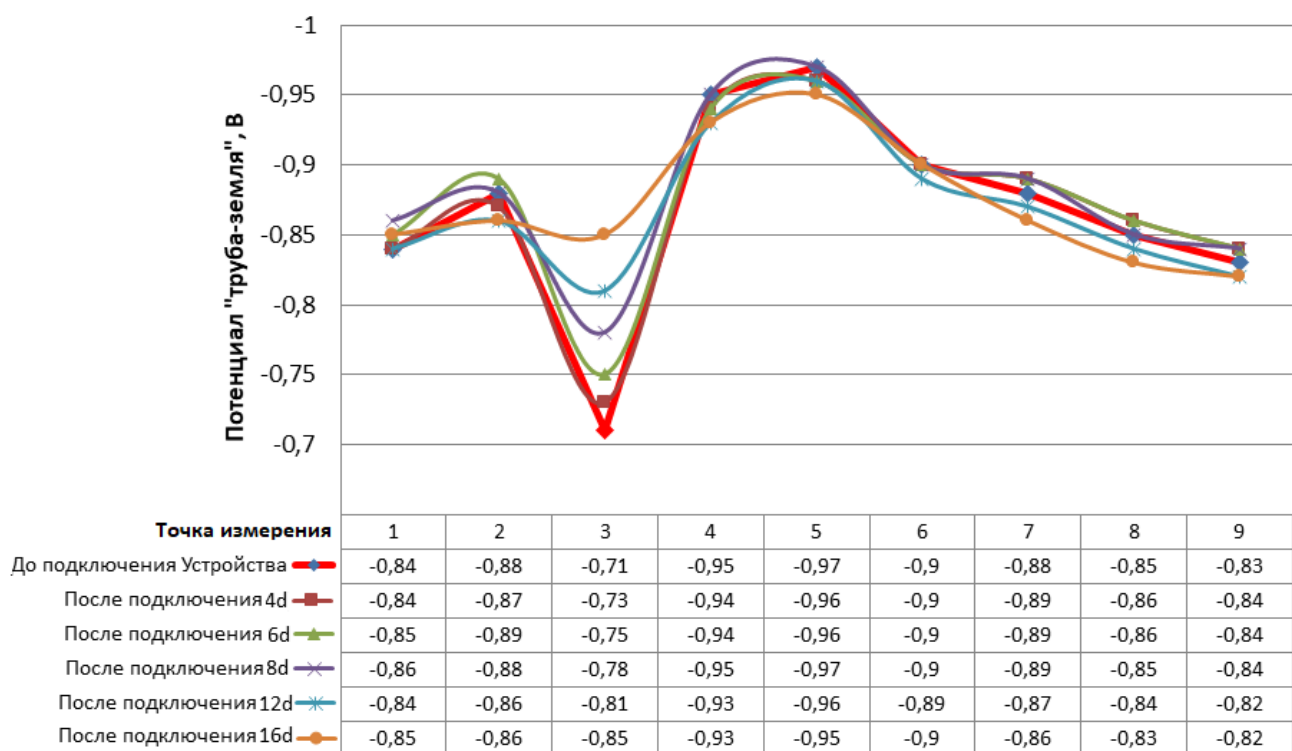


Рисунок 4.20 – Графики распределения величины потенциала «труба – земля» при отсутствии/наличии устройств для гальванической развязки в разрыве цепи защитного заземления

Также при испытании различных типов устройств были проведены измерения величины силы тока, натекающего на защитное заземление со стороны системы ЭХЗ трубопроводов. Результаты измерений представлены в таблице 4.18. Таблица 4.18 – Результаты измерений силы тока, натекающего на защитное заземление

До подключения устройства	После подключения устройств				
	$I_{(4d)}$, А	$I_{(6d)}$, А	$I_{(8d)}$, А	$I_{(12d)}$, А	$I_{(16d)}$, А
I , А					
0,36	0,25	0,22	0,18	0,12	0,07

В результате установки устройства для гальванической развязки в цепь защитного заземления в точке выявленного снижения потенциала «труба – земля» по абсолютной величине зафиксировано уменьшение экранирующего влияния

контура защитного заземления, причем при увеличении количества диодов в диодной сборке устройства происходит снижение величины КЭТКЗ (таблица 4.19).
Таблица 4.19 – Результаты расчета КЭТКЗ до и после подключения различных типов устройств

Точка измерения	1	2	3	4	5	6	7	8	9
До подключения устройств									
<i>КЭТКЗ</i>	0,33	0,38	0,60	0,29	0,00	0,05	0,03	0,03	0,00
После подключения устройств									
<i>КЭТКЗ_(4d)</i>	0,03	0,06	0,55	0,05	0,02	0,03	0,03	0,07	0,04
<i>КЭТКЗ_(6d)</i>	0,03	0,07	0,50	0,05	0,02	0,05	0,06	0,07	0,04
<i>КЭТКЗ_(8d)</i>	0,03	0,03	0,43	0,02	0,02	0,05	0,06	0,03	0,04
<i>КЭТКЗ_(12d)</i>	0,03	0,09	0,35	0,07	0,02	0,08	0,02	0,04	0,05
<i>КЭТКЗ_(16d)</i>	0,03	0,09	0,25	0,07	0,05	0,05	0,03	0,03	0,05

4.5 Выводы по главе 4

1. Сформулированы требования к техническим параметрам, конструктивным элементам и материалам, используемым в устройстве, позволяющем осуществить гальваническую развязку систем ЭХЗ и защитного заземления, а также определены требования к безопасности при монтаже и эксплуатации устройства, устанавливаемого в цепь защитного заземления электрооборудования промышленных площадок.

2. Разработаны конструктивные элементы устройства, позволяющего осуществлять гальваническую развязку катоднозащищаемых объектов и контуров защитного заземления.

3. Разработаны методики проведения испытаний прототипов устройства для гальванического разделения катоднозащищаемых объектов и

контуров защитного заземления с различной структурой в лабораторных условиях и на действующих объектах нефтегазовой отрасли.

4. Проведены испытания прототипов устройства для гальванического разделения катоднозащищаемых объектов и контуров защитного заземления в лабораторных условиях и на действующих промышленных площадках газораспределительной станции и кранового узла. Установлено, что путем увеличения числа диодов в диодной сборке устройства можно добиться повышения абсолютного значения потенциала «труба – земля» до нормируемого значения и снизить величину силы тока, натекающего на защитное заземление, имеющее электрическую связь с катоднозащищаемым сооружением.

ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО СНИЖЕНИЮ НЕГАТИВНОГО ВЛИЯНИЯ ЗАЩИТНЫХ ЗАЗЕМЛЕНИЙ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ТРУБОПРОВОДОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЛОЩАДОК

5.1 Разработка принципов проектирования и проведения пусконаладочных работ средств ЭХЗ трубопроводов с учетом влияния защитных заземлений энергоустановок

Проблема взаимовлияния контуров защитного заземления и катоднозащищаемых объектов на территории промышленных площадок должна учитываться на всех стадиях функционирования системы ЭХЗ: при проектировании, проведении пусконаладочных работ, ввода в эксплуатацию и эксплуатации.

Повышение эффективности ЭХЗ в этом случае может быть достигнуто только с учетом всех факторов, влияющих на степень экранирования катодного тока. Достоверная оценка этих факторов на каждой стадии возможна только при детальном исследовании возможных причин локального или общего снижения эффективности противокоррозионной защиты и их последствий.

Исходя из требований [48], основными типами материалов, применяемых в системах защитного заземления, являются черная сталь, оцинкованная сталь и медь. На стадии проектирования, как правило, не учитывается тот факт, что контуры защитного заземления могут оказывать влияние на функционирование систем ЭХЗ. Анализ проектных решений показывает, что наиболее частыми причинами возникновения эффекта экранирования катодного тока является сближение контуров защитного заземления с подземными технологическими трубопроводами, необоснованное использование большого количества точечных заземляющих электродов, увеличение сечения заземлителей и т.д. В главе 3

показано, что наиболее существенный экранирующий эффект возникает при наличии защитных заземлений, выполненных из меди. Несмотря на это, в настоящее время на территории промышленных площадок зачастую применяются медные вертикальные заземлители. Это объясняется необходимостью точечного заземления электрооборудования с целью защиты обслуживающего персонала от поражения током, а также опасностью развития коррозии заземляющих устройств. При этом возникает несогласованность проектных решений, поскольку в нормативной документации [69] существуют рекомендации по выполнению защитного заземления оборудования и сооружений, не имеющих гальванической развязки с защищаемыми сооружениями, а также заземлителей систем молниезащиты из оцинкованной стали с целью снижения негативного влияния на систему ЭХЗ.

В соответствии с [55, 70] исходными данными для проектирования электрохимической защиты являются следующие данные:

- план промышленной площадки с указанием размещения оборудования, трубопроводов и инженерных сетей;
- перечень всех подземных трубопроводов с указанием их длины и диаметра;
- характеристики грунтов (удельное электрическое сопротивление грунтов, содержание водорастворимых солей в грунте);
- результаты вертикального электрического зондирования по периметру промышленной площадки;
- максимальная температура перекачиваемого продукта;
- оценка влияния блуждающих токов от источников постоянного и переменного тока.

По результатам обзора основных положений по устройству систем ЭХЗ можно заключить, что на данный момент отсутствует методика оценки взаимного влияния систем ЭХЗ и защитного заземления. В связи с этим, разработка алгоритма выбора мероприятий по минимизации негативного влияния контуров защитного заземления на эффективность противокоррозионной защиты трубопроводов, позволяющая выработать обоснованное проектное решение, является

необходимым шагом для достижения поставленной цели настоящего исследования.

На стадии проектирования системы ЭХЗ трубопроводов промышленных площадок рекомендуется использовать программное обеспечение, позволяющее оценивать параметры токораспределения при экранировании катодного тока контурами защитного заземления (глава 2). Исходными данными для расчетов являются:

- параметры рассматриваемого участка трубопровода (длина участка, диаметр трубопровода, толщина стенки, сопротивление металла трубы, проводимость изоляционного покрытия);

- параметры системы ЭХЗ (напряжение и сила тока на выходе СКЗ, координаты расположения СКЗ на территории промышленной площадки);

- параметры окружающей среды (удельное электрическое сопротивление грунта);

- параметры защитных заземлений (сопротивление растеканию тока, материал, из которого выполнены защитные заземления, координаты расположения защитных заземлений на территории промышленной площадки).

