

**Ж. Е. ХУСАНОВ^{1*}, А. Д. ТЕВЯШЕВ², А. В. ПРОХОРОВ³, *А. Е. ХУСАНОВ¹,
В. П. ПРОХОРОВ², Б. М. КАЛДЫБАЕВА³**

¹Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, г. Шымкент, Казахстан

²Харьковский национальный университет радиоэлектроники, г. Харьков, Украина

³Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»
г. Харьков, Украина

e-mail: zhakhangir@mail.ru, tevjashhev@kture.kharkov.ua, o.prokhorov@khai.edu,

*khusanov_1975@inbox.ru, valery.prokhorov@nure.ua, kaldybaeva.b@mail.ru

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И МОДЕЛИ ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Представлены теоретические результаты исследования для разработки информационно-аналитической системы контроля и управления электрохимической защитой от коррозии магистральных трубопроводов, проводимые в рамках грантового проекта МОН РК АР09261098. Приведены модели и методы решения задачи оперативного планирования режимов работы станции катодной защиты трубопроводов в условиях неполной информации и были получены оптимальные значения силы тока. Результаты будут использованы в системе анализа и оперативного управления режимами работы электрохимической защиты подземных трубопроводов с целью повышения эффективности работы и сокращения затрат на эксплуатацию. Эффективность моделей и методов иллюстрируется на примере участка газораспределительных сетей высокого давления.

Ключевые слова: стохастическая модель, метод имитационного моделирования, электрохимическая защита, подземный магистральный трубопровод, информационно-аналитическая система контроля, станция катодной защиты, мониторинг, коррозия.

Введение. Одной из главных задач подземных трубопроводных систем (ТПС) транспортировки нефти и газа (нефтетранспортной системы (НТС) и газотранспортной системы (ГТС)) Республики Казахстан является повышение долговечности и эксплуатационной надежности магистральных трубопроводов (МТ) (магистральных нефтепроводов (МН) и магистральных газопроводов (МГ) с целью снижения аварийности на их объектах (объемов утечек транспортируемого продукта, предотвращения аварий, взрывов и т.п.).

Следовательно, долговечность и надежность трубопроводной системы находится в большой зависимости, порядка 27%, от ее защиты от коррозии. С другой стороны, система электрохимической защиты (ЭХЗ) МТ Республики Казахстан практически не автоматизирована. В связи с этим, комплексная автоматизация системы ЭХЗ является одним из важнейших направлений повышения долговечности и надежности ТПС.

Авторы [1] на численных примерах рассмотрели закономерности процессов ЭХЗ и задачи как проблемы токов в земле для сложных ТПС с неоднородными параметрами. В работах [2,3] рассмотрены актуальные вопросы обеспечения эффективной ЭХЗ и проблемы повышения эффективности систем защиты от коррозии подземных магистральных газопроводов. Большинство работ посвящено различным методам расчета основных параметров ЭХЗ, на основании таких исследований созданы справочники

* E-mail корреспондирующего автора: zhakhangir@mail.ru

для расчета параметров систем и средств ЭХЗ, нормативно-техническая документация и государственные стандарты [4-6].

Разработаны математические модели и алгоритмы расчета и оптимизации параметров ЭХЗ МТ с последующей программной их реализации [7,8]. Однако они не решают задачу комплексной автоматизации системы ЭХЗ МТ. В последнее время разработки направлены на автоматизацию процессов и задач системы ЭХЗ МТ. Так, известны различные телемеханические системы контроля и управления средствами ЭХЗ на основе контроллеров телеуправления с интегрированными модемами GSM/GPRS мобильной связи и других каналов связи с автоматизированным рабочим местом диспетчерского пункта [9-11].

В работе [9] описана автоматизированная система контроля и управления средствами электрохимической защиты на основе применения интеллектуальных информационных технологий. Данная автоматизированная система коррозионного мониторинга представляет собой систему распределенного типа, включающая в свой состав: автоматизированные рабочие места (АРМ) диспетчера и руководителей всех уровней системы ЭХЗ МТ, установки катодной защиты (УКЗ) со станциями катодной защиты (СКЗ), оснащенными телемеханическими средствами дистанционного контроля и управления средствами ЭХЗ и контрольно-измерительными пунктами (КИП), объединенные GSM/GPRS каналами мобильной связи. Впервые в данной автоматизированной системе [9] применена интеллектуальная информационная технология в виде экспертной системы поддержки принятия решений специалистами службы ЭХЗ.

В работе [12] рассмотрен стохастический подход к постановке и решению задачи оперативного планирования режима работы системы ЭХЗ подземных трубопроводов, а в [13] приведена система интегральных показателей качества и эффективности функционирования систем ЭХЗ подземных трубопроводов. В ряде работ, например, в [14] рассматриваются вопросы оптимизации режимов работы установок ЭХЗ, а также оптимизации защитных параметров всех СКЗ на заданных участках МТ [1,7-9], без которых невозможно построить эффективную систему ЭХЗ.

