

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

TECHNOLOGICAL BASIS FOR IMPROVING RELIABILITY AND PRODUCT QUALITY

УДК 658.562

doi:10.21685/2307-4205-2022-2-11

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА И СОЗДАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ КОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ

Г. И. Коршунов¹, Р. И. Сольнищев², Е. А. Фролова³

^{1,3} Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

^{1,3} Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

имени В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

^{1,3} kgi@pantes.ru, ² ssccte.leti@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассмотрены математические модели физических процессов, происходящих в техногенных объектах, системах трубопроводного транспорта энергоносителей подземной и морской прокладки, на основе законов сохранения и уравнений математической физики. *Материалы и методы.* Показано, что упрощение полученных моделей путем приведения их к форме «вход-выход» достаточно для программно-аппаратной реализации в виде киберфизических систем. Приведены примеры технических средств мониторинга и управления электрохимической защитой. *Результаты и выводы.* Показано, что обеспечение качества и интеллектуализация систем коррозионной защиты трубопроводного транспорта энергоносителей достигается поэтапным внедрением технологических инноваций в известные технические средства.

Ключевые слова: трубопроводный транспорт энергоносителей, коррозионная защита, математические модели, интеллектуальные системы

Для цитирования: Коршунов Г. И., Сольнищев Р. И., Фролова Е. А. Обеспечение качества и создание интеллектуальных систем коррозионной защиты трубопроводного транспорта энергоносителей // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 2. С. 92–101. doi:10.21685/2307-4205-2022-2-11

QUALITY ASSURANCE AND CREATION OF INTELLIGENT CORROSION PROTECTION SYSTEMS FOR PIPELINE TRANSPORTATION OF ENERGY CARRIERS

G.I. Korshunov¹, R.I. Sol'nitsev², E.A. Frolova³

^{1,3} St. Petersburg State University Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia

^{1,3} Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

² St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov (Lenin), St. Petersburg, Russia

^{1,3} kgi@pantes.ru, ² ssccte.leti@gmail.com

Abstract. *Background.* The article considers mathematical models of physical processes occurring in man-made objects, systems of pipeline transport of energy carriers underground and offshore, based on conservation laws and equations of mathematical physics. *Materials and methods.* It is shown that the simplification of the obtained models by bringing them to the form of "input-output" is sufficient for software and hardware implementation in the form of cyber-physical systems. Examples of technical means for monitoring and controlling electrochemical protection are given. *Results and conclusions.* It is shown that quality assurance and intellectualization of corrosion protection systems for pipeline transport of energy carriers is achieved by the gradual introduction of technological innovations into known technical means.

Keywords: pipeline transport of energy carriers, corrosion protection, mathematical models, intelligent systems

For citation: Korshunov G.I., Sol'nitsev R.I., Frolova E.A. Quality assurance and creation of intelligent corrosion protection systems for pipeline transportation of energy carriers. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(2):92–101. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-2-11

Введение

Необходимость использования трубопроводного транспорта энергоносителей в РФ очевидна. К энергоносителям относятся нефть, газ, вода холодная и горячая для систем отопления, пар. Необходимость обеспечения качества процессов такого транспорта обусловлена наличием техногенных аварий и катастроф, число которых возрастает по мере выработки ресурса. К числу важнейших факторов, влияющих на техническое состояние трубопроводов, относится коррозия. Защита от воздействия причин возникновения коррозии осуществляется разными средствами, однако во всех стандартах по этой тематике присутствует электрохимическая защита (ЭХЗ). Это обусловлено значимостью ЭХЗ по сравнению с другими видами защиты, а также наличием математического, методического и экспериментального задела, необходимого для цифровизации объектов. Однако проблема по упрощению известных математических моделей по-прежнему стоит остро, и в их практическом применении недостаточно представлен формализованный аппарат.

Целью работы является обеспечение качества систем коррозионной защиты трубопроводного транспорта энергоносителей на основе построения математических моделей физических процессов, происходящих в техногенных объектах, упрощение и приведение их к виду «вход-выход» для практического применения, создание интеллектуальных цифровых систем коррозионной защиты с использованием имеющегося технического и методического задела и последовательного внедрения технологических инноваций.

