

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

КОМПЛЕКС ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ АНТИКОРРОЗИЙНОЙ ЗАЩИТЫ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

А. Е. Запольский, Ю. В. Крышнев

*Гомельский государственный технический университет
имени П. О. Сухого, Республика Беларусь*

Рассмотрены основные проблемы антикоррозийной защиты подземных магистральных трубопроводов. Проведен анализ энергетической эффективности существующих станций катодной защиты (СКЗ) и факторов, вызывающих неравномерность защитного потенциала. Предложен комплекс технических решений, включающий переход к инверторным СКЗ с многоканальным импульсным регулированием, применение альтернативных источников энергии (солнечных панелей и ветрогенераторов), организацию резервированного канала телеметрии с использованием коротковолновой цифровой радиосвязи и внедрение нейросетевых алгоритмов для прогнозирования отказов и адаптивного управления защитой. Приводятся расчетные соотношения для выбора фотоэлектрических преобразователей и определения параметров изоляции. Реализация предложенных мер позволяет повысить равномерность распределения защитного потенциала, снизить энергопотребление и обеспечить автономность СКЗ на удаленных участках трасс.

Ключевые слова: катодная защита, магистральный трубопровод, энергоэффективность, инверторная станция, солнечная панель, коротковолновая радиосвязь, искусственный интеллект, нейронная сеть.

COMPLEX OF TECHNICAL SOLUTIONS FOR INCREASING ENERGY EFFICIENCY AND AUTONOMY OF CATHODIC PROTECTION SYSTEMS FOR MAIN PIPELINES

A. Ya. Zapolski, Yu. V. Kryshneu

Sukhoi State Technical University of Gomel, Republic of Belarus

The main problems of anticorrosion protection of underground main pipelines are considered. An analysis of the energy efficiency of existing cathodic protection stations (CPS) and factors causing non-uniformity of protective potential is carried out. A set of technical solutions is proposed, including the transition to inverter CPS with multichannel pulse regulation, the use of alternative energy sources (solar panels and wind generators), the organization of a redundant telemetry channel using short-wave digital radio communication, and the introduction of neural network algorithms for failure prediction and adaptive protection control. Calculation relationships for selecting photovoltaic converters and determining insulation parameters are given. The implementation of the proposed measures will improve the uniformity of distribution of protective potential, reduce energy consumption and ensure the autonomy of the CPS in remote sections of the route.

Keywords: cathodic protection, main pipeline, energy efficiency, inverter station, solar panel, shortwave radio communication, artificial intelligence, neural network.

Трубопроводный транспорт является критически важным элементом экономики Республики Беларусь, обеспечивая транзит нефти, природного газа и нефтепродук-

тов. Стоит отметить, что значительная часть существующей инфраструктуры эксплуатируется длительное время.

Основной причиной отказов и аварийных ситуаций является коррозия – постепенный электрохимический или химический процесс разрушения металлоконструкций при взаимодействии с агрессивной окружающей средой, вызванный термодинамической неустойчивостью металлов, которые в естественной среде находятся в окисленном состоянии. Коррозия классифицируется по механизму ее прохождения, характеру разрушения, типу окружающей среды.

Классификация по механизму прохождения коррозии является определяющей: химический и электрохимический подтип. Степень активности металлов зависит от их способности вытеснять водород из воды и кислотных растворов [1].

Химическая коррозия определяется площадью контакта «металл–среда (не электролит)», продолжительностью взаимодействия, температурой, качеством и видом обработки металлической поверхности. Грунты делятся на 3 степени коррозионной активности – высокую (при $\rho \leq 20 \text{ Ом} \cdot \text{м}$: торфяники и влажные черноземы), среднюю (при $\rho = 20\text{--}50 \text{ Ом} \cdot \text{м}$: торфяники и черноземы с низкой влажностью), низкую (при $\rho \geq 20 \text{ Ом} \cdot \text{м}$: песок, глина, бедный чернозем) [2].