Методы исследования. Задачей данного исследования является разработка формализованной модели автоматизированного управления режимами функционирования систем ЭХЗ подземных МТ. Комплексный подход обеспечит учет максимального числа факторов и параметров, влияющих на повышение эффективности системы ЭХЗ МТ. Для реализации данного подхода и устранения указанных недостатков существующих систем ЭХЗ необходимо разработать информационно-аналитическую систему контроля и управления (ИАСКУ) электрохимической защитой от коррозии магистральных трубопроводов. ИАСКУ ЭХЗ, прежде всего, должна решать задачу непрерывного дистанционного контроля параметров электрохимической защиты и оперативного управления защитными параметрами средств ЭХЗ в режиме реального времени. При этом ИАСКУ ЭХЗ должна поддерживать технологический процесс ЭХЗ на оптимальном уровне между разрушительными зонами как «недозащит», так и «перезащит», что позволит снизить вредные последствия, вызываемые

существующими системами ЭХЗ. Комплексное использование средств ИСКУ ЭХЗ может продлить технический ресурс МТ на 5-10 лет и снизить их аварийность из-за коррозии.

Для решения проблемы защиты МТ от коррозии необходимо построить математическую модель процессов, которые происходят при применении электрохимической защиты. При этом возникают довольно существенные трудности. Они заключаются в том, что такие параметры системы, как сопротивление грунта и изоляции не являются детерминированными величинами. Значения ряда параметров в определённый момент времени, вообще-то говоря, неизвестны. Известен лишь закон, который позволяет оценить значение параметров. Все это приводит к тому, что при формализации проблемы необходимо использовать математические методы описания степени неопределенности исходных данных.

В качестве основных элементов системы ЭХЗ подземных трубопроводов используются СКЗ, которые обеспечивают необходимое значение защитного потенциала на всей протяженности защищаемого подземного трубопровода. В свою очередь, величина защитного потенциала «труба-земля» является случайной величиной, зависящей от многочисленных факторов, основными из которых являются: фактические режимы работы СКЗ; фактическое состояние изоляционного покрытия трубопровода в любой точке рассматриваемого участка в каждый момент времени и соответствующее ему переходное сопротивление изоляционного покрытия; фактическое значение сопротивления грунта вдоль трассы трубопровода. Это приводит к необходимости рассматривать систему ЭХЗ подземных трубопроводов как стохастическую систему, функционирующую в стохастической среде. Наиболее эффективным способом управления такими системами являются двухэтапные процедуры, включающие в себя решение двух задач:

- оперативное планирование режимов работы СКЗ на основании прогнозов (условных математических ожиданий) основных возмущающих факторов системы;
- стабилизация величины защитного потенциала после наблюдения фактических реализаций возмущающих факторов.

В данной работе приведены некоторые методы и модели решения задачи оперативного планирования режимов работы системы ЭХЗ, обеспечивающие решение задачи автоматизации режимов функционирования системы ЭХЗ с целью повышения ее эффективности.

Результаты и обсуждение. Для участка подземного трубопровода с подключенными к нему СКЗ разность потенциалов «труба-земля» в каждой точке на всей протяженности трубопровода для каждой СКЗ складывается из двух составляющих: положительного потенциала грунта $U_{cp}^i(x)$, создаваемого электрическим полем анодных заземлителей, и отрицательным потенциалом поверхности трубы $U_T^i(x)$, возникающим за счет протекания катодного тока вдоль трубопровода. Изолированный подземный трубопровод, защищаемый станциями катодной защиты, можно представить в виде протяженного электрического проводника постоянного тока с утечкой (Рис.1).

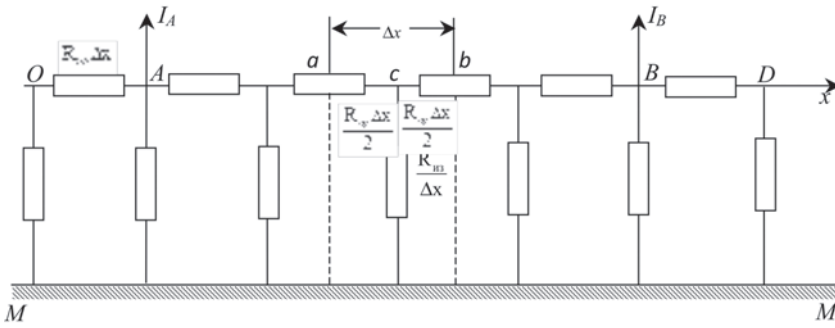


Рисунок 1 – Схема замещения протяженного проводника с утечкой

где величина R_{np} [Ом/м] – электрическое сопротивление единицы длины протяженного проводника с утечкой (удельное продольное сопротивление, погонное сопротивление);

$R_{уз}$ [Ом · м] – переходное сопротивление утечке, характеризует электрическое сопротивление между отрезком протяженного проводника и соприкасающейся с ним средой.

При наличии какой угодно приложенной к протяженному проводнику нагрузки в любой точке x проводника имеем зависящие от координаты x , потенциал $U_T^i(x)$ и протекающий по проводнику ток i .

Рассмотрим приведенную на рис. 1 схему замещения протяженного проводника с утечкой. Пусть эта схема представлена в виде последовательно соединенных продольных элементов сопротивлений $R_{np} \Delta x$, к концам которых параллельно подключены элементы переходных сопротивлений $\frac{R_{уз}}{\Delta x}$. Пусть, кроме этого, на участке OC имеется некоторый промежуток AB , внутри которого к протяженному проводнику не приложено никакой нагрузки. Ввиду того, что промежуток AB не загружен, ток i на всем этом промежутке не имеет разрыва, т.е. изменяется непрерывно.