Материалы и методы

Факторы, определяющие коррозию, методы и стандарты мониторинга и защиты от коррозии

Назначение (целевая функция) и задачи электрохимической защиты (ЭХЗ) определены нормативными документами, согласно которым мероприятия по ЭХЗ трубопроводов входят в систему планово-предупредительного ремонта функциональных структур энергохозяйства; эта система может быть определена как совокупность организационно-технических мероприятий по надзору и уходу за подземными коммуникациями с целью предупреждения их преждевременного износа, предотвращения аварий и обеспечения бесперебойной подачи энергии потребителям [1]. При этом катодная защита трубопроводов осуществляется в соответствии с требованиями¹.

Катодная защита реализуется наложением отрицательного потенциала от специального выпрямителя переменного тока на защищаемый участок линейной части трубопровода. Этот участок соединяется с отрицательным полюсом выпрямителя, который является основным функциональным элементом станции катодной защиты. В свою очередь положительный полюс соединен с анодным контуром (заземляющим устройством). Управление катодной защитой проводится путем поддержания необходимого защитного потенциала металлической стенки трубы относительно земли; этот потенциал может быть измерен на специальных контрольно-измерительных пунктах с помощью стационарных или переносных электродов сравнения. Создание и поддержание необходимого зна-

¹ ГОСТ 9.602. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии ; ГОСТ Р 51164-98. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии ; СП 378.1325800.2017. Морские трубопроводы. Правила проектирования и строительства.

чения поляризионного защитного потенциала на внешней поверхности объекта достигается путем наложения внешнего выпрямленного тока. Величина поляризионного защитного потенциала ϕ служит количественной мерой качества катодной защиты, а критерием защищенности в каждой точке является выполнение условия $\phi_{\min} \leq \phi \leq \phi_{\max}$. Выполнение этого условия обеспечивается в настоящее время применением средств ЭХЗ, включающих, в частности, при применении катодной защиты электрод сравнения, датчик потенциала, анодное заземление, источник постоянного тока (преобразователь тока промышленной частоты в выпрямленный ток), средства сбора, формирования и интерпретации данных о величине поляризионного потенциала. В существующей технологии применяются неавтоматизированные, частично или полностью автоматизированные средства стабилизации поляризионного потенциала.

Математические модели коррозионного мониторинга систем трубопроводного транспорта

Системы транспортировки энергоносителей – это один из важнейших видов техногенных систем. Протяженные магистральные системы прокладываются и эксплуатируются в земле, море и пограничных средах. Нормативными документами установлены требования к обеспечению функционирования трубопроводов¹, в том числе к управлению защитой от коррозии. В этом случае характер взаимодействия поверхности стального трубопровода с различными средами достаточно сложен и описывается дифференциальными уравнениями в частных производных (ДУЧП). Математические модели электрохимического процесса защиты трубопроводов являются основой для разработки средств мониторинга и управления защитой трубопроводов от коррозии. Важнейшим критерием качества систем защиты трубопроводов от электрохимической коррозии внешним током является величина электродного потенциала защищаемой поверхности. В случае коррозии небольших по размеру объектов величина потенциала адекватно отражает степень защищенности. Однако когда речь идет о коррозии трубопроводов, характеризующихся большой протяженностью, поверхность металла нельзя считать изопотенциальной, поэтому коррозия может иметь неравномерный характер. Для эффективной электрохимической защиты трубопроводов целесообразно использовать математические модели для расчета распределения поляризионного потенциала с учетом нелинейной зависимости поляризионного потенциала от плотности управляющего тока и конечного числа точек подключения средств контроля и управления защитой. Основная задача математического моделирования мониторинга и управления сводится к нахождению характеристик защитного электрического поля по положению создающих поле источников и физических параметров среды.

Подземные трубопроводы

Сравнительно большая продолжительность протекания рассматриваемых процессов позволяет использовать для их описания квазистатическое приближение, т.е. ввести потенциал ϕ , удовлетворяющий уравнению Пуассона. Нахождение распределения поляризионного потенциала на поверхности подземных металлических трубопроводов требует знания распределения потенциала ϕ , создаваемого в грунте токами, протекающими через наружную поверхность трубопровода, имеющую контакт с грунтом. Расчет распределения потенциала производится в предположении, что подземные трубопроводы расположены в однородном проводящем полупространстве с удельным сопротивлением ρ_s . Среда, с которой граничит полупространство, принимается непроводящей. В этих условиях распределение потенциала ϕ в проводящей среде является решением уравнения Пуассона

$$\nabla^2 \phi = -\rho_s \cdot \sum_{v=1}^N I_v \cdot \delta(P - \Psi_v), \quad (1)$$

где P – точка наблюдения на поверхности трубопровода; Ψ_v – точка расположения источника с номером t ; I_v – управляемый ток источника.