Электрохимическая коррозия связана с разрушением металла под действием гальванических элементов, возникающих в коррозионно-активной среде. Основным элементом электрохимической коррозии является электролит, который при взаимодействии «металл–металл–электролит» или «металл–сплав–электролит» приводит к возникновению в замкнутом гальваническом элементе разрушающего ионного тока: металл с меньшим окислительно-восстановительным потенциалом разрушается, а с большим – сохраняется.

По характеру прохождения коррозии делится на полную, общую и локальную. Первые 2 вида являются наиболее критичными, так как могут полностью вывести объект из строя.

При этом скорость коррозии на разных участках трубопровода отличается, что приводит к неоднородному износу объекта на разных его участках, что делает коррозию сложным процессом, на который наибольшее влияние оказывает взаимодействие «объект – внешняя среда».

Способы антикоррозионной защиты можно разделить на активные и пассивные. К активным методам относят электрохимическую защиту, к пассивным – изоляционные покрытия. Принцип реализации активной защиты в виде конфигурации станции катодной защиты продемонстрирован на рис. 1.

При катодной защите трубопровода положительный полюс источника постоянного тока (анод) подключается к специальному анодному заземлителю, а отрицательный (катод) – к защищаемому сооружению [2].

Принцип действия катодной защиты аналогичен электролизу. Под воздействием электрического поля начинается движение электронов от анодного заземлителя к защищаемому сооружению. Теряя электроны, атомы металла анодного заземлителя переходят в виде ионов в раствор почвенного электролита, при этом анодный заземлитель разрушается, что определяет его второе название – «жертвенный анод». На катоде (трубопроводе) наблюдается избыток свободных электронов (восстановление металла защищаемого сооружения).

Реализация мероприятий по защите объектов нефтепроводного транспорта требует значительных экономических затрат, в первую очередь – затрат на электроэнергию для систем активной противокоррозионной защиты, главным звеном которых являются станции катодной защиты (СКЗ).

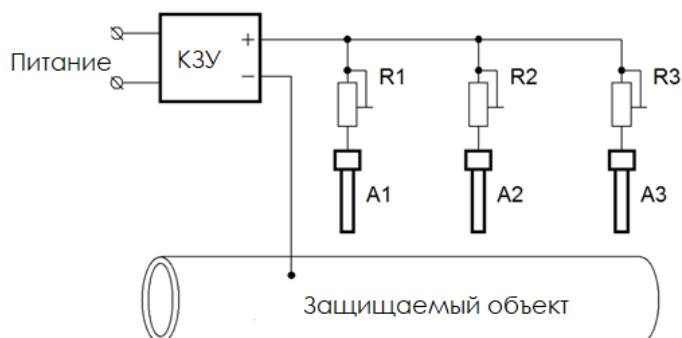


Рис. 1. Технологическая схема электрохимической защиты с распределенными анодами:
КЗУ – катодное защитное устройство; R1, R2, R3 – регулировочные сопротивления; A1, A2, A3 – анодные заземлители

При этом действующие нормативы (ГОСТ 9.602-2016, СТБ ГОСТ Р 51164-2001) оставляют нерешенными ряд проблем [3, 4]:

- 1) отсутствие гарантий равномерного распределения защитного потенциала по поверхности большой протяженности;
- 2) отсутствие требований по автоматической подстройке под постоянно изменяющиеся параметры эквивалентного контура протекания тока защиты (сезонная и микробиологическая динамика сопротивления грунта, состояние жертвенного анода и др.);
- 3) отсутствие учета переходных процессов нарастания и спада поляризации;
- 4) отсутствие учета ускоренного коррозионного разрушения металлических конструкций на ответвляемых от основного защищаемого нефтепровода участках;
- 5) отсутствие критериев совместимости параметров электрохимической защиты с материалами трубопровода и его защитного покрытия;
- 6) отсутствие требований по энергоэффективности применяемых технических решений и др.