Программное обеспечение позволяет проводить расчет и визуализацию зависимостей от линейной координаты силы тока в трубопроводе $I(x)$ и разности потенциалов между трубопроводом и грунтом $U(x)$. Полученное значение защитного потенциала сравнивают с нормативным [18]. Кроме того, проводят расчет коэффициента экранирования тока катодной защиты в соответствии с методикой, изложенной в главе 3. В случае, если результаты расчетов указывают на необходимость решения проблемы негативного влияния контуров защитного заземления на систему ЭХЗ трубопроводов, необходимо выделить наиболее приоритетный параметр, определяющий дальнейшую стратегию реализации мероприятий по повышению эффективности ЭХЗ трубопроводов.

Как было отмечено в главе 3, основными показателями эффективности работы и рационального энергопотребления СКЗ, расположенных на территории промышленных площадок, являются КЭТКЗ и сила тока, натекающего на защитное

заземление. Допустимая величина КЭТКЗ может быть определена по формуле (3.13) исходя из требований ГОСТ Р 51164-98 к минимальным значениям потенциала «труба-земля» для рассматриваемой точки.

Допустимая величина силы тока, натекающего на защитное заземление, может быть приближенно определена исходя из требований к обеспечению запаса не менее 50% напряжения и тока преобразователей на начальный момент включения СКЗ при проектировании.

Оценку целесообразности использования тех или иных мероприятий проводят в следующей последовательности:

1. Оценка типа и характеристик защитных заземлений, располагаемых на территории промышленных площадок;

2. Оценка пространственного положения защитных заземлений относительно элементов системы ЭХЗ;

3. Оценка типа и характеристик анодных заземлений, используемых в системе ЭХЗ трубопроводов, расположенных на территории промышленных площадок;

4. Оценка возможности установки устройства для гальванической развязки системы защитного заземления и катоднозащищаемых объектов в разрыв цепи защитного заземления (см. гл. 4);

5. Выработка окончательного проектного решения, характеризующегося следующими параметрами:

- координаты расположения СКЗ $x_{СКЗ}, y_{СКЗ}$;
- координаты расположения точечных защитных заземлений и контура защитного заземления $x_{ЗЗ}, y_{ЗЗ}$;
- материал защитного заземления;
- сопротивление растеканию тока защитного заземления $R_{ЗЗ}$;
- сила тока СКЗ $I_{СКЗ}$;
- необходимость внедрения дополнительных технических решений (протекторов, электроизолирующих вставок, анодных заземлителей,

устройств для гальванического разделения систем ЭХЗ и защитного заземления электрооборудования).

Кроме того, необходимо учитывать следующие рекомендации по ограничению влияния контуров защитных заземлений на систему ЭХЗ на стадии проектирования:

1. При организации контуров защитных заземлений технологического оборудования промплощадок и линейной части в качестве заземляющих устройств следует применять оцинкованные материалы.

2. В случае применения в качестве рабочих (функциональных) заземлений труб из черного проката запрещается их объединять с контуром защитного заземления.

3. При пересечении контуром защитного заземления подземных трубопроводов предусматривать изоляцию контура заземления на расстоянии не менее 2 м от места пересечения.

4. Определить оптимальное положение контура защитного заземления относительно подземного сооружения и анодных заземлений исходя из оценки степени экранирования катодного тока.

5. При проектировании защитного заземления следует учитывать наличие естественных заземлителей.

6. Минимизировать количество заземлителей контура защитного заземления.

6. Рациональным является вынос заземления на периферию промплощадки с организацией общей заземляющей шины, если это допустимо с учетом требований ПУЭ к соблюдению расстояний от заземляемого оборудования до места установки защитных заземлений.

7. Исключить объединение контура молниеприемников и защитного заземления.

8. Противоподкопная сетка ограждений должна быть покрыта изоляционными покрытиями.

9. Для исключения влияния заземляющих устройств на находящиеся под катодной поляризацией сооружения рекомендуется гальваническое разделение защищаемого сооружения от заземленного оборудования, организация отдельных контуров заземления, применение поляризационных элементов или диодных схем в цепи заземления. В отдельных случаях может быть предусмотрена возможность разделения системы заземления от защищаемого сооружения с использованием устройства развязки (защитные устройства, которые замыкаются при превышении заранее определенного уровня порогового напряжения или позволяют пропускать только переменный ток).

При проведении *пусконаладочных работ* выбор мероприятий зависит от результатов оценки соответствия величины потенциала «труба – земля» на территории промышленной площадки нормативным требованиям [18]. В случае, если эффективная противокоррозионная защита обеспечивается не во всех контролируемых точках, необходимо ликвидировать гальваническую связь заземляемого оборудования с объектами, подлежащими катодной защите (например, имеющиеся контакты блоков управления арматурой с корпусами арматуры и др.), а также проверить правильность подключения системы защитного заземления в шкафу оборудования КИП. В случае, если выполнение данных мероприятий не способствует повышению эффективности противокоррозионной защиты трубопроводов, необходимо разработать дополнительные технические решения для обеспечения нормативного значения защитного потенциала на трубопроводах, т.е. провести реконструкцию системы ЭХЗ или системы защитного заземления [72].

На стадии эксплуатации системы ЭХЗ трубопроводов электрометрическое обследование технологических трубопроводов проводят с целью определения степени эффективности работы системы ЭХЗ, а также выявления и устранения факта несоответствия потенциала «труба – земля» нормативным требованиям [18]. Защищенность подземных технологических трубопроводов оценивается по результатам обработки комплекса результатов измерений потенциалов с омической составляющей [59]. В случае выявления недопустимых значений

потенциала «труба – земля» требуется регулирование параметров системы ЭХЗ трубопроводов. Однако, как было отмечено в 1 главе, причинами снижения эффективности ЭХЗ трубопроводов могут быть воздействие блуждающих токов, неравномерность распределения параметров ЭХЗ трубопроводов, экранирование тока катодной защиты контурами защитных заземлений.

Целью оптимизации параметров ЭХЗ трубопроводов промышленных площадок является определение таких режимов работы каждой установки катодной защиты, при которых во всех контролируемых точках величина потенциала «труба – земля» будет соответствовать регламентированным величинам, а суммарная энергозатраты на защиту трубопроводов от коррозии будут сведены к минимуму [11, 27, 39]. Оптимальные режимы работы системы ЭХЗ определяют на основании построения математической модели, реализуемой путем применения регрессионного анализа [52, 56].

В случае, если реализация мероприятий по регулированию выходных параметров системы ЭХЗ трубопроводов не позволяет достичь оптимального уровня защищенности от коррозии, необходимо выполнить реконструкцию системы ЭХЗ и/или реконструкцию системы защитного заземления промышленной площадки.

На рисунке 5.1 представлен алгоритм выбора мероприятий, позволяющих устранить или свести к минимуму негативное влияние контуров защитных заземлений на эффективность работы системы ЭХЗ трубопроводов, расположенных на территории промышленных площадок.

Данный алгоритм подразумевает выбор стадии, на которой требуется использование средств и методов, позволяющих повысить эффективность противокоррозионной защиты:

- стадия проектирования систем защитного заземления и ЭХЗ трубопроводов;
- стадия проведения пусконаладочных работ ЭХЗ;
- стадия эксплуатации систем защитного заземления и ЭХЗ трубопроводов.

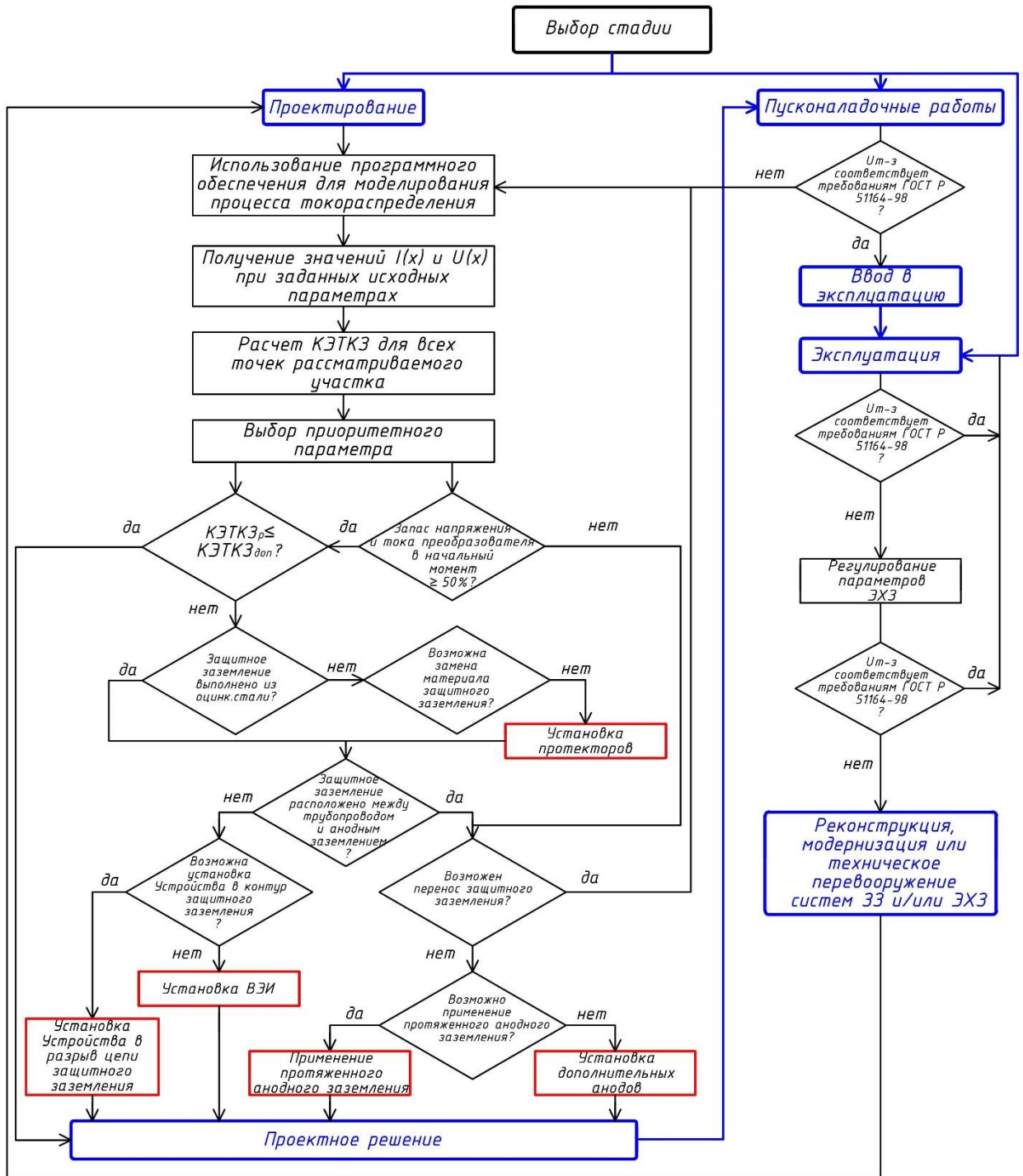


Рисунок 5.1 – Алгоритм выбора мероприятия по снижению экранирующего влияния, оказываемого контурами защитного заземления на распространение катодного тока

