

УДК 537.39

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СТАНЦИЙ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

**Ключевые слова:** противокоррозионная защита, станция катодной защиты, коррозионная агрессивность грунта, антикоррозионное покрытие, защитный потенциал, метод конечных элементов, методы численной оптимизации.

**В статье рассмотрен методический подход к расчету оптимальных режимов работы станций катодной защиты системы электрохимической защиты магистральных трубопроводов с учетом фактического состояния антикоррозионных покрытий трубопроводов.**

Разработка методики расчета оптимальных режимов работы станций катодной защиты системы электрохимической защиты трубопровода линейной части МН с учетом фактического состояния антикоррозионных покрытий трубопроводов обусловлена современными требованиями по ведению непрерывного контроля, моделированию и анализу технического состояния противокоррозионной защиты объектов трубопроводного транспорта в организациях системы ОАО «АК «Транснефть», оптимизации режимов работы системы электрохимзащиты (ЭХЗ) и выработки компенсирующих ме-

роприятий, что в целом способствует повышению надежности объектов магистральных трубопроводов.

Известно, что основными факторами, влияющими на эффективность противокоррозионной защиты трубопроводов подземной прокладки, являются: коррозионная агрессивность грунта, состояние антикоррозионного покрытия защищаемых объектов, параметры самих защищаемых объектов и характеристики средств защиты.

Так, коррозионная агрессивность грунта определяется его удельным электрическим сопротивлением, которое измеряется в

**Н.Н. Скуридин**  
начальник  
отдела технологии  
и технических средств  
электрохимзащиты  
ООО «НИИ ТНН»,  
г. Москва  
[SkuridinNN@niitnn.transneft.ru](mailto:SkuridinNN@niitnn.transneft.ru)



**А.А. Кузнецов**  
д.т.н., проф.,  
главный специалист  
отдела антикоррозионных  
и теплоизоляционных покрытий  
ООО «НИИ ТНН»,  
г. Москва  
[KuznetsovAA@niitnn.transneft.ru](mailto:KuznetsovAA@niitnn.transneft.ru)



**Д.А. Неганов**  
к.т.н., ведущий специалист  
отдела технологии  
и технических средств  
электрохимзащиты  
ООО «НИИ ТНН»,  
г. Москва  
[NeganovDA@niitnn.transneft.ru](mailto:NeganovDA@niitnn.transneft.ru)



**С.Ю. Глушков**  
главный специалист  
отдела технологии  
и технических средств  
электрохимзащиты  
ООО «НИИ ТНН»,  
г. Москва  
[GlushkovSY@niitnn.transneft.ru](mailto:GlushkovSY@niitnn.transneft.ru)



полевых условиях в соответствии с ГОСТ 9.602-2005.

Основным показателем качества антикоррозионного покрытия (АКП) объектов является его переходное сопротивление, учитывающее старение покрытия, появление различного рода дефектов (методика оценки переходного сопротивления АКП на действующих трубопроводах изложена в ГОСТ 9.602-2005).

Действующая система ЭХЗ должна обеспечивать в течение всего срока эксплуатации непрерывную по времени катодную поляризацию защищаемых объектов на всей поверхности таким образом, чтобы значения защитных потенциалов на объектах были по абсолютной величине не меньше минимального и не больше максимального значений в соответствии с ГОСТ Р 51164-98 в зависимости от

условий прокладки и эксплуатации трубопровода.

Для обеспечения этого требования станции катодной защиты системы ЭХЗ должны работать в заданных (оптимальных) режимах, которые могут быть определены расчетным методом.

При разработке методики расчета оптимальных режимов работы станций катодной защиты системы электрохимической защиты приняты следующие допущения и ограничения:

- не учитывается влияние блуждающих токов;
- не учитывается влияние биологической коррозии;
- не учитывается влияние отдельных установок ЭХЗ трубопроводов, проходящих в одном коридоре (пересекающихся) с оцениваемым.

В основу математической модели процесса функционирования системы ЭХЗ положен численный метод конечных элементов [1, 2, 3], позволяющий учесть неоднородность параметров трубопровода, АКП и окружающей среды. Схема расчета приведена на рис. 1, на котором показано условное изображение участка защитной зоны установки катодной защиты (УКЗ).