Исходя из этого актуальной задачей является разработка комплекса технических решений по антикоррозионной защите магистральных трубопроводов.

Комплексное решение должно включать меры, концентрирующие в себе современные аппаратные и программные средства, направленные на повышение энергетической эффективности и автономности СКЗ при одновременном обеспечении равномерной катодной защиты подземных магистральных трубопроводов.

Решение данных проблем возможно комплексным путем: увеличением количества СКЗ и анодных заземлений, изменением установленной мощности и режимов работы станций и др. Перспективными являются применение импульсного тока электрохимической защиты, широкое использование природных источников энергии для формирования защитных потенциалов, пересмотр концепций установки анодных заземлителей с целью повышения интегральной эффективности защиты подземного трубопровода в целом.

Существующие нормативные документы не содержат прямого указания на конкретные расстояния между станциями, так как этот параметр является расчетной величиной. Он зависит от многих факторов: диаметра и толщины стенки трубы, сопротивления изоляционного покрытия, удельного сопротивления грунта и силы тока

станций. Однако именно СТБ ГОСТ Р 51164-2001 задает общие требования (например, к величине защитного потенциала), которые используются при проектировании для определения оптимального количества и мест установки станций электрохимической защиты.

Разработка и внедрение данного комплекса позволит увеличить срок службы существующих и новых нефтепроводов, снизить затраты на их обслуживание и ремонт.

Станции катодной защиты по типу силового преобразователя различают выпрямительные, тиристорные, инверторные.

Трансформаторные станции с тиристорными преобразователями обладают простотой конструкции и ремонтпригодностью, однако характеризуются: низким коэффициентом полезного действия (КПД) – 60–80 % в номинальном режиме, при этом реальный КПД значительно падает при снижении выходной мощности.

Инверторные СКЗ обладают КПД на уровне 90–93 % на номинальной мощности. За счет перенесения трансформации напряжений в высокочастную область они имеют меньшие габариты и вес, а также обеспечивают низкий уровень пульсаций выходного тока. Они технически совершеннее тиристорных станций, однако имеют более сложную схемотехнику.

Зависимость КПД различных по технической реализации СКЗ от коэффициента их загрузки показана на рис. 2.

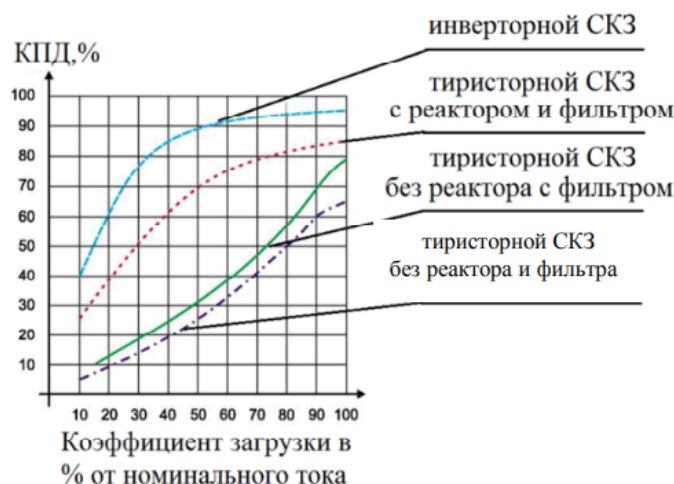


Рис. 2. Зависимость КПД различных по технической реализации СКЗ от коэффициента их загрузки [5]

Из рис. 2 видно, что для достижения наибольшей энергоэффективности, режим эксплуатации СКЗ любого типа по нагрузке должен приближаться к 100 %. Однако необходимо подчеркнуть, что с учетом требований запаса по мощности, реальная установленная мощность эксплуатируемых СКЗ значительно (в 8–10 раз) превышает нормативную, необходимую для поддержания заданного режима работы. Это приводит к снижению КПД станций.

Мощность СКЗ зависит от таких критериев, как сезонно-зависимое удельное электрическое сопротивление грунта и состояние основных системообразующих элементов станции.