5.2 Определение требуемых параметров устройства для гальванического разделения систем заземления и катоднозащищаемых объектов

При определении требуемых параметров устройства для гальванического разделения систем заземления и катоднозащищаемых объектов необходимо, в первую очередь, руководствоваться характеристиками системы заземления электрооборудования, расположенного на территории промышленной площадки. К таким характеристикам относятся [17]:

- тип системы защитного заземления (замкнутый горизонтальный заземлитель, замкнутый горизонтальный заземлитель с подключенными точечными заземляющими электродами, точечные заземляющие электроды);
- материал защитного заземления (черная сталь, оцинкованная сталь, медь);
- тип и количество точечных электродов заземления.

Кроме того, необходимо уточнение информации о количестве и характеристиках электрооборудования, подлежащего заземлению, поскольку от этого зависят параметры заземляющих проводников [17, 34]:

- диаметр и площадь поперечного сечения проводника;
- величина тока короткого замыкания, протекающего по заземляющему проводнику.

При определении требуемых характеристик устройства для гальванического разделения необходимо учитывать характеристики материала, из которого выполнено защитное заземление. Степень влияния материала защитного заземления может быть выражена формулой, определяющей степень экранирования катодного тока

$$\Delta U = |U_{r-z}| - (|U_{cr}^{33}| - |U_{cr}^{TP}|), \quad (5.1)$$

где U_{cr}^{33} - величина стационарного потенциала металла, из которого выполнено защитное заземление, В;

U_{cr}^{TP} - величина стационарного потенциала металла трубы, В;

$U_{т-з}$ - величина потенциала «труба – земля» при отсутствии влияния защитных заземлений, В.

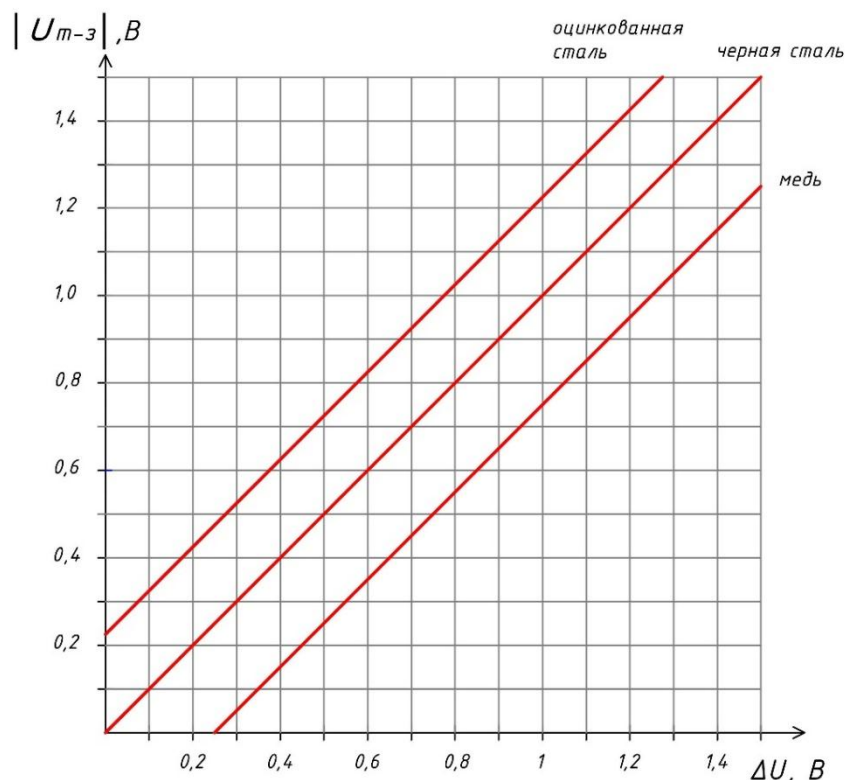
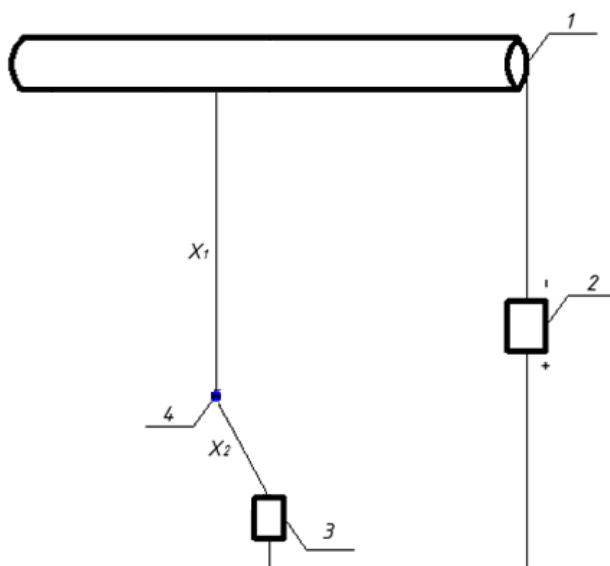


Рисунок 5.2 – Зависимость степени влияния материала защитного заземления на величину потенциала «труба – земля» (материалы защитного заземления: оцинкованная сталь, черная сталь, медь)

На выбор типа и количества диодов, входящих в состав устройства, также существенное влияние оказывает расположение защитного заземлителя или контура защитного заземления относительно катоднозащищаемого сооружения. Как было отмечено в 3 главе, чем ближе к подземному трубопроводу установлено защитное заземление, тем более существенное экранирующее влияние оно оказывает на протекание тока катодной защиты.

Наиболее важным параметром в данном случае является отношение кратчайшего расстояния от катоднозащищаемого сооружения до защитного заземления X_1 , м, к кратчайшему расстоянию от защитного заземления до анодного заземления, X_2 , м (рисунок 5.3).



1 –защищаемый трубопровод; 2 – источник постоянного тока; 3 – анодное заземление; 4 – защитное заземление

Рисунок 5.3 – Схема, поясняющая определение соотношения расстояний X_1/X_2

Исходя из полученного соотношения расстояний X_1/X_2 может быть найден коэффициент k (таблица 5.1), учитывающий близость расположения защитного заземления к анодному заземлению.

Таблица 5.1 – Коэффициент, учитывающий расположение защитного заземления относительно катоднозащищаемого объекта и анодного заземления

Соотношение X_1/X_2	Коэффициент k
1,8 и более	0,1
1,6	0,2
1,4	0,3
1,2	0,4
1	0,5
0,8	0,6
0,6	0,7
0,4	0,8
0,2	0,9
до 0,1 включительно	1

Тип диодов, входящих в состав основного блока устройства для гальванической развязки, выбирается исходя из максимального значения прямого

тока, протекающего в цепи защитного заземления. При этом диоды должны быть рассчитаны на номинальный рабочий ток, в 1,5 раза превышающий максимально возможный ток короткого замыкания.

Выпускаемые отечественной промышленностью диоды, разработанные до 1964 г., обозначают следующим образом [14]:

- первый элемент – буква Д (диоды);
- второй элемент – тип прибора (плоскостные кремниевые от 201 до 300, плоскостные германиевые от 301 до 400);
- третий элемент – разновидность прибора.

Более современная система обозначений диодов [14]:

- первый элемент – материал (Г или 1 – германий, К или 2 – кремний);
- второй элемент – буква Д (диоды);
- третий элемент – тип прибора (выпрямительные диоды от 101 до 199, универсальные диоды от 201 до 299, импульсные диоды от 301 до 399).

Каждый тип диодов характеризуется определенной величиной постоянного прямого напряжения диода при максимальной величине протекающего тока, которая колеблется в пределах 0,3...2 В. Исходя из значений данных параметров выбирается количество диодов, включенных параллельно.

Пример определения количества диодов, входящих в состав основного блока устройства, включенных параллельно, показан на рисунке 5.4. Пусть на стадии эксплуатации системы противокоррозионной защиты подземных технологических трубопроводов было выявлено экранирующее влияние защитного заземления электроустановки. Требуемую величину максимального прямого тока могут обеспечить диоды Д303, прямое напряжение (постоянное) на диоде составляет 0,8 В. Разъединяют цепь защитного заземления и проводят измерение падения напряжения в разрыве цепи. Измеренное падение напряжение составило 0,95 В. На оси ординат отмечают величину 1 В, проводят горизонтальную прямую до пересечения с линией, соответствующей величине прямого напряжения на диоде 0,8 В. Из полученного пересечения опускают перпендикуляр на ось абсцисс,

полученную величину количества диодов, подключаемых параллельно, округляют в большую сторону: $n = 2$ шт.