Участок трубопровода разбивается на конечные элементы длины  $\Delta L$ . Конечные элементы обозначены номерами  $i-2, i-1, i, i+1, i+2$  и т.д. Токи  $j_i$  протекают от анода УКЗ к трубе, а токи  $J_i$  – по трубе защитной зоны УКЗ.

При достаточно малых  $\Delta L$  (около 10 м) разность защитных потенциалов  $\Delta\varphi = \varphi_i - \varphi_{i+1}$ , измеренная на грунте над трубой при диагностировании, можно считать приблизительно равной разности потенциалов  $\Delta\varphi' = \varphi'_i - \varphi'_{i+1}$  непосредственно на трубе, что справедливо при однородности грунта и АКП трубы в пределах шага дискретизации  $\Delta L$ .

В соответствии с первым законом Кирхгофа

$$j_i = J_{i-1} - J_i. \quad (1)$$

Из закона Ома следуют соотношения

$$J_i = \frac{\varphi_{i+1} - \varphi_i}{R_{\tau,i} \Delta L}, \quad J_{i-1} = \frac{\varphi_i - \varphi_{i-1}}{R_{\tau,i-1} \Delta L},$$

$$j_i = \frac{-\varphi_i \Delta L}{0,5(R_{n,i-1} + R_{n,i})}, \quad (2)$$

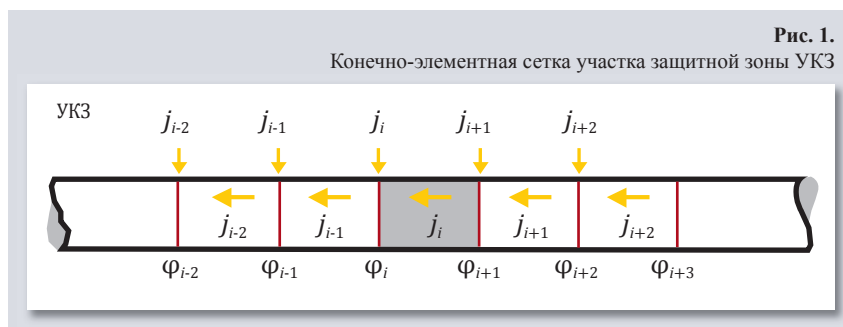


Рис. 1.

Конечно-элементная сетка участка защитной зоны УКЗ

где  $\varphi_i$  – защитные потенциалы (далее потенциалы) за вычетом естественного потенциала трубы, В;  $R_{\tau,i}$  – продольное сопротивление трубы на  $i$ -м элементе, Ом/м;  $R_{n,i}$  – переходное сопротивление АКП трубы на  $i$ -м элементе, Ом·м;  $i$  – номер узла конечно-элементной сетки.

Подставляя выражения (2) в (1) и решая относительно  $\varphi_i$ , получим уравнение для потенциалов на узлах конечно-элементной сетки

$$\varphi_i = \frac{\frac{\varphi_{i-1}}{R_{\tau,i-1} \Delta L} + \frac{\varphi_{i+1}}{R_{\tau,i} \Delta L}}{\frac{1}{R_{\tau,i-1} \Delta L} + \frac{1}{R_{\tau,i} \Delta L} + \frac{2 \Delta L}{R_{n,i-1} + R_{n,i}}}. \quad (3)$$

Количество уравнений (3) равно количеству узлов конечно-элементной сетки. Искомые величины – потенциалы  $\varphi_i$  на узлах  $i$  конечно-элементной сетки.

Потенциалы  $\varphi_i$  в точках дренажа станций катодной защиты (СКЗ) играют роль граничных условий и задаются в виде исходных данных или варьируются при решении задач оптимизации параметров СКЗ.

Определение потенциалов  $\varphi_i$  между УКЗ производится в результате циклического решения уравнения (3) для узлов конечно-элементной сетки между точками дренажа УКЗ. Завершение расчета определяется достижением заданной точности вычислений.