Удельное электрическое сопротивление является системой сопротивлений, в которую входит характеристическое входное сопротивление трубопровода, сопротивление соединительных проводов и сопротивление анодных заземлителей.

Характеристическое входное сопротивление трубопровода также определяется как система сопротивлений, которую образует продольное сопротивление металла трубы, переходное сопротивление изоляции и сопротивление грунта.

В процессе эксплуатации переходное сопротивление изоляции падает по экспоненциальному закону, сопротивление анодных заземлителей монотонно возрастает вследствие образования на них коррозионных отложений и их постепенного растворения в грунте; удельное сопротивление грунта испытывает сезонные колебания, достигающие его абсолютной величины. При фиксированных настройках тока или напряжения СКЗ, указанные вариации приводят к неравномерности защитного потенциала и появлению локальных участков с недопустимо низкой защищенностью.

Графики временных зависимостей сопротивлений, которые оказывают влияние на защитный потенциал, показаны на рис. 3, график изменения сопротивления изоляции в зависимости от времени ее использования показан на рис. 4.

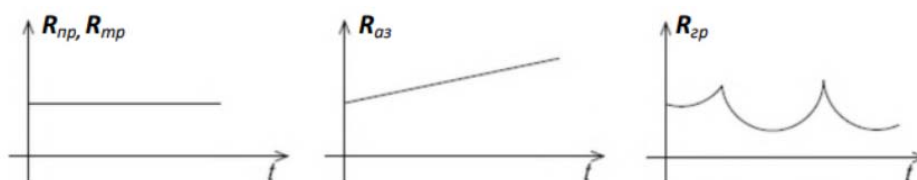


Рис. 3. Графики зависимостей сопротивлений, которые оказывают влияние на защитный потенциал, от времени:

$R_{пр}$ – сопротивление проводов; $R_{аз}$ – сопротивление анодных заземлителей; $R_{гр}$ – сопротивление грунта (вдоль трубопровода)

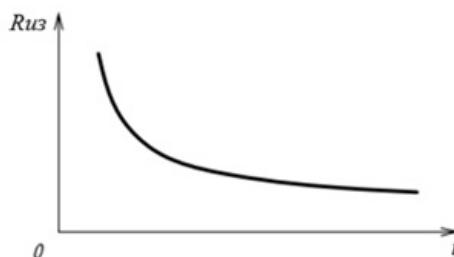


Рис. 4. График изменения сопротивления изоляции в зависимости от времени ее использования

Таким образом, первоочередными задачами совершенствования являются переход на энергоэффективные инверторные преобразователи с возможностью оперативного регулирования по состоянию объекта и применение источников питания, обеспечивающих автономность СКЗ на удаленных участках трасс.

Базовый силовой блок должен быть построен на инверторной (бестрансформаторной) схеме, выполненной на MOSFET-транзисторах с минимальным временем переключения и управляемой микропроцессорным устройством управления (МПУУ). Принцип реализации стабилизатора анодного тока для СКЗ телемеханического типа показан на рис. 5, реализация СКЗ данного типа с микропроцессорным управляющим устройством – на рис. 6.

Для снижения динамических потерь применяются высокоскоростные драйверы, а для минимизации статических потерь в выпрямителе – синхронное выпрямление на диодах Шоттки. Омические потери в обмотках трансформаторов минимизируют-

ся за счет высокой частоты преобразования (десятки кГц), что позволяет резко сократить число витков и использовать проводники увеличенного сечения.