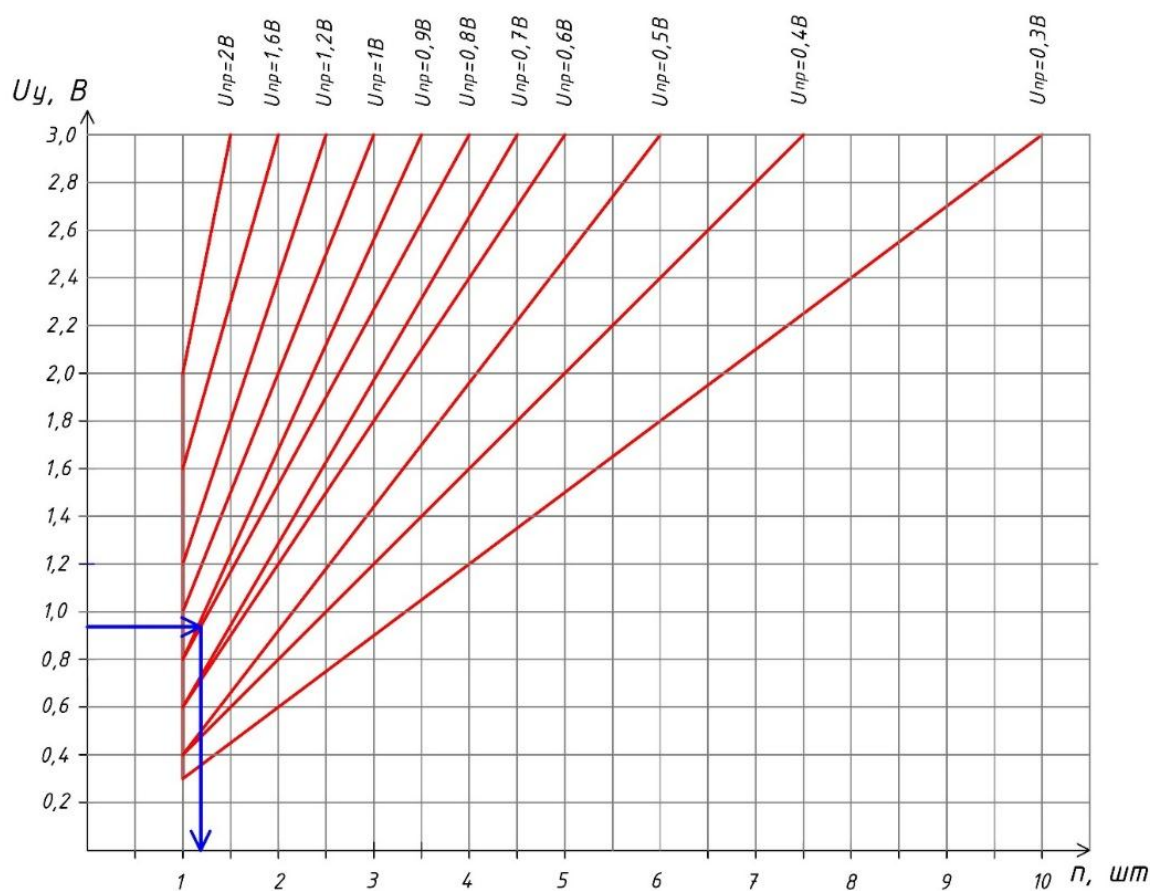


Рисунок 5.4 – Пример определения количества диодов, входящих в состав основного блока устройства, включенных параллельно

Все параметры, принимаемые во внимание при определении типа и количества диодов, входящих в состав основного блока устройства для гальванической развязки катоднозащищаемых объектов и систем защитного заземления, необходимо учитывать комплексно. Наиболее удобным способом является представление процедуры выбора параметров, влияющих на результат выбора требуемых параметров устройства, в виде номограммы. Пример использования номограммы на стадии проектирования системы ЭХЗ трубопроводов промышленной площадки представлен на рисунке 5.5.

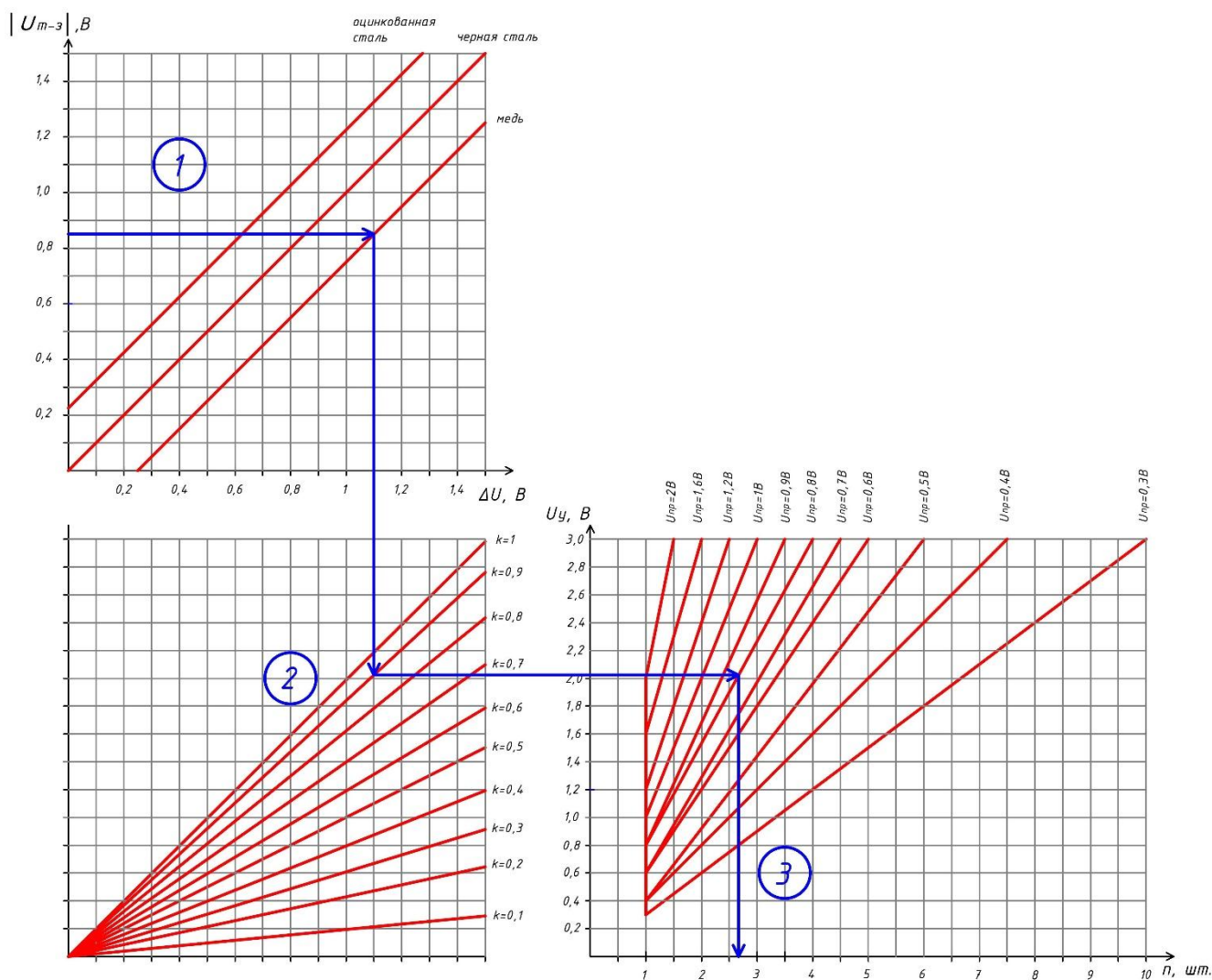


Рисунок 5.5 – Номограмма, предназначенная для определения типа и количества диодов, входящих в состав устройства для гальванической развязки:

- 1 – определение степени влияния материала защитного заземления на величину потенциала «труба – земля»; 2 – этап, позволяющий произвести учет влияния расположения защитного заземления относительно анодного заземления на величину защитного потенциала; 3 – определение количества диодов, входящих в состав основного блока устройства, включенных параллельно

Пусть при выработке проектного решения по устройству системы ЭХЗ технологических трубопроводов промышленной площадки выявлено, что защитное заземления электрооборудования, расположенного на территории компрессорной станции, имеет гальваническую связь с катоднозащищаемым трубопроводом, что может оказать влияние на эффективность

противокоррозионной защиты трубопроводов, проявляющееся в снижении потенциала «труба – земля» по абсолютной величине.

Номинальный рабочий ток в цепи защитного заземления (исходя из характеристик заземляемого оборудования) может достигать величины 5 А.

Защитное заземление электрооборудования выполнено из меди и представляет собой точечный заземляющий электрод, расположенный на расстоянии 2 м от подземного технологического трубопровода и на расстоянии 10 м от анодного заземления, подключенного к СКЗ.

Требуется определить количество диодов, подключаемых последовательно, для осуществления гальванической развязки катоднозащищаемого технологического трубопровода и защитного заземления.

Этап 1:

1) Задаются требуемой величиной потенциала «труба – земля» для данного участка: $U_{Т-З} = -0,85 \text{ В}$;

3) На оси абсцисс фрагмента 1 откладывают полученное значение $|U_{Т-З}| = 0,85 \text{ В}$. Соединяют значение $|U_{Т-З}|$, В с линией, соответствующей материалу, из которого выполнено защитное заземление (медь). Из полученной точки опускают перпендикуляр до пересечения с фрагментом 2.

Этап 2:

1) Определяют отношение кратчайшего расстояния от катоднозащищаемого сооружения до защитного заземления X_1 , м, к кратчайшему расстоянию от защитного заземления до анодного заземления, X_2 , м:

$$\frac{X_1}{X_2} = \frac{2}{10} = 0,2;$$

2) По полученному значению $\frac{X_1}{X_2}$ в соответствии с таблицей 5.1 определяют, что коэффициент, учитывающий расположение защитного заземления относительно катоднозащищаемого объекта и анодного заземления k равен 0,9.

3) Линию, полученную в результате выполнения первого этапа, соединяют с прямой, характеризующей полученный коэффициент k .

4) От точки пересечения проводят прямую горизонтальную линию до фрагмента 3.

Этап 3:

1) Определяют величину максимального прямого тока для выбора типа диодов. Диоды должны быть рассчитаны на номинальный рабочий ток, в 1,5 раза превышающий максимально возможный ток короткого замыкания:

$$I_{пр.макс} = 3,3 \cdot 1,5 \approx 5A$$

По справочным данным [65] определяем, что требуемую величину максимального прямого тока обеспечивают диоды Д304 со следующими характеристиками:

– постоянное прямое напряжение при токе 5 А $U_{пр} = 0,8$ В;

– постоянный обратный ток диода $I_{обр} = 2$ мА;

– максимально допустимое обратное напряжение диода $U_{обр.макс} = 100$ В.