Выделим на промежутке AB достаточно малый отрезок ab длиной Δx . Пусть начальная точка a отрезка ab имеет координату x . Следовательно, координата точки b есть $x + \Delta x$. К средней точке отрезка ab подключен один из элементов переходных сопротивлений $\frac{R_{уз}}{\Delta x}$, в связи с чем между точками a и b включены по продольному элементу сопротивления, имеющие величину $\frac{R_{np} \Delta x}{2}$.

Пусть в точке a имеются потенциал U_T и ток i , протекающий от точки a к точке c , а в точке b – потенциал $U_T + \Delta U_T$ и ток $i + \Delta i$, протекающий от c к b , т.е. приращению Δx координаты x соответствуют приращения ΔU_T и Δi потенциала U_T и тока i . Если ток направлен слева направо, т.е. если он имеет положительный знак, то $U_T > U_T + \Delta U_T$ вследствие чего $\Delta U_T < 0$, т.е. приращение потенциала имеет отрицательный знак, т.е. знаки величин ΔU_T и i противоположны. Как видно из рис. 1, это падение напряжения равно:

$$-\Delta U_T = i \frac{R_{np} \Delta x}{2} + (i + \Delta i) \frac{R_{np} \Delta x}{2}, \tag{1.1}$$

где Δi представляет собой ток на участке $ab = \Delta x$ между отрезком проводника и эквипотенциальной поверхностью ММ, т.е. ток Δi есть приращение тока на участке Δx , которое будет положительным в случае его входа в отрезок Δx (ток подтекания) и отрицательным в случае его выхода из отрезка Δx (ток утечки).

Величина тока Δi определяется потенциалом U_{Tc} точки с и переходным сопротивлением $\frac{R_{uz}}{\Delta x}$, причем при положительном значении потенциала U_{Tc} приращение Δi будет отрицательным, а при отрицательном потенциале U_{Tc} приращение положительно.

$$U_{Tc} = U_T - i \frac{R_{np} \Delta x}{2}, \quad (1.2)$$

$$\Delta i = - \frac{U_{Tc}}{\frac{R_{uz}}{\Delta x}} = - \frac{U_T - i \frac{R_{np} \Delta x}{2}}{R_{uz}} \cdot \Delta x. \quad (1.3)$$

Таким образом, при известных значениях потенциала и тока в точке подключения СКЗ можно последовательно получить значения потенциала U_T и тока i в каждой точке рассматриваемого участка.

Представим уравнения (1.1) и (1.3) следующим образом:

$$\frac{\Delta U_T}{\Delta x} = -R_{np} i - \frac{R_{np}}{2} \Delta i, \quad (1.4)$$

$$\frac{\Delta i}{\Delta x} = - \frac{U_T}{R_{uz}} + \frac{R_{np} i}{2R_{uz}} \Delta x. \quad (1.5)$$

Если отрезок Δx неограниченно уменьшать, устремляя его к значению дифференциала dx координаты x , то приращения ΔU_T и Δi будут соответственно стремиться к дифференциалам dU_T и di . Вторые слагаемые правых частей уравнений (1.4) и (1.5) превратятся в величины высшего порядка малости по сравнению с первыми слагаемыми, а сами уравнения из конечно-разностных превратятся в дифференциальные.

Функция $U_T^i(x)$ – распределения отрицательного потенциала поверхности трубы каждой i -й СКЗ является решением системы дифференциальных уравнений:

$$\frac{dU_T^i(x)}{dx} + R_{np} i = 0, \quad (1.6)$$

$$\frac{di}{dx} + \frac{U_T^i(x)}{R_{uz}} = 0, \quad (1.7)$$

i – функция распределения значений силы тока.

Решение системы дифференциальных уравнений в общем виде:

$$U_T^i(x) = Ae^{x \sqrt{\frac{R_{np}}{R_{uz}}}} + Be^{-x \sqrt{\frac{R_{np}}{R_{uz}}}}, \quad (1.8)$$

$$i = -\frac{1}{\sqrt{R_{np} \cdot R_{uz}}} (Ae^{x \sqrt{\frac{R_{np}}{R_{uz}}}} - Be^{-x \sqrt{\frac{R_{np}}{R_{uz}}}}), \quad (1.9)$$

где коэффициент затухания α определяется выражением $\alpha = \sqrt{\frac{R_{np}}{R_{uz}}}$, а постоянные A и B определяются для каждого участка непрерывного изменения тока из условий на границах того же участка.

Значения положительного потенциала грунта $U_{zp}^i(x)$, создаваемого электрическим полем анодного заземления i -й СКЗ определяется выражением [13]:

$$U_{zp}^i(x) = \frac{I_i \rho_{zp}}{2\pi(b_i - a_i)} \cdot \ln \left(\frac{(x - a_i) + \sqrt{(x - a_i)^2 + y_i^A}}{(x - b_i) + \sqrt{(x - b_i)^2 + y_i^A}} \right), \quad (1.10)$$

где a_i, b_i, y_i^A – координаты расположения протяженного анодного заземления i -й СКЗ.

Функция распределения потенциала «труба-земля» U_{T-3} для n -СКЗ находится следующим образом:

$$U_{T-3}(x) = \sum_{i=1}^n U_T^i(x) - \sum_{i=1}^n U_{zp}^i(x). \quad (1.11)$$

Основными случайными величинами, влияющими на значение защитного потенциала «труба-земля» являются: фактическое состояние изоляционного покрытия трубопровода в точке x в момент времени t и соответствующее ему переходное сопротивление изоляционного покрытия, а также фактическое значение сопротивления грунта вдоль трассы трубопровода, зависящее от влажности почвы, ее состава, плотности, температуры и т.п.