Продольное сопротивление трубы на  $i$ -м элементе  $R_{\tau,i}$  задается в качестве исходной информации из результатов проведения комплексного обследования коррозионного состояния МН или может быть рассчитано по формуле [4]

$$R_{\tau,i} = \frac{\rho_{\tau,i}(1 + \beta_{20}(t_c - 20))}{\pi(D_{\tau,i} \cdot 10^3 - \delta_{\tau,i}) \delta_{\tau,i}}, \quad (4)$$

где  $\rho_{\tau,i}$  – удельное сопротивление материала трубы, Ом мм<sup>2</sup>/м;  $\beta_{20}$  – температурный коэффициент электрического сопротивления стали при 20 °С, 1/°С;  $t_c$  – максимальная эксплуатационная температура стенки трубы, °С;  $D_{\tau,i}$  – диаметр трубы, м;  $\delta_{\tau,i}$  – толщина стенки трубы, мм;  $i$  – элемент трубы длиной  $\Delta L$ .

Переходное сопротивление АКП трубы на  $i$ -м элементе  $R_{n,i}$  определяется как сумма сопротивления АКП и сопротивления растеканию трубопровода [5]

$$R_{n,i} = \frac{R_{из,i} + R_{p,i}}{\pi D_{\tau,i}}, \quad (5)$$

где  $R_{из,i}$  – сопротивление АКП трубопровода на момент измерений (является исходной информацией), Ом·м<sup>2</sup>;  $R_{p,i}$  – сопротивление растеканию трубопровода, Ом·м<sup>2</sup>.

Сопротивление растеканию трубопровода  $R_{p,i}$  определяется из результатов численного решения трансцендентного уравнения [4]

$$R_{p,i} = \frac{\rho_{\tau,i} D_{\tau,i}}{2} \ln \left( \frac{0,4 \pi R_{p,i}}{D_{\tau,i}^2 H_{\tau,i} R_{\tau,i}} \right), \quad (6)$$

где  $\rho_{\tau,i}$  – удельное сопротивление грунта, Ом·м;  $H_{\tau,i}$  – глубина залегания трубы, м.

Для определения суммарных токов СКЗ необходимо знать зону действия УКЗ.

Для расчета этой зоны используется выражение для изменения значения потенциала в зависимости от удаления от точки дренажа УКЗ [3]

$$\varphi(x) = \varphi_{у\kappa\text{З}} \exp(-\alpha \cdot x), \quad (7)$$

где  $\varphi_{у\kappa\text{З}}$  – потенциал в точке дренажа УКЗ, В;  $\alpha$  – коэффициент затухания, 1/м;  $x$  – координата по трубе, м.

Так, если УКЗ № 1 имеет в точке дренажа потенциал  $\varphi_1$  а УКЗ № 2 – потенциал  $\varphi_2$ , и при этом среднее значение посто-

янной распространения тока между УКЗ № 1 и 2 равно  $\bar{\alpha}$  (1/м), то выражение для определения координаты равенства защитного потенциала, создаваемого УКЗ № 1 и 2 можно записать как

$$\varphi_1 \exp(-\bar{\alpha}(x - N_1)\Delta L) = \varphi_2 \exp(-\bar{\alpha}(N_2 - x)\Delta L), \quad (8)$$

где  $N_1$  и  $N_2$  – индексы координат УКЗ № 1 и № 2 соответственно;  $x$  – индекс координаты искомой величины.

Отсюда выражение для  $x$  имеет вид

$$x = 0,5(N_1 + N_2 - \ln(\varphi_2/\varphi_1)/(\bar{\alpha}\Delta L). \quad (9)$$

Среднее значение коэффициента затухания  $\bar{\alpha}$  – на участке между узлами  $N_1$  и  $N_2$  находится как

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_{N_1}^{N_2} \alpha_i}{N_2 - N_1}, \quad (10)$$

$$\text{где } \alpha_i = \sqrt{\frac{R_{\tau,i}}{R_{\pi,i}}}.$$

Ток УКЗ определяется как сумма токов  $j_i$ , протекающих от ее анода к элементам трубы в пределах зоны действия

$$I_{\text{укз}} = \sum_{i=N_{\text{лв}}}^{N_{\text{укз}}} \frac{\varphi_i \Delta L}{R_{\pi,i}} + \sum_{i=N_{\text{укз}}}^{N_{\text{пр}}} \frac{\varphi_i \Delta L}{R_{\pi,i}}, \quad (11)$$

где  $N_{\text{лв}}$  и  $N_{\text{пр}}$  – индексы координат (узлов) левой и правой частей зоны действия УКЗ;  $N_{\text{укз}}$  – индекс координаты (узла точки дренажа) УКЗ;  $\varphi_i$  – рассчитанные по выражению (3) потенциалы на узлах конечно-элементной сетки.