2) Линию, полученную в результате выполнения второго этапа, соединяют с линией, соответствующей величине постоянного прямого напряжения $U_{пр} = 0,8$ В и опускают перпендикуляр на ось ординат.

3) Полученное количество диодов, соединяемых последовательно, входящих в состав основного блока устройства округляют в большую сторону: $n = 3$ шт.

4) Общее количество диодов, входящих в состав устройства, с учетом подключенных встречно-параллельно, определяют путем умножения полученного значения на два: $n_{общ} = 6$ шт.

Полученное значение необходимо сравнить с результатом, полученным по формуле 5.2

$$n \geq \frac{2 \cdot k \cdot |U_{T-3}| - (|U_{ст}^{33}| - |U_{ст}^{TP}|)}{U_{пр}}, \quad (5.2)$$
$$\frac{2 \cdot 0,9 \cdot (0,85 - (-0,25))}{0,8} = 2,69 \approx 3$$

$$n \geq 3$$

$$n_{\text{общ}} = 2 \cdot 3 = 6$$

Использование номограммы для определения количества диодов, входящих в состав устройства для гальванической развязки, целесообразно на стадии проектирования системы ЭХЗ трубопроводов промышленных площадок.

На стадии пусконаладочных работ или на стадии эксплуатации системы ЭХЗ площадных объектов одним из вариантов решения проблемы снижения защитного потенциала по абсолютной величине, вызванной влиянием системы защитного заземления, является установка устройств гальванической развязки. Вопрос выбора типа устройств и мест их установки решается на основании измерения величины падения напряжения в разрыве цепи защитного заземления. Поскольку в соответствии с требованиями Правил устройства электроустановок электрооборудование, расположенное на территории промышленной площадки, должно быть подключено к постоянно действующей системе защитного заземления, не допускается осуществлять разрыв цепи защитного заземления в штатном режиме работы энергоиспользующего оборудования. В связи с этим, проведение измерений падения напряжения в разрыве цепи защитного заземления целесообразно проводить только в период проведения ремонтных работ на территории промышленной площадки, в т.ч. при выводе в ремонт контура (участка контура) защитного заземления либо точечных вертикальных заземлителей.

Полученные результаты измерения падения напряжения в разрыве цепи защитного заземления могут быть использованы с целью выбора типа и количества диодов, входящих в состав устройства для гальванического разделения контуров защитного заземления и катоднозащищаемых объектов (рисунок 5.5, этап 3).

В общем виде алгоритм выбора требуемых параметров устройства для гальванической развязки систем ЭХЗ и защитного заземления (количество и типа диодов, величина прямого тока и напряжения) показан на рисунке 5.6.

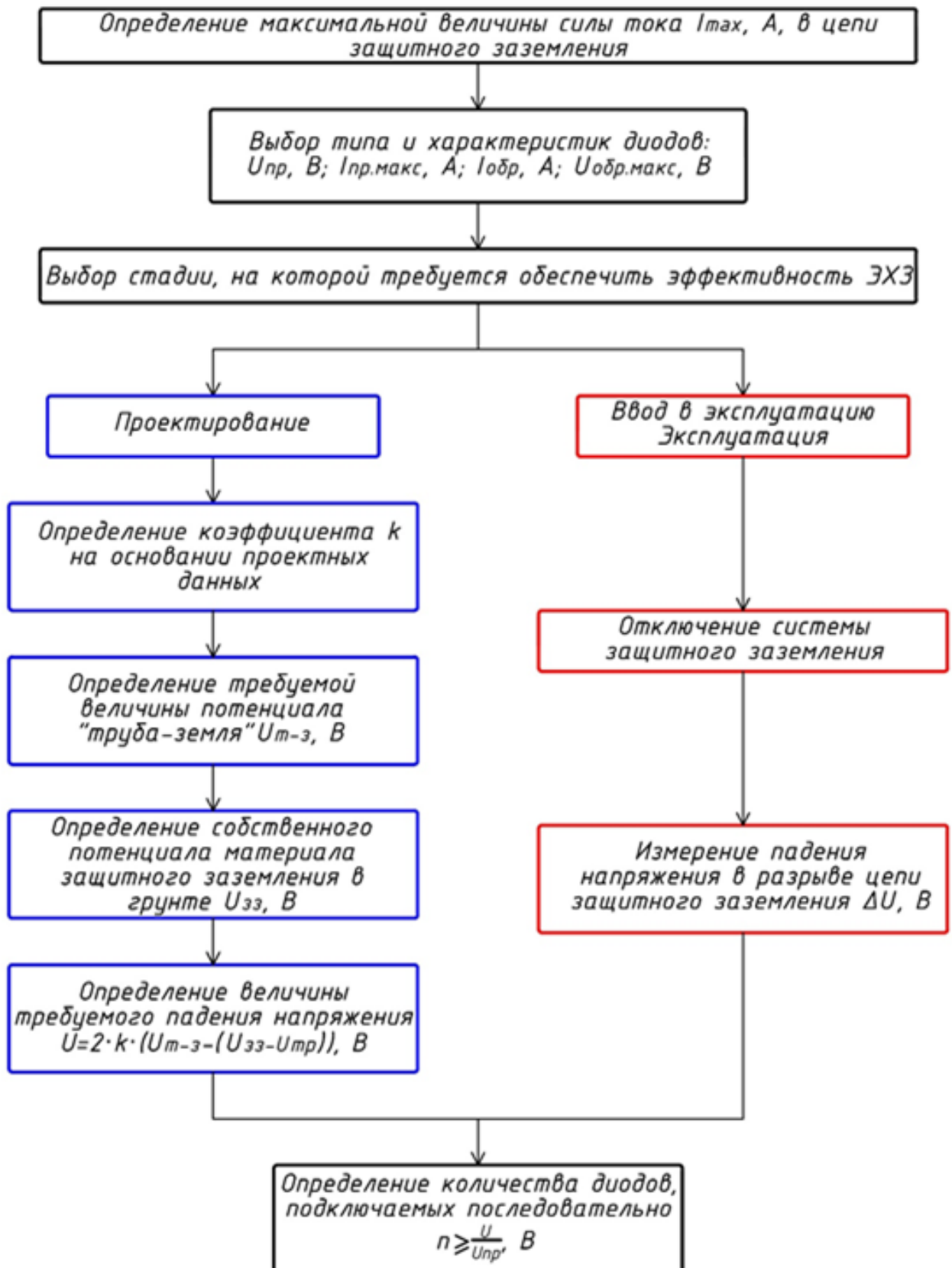


Рисунок 5.6 – Алгоритм выбора требуемых параметров устройства, предназначенного для гальванической развязки систем ЭХЗ и защитного заземления, на стадиях проектирования и эксплуатации систем ЭХЗ и защитного заземления

5.3 Реализация алгоритма выбора мероприятия по снижению экранирующего влияния, оказываемого контурами защитного заземления на распространение катодного тока, при проектировании компрессорной станции

Алгоритм выбора мероприятий по снижению экранирующего влияния, оказываемого контурами защитного заземления на распространение катодного тока, был использован при проектировании компрессорной станции «Дивенская» в рамках проекта «Развитие газотранспортных мощностей ЕСГ Северо-Западного региона, участок «Грязовец - КС Славянская».

Трубопроводная обвязка оборудования, расположенного на территории компрессорной станции, выполнено с использованием труб диаметром от 56 мм до 1420 мм. Участки трубопроводов, расположенные подземно, подлежат комплексной противокоррозионной защите с использованием изоляционного покрытия и подключения станций катодной защиты. Сопротивление изоляции трубопроводов составляет не менее $R_{из} = 3 \cdot 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$. В УКЗ, обеспечивающей электрохимическую защиты подземных трубопроводов от коррозии, предусматривается применение шестиканальных СКЗ с силой тока канала до 25 А. Общая сила тока УКЗ – до 150 А.

Удельное электрическое сопротивление грунта на территории площадки компрессорной станции составляет в среднем $R_{zp} = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Системы защитного заземления электрооборудования компрессорной станции выполнено в виде горизонтального контура, выполненного в виде полосы из оцинкованной стали 4×40 мм. Для обеспечения требуемой величины сопротивления защитного заземления используются точечные вертикальные заземлители – составные стержневые стальные оцинкованные электроды длиной 4,5 м, диаметром – 16 мм.

Система защитного заземления представляет собой единое общее заземляющее устройство, полученное путем объединения контуров заземлений всех сооружений и конструкций на территории объекта.

Для определения оптимального расположения контура защитного заземления электрооборудования, позволяющего минимизировать величину катодного тока, натекающего на защитные заземления, было использовано программное обеспечение «PPEModeller». На основании исходных данных о параметрах рассматриваемого участка трубопровода, системы и защитных заземлений был проведен расчет зависимостей от линейной координаты силы тока в трубопроводе $I(x)$ и разности потенциалов между трубопроводом и грунтом $U(x)$. Полученное значение защитного потенциала сравнивалось с нормативным [18].

Результаты расчета позволили определить оптимальные с точки зрения эффективной противокоррозионной защиты трубопроводов координаты расположения СКЗ и координаты расположения точечных защитных заземлений и контура защитного заземления, позволяющие минимизировать потребляемую станциями электроэнергию и повысить срок службы анодных заземлений, а также обеспечить необходимый резерв запаса преобразователей СКЗ по току и мощности. Кроме того, с целью обеспечения равномерного распределения потенциала «труба-земля» на рассматриваемом участке подземного трубопровода было принято решение об использовании в составе системы катодной защиты, обеспечивающий противокоррозионную защиту подземных стальных коммуникаций КС «Дивенская», комбинированной системы анодных заземлений: протяженные гибкие аноды (ПГА), укладываемые в траншее рядом с газопроводом в сочетании с глубинными анодными заземлителями. Пример реализации данного решения представлен на рисунке 5.7.

Помимо этого, при проектировании объекта были приняты соответствующие меры по ограничению влияния контуров защитного заземления на эффективность катодной защиты подземных трубопроводов:

1. Исключить размещение контура защитного заземления на расстоянии от подземных технологических трубопроводов, подлежащих катодной защите, менее чем на 3 м.