¹ ГОСТ 9.602. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии ; ГОСТ Р 51164-98. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии.

Принимая во внимание, что на практике каждое поперечное сечение можно считать эквипотенциальным, благодаря чему потенциал металла ϕ_M оказывается зависящим только от продольной (по отношению к трубопроводу) координаты. Уравнение, описывающее продольное распределение потенциала металла, принимает вид

$$\frac{d^2\phi_M}{dx^2} = r(P) \cdot i(P), \quad (2)$$

где $r(P)$ – погонное продольное сопротивление трубопровода в рассматриваемой точке; $i(P)$ – ток, стекающий в среду через поперечное сечение трубопровода.

Предполагая, что плотность тока, стекающего в среду, во всех точках поперечного сечения одинаковая, можно считать, что эта плотность тока создается линейным источником тока с погонной производительностью $i(\Psi)$, расположенным на оси трубопровода. Тогда потенциал, создаваемый токами, протекающими через поперечное сечение трубопровода, может быть представлен в виде

$$\phi(P) = \rho_s \cdot \int_{-L}^L i(\Psi) G(P, \Psi) d\Psi, \quad (3)$$

где $(-L; L)$ – рассматриваемый участок трубопровода; Ψ – точка расположения источника тока на рассматриваемом участке; $G(P, \Psi)$ – функция Грина, учитывающая свойства среды. Решение интегрального уравнения приведено в [2, 3]

В условиях трубопровода с множеством сосредоточенных нагрузок потенциал ϕ_0 , создаваемый N источниками управляющего тока, определяется по формуле

$$\phi_0(x) = \rho_s \sum_{v=1}^N I_v \cdot G(x, \xi_v), \quad (4)$$

где I_v – управляющий ток v -го источника; $G(P, \xi_v)$ – функция влияния (4), учитывающая координаты точки наблюдения $P(x, y, z)$ и точек расположения источников тока $\Psi_v(\xi_v, \eta_v, \zeta_v)$.

Тогда система уравнений для определения распределения тока вдоль заданного трубопровода примет вид

$$\begin{cases} -\lambda\phi_{11} + i(x) + \lambda \int_{-L}^L K(x, \xi) \cdot [i(\xi) - i(x)] d\xi + \lambda\chi(x)i(x) = -\lambda\rho_s \sum_{v=1}^N I_v \cdot G(x, \xi_v), \\ \int_{-L}^L i(\xi) d\xi + \sum_{v=1}^N I_v = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Переходя от первого и второго интеграла к разностным уравнениям, получим

$$\begin{cases} -\lambda\phi_{11} + F(x_j) \cdot i(x_j) + \lambda \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^n B_{j,k} \cdot i(x_k) = -\lambda\rho_s \sum_{v=1}^N I_v \cdot G(x_j, \xi_v) + \rho_3(x_j), \\ \sum_{k=1}^n A_k i(x_k) = -\sum_{v=1}^N I_v - \rho_4(x_j), \end{cases} \quad (6)$$

где $\rho_3(x_j)$ и $\rho_4(x_j)$ – погрешности, получающиеся в результате перехода от интегральных уравнений к системе разностных уравнений.

Отбрасывая в правой части равенств (6) малые величины $\rho_3(x_j)$ и $\rho_4(x_j)$, точные значения которых неизвестны, получим следующую систему $n+1$ уравнений с $n+1$ неизвестными $\tilde{\phi}_{11}$, $\tilde{i}(x_1), \tilde{i}(x_2), \dots, \tilde{i}(x_n)$:

$$\begin{cases} -\lambda\tilde{\phi}_{11} + F(x_j) \cdot \tilde{i}(x_j) + \lambda \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^n B_{j,k} \cdot \tilde{i}(x_k) \cong -\lambda\rho_s \sum_{v=1}^N I_v \cdot G(x_j, \xi_v), \\ \sum_{k=1}^n A_k \tilde{i}(x_k) \cong -\sum_{v=1}^N I_v. \end{cases} \quad (7)$$