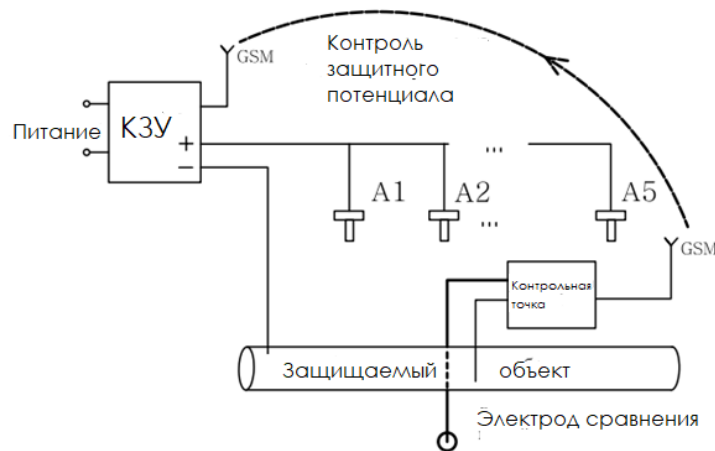


Рис. 5. Принцип реализации стабилизатора анодного тока для СКЗ телемеханического типа:

КЗУ – катодное защитное устройство; А1–А5 – глубинные анодные заземлители

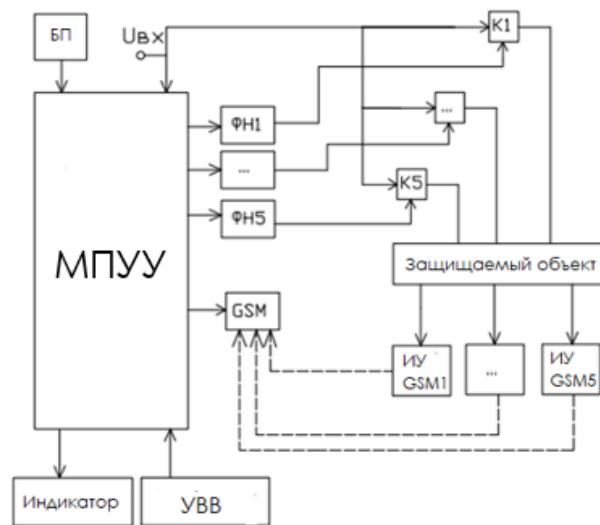


Рис. 6. СКЗ с микропроцессорным управляющим устройством:

МПУУ – микропроцессорное устройство управления;

К1–К5 – каналы стабилизатора-делителя тока;

ИУ1–ИУ5 – измерительные усилители; БП – блок питания;

ФН1–ФН5 – формирователи напряжения;

GSM – телекоммуникационные модули формата GSM

Одним из ключевых элементов системы является многоканальный импульсный стабилизатор анодного тока. МПУУ через измерительные усилители непрерывно контролирует величину защитного потенциала на каждом глубинном анодном заземлителе и индивидуально регулирует ток каждого канала таким образом, чтобы выровнять потенциал по всей защищаемой поверхности. Регулирование ведется с компенсацией омической составляющей методом кратковременного отключения то-

ка, что позволяет выделить поляризационный потенциал, непосредственно влияющий на скорость коррозии. Встроенный GSM-модуль обеспечивает передачу телеметрической информации на диспетчерский пункт. Структурная схема устройства мониторинга защитного потенциала с микроконтролерным управлением и дистанционным каналом связи [6, 7] показана на рис. 7.

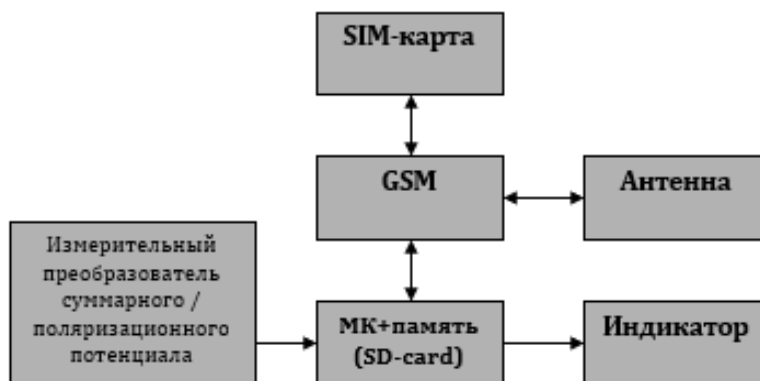


Рис. 7. Структурная схема устройства мониторинга защитного потенциала с микроконтролерным управлением и дистанционным каналом связи

Значительная протяженность трубопроводов и удаленность многих участков от линий электропередачи делают актуальным перевод СКЗ на автономное энергоснабжение с использованием фотоэлектрических панелей (ФЭП) и ветрогенераторов [8, 9].