Пусть $\langle \Omega, F, P \rangle$ вероятностное пространство, где Ω – пространство элементарных исходов, F – σ – алгебра подмножеств Ω , P – вероятностная мера на F . Определим параметры R_{uz} и ρ_{zp} как случайные величины на пространстве $\langle \Omega, F, P \rangle$: $\rho_{zp} = \rho_{zp}(\omega, t)$, $R_{uz} = R_{uz}(\omega, t)$, где $\omega \in \Omega$.

Как уже рассматривалось ранее, потенциал «труба-земля» в точке x представляет собой сумму потенциалов каждой СКЗ и является разницей отрицательного потенциала трубы и положительного потенциала грунта. Отрицательный потенциал трубы зависит от случайной величины сопротивления изоляции $U_T^i(x) = U_T^i(x, R_{uz}(\omega, t))$. Положительный потенциал грунта зависит от случайной величины удельного сопротивления грунта $U_{zp}^i(x) = U_{zp}^i(x, \rho_{zp}(\omega, t))$, таким образом, потенциал «труба-земля» также представляет собой случайную величину:

$$U_{T-3}(x, t, \omega) = \sum_{i=1}^n U_T^i(x, R_{uz}(\omega, t)) - \sum_{i=1}^n U_{zp}^i(x, \rho_{zp}(\omega, t)). \quad (1.12)$$

Для рассматриваемого однопроводного участка подземного трубопровода энергетические затраты на работу i -й СКЗ в момент времени $t \in [0, T]$ определяется мощностью по постоянному току на выходе преобразователя СКЗ $C_{эксн}$, [кВт · ч]:

$$C_{эксн} = P_i(t) \cdot t, \quad (1.13)$$

где мощность i -й СКЗ $P_i(t)$, [кВт] определяется выражением:

$$P_i(t) = U_{i_{np}}(t)I_i, \quad (1.14)$$

где $U_{i_{np}}(t) = I_i \cdot [R_{i_{л}} + R_{i_{аз}} + Z_i]$ – напряжение на выходе преобразователя i -й СКЗ [В] в момент времени t ; I_i – величина силы тока на выходе i -й СКЗ [А] в момент времени t ; $R_{i_{л}}$ – сопротивление соединительных линий i -й СКЗ [Ом]; $R_{i_{аз}}$ – сопротивление анодного заземления i -й СКЗ [Ом]; $z_i = \sqrt{R_{i_{np}} \cdot R_{i_{уз}} \cdot (\pi D)^{-1}}$ – характеристическое сопротивление трубопровода [Ом]; $R_{i_{np}}$ – продольное сопротивление подземного трубопровода, [Ом/м] на участке $[x_{i-1}, x_i]$; $R_{i_{уз}}$ – среднее значение переходного сопротивления изоляционного покрытия, [Ом · м²] на участке $[x_{i-1}, x_i]$.

Переходное сопротивление изоляции является случайной величиной $R_{i_{уз}} = R_{i_{уз}}(t, \omega)$, следовательно, и характеристическое сопротивление трубопровода представляет собой также случайную величину $z_i = z_i(t, \omega)$.

Как следует из (1.14) мощность i -й СКЗ P_i является в этом случае функцией от случайной величины $z_i(t, \omega)$ и, в свою очередь, также будет случайной величиной, т.е.

$$P_i(t, \omega) = I_i^2 [R_{i_{л}} + R_{i_{аз}} + z_i(t, \omega)] . \quad (1.15)$$

В этом случае в качестве интегрального показателя оптимизации работы i -й СКЗ на интервалах времени $[0, T]$ будем использовать выражение

$$J_i(T, \omega) = \int_0^T P_i(t, \omega) dt = \int_0^T I_i^2 [R_{i_{л}} + R_{i_{аз}} + z_i(t, \omega)] dt . \quad (1.16)$$

Численное значение $J_i(T, \omega)$ характеризует суммарные затраты мощности i -й СКЗ на интервале времени $[0, T]$ и как следует из (1.16) является случайной величиной.

Так как $J_i(T, \omega)$ – случайная величина, то для получения операционной системы интегральных показателей эффективности функционирования i -й СКЗ необходимо использовать ее математическое ожидание.

Задача оперативного планирования режимов работы СКЗ в стохастической постановке будет иметь вид следующей целевой функции:

$$M \sum_{i=1}^n J_i(T, \omega) \rightarrow \min_{I \in G} \quad (1.17)$$

После подстановки выражения для вычисления затрат мощности i -й СКЗ (1.16) и выражения характеристического сопротивления участка трубопровода целевая функция задачи будет иметь вид:

$$\sum_{i=1}^n M_{\omega} \left\{ \int_0^T I_i^2 [R_{il} + R_{iaz} + \sqrt{R_{inp} \cdot R_{iuz}(\omega) \cdot (\pi D)^{-1}}] t dt \right\} \rightarrow \min_{I \in G} \quad (1.18)$$

После вычисления определенного интеграла выражение (1.18) можно представить в виде:

$$\sum_{i=1}^n M_{\omega} \left\{ I_i^2 [R_{il} + R_{iaz} + \sqrt{R_{inp} \cdot R_{iuz}(\omega) \cdot (\pi D)^{-1}}] \frac{T^2}{2} \right\} \rightarrow \min_{I \in G} \quad (1.19)$$