Модель «вход-выход» для объекта управления в системе электрохимической защиты от блуждающих токов через почву выводится из системы уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 \phi_M(x)}{dx^2} = r(x) \cdot i(x), \\ i(x) = \frac{1}{R_c} \left(-\rho_x \int_{-L}^L i(\xi) G(x, \xi) d\xi + \phi_M^-(x) - \phi_0^-(x) \right), \\ \int_{-L}^L i(x) dx + I = 0. \end{array} \right. \quad (8)$$

После преобразований Лапласа при нулевых начальных условиях найдем [2]:

$$\frac{\phi_M}{\phi_0} = \frac{1}{p^2 - \Psi(\rho, R_c, L, I)}. \quad (9)$$

По найденному распределению тока вдоль трубопроводной системы определяется распределение смещения регулируемого потенциала на поверхности трубопроводной системы и защищенность трубопроводной системы от коррозии по формуле

$$\eta_p(x_j) = R_c(x_j) \cdot \tilde{i}(x_j), \quad (10)$$

Определение смещения потенциала под действием токов дает возможность приблизить значения токов установок электрохимической защиты к оптимальным значениям. Оценка условий достижения катодной защиты по выбранному критерию заключается в требовании обеспечения защитных параметров в ряде фиксированных контрольных точек.

Обозначим число независимых станции катодной защиты N_2 , координаты контрольных точек x_1 (в выбранной системе координат, например, в зависимости от расстояния до начальной точки трубопроводов по длине трассы). Для решения поставленной задачи необходимо рассчитать значения смещения потенциала, создаваемые в каждой контрольной точке отдельными станциями. Результатом расчета будет квадратная матрица W размерностью $(N_2 \times N_2)$, которая позволяет найти вектор значений смещения потенциала в контрольных точках по известному вектору значений выходных токов I катодных станций по формуле

$$\phi_1 = WI. \quad (11)$$

Если требуется, чтобы в контрольных точках при работе системы катодной защиты поддерживались заданные значения смещения потенциалов, образующие вектор заданных значений V_1 , необходимое распределение токов между станциями может быть найдено по формуле

$$I = W^{-1}V_1. \quad (12)$$

В случае, когда число контрольных точек N_1 и число станций N_2 не совпадают, $N_2 > N_1$, т.е. имеются станции, выходной ток которых управляется другим способом, формула (11) принимает следующий вид:

$$I = W^{-1}(V_1 - W_2 I_2), \quad (13)$$

где W_2 – матрица размерности $N_1 \times (N_2 - N_1)$, определяющая влияние «неуправляемых» станций на смещения потенциалов в контрольных точках; I_2 – вектор выходных токов неуправляемых станций размерности $(N_2 - N_1)$.

Аналогичные преобразования исходных распределенных моделей объектов управления для различных сред приводятся на основе общих уравнений неразрывности [2–4]. В случае многокоординатной зависимости $y(t, \xi, \eta, \zeta)$ оценку влияния движения по координатам ξ, η, ζ получим на основе известной теоремы о первых интегралах дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка [5].

Морские трубопроводы

В настоящее время защита от коррозии трубопроводов, пересекающих значительные водные пространства под водой, обеспечивается системой кольцевых протекторов, периодически расположенных с определенным шагом вдоль трубопровода [6, 7]. Сказанное выше справедливо лишь при условии отсутствия блуждающих токов в среде, в которой проложен трубопровод. Ситуация существенно изменяется при взаимодействии трубопровода с электрическим полем блуждающих токов в море. Токи протекторов зависят от расположения протекторов относительно оконечности трубопровода. Максимального значения достигает ток протектора, ближайшего к концу трубопровода. При напряженности внешнего электрического поля $E_0 = 0,5$ мВ/м это значение составляет $I_{\text{пр(макс)}} = 5,25$ А. При таком токе срок службы протектора составит может быть уменьшен. Токи остальных протекторов могут быть, приближенно, оценены по формуле (12)

$$I_{\text{пр}(m)} = I_{\text{пр(макс)}} \exp(-\xi l_m), \quad (14)$$

где m – номер протектора; l_m – его расстояние от протектора с максимальным током; ξ – постоянная распространения.

Необходимо отметить, что ток протекторов, обусловленный действием блуждающих токов практически не зависит от параметров изолирующего покрытия трубопровода.