5.4 Выводы по главе 5

1. Разработан алгоритм выбора мероприятий по минимизации и устранению негативного влияния контуров защитного заземления, реализация которого позволяет обеспечить минимизацию потребляемой системой ЭХЗ электроэнергию и повышение срока службы анодных заземлителей, а также снизить риски выхода из строя преобразователей СКЗ и обеспечить необходимый резерв запаса преобразователей по току и мощности.

2. Представлены результаты внедрения разработанного алгоритма выбора мероприятий по повышению эффективности противокоррозионной защиты трубопроводов при проектировании системы ЭХЗ трубопроводов КС «Дивенская», свидетельствующие о целесообразности и необходимости предварительной оценки степени влияния контуров защитного заземления с целью выбора наиболее оптимального способа минимизации экранирования катодного тока.

3. Предложена номограмма подбора параметров устройства для гальванической развязки электрических цепей анодных и защитных заземлений, предназначенная для выбора типа и количества диодов в устройстве в зависимости от величины и условий протекания тока, материала электродов заземлений и других параметров, что позволяет свести к минимуму негативное влияние защитных заземлений и повысить эффективность противокоррозионной защиты трубопроводов промышленных площадок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что при проведении пусконаладочных работ и эксплуатации средств ЭХЗ трубопроводов промышленных площадок в большинстве случаев наблюдается снижение эффективности противокоррозионной защиты, что связано несоответствием величины защитного потенциала требованиям НТД, что, в свою очередь, приводит к увеличению потребления электроэнергии на электрохимическую защиту, уменьшению срока службы анодных заземлителей, а также повышению риска выхода из строя преобразователей станций катодной защиты и отсутствию резерва запаса преобразователей по току и мощности.

2. На основании результатов математического моделирования получены уравнения для расчета внешнего электрического поля, действующего на участок трубопровода, подключенный к произвольному количеству станций катодной защиты и имеющий электрический контакт с произвольным количеством защитных заземлений электроустановок. Разработано программное обеспечение, позволяющее производить расчет распределения силы тока в трубопроводе и разности потенциалов между трубопроводом и грунтом с учетом имеющегося гальванического соединения катоднозащищаемого сооружения с контуром защитного заземления.

3. На основании разработанной методики проведено экспериментальное исследование явления экранирования катодного тока точечным заземляющим электродом. Для оценки эффективности ЭХЗ трубопроводов предложен усовершенствованный критерий - коэффициент экранирования тока катодной защиты (КЭТКЗ) и формула для его определения. В результате анализа полученных экспериментальных данных установлена зависимость КЭТКЗ от материала и координаты расположения защитного заземления относительно катоднозащищаемого сооружения и анодного заземления.

4. Разработана конструкция устройства для разделения контуров защитного заземления и катоднозащищаемых объектов, позволяющего обеспечить уменьшение величины тока, натекающего на защитные заземления. Предложена номограмма для выбора характеристик предлагаемого устройства в зависимости от величины и условий натекания тока, материала электродов заземлений и других параметров.

5. Проведены испытания прототипов устройства для гальванического разделения катоднозащищаемых объектов и контуров защитного заземления в лабораторных условиях и на действующих промышленных площадках ГРС «Кузьмин Усад» и кранового узла СМГ «Бованенково-Ухта». Установлено, что путем увеличения числа диодов в диодной сборке устройства можно добиться повышения абсолютного значения потенциала «труба – земля» до нормируемого НТД значения и снизить величину силы тока, натекающего на защитное заземление, имеющее электрическую связь с катоднозащищаемым сооружением.

6. Разработан алгоритм выбора мероприятий по повышению эффективности защиты от коррозии подземных трубопроводов в условиях экранирования катодного тока защитными заземлениями электрооборудования на стадиях проектирования, проведения пусконаладочных работ и эксплуатации систем ЭХЗ промышленных площадок. Алгоритм выбора мероприятий по снижению экранирующего влияния, оказываемого контурами защитного заземления на распространение катодного тока, был использован при проектировании компрессорной станции «Дивенская» в рамках проекта «Развитие газотранспортных мощностей ЕСГ Северо-Западного региона, участок «Грязовец - КС Славянская».

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АСУ ТП	–	автоматизированная система управления технологическим процессом;
ВЛ	–	воздушная линия электропередачи
ГРС	–	газораспределительная станция;
ДКС	–	дожимная компрессорная станция;
ЕСГ	–	Единая система газоснабжения
ЗЗ	–	защитное заземление;
КИП	–	контрольно-измерительный пункт;
КПП СОД	–	камера пуска-приема средств очистки и диагностики;
КС	–	компрессорная станция;
КЭТКЗ	–	коэффициент экранирования тока катодной защиты;
ЛПУ	–	линейное производственное управление;
НПС	–	нефтеперекачивающая станция;
НТД	–	нормативно-техническая документация;
ПГА	–	протяженный гибкий анод;
ПНР	–	пусконаладочные работы;
ПУЭ	–	правила устройства электроустановок;
СКЗ	–	станция катодной защиты;
СМГ	–	система магистральных газопроводов;
УКЗ	–	установка катодной защиты;
ЭХЗ	–	электрохимическая защита.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агинея, Р. В. Совершенствование методов оценки эффективности работы средств электрохимической защиты газонефтепроводов / Р. В. Агинея, Ю. В. Александров // Практика противокоррозионной защиты. – 2012. – №1 (63). – С. 17-22.
2. Александров, Ю. В. Актуальные вопросы защиты от коррозии длительно эксплуатируемых магистральных газопроводов / Ю. В. Александров, Р. В. Агинея. – СПб. : «Недра», 2012. – 394 с.
3. Бойко, Н. Г. Теория и методы инженерного эксперимента: Курс лекций / Н. Г. Бойко, Т. А. Устименко. – Донецк : ДонНТУ, 2009. – 158с.
4. Болотнов, А. М. Компьютерное моделирование электрических полей катодной защиты подземных трубопроводов / А. М. Болотнов, Ф. З. Хисаметдинов // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2015. – №1. – С. 2-8.
5. Бэкман, В. Катодная защита от коррозии. Справочник / В. Бэкман, В. Швенк. – Москва : Металлургия, 1984. – 496 с.
6. Вероятностные методы исследования зависимостей в нефтяной и газовой промышленности: учебное пособие / И. И. Волкова, Е. В. Пластинина, О. М. Прудникова и др. – Ухта: УГТУ, 2014. – 135 с.
7. Винарский, М. С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях / М. С. Винарский, М. В. Лурье. – Киев: Техника, 1975. – 168 с.
8. Воробьев, А. Н. Актуальные вопросы обеспечения эффективной противокоррозионной защиты объектов ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород» / А. Н. Воробьев // Коррозия территории «НЕФТЕГАЗ». – 2014. – №3. – С. 66-70.

9. ВРД КТК 73-02-2013 Регламент по организации работ по контролю, техническому обслуживанию и ремонту средств электрохимической защиты нефтепровода КТК. – Москва : КТК, 2013. – 46 с.

10. ВСН 39-1.22-007-2002 Указания по применению вставок электроизолирующих для газопровода. – Москва : ИРЦ Газпром, 2002. – 9 с.

11. Глотов, И. В. Оптимизация режимов работы электрохимической защиты в условиях промышленных площадок / И. В. Глотов, Р. В. Агинец // Сборник научных трудов: материалы IX международной молодежной научной конференции (19-21 марта 2008 г.): в 3 ч.; ч. 2; под ред. Н.Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2008. – С. 179-181.

12. Глотов, И. В. Развитие методов локализации источников блуждающих токов / И. В. Глотов, Р. В. Агинец // Сборник научных трудов: материалы Международной молодежной научной конференции (21-23 марта 2007 г.) – Ухта: УГТУ, 2007. – С. 108-111.

13. Глотов, И. В. Экспериментальное определение математических моделей для оптимизации защиты подземных нефтегазопроводов несколькими катодными станциями / И. В. Глотов, Р. В. Агинец, В. Н. Юшманов // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2009. – № 8 – С. 18-22.

14. Городецкий, А. Ф. Полупроводниковые приборы / А. Ф. Городецкий, А. Ф. Кравченко. – Москва : Высшая школа, 1967. – 348 с.

15. ГОСТ 17516.1-90 Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам. – Москва : Стандартиформ, 2007. – 45 с.

16. ГОСТ 9.602-2016 Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. – Москва : Стандартиформ, 2016. – 93 с.

17. ГОСТ Р 50571.5.54-2013 Электроустановки низковольтные. Часть 5-54. Выбор и монтаж электрооборудования. Заземляющие устройства, защитные проводники и защитные проводники уравнивания потенциалов. – Москва : Стандартиформ, 2014. – 30 с.

18. ГОСТ Р 51164-98 Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии. – Москва : Стандартинформ, 1998. – 45 с.
19. Замалетдинов, И. И. Электрохимическая коррозия и защита металлов: учебное пособие / И. И. Замалетдинов. – Пермь : Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2010. – 152 с.
20. Запевалов, Д. Н. Повышение эффективности систем защиты от коррозии подземных магистральных газопроводов / Д. Н. Запевалов // Газовая промышленность. – 2015. – №5 (724). – С. 67-70.
21. Защита от коррозии протяженных металлических сооружений: справочник / В. И. Глазков, А. М. Зиневич, В. Г. Котик и др. – Москва : Недра, 1969. – 311 с.
22. Защита подземных металлических сооружений от коррозии: Справочник / И. В. Стрижевский, А. Д. Белоголовский, В. И. Дмитриев и др. – Москва : Стройиздат, 1990. – 303 с.
23. Защита трубопроводов от коррозии: том 2 : учебное пособие / Ф. М. Мустафин, Л. И. Быков, А. Г. Гумеров и др. – СПб.: Недра, 2007. – 708 с.
24. Зиневич, А. М. Защита трубопроводов и резервуаров от коррозии / А. М. Зиневич, В. М. Глазков, В. Г. Котик. – Москва : Недра, 1975. – 288 с.
25. Зубков, А. А. Математическая модель образования геомагнитно-индуцированного тока в протяженном изолированном трубопроводе / А. А. Зубков, С. С. Гуськов, Р. В. Агинеи // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2015. – №3. – С. 16-19.
26. Иваненков, В. В. Моделирование работы ЭХЗ методом конечных элементов [Электронный ресурс] / В. В. Иваненков, Р. Р. Гиззатуллин, К. М. Гумеров. – Нефтегазовое дело. – 2008. – № 2 – Режим доступа : http://ogbus.ru/authors/Ivanenkov/Ivanenkov_1.pdf.
27. Инструкция по оптимизации режимов работы УКЗ коммуникаций промплощадок / Н. А. Петров, А. С. Соколов, З. И. Нефедова и др. – Москва : ВНИИГАЗ, 1986. – 45 с.