Необходимое напряжение УКЗ определяется как произведение тока  $I_{\text{укз}}$  и суммарного сопротивления всех элементов УКЗ, включая трубопровод

$$U_{\text{укз}} = I_{\text{укз}} \left( R_{\text{дк}} + R_{\text{ак}} + R_{\text{а}} + \frac{1}{\frac{1}{R_{\text{лз}}} + \frac{1}{R_{\text{пз}}}} \right), \quad (12)$$

где  $R_{\text{дк}}$ ,  $R_{\text{ак}}$  и  $R_{\text{а}}$  – сопротивления дренажного, анодного кабелей и сопротивление растеканию тока анода ( $R_{\text{а}}$  задается в качестве исходной информации), Ом;  $R_{\text{лз}}$  и  $R_{\text{пз}}$  – эквивалентные сопротивления левой и правой частей зоны действия УКЗ соответственно, Ом.

Учитывая то, что продольное сопротивление  $R_{\tau,i}$  трубы на  $i$ -м элементе значительно (на 7–10 порядков) меньше, чем переходное сопротивление  $R_{\pi,i}$  выражения для  $R_{\text{лз}}$  и  $R_{\text{пз}}$  можно записать в виде

$$R_{\text{лз}} = \frac{1}{\sum_{i=N_{\text{лз}}}^{N_{\text{укз}}} \frac{1}{\frac{R_{\pi,i}}{\Delta L} + \sum_{j=i}^{N_{\text{укз}}} (\Delta L \cdot R_{\tau,j})}},$$

$$R_{\text{пз}} = \frac{1}{\sum_{i=N_{\text{укз}}}^{N_{\text{пз}}} \frac{1}{\frac{R_{\pi,i}}{\Delta L} + \sum_{j=N_{\text{укз}}}^i (\Delta L \cdot R_{\tau,j})}}. \quad (13)$$

Фактически они представляют собой суммы параллельно соединенных переходных сопротивлений  $R_{\pi,i}$  трубы и соответствующих продольных сопротивлений  $R_{\tau,j}$  участков трубы от точки дренажа УКЗ до  $i$ -х узлов левой и правой частей зоны действия УКЗ.

Сопротивления дренажного и анодного кабелей соответственно равны

$$R_{\text{дк}} = \frac{\rho_{\text{д}} L_{\text{д}}}{S_{\text{д}}}, \quad R_{\text{ак}} = \frac{\rho_{\text{а}} L_{\text{а}}}{S_{\text{а}}}, \quad (14)$$

где  $\rho_{\text{д}}$  и  $\rho_{\text{а}}$  – удельное сопротивление дренажного и анодного кабелей соответственно, Ом·мм<sup>2</sup>/м;  $L_{\text{д}}$  и  $L_{\text{а}}$  – длина дренажного и анодного кабелей соответственно, м;  $S_{\text{д}}$  и  $S_{\text{а}}$  – площади сечения дренажного и анодного кабелей соответственно, мм<sup>2</sup>.

Таким образом, основным электрическим параметром СКЗ является их ток, который зависит от основных параметров трубопровода, АКП трубы, внешней среды и обеспечивает требуемый уровень защиты трубопровода (или соответствующие защитные потенциалы).

Напряжение СКЗ и соответственно потребляемая мощность являются вторичными параметрами, определяемыми соответствующими сопротивлениями УКЗ и трубопровода.

С учетом приведенных расчетных соотношений при решении задач по расчету оптимальных режимов работы СКЗ системы ЭХЗ магистральных трубопроводов с учетом фактического состояния антикоррозионных покрытий трубопроводов

целевую функцию (функционал) необходимо формировать с использованием обеспечиваемых СКЗ токов.