Приведенные данные показывают, что несколько первых анодов имеют близкие значения токов. Благодаря этому они растворятся в первую очередь. Их растворение, с одной стороны, приведет к увеличению скорости растворения следующих протекторов (за счет увеличения их токов), а с другой стороны, вызовет ухудшение коррозионного состояния металла в концевой зоне трубопровода за счет увеличения положительного смещения потенциала.

Резкое увеличение тока протекторов, приводящее к катастрофическому сокращению срока службы протекторов, не является единственным негативным следствием действия блуждающих токов. Другим таким следствием является ухудшение коррозионных условий в концевой зоне трубопровода даже при работающих протекторах. Для устранения отрицательных последствий действия блуждающих токов на трубопровод, оборудованный системой протекторов, целесообразно применить в концевых зонах систему катодной защиты. Основной задачей этой системы будет устранение концевых эффектов влияния блуждающих токов.

Технические средства мониторинга и электрохимической защиты трубопроводного транспорта

Известен значительный аппаратный задел различных фирм и предприятий для построения систем ЭХЗ. Здесь для определенности приведены ссылки на разработанные, изготовленные и введенные изделия фирмы ООО «ПАНТЕС».

Прибор для измерения параметров коррозии «КОРИП С-3 А» (ТУ 4217-003-54303725-2003, в дальнейшем – прибор) предназначен для определения коррозионного состояния и оценки эффективности средств ЭХЗ подземных металлических сооружений в полевых условиях и обработки информации на компьютере. Общей особенностью выполненных измерений является использование приборов в режиме синхронных измерений. С этой целью перед началом измерений выполнялась синхронизация приборных часов с часами компьютера. В результате выполнения этой операции показания приборных часов отличались не более чем на 1 с. При установке одинакового момента включения регистрации эта величина определяет точность синхронизации моментов измерений. Благодаря применению указанных регистраторов полученные данные о влиянии на участки тепловых трасс как блуждающих токов, так и работы установок катодной защиты смежных подземных сооружений обладают высокой достоверностью и, следовательно, доказательной силой. Полученные данные были использованы как исходные на стадии проектирования при оптимизации как расположения установок катодной защиты вдоль трасс нефтепроводов, так и выходных параметров этих установок.

В табл. 1 приведены описание объекта, средств, режимов и результатов для двух характерных вариантов коррозионных обследований. Целью первого варианта является общее коррозионное обследование заданного участка тепловой трассы, включая влияние импульсной компоненты блуждающих токов. Во втором варианте к этой задаче добавлена оценка влияния работы системы катодной защиты смежных подземных сооружений (газовой сети).

Таблица 1

Описание объекта, средств, режимов и результатов
для двух характерных вариантов коррозионных обследований

Описание объекта и цель измерений	Средства измерений	Схема и режим измерений	Результаты обработки данных
Участок трассы тепловой сети протяженностью 1,6 км; на участке 16 тепловых камер	Пять приборов КОРИПС, 15 измерительных электродов	Измерялись потенциалы «труба – земля» вблизи 5 тепловых камер, в которых к трубам подключались кабели от положительных клемм приборов. Вблизи каждой из этих камер размещались три измерительных электрода на расстояниях 5 м, 25 м и 50 м от камеры	Результаты измерений потенциалов электродами, расположенными на расстоянии 25 м от камер показывают: 1. Потенциалы на большинстве секций участка смещены в положительную сторону. 2. Значительное влияние импульсной составляющей блуждающих токов. 3. Характер влияния импульсной составляющей зависит от расположения точки на трассе: вблизи ТК-4 импульсы блуждающих токов вызывают анодное смещение потенциала, тогда как вблизи ТК-16 – ярко выраженное катодное смещение
Участок трассы тепловой сети протяженностью 0,95 км; на участке 12 тепловых камер	Пять приборов КОРИПС, 15 измерительных электродов	Измерялись потенциалы «труба – земля» вблизи четырех тепловых камер. Расположение измерительных электродов как в п. 1. Дополнительно были выполнены измерения напряженности электрического поля. Для оценки влияния установки катодной защиты производилось выключение ее питания программируемым прерывателем	Результаты измерений потенциалов электродами, расположенными на расстоянии 25 м от камер показывают: 1. Потенциалы на большинстве секций участка смещены в положительную сторону, за исключением ТК-39, участок вблизи которой защищен от коррозии благодаря действию установки катодной защиты на газопроводе. 2. Влияние импульсной составляющей наиболее значительно вблизи ТК-29. 3. В районе ТК-29 – ТК-33 работа установки катодной защиты вызывает смещение потенциала в направлении положительных значений, т.е. ухудшает коррозионное состояние трубопроводов

Общей особенностью выполненных измерений является использование регистраторов КОРИПС в режиме синхронных измерений.