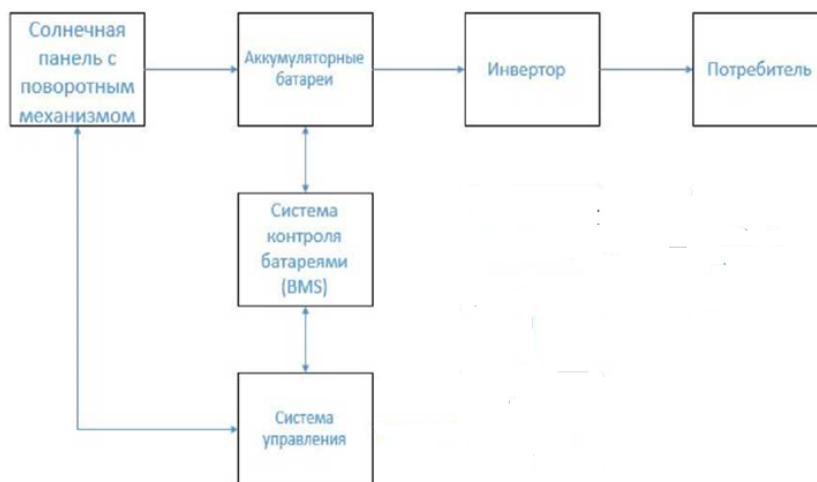


Рис. 8. Структурная схема автономного питания с использованием солнечных панелей с поворотным механизмом

Суточная энергия, вырабатываемая панелью, зависит от суточной инсоляции, приходящейся на горизонтальную поверхность с учетом реальных погодных условий и КПД фотоэлектрического преобразователя [9].

Для увеличения отбора мощности в условиях переменной освещенности целесообразным является использование МРРТ-контроллера (Maximum Power Point Tracking), который в реальном времени смещает рабочую точку ФЭП в точку максимальной мощности [10].

Структурная схема автономного питания с использованием солнечных панелей с поворотным механизмом показана на рис. 8, реализация различных механизмов поворота солнечных панелей относительно Солнца – на рис. 9.

Дополнительное повышение эффективности достигается применением систем автоматического позиционирования панелей: одноосевых или двухосевых трекеров, а также алгоритмических систем, рассчитывающих азимут и угол места Солнца по географическим координатам и времени без использования внешних датчиков.

Комбинированное использование ФЭП и малых ветроустановок совместно с буферными накопителями энергии позволяет сгладить суточные и сезонные колебания генерации и обеспечить гарантированное питание СКЗ.

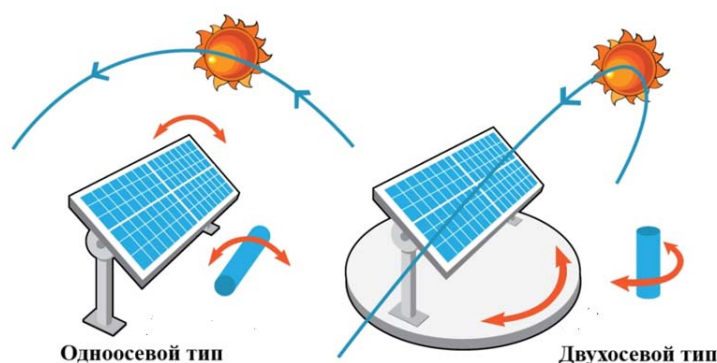


Рис. 9. Реализация различных механизмов поворота солнечных панелей относительно Солнца: одноосевой и двухосевой механизм

Для реализации удаленного мониторинга и управления СКЗ предлагается двух-уровневая система связи. Основной канал организуется на базе сотовой сети, что обеспечивает высокую скорость передачи данных о защитных потенциалах, состоянии оборудования и тревожных событиях. Однако зависимость от инфраструктуры и операторов связи делает этот канал уязвимым в аварийных ситуациях и на участках с неустойчивым покрытием.