Для получения математического ожидания случайной величины воспользуемся неравенством Йенсена. Для нелинейной функции $f(x, \eta(\omega))$ и случайной величины $\eta(\omega)$ имеет место неравенство Йенсена:

$$M_{\omega} f(x, \eta(\omega)) \geq f(M_{\omega} f(x, \eta(\omega))) ,$$

если функция $f(x, \eta(\omega))$ выпукла, и если функция $f(x, \eta(\omega))$ вогнута:

$$M_{\omega} f(x, \eta(\omega)) \leq f(M_{\omega} f(x, \eta(\omega))) ,$$

Построим график зависимости функции затрат мощности i -й СКЗ (1.16) от значения случайной величины $R_{iuz}(\omega)$ (рис. 2).

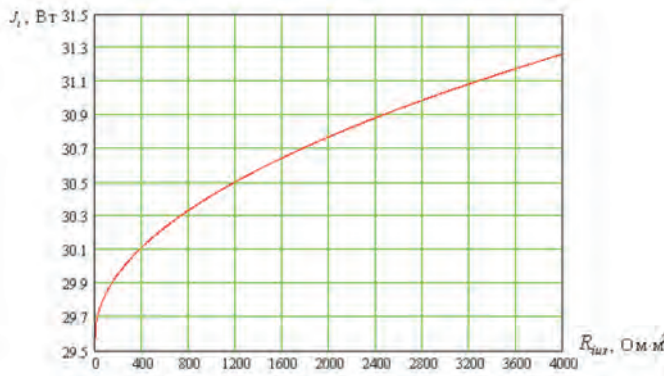


Рисунок 2 – График зависимости функции затрат мощности i -й СКЗ от значения случайной величины $R_{iuz}(\omega)$

Из графика зависимости видно, что функция, определяющая затраты при эксплуатации СКЗ вогнута, т.е. имеет место неравенство:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n M_{\omega} \left\{ I_i^2 [R_{il} + R_{iaz} + \sqrt{R_{inp} \cdot R_{iuz}(\omega) \cdot (\pi D)^{-1}}] \frac{T^2}{2} \right\} &\leq \\ &\leq \sum_{i=1}^n \left(I_i^2 [R_{il} + R_{iaz} + \sqrt{R_{inp} \cdot R_{iuz} \cdot (\pi D)^{-1}}] \frac{T^2}{2} \right) \end{aligned} \quad (1.20)$$

Таким образом, оценка затрат при эксплуатации СКЗ, полученная в результате решения задачи стохастического программирования будет больше реальных затрат.

Результаты решения задачи иллюстрируется на примере участка газораспределительных сетей высокого давления: длина участка 41510 м; количество СКЗ – 5; координаты расположения СКЗ от начала участка: 2000 м., 13690 м., 20900 м., 30063 м., 39513 м. на участке имеется трубопровод различного диаметра: [0, 19950] $D = 0,529$ м.; [19950, 30050] $D = 0,020$ м.; [30050, 41510] $D = 0,720$ м.; – изоляционное покрытие – заводское напыленное полимерное усиленного типа, среднее значение переходного сопротивления изоляции $R_{uz} = 5 \cdot 10^3$ [Ом · м²]; продольное сопротивление трубопровода $R_{np} = 6,6 \cdot 10^{-6}$ [Ом/м]; сопротивление анодного заземления СКЗ $R_{az} = 1,37$ [Ом]; сопротивление соединительных линий СКЗ $R_{sl} = 0,23$ [Ом]; среднее удельное сопротивление грунта по трассе составляет $\rho_{sp} = 40$ [Ом · м]; анодное заземление – несмещенное, т.е. $a_i = x_i^k - 100$ [м], $b_i = x_i^k + 100$ [м] $i = 1..5$; длина цепочки анодного заземления $L_i^A = 200$ [м] $i = 1..5$; расстояние до анодного заземления $y_i^A = 220$ [м] $i = 1..5$; максимальная сила тока на выходе СКЗ 12.5 А; $U_{min} = -0,85$ – минимальный защитный потенциал [В]; $U_{max} = -1,15$ – максимальный защитный потенциал [В].

Результатом решения задачи является оптимальное значение силы тока СКЗ на заданный период времени. Для описанных исходных данных получили такие значения силы тока СКЗ: $Iskz[1] = 7.032A$, $Iskz[2] = 6.790A$, $Iskz[3] = 7.154 A$, $Iskz[4] = 6.650A$, $Iskz[5] = 6.287A$.

На рис.3а показана распределение защитного потенциала «труба-земля» для полученных значений силы тока СКЗ трубопровода. На рис.3б изображены графики распределения потенциала «труба-земля» для оптимальных значений силы тока СКЗ при различных реализациях случайных величин сопротивления изоляции и удельного сопротивления грунта. В результате решения задачи оперативного планирования режима работы системы ЭХЗ были получены оптимальные значения силы тока СКЗ, в условиях неполной информации о сопротивлении изоляционного покрытия трубопровода и удельного сопротивления грунта, показана эффективность решения данной задачи.