Задачу выбора оптимальных режимов работы СКЗ можно сформулировать следующим образом: минимизировать значение функционала

$$F(\varphi_{\text{укз},1}, \dots, \varphi_{\text{укз},j}, \dots, \varphi_{\text{укз},n}) = \sum_{i=1}^n I_{\text{укз},i}(\varphi_{\text{укз},i}), \quad (15)$$

при ограничениях

$$\varphi_{\min} < \varphi_i < \varphi_{\max}$$

$$I_{\text{укз},i}(\varphi_{\text{укз},i}) < I_{\text{укз},i \max}$$

$$U_{\text{укз},i}(\varphi_{\text{укз},i}) < U_{\text{укз},i \max}$$

$$i=1, 2, \dots, n,$$

где  $\varphi_{\text{укз},i}$  – защитные потенциалы за вычетом естественного потенциала установленных СКЗ в точках дренажа (варьируемые переменные), В;  $\varphi_i$  – защитные потенциалы за вычетом естественного потенциала в узлах конечно-элементной сетки, В;  $\varphi_{\min}$ ,  $\varphi_{\max}$  – допустимые минимальные и максимальные защитные потенциалы за вычетом естественного потенциала;  $I_{\text{укз},i}(\varphi_{\text{укз},i})$  и  $U_{\text{укз},i}(\varphi_{\text{укз},i})$  – токи и напряжения установленных СКЗ;  $I_{\text{укз},i \max}$  и  $U_{\text{укз},i \max}$  – допустимые значения токов и напряжений СКЗ.

Учитывая отсутствие аналитического выражения для функционала (15), оптимизационная задача может быть решена численными методами с применением персональных компьютеров.

Для этих целей была разработана расчетная программа с использованием программного обеспечения Mathcad 15.0 [6]. Для поиска оптимального значения функционала в программном обеспечении Mathcad 15.0 используется численный метод сопряженных градиентов для нелинейных функций или альтернативные методы Левенберга – Марквардта и квази-Ньютона (реализуется в программном обеспечении Mathcad 15.0 с использованием встроенной функции «Minimize»).

Метод сопряженных градиентов является развитием метода наискорейшего спуска. Направ-

ление, в котором ищется минимум, в этом методе выбирается как линейная комбинация градиента в текущей точке и предыдущего направления поиска

$$x_{k+1} = x_k + \alpha_k d_k, d_{k+1} = -g_{k+1} + \beta_k d_k \quad (16)$$

Параметр  $\alpha$  выбирается путем минимизации  $f(x_k + \alpha_k d_k)$ . Для выбора параметра  $\beta$  существует несколько формул, каждая из которых соответствует отдельному алгоритму из семейства алгоритмов, объединенных общим названием «метод сопряженных градиентов». Такой подход, несмотря на свою простоту, позволяет накапливать информацию о локальной кривизне функции – эта информация сохраняется в векторе, задающем направление поиска.

Время выполнения расчета зависит от мощности процессора компьютера, выбранного шага дискретизации, точности выполнения расчета, количества УКЗ и протяженности трубопровода.

Для учета влияния защитного заземления необходимо определить полный ток СКЗ по формуле

$$I_{\Sigma \text{УКЗ},i}(\varphi_{\text{УКЗ},i}) = I_{\text{УКЗ},i}(\varphi_{\text{УКЗ},i}) / \alpha, \quad (17)$$

где  $\alpha$  – доля общего тока катодного преобразователя, используемого по основному назначению (расчет коэффициента  $\alpha$  рассмотрен в работе [7]).

При использовании совместной катодной защиты для многониточных параллельных магистральных трубопроводов вышеприведенные расчеты выполняются отдельно для каждого трубопровода. При этом ток установок совместной катодной защиты определяется по выражению

$$I_{\text{УКЗ}} = \sum_{i=1}^n I_{\text{УКЗ},i}, \quad (18)$$

где  $I_{\text{УКЗ},i}$  – величина тока, необходимая для защиты  $i$  трубопровода, А;  $n$  – количество совместно защищаемых трубопроводов.