28. Иоссель, Ю. Я. Математические методы расчета электрохимической коррозии и защиты металлов / Ю. Я. Иоссель, Г. Э. Кленов. – Москва : Металлургия, 1984. – 272 с.
29. Казаков, В. Ю. Планирование и организация эксперимента: учебно-методическое пособие / В. Ю. Казаков. – Томск: ТПУ, 2008. – 96 с.
30. Корзинин, В. Ю. Использование протяженных анодных заземлителей для электрохимической защиты нефтепроводов от коррозии / В. Ю. Корзинин // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2012. – №4(8). – С. 92-98.
31. Коротяев, А. Г. Влияние контуров защитных заземлений на уровень защищенности и ресурс системы электрохимзащиты площадных объектов / А. Г. Коротяев // Коррозия территории «НЕФТЕГАЗ». – 2016. – № 3 (35). – С. 60-62.
32. Кремер, Н. Ш. Теория вероятностей и математическая статистика : учеб. для вузов / Н. Ш. Кремер. – Москва : ЮНИТИ-ДАНА, 2000. – 543 с.
33. Кузнецова, Е. В. Математическое планирование эксперимента: учебно-методическое пособие / Е. В. Кузнецова. – Пермь : ПГТУ, 2011. – 35 с.
34. Маньков, В. Д. Защитное заземление и защитное зануление электроустановок: справочник / В. Д. Маньков, С. Ф. Заграничный. – СПб. : Политехника, 2005. – 400 с.
35. Методические указания по проведению сертификационных испытаний (обследований) противокоррозионной защиты подземных трубопроводов. – Москва : ООО «НефтегазТехЭкспертиза», 2012. – 57 с.
36. Методы контроля и измерений при защите подземных сооружений от коррозии / Н. П. Глазов, И. В. Стрижевский, А. М. Калашникова и др. – Москва : Недра, 1978. – 216 с.
37. Налимов, В. В. Теория эксперимента / В. В. Налимов. – Москва : Наука, 1971. – 208 с.
38. Никитенко, Е. А. Монтер по защите подземных трубопроводов от коррозии : учебник / Е. А. Никитенко, Я. М. Эдельман. – Москва : Недра, 1981. – 256 с.

39. Никулин, С. А. Оптимизация режимов установок электрохимической защиты / С. А. Никулин, Е. Л. Карнавский // Системы управления и информационные технологии. – 2014. – №3 (57). – С. 64-68.
40. Новицкий, П. В. Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.
41. Основы метрологии и электрические измерения: учебник для вузов / Б. Я. Авдеев, Е. М. Антонюк, Е. М. Душин и др.; под ред. Е. М. Душина. – 6-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1987. – 480 с.
42. Основы проектирования электрохимической защиты от коррозии подземных и подводных объектов транспорта нефти и газа: учебное пособие / под ред. д.т.н., профессора Агинеи Р.В. – СПб. : Недра, 2016. – 198 с.
43. Пат. 104394 Российская Федерация, МПК H02H9/04. Устройство для разделения контуров анодных заземлителей катодной защиты и контуров защитного заземления и молниезащиты / З. Х. Ягубов, И. М. Забалуев, И. М. Мартынов; заявитель и патентообладатель: ГОУ ВПО УГТУ. – № 2010125417/07; Заявл. 21.06.2010; Оpubл. 10.05.2011.
44. Пат. 2555301 Российская Федерация, МПК C23F13/04 Способ регулирования параметров катодной защиты сложноразветвленных подземных трубопроводов / Р. В. Агинеи, А. Ф. Пужайло, С. В. Савченков, В. М. Югай, Р. А. Сардтдинов, В. А. Воробьев; патентообладатели АО «Гипрогазцентр, ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород». – Заявл. 03.03.2014; Оpubл. 10.07.2015.
45. Пат. 2588346 Российская Федерация, МПК F16L25/02 Электроизолирующая вставка / А. А. Гаврилин, С. П. Невзоров, К. А. Климович; заявитель и патентообладатель: ООО «АДЛ Групп». – № 2015127584/06, Заявл. 09.07.2015; Оpubл. 27.06.2016.
46. Пачурин, Г. В. Обеспечение электробезопасности газоперекачивающих агрегатов / Г. В. Пачурин, А. Е. Дерябин, С. М. Шевченко // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2017. – № 1-2. – С. 211-214.

47. Полупроводниковые приборы: диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы: справочник; под общ. ред. Н. Н. Горюнова. – Москва : Энергоатомиздат, 1983. – 744 с.

48. Правила устройства электроустановок, 7-е изд. – Москва : Изд-во НИЦ ЭНАС, 2003. – 176 с.

49. Притула, В. А. Электрическая защита от коррозии подземных металлических сооружений / В. А. Притула. – Москва : Госэнергоиздат, 1958. – 239 с.

50. Противокоррозионная защита трубопроводов и резервуаров: учебник для вузов / М. В. Кузнецов, В. Ф. Новоселов, П. И. Тугунов и др. – Москва : Недра, 1992. – 238 с.

51. Прохоров, А. А. Опыт проектирования защиты от коррозии подземных трубопроводов на площадках НПС / А. А. Прохоров, В. В. Радченко, Р. А. Жуков // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов Том 7. – 2017. – № 1. – С. 82-86.

52. Р Газпром 9.4-006-2009 Защита от коррозии. Инструкция по электрометрическому обследованию подземных технологических трубопроводов компрессорных станций. – Москва : ООО «Газпром экспо», 2010. – 29 с.

53. РД 29.200.00-КТН-048-14 Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Обследование коррозионного состояния технологических трубопроводов и резервуаров. Порядок выполнения и требования к отчетной документации. – Москва : ОАО «АК«Транснефть», 2014. – 139 с.

54. РД 91.020.00-КТН-259-10 Нормы и правила проектирования заземляющих устройств объектов магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов организаций системы ОАО «АК«Транснефть». – Москва : ОАО «АК«Транснефть», 2010. – 165 с.

55. РД-91.020.00-КТН-234-10 Нормы проектирования электрохимической защиты магистральных трубопроводов и сооружений НПС. – Москва : ОАО «АК«Транснефть», 2010. – 71с.

56. Реализация методов оптимального регулирования режимов работы станций катодной защиты на действующем магистральном газопроводе / С. А. Никулин, Е. А. Спиридович, Р. В. Агинеи и др. // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2015. – №3(49). – С. 38-43.

57. Ровдо, А. А. Полупроводниковые диоды и схемы с диодами / А. А. Ровдо. – Москва : Лайт ЛТД, 2000. – 288 с.

58. Рузич, Е. Н. Влияние подготовительных мероприятий согласно DIN 30676 на катодную защиту трубопровода / Е. Н. Рузич, В. Г. Киселев // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. Т. 23. – 2017. – № 2. – С. 101–108.

59. Руководство по эксплуатации систем противокоррозионной защиты трубопроводов. – Москва: ВНИИГАЗ, 2004. – 300 с.

60. Селина, Л. А. Проектирование средств электрохимзащиты на СМГ «Бованенково-Ухта». Итоги строительства и пусконаладочных работ / Л. А. Селина, И. Г. Телетьен // Коррозия территории «НЕФТЕГАЗ». – 2016. – № 3 (25). – С. 76- 79.

61. Семенова, И. В. Коррозия и защита от коррозии: учебное пособие / И. В. Семенова, Г. М. Флорианович, А. В. Хорошилов. - 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2010. - 416 с.

62. Скуридин, Н. Н. Определение оптимальных режимов работы станций катодной защиты системы электрохимической защиты магистральных трубопроводов / Н. Н. Скуридин, А. А. Кузнецов, Д. А. Неганов, С. Ю. Глушков // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2011. – № 4. – С. 90-94.

63. СП 245.1325800.2015 Защита от коррозии линейных объектов и сооружений в нефтегазовом комплексе. Правила производства и приемки работ. – Москва : Минстрой России. – 41 с.

64. Способ снижения затрат электроэнергии на защиту подземных металлоконструкций / Н. Д. Цхадая, С. В. Крючков, А. Е. Жуйков и др. // Известия

Коми научного центра УРО РАН. – Сыктывкар: КНЦ УРО РАН, 2014. – №4(20). – С. 91-93.

65. Справочник по полупроводниковым приборам и их аналогам; под ред. А. М. Пыжевского. – Москва : АО «Роби», 1992. – 316 с.

66. СТО Газпром 2-1.12-802-2014 Организация пусконаладочных работ на объектах ОАО «Газпром». Основные положения. – Москва : ОАО «Газпром». – 53 с.

67. СТО Газпром 2-3.5-454-2010 Правила эксплуатации магистральных газопроводов. – Москва : ОАО «Газпром». – 241 с.

68. СТО Газпром 9.0-001-2009 Защита от коррозии. Общие положения. – Москва : ОАО «Газпром». – 19 с.

69. СТО Газпром 9.2-002-2009 Защита от коррозии. Электрохимическая защита от коррозии. Основные требования. – Москва : ОАО «Газпром». – 23 с.

70. СТО Газпром 9.2-003-2009 Защита от коррозии. Проектирование электрохимической защиты подземных сооружений. – Москва : ОАО «Газпром». – 48 с.

71. Телетьен, И. Г. Особенности построения системы электрохимической защиты при наличии заземленных сооружений / И. Г. Телетьен, Н. Ю. Патрышев // Коррозия территории «НЕФТЕГАЗ». – 2014. – № 1 (27). – С. 76-77.

72. Тихомиров, Е. Н. Монтаж, наладка и эксплуатация устройств электрохимической защиты / Е. Н. Тихомиров. – Ленинград : Недра, 1976. – 130 с.