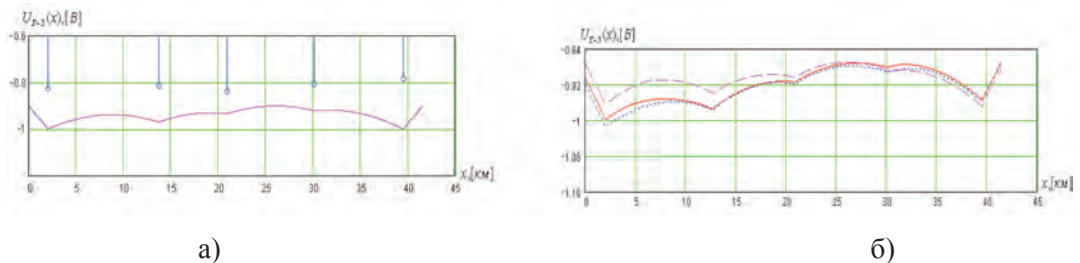


Рисунок 3 – а) график распределения потенциала «труба-земля» для оптимальных значений силы тока СКЗ; б) распределения потенциала «труба-земля» для оптимальных значений силы тока СКЗ при различных реализациях случайных величин

Заключение. Для создания телеметрических, информационно-аналитических и автоматизированных систем необходимы математические модели описания техно-

логического процесса ЭХЗ. В работе предложены стохастические модели и методы решения задачи оперативного планирования режимов работы СКЗ трубопроводов в условиях неполной информации при решении задачи минимизации затрат на эксплуатацию системы ЭХЗ. В результате экспериментальных исследований решения задачи оперативного планирования режима работы системы ЭХЗ были получены оптимальные значения силы тока СКЗ в условиях неполной информации о сопротивлении изоляционного покрытия трубопровода и удельного сопротивления грунта, а также показана эффективность разработанных моделей для решения данной задачи. Результаты решения задачи могут быть использованы в системе анализа и оперативного управления режимами работы системой ЭХЗ подземных трубопроводов при разработке ИА-СКУ ЭХЗ от коррозии МТ с целью повышения эффективности работы и сокращения затрат на эксплуатацию систем ЭХЗ подземных трубопроводов.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Ткаченко В.Н. Электрохимическая защита трубопроводов.– Волгоград: НП ИПД «Авторское перо», 2005. – 235 с.
- 2 Воробьев А.Н. Актуальные вопросы обеспечения эффективной противокоррозионной защиты объектов ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород» // Коррозия территории «НЕФТЕГАЗ». – 2014. – №3. – С. 66-70.
- 3 Запевалов Д. Н. Повышение эффективности систем защиты от коррозии подземных магистральных газопроводов // Газовая промышленность. – 2015. – №2 (724). – С. 67-70.
- 4 Глазков В. И., Зиневич А.М., Котик В.Г. и др. Защита от коррозии протяженных металлических сооружений // Справочник. – М.: Стройиздат, 1990.–303 с.
- 5 ГОСТ Р 51164-98. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии.
- 6 ГОСТ 9.602-2016. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии.
- 7 Новицкий Н.Н., Сухарев М.Г., Тевяшев А.Д. и др. Трубопроводные системы энергетики: методические и прикладные проблемы математического моделирования. – Новосибирск: Наука, 2015. – 476 с.
- 8 Nocedal J., S. J. Wright. Numerical optimization.- Springer. – 1999. – 634 p.
- 9 Крохмаль А.Е., Прохоров В.П., Береза А.С., Прохоров А.В. Автоматизированная система контроля и управления средствами электрохимической защиты на основе интеллектуальных информационных технологий // Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития: 2-й Международный радиоэлектронный Форум МРФ-2005: сб. науч. трудов. – Том I. – Харьков: АН ПРЭ, ХНУРЭ. 2005. – с.95-98.
- 10 Балаба К.В., Балахонцев В. Е., Юнусов А. Р. Телемеханическая система контроля и управления станциями катодной защиты // Патент RU 101545 U1 G05B 19/00, опубликован: 20.01.2011, бюл. №2.-2 с.
- 11 Крючков Н.М., Баранов Б.А., Владимиров В.А., Фридман И.С. Телемеханическая система контроля и управления установками катодной защиты магистральных газопроводов // Патент RU 2540847 C2 U1 G05B 19/00, C23F 13/02: опубл. 10.02.2015, бюл. № 4.-10с.
- 12 Тевяшев А.Д., Ткаченко В.Ф., Попов А.В., Стрижак Л.В. Стохастический подход к постановке и решению задачи оперативного планирования режима работы системы электрохимической защиты подземных трубопроводов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2005. – № 3/2(15). – С. 94-98.

13 Тевяшев А.Д., Ткаченко В.Ф., Попов А.В. Система интегральных показателей качества и эффективности функционирования систем электрохимзащиты подземных трубопроводов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2006. – № 1/2(19). – С. 21-26.

14 Никулин С.А., Карнавский Е.Л. Оптимизация режимов установок электрохимической защиты // Системы управления и информационные технологии. – 2014. – №3 (57). – С. 64-68.

REFERENCES

1 Tkachenko V.N. Elektrokhimicheskaya zashchita truboprovodov.– Volgograd: NP IPD «Avtorskoye pero». 2005. – 235 s.[Tkachenko V.N. Elektrokhimicheskaya zashchita truboprovodov.– Volgograd: NP IPD «Avtorskoye pero». 2005. – 235 s.]