Преобразователь защитного потенциала (ТУ 4217-002-54303725-2002) предназначен для постоянного мониторинга магистральных нефте- и газопроводов. Структурная схема преобразователя приведена на рис. 1.

Когда ключ коммутатора находится в положении 1, вспомогательный электрод (ВЭ) поляризуется (заряжается) потенциалом трубопровода. Затем ВЭ переключается к высокоомному входу аналого-цифрового преобразователя АЦП, и микропроцессор осуществляет измерение величины напряжения на ВЭ относительно медно-сульфатного электрода (МСЭ) как рабочей меры. Циклы измерения повторяются с периодом 1 мс (7 мс в положении 1, 4 мс – в положении 2). Отличительной особенностью преобразователя является отсутствие источника питания.

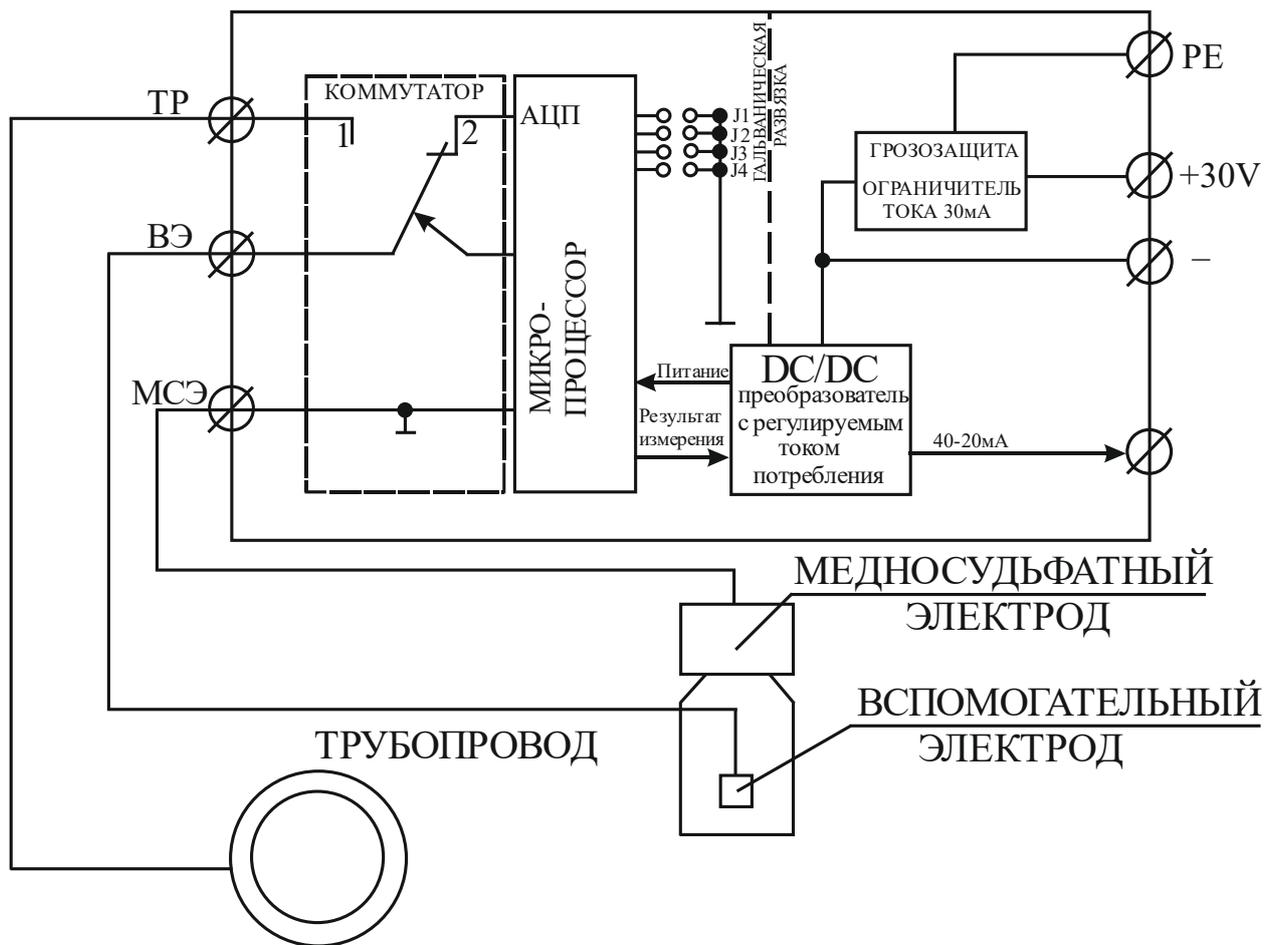


Рис. 1. Структурная схема преобразователя

Автоматизация мониторинга и управления коррозионной защитой техногенных объектов имела место и ранее, однако эффект, представленный на уровне теории, не был полноценно реализован. Это объяснялось недостаточным уровнем развития технических средств. Базовый набор таких средств и интеграция в составе КФС представлены в концепции «Индустрия 4.0». Эти средства совершенствуются и создают необходимые условия для обеспечения качества техногенных объектов на основе цифровизации этапов жизненного цикла. Поэтапный перевод систем автоматизации мониторинга и управления коррозионной защитой техногенных объектов достигается внедрением компонентов И4.0: Интернета вещей, взаимодействия М2М (машина с машиной), сбора, хранения и обработки больших объемов данных, распознавания динамики изменения параметров. Это, в частности, включает:

- организацию сбора данных с контрольных точек мониторинга и передачу управлений с помощью Интернета вещей по распространенным стандартам Bluetooth LE, ZigBee, Thread (6LOWPAN), Z-Wave, ANT*, WirelessHART, ISA100.1la (6LOWPAN), EnOcean, Plus more – для расстояний 10–100 м; 802.11a/b/g/n/ac, 802.11af (white space), 802.11ah & 802.Ир – для расстояний 100–1000 м; WI-SUN (6LOWPAN), ZigBee-NAN (6LOWPAN) – для расстояний 5–10 км; Cellular, 2G/3G/4G, LTE-MTE, 5G in the future, Low Power Wide Area (LPWAN), SIGFOX, LoRa, Nelensa, PTC и другие – до 100 км; и т.д.;