73. Ткаченко, В. Н. Анализ поля токов катодной защиты трубопроводной сети / В. Н. Ткаченко // Защита металлов. – 2006. – №5. – С.132-135.

74. Ткаченко, В. Н. Электрохимическая защита трубопроводных сетей / В. Н. Ткаченко. – Москва : Стройиздат, 2004. – 320 с.

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

76. Фатрахманов, Ф. К. Концепция и пути оптимизации катодной защиты коммуникаций промплощадок / Ф. К. Фатрахманов // Современные проблемы трубопроводного транспорта газа. – Москва : ВНИИГАЗ, 1998. – С. 408-411.

77. Фатрахманов, Ф. К. Опыт оптимизации катодной защиты сложных коммуникаций промплощадок / Ф. К. Фатрахманов // Материалы международного научно-технического семинара по проблемам защиты от коррозии подземных сооружений РАО «Газпром». – Москва : ИРЦ Газпром, 1996. – С 39-45.

78. Фатхуллин, А. А. Электроизолирующие соединения в системах электрохимической защиты трубопроводов. Конструкции, моделирование, расчеты: монография / А. А. Фатхуллин, Р. А. Кайдриков, Б. Л. Журавлев, В. Э. Ткачева. – Казань, КНИТУ, 2011. – 176 с.

79. Фуркин, А. В. Совершенствование методик идентификации и оценки опасности блуждающих токов, воздействующих на магистральные нефтегазопроводы: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 25.00.19 / Алексей Владимирович Фуркин. – Ухта, 2012. – 26 с.

80. Электроизмерения на подземных газонефтепроводах: методические указания / Р. В. Агинеи, А. С. Кузьбожев, И. В. Шишкин и др. – Ухта : УГТУ, 2007. – 50 с.

81. Эффективность противокоррозионной защиты сложноразветвленных газопроводов промышленных площадок КС / Ю. В. Александров, И. В. Глотов, Р. В. Агинеи и др. // Газовая промышленность. – 2010. – №2. – С. 52-54.

82. Ягубов, З. Х. Оптимизационные методы контроля и управления объектами с рассредоточенными элементами: монография / З. Х. Ягубов. – Ухта : УГТУ, 2014. – 132 с.

83. BS EN 12954:2001 Cathodic protection of buried or immersed metallic structures. General principles and application for pipelines. Approved 01.12.2000. – Brussels, European committee for standardization, 2001. – 34 p.

84. BS EN 14505:2005 Cathodic protection of complex structures. – Approved 15.03.2005. – Brussels, European committee for standardization, 2005. – 28 p.

85. DIN 12954:2001-04 Kathodischer korrosionsschutz von metallischen anlagen in böden und wässern. Grundlagen und anwendung für rohrleitungen, 2001. – 29 s.

86. Dong, L. Compatibility analysis of regional CP system and electrical grounding system in oil & gas stations / L. Dong, W. Cui, Y. Yang, X. Wang, F. Gu // CORROSION 2017. – OnePetro : NACE International, 2017.
87. Ghesquiere, J. D. Cathodic protection and zinc grounding in industrial plant construction / J. D. Ghesquiere // CORROSION 1961. – №17(3) – P. 149-153.
88. Gummow, R. A. Cathodic protection current requirements for electrical grounding materials / R. A. Gummow // CORROSION 2004. – New Orleans, TX : NACE International, 2004.
89. Humedahl, G. Real-time monitoring affects cathodic protection / G. Humedahl // Materials performance. – 2006. – №6. – P. 16-19.
90. Husock, B. The effect of electrical grounding systems on underground corrosion and cathodic protection / B. Husock // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part II: Applications and Industry. – Cleveland : IEEE, 1960.
91. Kirkpatrick, E. L. Copper grounding and cathodic protection in nuclear facilities / E. L. Kirkpatrick // CORROSION 2011. – Houston, TX : NACE International, 2011.
92. Kirkpatrick, E. L. Copper grounding systems have a negative effect on cathodic protection in production facilities / E. L. Kirkpatrick, M. Shamim / E. L. Kirkpatrick // CORROSION 2000. – San Antonio, TX : NACE International, 2000.
93. Kirkpatrick, E. L. Effects of electrical grounding on corrosion / E. L. Kirkpatrick // CORROSION 79. – Houston, TX : NACE International, 1979.
94. Kirkpatrick, E. L. Report of cathodic protection and grounding study on oil and gas production facilities in Pakistan / E. L. Kirkpatrick // ELK Engineering Associates, 1997.
95. Kirkpatrick, E. L. The conflict between copper grounding systems and cathodic protection systems / E. L. Kirkpatrick // Cathodic and anodic protection. Materials performance, 2002. – P. 22-39.
96. Mitolo, M. Interactions between cathodically protected pipelines and grounding systems / M. Mitolo, A. Pettinger // Industry Applications IEEE Transactions. – vol. 52 – 2016. – P. 3694-3698.

97. NACE Standard RP0193-2001 External cathodic protection of on-grade carbon steel storage tank bottoms. – Houston, Texas: NACE International, 2001. – 24 p.
98. NACE Standard SP0169-2007 Control of external corrosion on underground or submerged metallic piping systems. – Houston, Texas : NACE International, 2007. – 36 p.
99. Russell, W. B. Safe electrical isolation of cathodically protected pipe / W. B. Russell // Pipeline&gas industry. – 1997. – №6 – P. 35-37.
100. SAES-P-111 Grounding. Engineering Standard. – Saudi Aramco DeskTop Standarts, 2004. – 24 p.
101. SAES-X-400 Cathodic protection of buried pipelines. – Saudi Aramco DeskTop Standarts, 2005. – 28 p.
102. SAES-X-600 Cathodic protection of plant facilities. – Saudi Aramco DeskTop Standarts, 2007. – 34 p.
103. Switzer, W. K. Practical guide to electrical grounding / W. K. Switzer. – Ohio : ERICO, 1999. – 124 p.
104. Trimble, W. L. The conflicts and solutions to complying with the grounding revisions of the 2005 National electrical code® for cathodically protected facilities / W. L. Trimble, E. E. Guidry // Petroleum and Chemical Industry Technical Conference, 2007. – Calgary : IEEE, 2007.

ПРИЛОЖЕНИЕ А



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе
ФГБОУ ВО «УГТУ»

Л. А. Кравцова

«20» марта 2018 г.

АКТ

**о внедрении в учебный процесс
результатов диссертационного исследования, выполненного
Исуповой Екатериной Владимировной на тему
«ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ
ПОДЗЕМНЫХ НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ НА ТЕРРИТОРИИ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЛОЩАДОК»**

Настоящим актом подтверждается факт введения с 12.02.2018 результатов, полученных в ходе выполнения диссертационного исследования, в образовательный процесс, реализуемый ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет» по направлению подготовки 21.03.01 «Нефтегазовое дело» (уровень бакалавриата) в рамках дисциплин «Противокоррозионная защита» и «Пусконаладочные работы при сооружении систем ЭХЗ», по направлению подготовки 21.04.01 «Нефтегазовое дело» (уровень магистратуры) в рамках дисциплины «Электрохимические методы защиты».

Методика проведения экспериментальных лабораторных исследований используется при проведении лабораторных работ: «Исследование влияния защитных заземлений электроустановок на показатели ЭХЗ трубопроводов», «Регулирование параметров СКЗ при наличии экранирующего воздействия со стороны контуров защитного заземления электроустановок». В рамках практических занятий решаются задачи по оценке экранирующего влияния, оказываемого контурами защитного заземления электроустановок на параметры ЭХЗ путем определения коэффициента экранирования тока катодной защиты.

Директор ИГНиТТ

Н. П. Демченко

Начальник учебного отдела

А. Б. Мяндина

Начальник учебно-методического
управления

Д. В. Евстифеев

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

УТВЕРЖДАЮ

Главный инженер АО «Газпрогазцентр»

С. В. Савченков

2018 г.

АКТ

внедрения научных результатов, полученных Исуповой Е. В. при выполнении диссертационного исследования на тему
«ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ ПОДЗЕМНЫХ НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ НА ТЕРРИТОРИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЛОЩАДОК»

Комиссия в составе:

- 1) главный инженер проектов С. В. Ларцов, д-р техн. наук, профессор;
- 2) начальник отдела НИОКР В. В. Мусонов, канд. техн. наук;
- 3) инженер I категории отдела проектирования систем ЭХЗ С. А. Никулин, канд. техн. наук

удостоверяет, что научные результаты, полученные Исуповой Екатериной Владимировной, а именно алгоритм выбора мероприятий по снижению экранирующего влияния, оказываемого контурами защитного заземления на распространение катодного тока, были использованы при проектировании компрессорной станции «Дивенская» в рамках проекта «Развитие газотранспортных мощностей ЕСГ Северо-Западного региона, участок «Грязовец - КС Славянская».

Использование алгоритма на стадии проектирования позволило определить оптимальные с точки зрения эффективной противокоррозионной защиты трубопроводов координаты расположения СКЗ и координаты расположения точечных защитных заземлений и контура защитного заземления, позволяющие минимизировать потребляемую станциями электроэнергию и повысить срок службы анодных заземлений, а также обеспечить необходимый резерв запаса преобразователей СКЗ по току и мощности. Кроме того, с целью обеспечения равномерного распределения потенциала «труба-земля» на рассматриваемом участке подземного трубопровода было принято решение об использовании в составе системы катодной защиты, обеспечивающий противокоррозионную защиту подземных стальных коммуникаций КС «Дивенская», комбинированной системы анодных заземлений: протяженные гибкие аноды (ПГА), укладываемые в траншею рядом с газопроводом в сочетании с глубинными анодными заземлителями.

Помимо этого, при проектировании объекта были приняты соответствующие меры по ограничению влияния контуров защитного заземления на эффективность катодной защиты подземных трубопроводов:

1. Исключение размещения контура защитного заземления на расстоянии от подземных технологических трубопроводов, подлежащих катодной защите, менее чем на 3 м.
2. Исключение размещения защитного заземления между протяженным/распределенным анодным заземлением и катоднозащищаемым сооружением.

Главный инженер проектов

С. В. Ларцов

Начальник отдела НИОКР

В. В. Мусонов

Инженер I категории отдела проектирования систем ЭХЗ

С. А. Никулин