2 Vorobyev A.N. Aktualnyye voprosy obespecheniya effektivnoy protivokorroziionnoy zashchity obyektov OOO «Gazprom transgaz Nizhniy Novgorod» // Korroziya territorii «NEFTEGAZ». – 2014. – №3. – S. 66-70.[Vorob'ev A.N. Aktual'nye voprosy obespecheniya effektivnoy protivokorroziionnoy zashchity ob"ektov OOO «Gazprom transgaz Nizhniy Novgorod» // Korroziya territorii «NEFTEGAZ». – 2014. – №3. – S. 66-70.]

3 Zapevalov D. N. Povysheniye effektivnosti sistem zashchity ot korrozii podzemnykh magistralnykh gazoprovodov // Gazovaya promyshlennost. – 2015. – №2 (724). – S. 67-70.[Zapevalov D. N. Povysheniye effektivnosti sistem zashchity ot korrozii podzemnykh magistral'nykh gazoprovodov // Gazovaya promyshlennost'. – 2015. – №2 (724). – S. 67-70.]

4 Glazkov V. I., Zinevich A.M., Kotik V.G. i dr. Zashchita ot korrozii protyazhennykh metallicheskih sooruzheniy // Spravochnik. – M.: Stroyizdat. 1990.–303 s.[Glazkov V. I., Zinevich A.M., Kotik V.G. i dr. Zashchita ot korrozii protyazhennykh metallicheskih sooruzhenij // Spravochnik. – M.: Strojizdat. 1990.–303 s.]

5 GOST R 51164-98. Truboprovody stalnyye magistralnyye. Obshchiye trebovaniya k zashchite ot korrozii. [GOST R 51164-98. Truboprovody stal'nye magistral'nye. Obshchie trebovaniya k zashchite ot korrozii.]

6 GOST 9.602-2016. Edinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya. Sooruzheniya podzemnyye. Obshchiye trebovaniya k zashchite ot korrozii. [GOST 9.602-2016. Edinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya. Sooruzheniya podzemnyye. Obshchie trebovaniya k zashchite ot korrozii.]

7 Novitskiy N.N., Sukharev M.G., Tevyashev A.D. i dr. Truboprovodnyye sistemy energetiki: metodicheskiye i prikladnyye problemy matematicheskogo modelirovaniya. – Novosibirsk: Nauka. 2015. – 476 s.[Novitskiy N.N., Suharev M.G., Tevyashev A.D. i dr. Truboprovodnyye sistemy energetiki: metodicheskie i prikladnyye problemy matematicheskogo modelirovaniya. – Novosibirsk: Nauka. 2015. – 476 s.]

8 Nocedal J., S. J. Wright. Numerikal optimization.- Springer. – 1999. – 634 p.

9 Krokhmal A.E., Prokhorov V.P., Bereza A.S., Prokhorov A.V. Avtomatizirovannaya sistema kontrolya i upravleniya sredstvami elektrokhimicheskoy zashchity na osnove intellektualnykh informatsionnykh tekhnologiy // Prikladnaya radioelektronika. Sostoyaniye i perspektivy razvitiya: 2-y Mezhdunarodnyy radioelektronnyy Forum MRF-2005: sb. nauch. trudov. – Tom I. – Kharkov: AN PRE. KhNURE. 2005. – s.95-98. [Krokhmal' A.E., Prohorov V.P., Bereza A.S., Prohorov A.V. Avtomatizirovannaya sistema kontrolya i upravleniya sredstvami elektrokhimicheskoy zashchity na osnove intellektual'nykh informatsionnykh tekhnologiy // Prikladnaya radioelektronika. Sostoyanie i perspektivy razvitiya: 2-j Mezhdunarodnyy radioelektronnyy Forum MRF-2005: sb. nauch. trudov. – Tom I. – Har'kov: AN PRE. HNURE. 2005. – s.95-98.]

10 Balaba K.V., Balakhontsev V. E., Yunusov A. R. Telemekhanicheskaya sistema kontrolya i upravleniya stantsiyami katodnoy zashchity // Patent RU 101545 U1 G05B 19/00. opublikovan:

20.01.2011. byul. №2.-2 s. [Balaba K.V., Balahoncev V. E., YUnusov A. R. Telemekhanicheskaya sistema kontrolya i upravleniya stanciyami katodnoj zashchity // Patent RU 101545 U1 G05B 19/00. opublikovan: 20.01.2011. byul. №2.-2 s.]

11 Kryuchkov N.M., Baranov B.A., Vladimirov V.A., Fridman I.S. Telemekhanicheskaya sistema kontrolya i upravleniya ustanovkami katodnoy zashchity magistralnykh gazoprovodov // Patent RU 2540847 C2 U1 G05B 19/00. C23F 13/02: opubl. 10.02.2015. byul. № 4.-10c. [Kryuchkov N.M., Baranov B.A., Vladimirov V.A., Fridman I.S. Telemekhanicheskaya sistema kontrolya i upravleniya ustanovkami katodnoj zashchity magistral'nyh gazoprovodov // Patent RU 2540847 C2 U1 G05B 19/00. C23F 13/02: opubl. 10.02.2015. byul. № 4.-10c.]