- получение управляющих сигналов от отказоустойчивых источников постоянного тока по результатам мониторинга;
- сбор, хранение и обработку больших объемов данных о коррозионном состоянии трубопроводов в базах данных и базах знаний для постепенного перехода к безлюдным технологиям;
- распознавание динамики изменения параметров для прогнозирования состояния коррозионной защиты.

Приведенный подход был реализован при поэтапном внедрении технологических инноваций в систему оперативного дистанционного контроля теплотрасс в виде кибер-физической системы [8].

По мере решения этих задач возникают задачи интеграции процессов и ресурсов в проблемной области энергоэффективности.

Заключение

Предложенные в статье модели физических сред определяют не только статику, но и динамику их взаимодействия с трубопроводами в условиях воздействия внешних электромагнитных полей. Корректное упрощение таких моделей и приведение к виду «вход-выход» позволяет более точно осуществлять электрохимическую защиту трубопроводов и обеспечивать их безаварийность и продление ресурса. Модели приведены для подземных и подводных трубопроводов, но могут быть использованы и для других объектов – морских судов, нефтехранилищ, мостов и других металлических объектов. Приведены примеры технических средств для мониторинга и управления ЭХЗ. Показано, что развитие кибернетических методов, локальной автоматизации и появление технологических инноваций создали необходимые условия для постепенного перехода к интеллектуальным системам коррозионной защиты трубопроводного транспорта энергоносителей. Такой подход обеспечит новые возможности обеспечения качества процессов транспорта, переход к безлюдным технологиям и развития проблемной области ЭХЗ как части глобальной проблемы обеспечения энергоэффективности.