В качестве резервного и полностью автономного канала предлагается использование цифровой коротковолновой (КВ) радиосвязи. Выполненный анализ условий распространения декаметровых волн с учетом поверхностной и пространственной составляющих показал, что оптимальным для организации связи на расстояниях от десятков до первых сотен километров в любое время суток является 40-метровый диапазон (7,0–7,2 МГц). Он практически не имеет «мертвой зоны» и позволяет передавать информацию при относительно низкой мощности передатчика. Для небольших расстояний допустимо применение 80-метрового диапазона. Механизм распространения радиоволн показан на рис. 10.

Передача данных может вестись с использованием узкополосных цифровых протоколов (PSK31, Olivia, FT8), обеспечивающих высокую помехоустойчивость при малом отношении сигнал/шум.

Предложенный КВ-канал обеспечивает доставку на диспетчерский пункт контрольных сигналов (срабатывание защит, несанкционированный доступ, переход на резервное питание), результатов измерения защитного потенциала и состояния электродов сравнения, а также общего энергопотребления системы. Таким образом, достигается полная автономность информационного обмена, не зависящая от функционирования внешней телекоммуникационной инфраструктуры [11].



Рис. 10. Механизм распространения радиоволн

Поток данных, поступающих от распределенной системы контрольно-измерительных пунктов, содержит скрытые закономерности, отражающие динамику деградации изоляции, сезонные тренды сопротивления грунта и предвестники отказов оборудования. Для оперативной обработки этого потока и выработки управляющих воздействий предлагается применение глубоких нейронных сетей [12].

Для решения задачи прогнозирования образования локальных участков недозащиты и оценки остаточного ресурса изоляционного покрытия могут использоваться нейросетевые модели, обученные на исторических данных о распределении токов и потенциалов вдоль трассы, температуре, влажности, химическом составе грунта и маркерных событиях (результаты шурфовок, данные о ремонтах). Сеть способна выявлять аномалии и предсказывать развитие дефектов, что позволяет перейти от плановых ремонтов к обслуживанию по фактическому состоянию.

Для прогнозирования отказов силовых элементов СКЗ (транзисторных модулей, анодных заземлителей, электродов сравнения) и автоматической коррекции уставок защитного тока предлагается использовать рекуррентные сети типа LSTM (Long Short-Term Memory), эффективно улавливающие долгосрочные зависимости во временных рядах измерений, либо сверточные нейронные сети (CNN), обрабатывающие пространственно-временные паттерны со множества точек контроля. Глубокое машинное обучение позволяет также оптимизировать распределение тока между анодными заземлителями по критерию минимума энергопотребления при заданном уровне защищенности [12].

Практическое внедрение интеллектуального управления позволяет сократить эксплуатационные затраты на электроэнергию и обслуживание, одновременно повышая надежность противокоррозионной защиты.

Выполненный анализ и предложенный комплекс технических решений охватывают ключевые аспекты совершенствования систем катодной защиты магистральных трубопроводов: энергоэффективное преобразование, автономное энергоснабжение, резервированную телеметрию и адаптивное интеллектуальное управление. Внедрение инверторных СКЗ с многоканальным импульсным регулированием позволяет устранить проблему неравномерности защитного потенциала. Использование солнечных панелей с МРРТ-контроллерами и ветрогенераторов позволяет отказаться от дорогостоящей инфраструктуры ЛЭП на удаленных участках. Применение коротковолновой радиосвязи в качестве аварийного канала обеспечивает надежный дистанционный контроль вне зависимости от состояния сотовых сетей. Наконец, нейросетевые алгоритмы открывают путь к предиктивному обслуживанию и оптимальному управлению защитой, минимизируя человеческий фактор. В совокупности предложенные решения создают научно-техническую основу для построения распределенной адаптивной системы антикоррозионной защиты нового поколения.