12 Tevyashev A.D., Tkachenko V.F., Popov A.V., Strizhak L.V. Stokhasticheskiy podkhod k postanovke i resheniyu zadachi operativnogo planirovaniya rezhima raboty sistemy elektrokhimicheskoy zashchity podzemnykh truboprovodov // Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. – 2005. – № 3/2(15). – S. 94-98. [Tevyashev A.D., Tkachenko V.F., Popov A.V., Strizhak L.V. Stokhasticheskiy podkhod k postanovke i resheniyu zadachi operativnogo planirovaniya rezhima raboty sistemy elektrokhimicheskoy zashchity podzemnykh truboprovodov // Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologij. – 2005. – № 3/2(15). – S. 94-98.]

13 Tevyashev A.D., Tkachenko V.F., Popov A.V. Sistema integralnykh pokazateley kachestva i effektivnosti funkcionirovaniya sistem elektrokhimzashchity podzemnykh truboprovodov // Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. – 2006. – № 1/2(19). – S. 21-26. [Tevyashev A.D., Tkachenko V.F., Popov A.V. Sistema integral'nyh pokazateley kachestva i effektivnosti funkcionirovaniya sistem elektrokhimzashchity podzemnykh truboprovodov // Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologij. – 2006. – № 1/2(19). – S. 21-26.]

14 Nikulin S.A., Karnavskiy E.L. Optimizatsiya rezhimov ustanovok elektrokhimicheskoy zashchity // Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii. – 2014. – №3 (57). – S. 64-68. [Nikulin S.A., Karnavskiy E.L. Optimizatsiya rezhimov ustanovok elektrokhimicheskoy zashchity // Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii. – 2014. – №3 (57). – S. 64-68.]

**Ж. Е. ХУСАНОВ¹, А. Д. ТЕВЯШЕВ², А. В. ПРОХОРОВ³, *А. Е. ХУСАНОВ¹,
В. П. ПРОХОРОВ², Б. М. КАЛДЫБАЕВА³**

¹М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент қ., Қазақстан

²Харьков ұлттық радиоэлектроника университеті, Харьков қ., Украина

³Н. Е. Жуковский атындағы Ұлттық аэроғарыш университеті. "ХАИ" Харьков, Украина
e-mail: zhakhangir@mail.ru, tevyashev@kture.kharkov.ua, o.prokhorov@khai.edu,

*khusanov_1975@inbox.ru, valery.prokhorov@nure.ua, kaldybaeva.b@mail.ru

ЖЕРАСТЫ ҚҰБЫРЛАРЫН ЭЛЕКТРОХИМИЯЛЫҚ ҚОРҒАУ ЖҮЙЕЛЕРІНІҢ ЖҰМЫС ІСТЕУ РЕЖИМДЕРІН ЖЕДЕЛ ЖОСПАРЛАУДЫҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ ӘДІСТЕРІ МЕН МОДЕЛЬДЕРІ

ҚРБҒМАР09261098 гранттық жобасы аясында жүргізілген ғылыми зерттеу жұмыстарының негізінде магистральдық құбырлардың коррозиясынан электрохимиялық қорғауды бақылау және басқарудың ақпараттық-аналитикалық жүйесін әзірлеу үшін зерттеудің теориялық нәтижелері ұсынылған. Толық емес ақпарат жағдайында құбырларды катодтық қорғау станциясының жұмыс режимдерін Жедел жоспарлау мәселесін шешудің модельдері мен әдістері келтірілген және токтың оңтайлы мәндері алынған. Нәтижелер жұмыс тиімділігін арттыру және пайдалану шығындарын қысқарту мақсатында жерасты құбырларын электрохимиялық қорғаудың

жұмыс режимдерін талдау және жедел басқару жүйесінде пайдаланылатын болады. Модельдер мен әдістердің тиімділігі жоғары қысымды газ тарату желілерінің мысалында суреттелген.

Түйін сөздер: стохастикалық модель, имитациялық модельдеу әдісі, электрохимиялық қорғау, жерасты магистральдық құбыр, ақпараттық-аналитикалық бақылау жүйесі, катодты қорғау станциясы, мониторинг, коррозия.

**ZH. E. KHUSSANOV¹, A. D. TEVYASHEV², A. V. PROKHOROV³,
A. E. KHUSSANOV¹, V. P. PROKHOROV², B. M. KALDYBAYEVA¹**

¹*M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan*

²*Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, Ukraine*

³*N. E. Zhukovsky National Aerospace University "KHAI" Kharkiv, Ukraine*
e-mail: zhakhangir@mail.ru, tevjashev@kture.kharkov.ua, o.prokhorov@khai.edu,

**khusanov_1975@inbox.ru, valery.prokhorov@nure.ua, kaldybaeva.b@mail.ru*

MATHEMATICAL METHODS AND MODELS OF OPERATIONAL PLANNING OF OPERATING MODES OF ELECTROCHEMICAL PROTECTION SYSTEMS OF UNDERGROUND PIPELINES

The theoretical results of the research for the development of an information and analytical system for monitoring and controlling electrochemical corrosion protection of main pipelines, carried out within the framework of the grant project of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan AP09261098, are presented. Models and methods for solving the problem of operational planning of the modes of operation of the cathodic protection station of pipelines in conditions of incomplete information are presented and optimal values of the current strength were obtained. The results will be used in the system of analysis and operational management of the modes of operation of electrochemical protection of underground pipelines in order to increase the efficiency of operation and reduce operating costs. The effectiveness of models and methods is illustrated by the example of a section of high-pressure gas distribution networks.

Keywords: *stochastic model, simulation method, electrochemical protection, underground main pipeline, information and analytical control system, cathodic protection station, monitoring, corrosion.*