Список литературы

1. Киселев В. Г., Коршунов Г. И. Комплекс телеметрического контроля установок электрохимической (катодной) защиты КТК-1 // Монтажные и специальные работы в строительстве. 1999. № 3. С. 85–90.
2. Сольницев Р. И. Вопросы построения замкнутой системы «природа-техногеника» // Известия «ЛЭТИ». 2009. № 7. С. 21–32.
3. Сольницев Р. И., Коршунов Г. И. Математические модели систем управления «природа-техногеника» // Известия вузов. Приборостроение. 2012. № 12. С. 5–11.
4. Сольницев Р. И., Коршунов Г. И. Системы управления «природа-техногеника». СПб. : Политехника, 2013.
5. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. М. : Наука, 1977.
6. Poliakov A. V., Korshunov G. I. Modeling of processes of electrochemical protection against corrosion of submarine pipelines under the influence of stray currents // SPb. Metalworking. Polytechnica. 2009. Vol. 3. P. 17–21.
7. Korshunov G. I., Frolova E. A. Systems analysis of physical processes: its application in the creation of cyber-physical systems // Lecture Notes in Networks and Systems. 2021. Vol. 184. P. 417–429.
8. Коршунов Г. И., Поляков А. В., Фролова Е. А. Математические модели процесса электрохимической защиты трубопроводных систем. СПб. : СПбГУ АП, 2005. 14 с.

References

1. Kiselev V.G., Korshunov G.I. Complex of telemetric control of electrochemical (cathodic) protection installations KTK-1. *Montazhnye i spetsial'nye raboty v stroitel'stve = Installation and special works in construction*. 1999;(3):85–90. (In Russ.)
2. Sol'nitsev R.I. Questions of constructing a closed system "nature-technogenics". *Izvestiya «LETI» = Proceedings of "LETI"*. 2009;(7):21–32. (In Russ.)
3. Sol'nitsev R.I., Korshunov G.I. Mathematical models of control systems "nature-technogenics". *Izvestiya vuzov. Priborostroenie = Proceedings of universities. Instrumentation*. 2012;(12):5–11. (In Russ.)
4. Sol'nitsev R.I., Korshunov G.I. *Sistemy upravleniya «priroda-tekhnenika» = Control systems "nature-technogenics"*. Saint Petersburg: Politekhnik, 2013. (In Russ.)
5. Tikhonov A.N., Samarskiy A.A. *Uravneniya matematicheskoy fiziki = Equations of mathematical physics*. Moscow: Nauka, 1977. (In Russ.)
6. Poliakov A.V., Korshunov G.I. Modeling of processes of electrochemical protection against corrosion of submarine pipelines under the influence of stray currents. *SPb. Metalworking. Polytechnica*. 2009;3:17–21.
7. Korshunov G.I., Frolova E.A. Systems analysis of physical processes: its application in the creation of cyber-physical systems. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2021;184:417–429.
8. Korshunov G.I., Polyakov A.V., Frolova E.A. *Matematicheskie modeli protsessa elektrokhimicheskoy zashchity truboprovodnykh sistem = Mathematical models of the electrochemical process protection of pipeline systems*. Saint Petersburg: SPbGU AP, 2005:14. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Геннадий Иванович Коршунов

доктор технических наук, профессор,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67);
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29)
E-mail: kgi@pantes.ru

Ремир Иосифович Сольницев

доктор технических наук, профессор,
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
имени В. И. Ульянова (Ленина)
(Россия, г. Санкт-Петербург,
ул. Профессора Попова, 5)
E-mail: ssccte.leti@gmail.com

Елена Александровна Фролова

доктор технических наук, профессор,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67);
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29)
E-mail: kgi@pantes.ru

Gennady I. Korshunov

Doctor of technical sciences, professor,
St. Petersburg State University
Aerospace Instrumentation
(67 Bolshaya Morskaya street, St. Petersburg, Russia);
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
(29 Polytechnicheskaya street, St. Petersburg, Russia)

Remir I. Sol'nitsev

Doctor of technical sciences, professor,
St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI"
named after V.I. Ulyanov (Lenin)
(5 Professor Popov street, St. Petersburg, Russia)

Elena A. Frolova

Doctor of technical sciences, professor,
St. Petersburg State University
Aerospace Instrumentation
(67 Bolshaya Morskaya street, St. Petersburg, Russia);
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
(29 Polytechnicheskaya street, St. Petersburg, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию / Received 29.05.2021

Поступила после рецензирования / Revised 30.06.2021

Принята к публикации / Accepted 14.09.2021