Литература

1. Аналіз умоў узнікнення карозіі падземных трубаправодаў і метадаў яе прадухілення / Ю. В. Крышнеў, А. Я. Запольскі, М. А. Рогаў, Ю. Я. Котава // Современные проблемы машиноведения : сб. науч. тр. В 2 ч. Ч. 1 / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2025. – С. 218–221.
2. Аналіз нарматыўных патрабаванняў да арганізацыі актыўных і пасіўных спосабаў абароны магістральных трубаправодаў / Ю. В. Крышнеў, А. Я. Запольскі, Бай Вэй Вэй [і інш.] // Современные проблемы машиноведения : сб. науч. тр. В 2 ч. Ч. 1 / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2025. – С. 253–256.
3. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии : ГОСТ 9.602-2016.
4. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии : СТБ ГОСТ Р 51164-2001.
5. Семенов, А. Г. Что такое электрохимическая защита и как выбрать катодную станцию / А. Г. Семенов, Л. П. Сыса // Новости теплоснабжения. – 2004. – № 10. – С. 34–38.
6. Многоканальный стабилизатор катодного тока с возможностью удаленного управления / Л. А. Захаренко, В. М. Лукашов, А. В. Мельников [и др.] // Современные проблемы машиноведения : тез. докл. XI Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. П. О. Сухому) / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2016. – С. 154–155.
7. Запольский, А. Е. Повышение энергетической эффективности катодных защитных устройств / А. Е. Запольский, М. В. Дравица, Р. С. Бондаренко // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XXII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 28–29 апр. 2022 г. В 2 ч. Ч. 2 / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2022. – С. 43–46.
8. Запольскі, А. Я. Спажывальны разлік сонечных панэляў для павышэння энергетычнай эфектыўнасці станцый катоднай абароны падземных трубаправодаў / А. Я. Запольскі, М. А. Рогаў // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XXIV Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 25–26 апр. 2024 г. В 2 ч. Ч. 2 / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2024. – С. 60–63.
9. Запольскі, А. Я. Выкарыстанне ветраной энергіі для павышэння энергетычнай эфектыўнасці станцый катоднай абароны падземных трубаправодаў / А. Я. Запольскі, М. А. Рогаў // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XXIV Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 25–26 апр. 2024 г. В 2 ч. Ч. 2 / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2024. – С. 63–65.
10. Бондаренко, Р. С. Система автоматизированного управления солнечными панелями для солнечной электростанции / Р. С. Бондаренко, А. Е. Запольский, Д. А. Борешка // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XXIII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 27–28 апр. 2023 г. В 2 ч. Ч. 2 / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2023. – С. 48–51.
11. Запольский, А. Е. Организация телеметрии с использованием коротковолновой радиосвязи для пункта управления станции катодной защиты подземных трубопроводов / А. Е. Запольский, А. В. Сахарук, Ю. В. Крышнев // Проблемы взаимодействия излучения с веществом : сб. материалов VI Междунар. науч. конф., посвящ. акад. Б. В. Бокутю, Гомель, 14 нояб.

- 2024 г. / Гомел. гос. ун-т им. Ф. Скорины, Отд-ние физики, математики, информатики Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т физики им. Б. И. Степанова Нац. акад. наук Беларуси ; редкол.: С. А. Хахомов [и др.]. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2025. – С. 251–252.
12. Запольский, А. Е. Возможности совершенствования систем катодной защиты магистральных нефтепроводов / А. Е. Запольский // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XXV Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 24–25 апр. 2025 г. : в 2 ч. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2025. – С. 229–231.