Следует отметить, что исключение блока оптимизации из расчетной программы позволяет без дополнительных доработок получить программу для анализа работы системы УКЗ магистрального трубопровода.

Таким образом, этапы определения оптимальных режимов ра-

Рис. 2.

Результаты анализа функционирования СКЗ

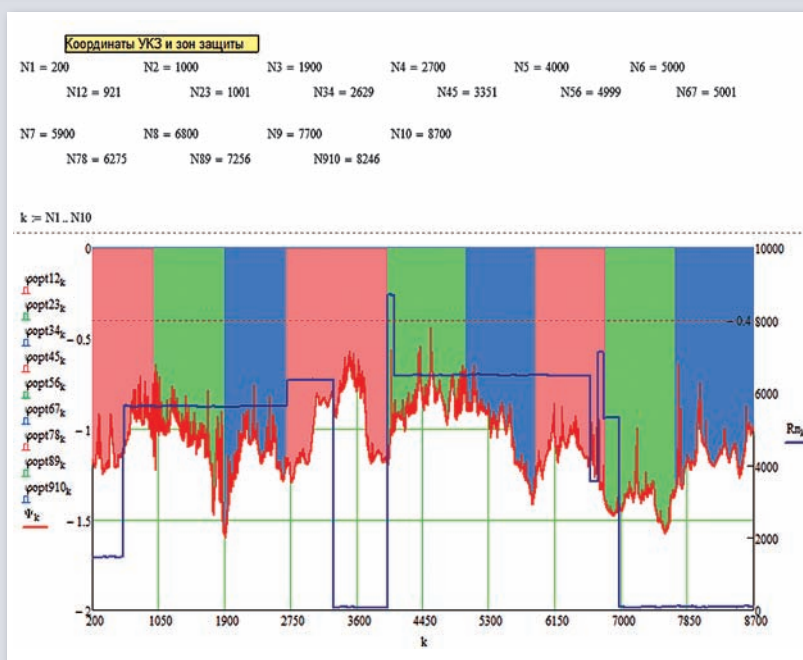


Рис. 3.

Результаты расчета токов и напряжений УКЗ

Оптимальные значения режимов УКЗ								
	УКЗ 1	УКЗ 2	УКЗ 3	УКЗ 4	УКЗ 5	УКЗ 6	УКЗ 7	УКЗ 8
Ток, А	3,675	0,136	3,177	7,792	91,643	0,002	2,077	66,677
Напряжение, В	3,598	1,023	2,650	7,780	237,091	0,400	2,766	57,932

боты станций катодной защиты включают:

1. Сбор, анализ и предварительную подготовку исходных данных для оцениваемых объектов МН:

- данные по коррозионной агрессивности грунтов;
- данные по коррозионному состоянию объектов МН (состояние АКП);
- данные по основным параметрам защищаемых объектов МН;
- данные по средствам ЭХЗ объектов МН.

2. Моделирование процессов функционирования СКЗ и оптимизация режимов их работы.

3. Анализ результатов моделирования и выработка рекомендаций по обеспечению эффективной защиты объектов МН от коррозионных повреждений.

Перечень исходных данных для программы расчета содержит:

- Данные по трубам МН:
  - диаметр трубы, мм;
  - толщина стенки трубы, мм;

- глубина укладки до верхней образующей трубы, м;

- продольное сопротивление, Ом/м.

2. Антикоррозионное покрытие:

- сопротивление, Ом·м<sup>2</sup>.
- 3. Внешние условия:
  - удельное сопротивление грунта, Ом·м.

4. Станции катодной защиты:
 

- рабочее напряжение СКЗ, В;
- рабочий ток СКЗ, А;
- сопротивление АЗ, Ом;
- параметры (длина, сечение, удельное сопротивление) дренажных и анодных кабелей.

5. Потенциалы, измеренные на трубопроводе при диагностике:

- защитный потенциал, В;
- естественный потенциал, В.

Для апробации разработанной программы был проведен расчет оптимальных режимов работы СКЗ системы ЭХЗ для линейной части МН Куйбышев–Тихорецк [8].

На рис. 2 приведена графическая интерпретация результатов

Рис. 4.

Результаты оптимизации режимов работы СКЗ

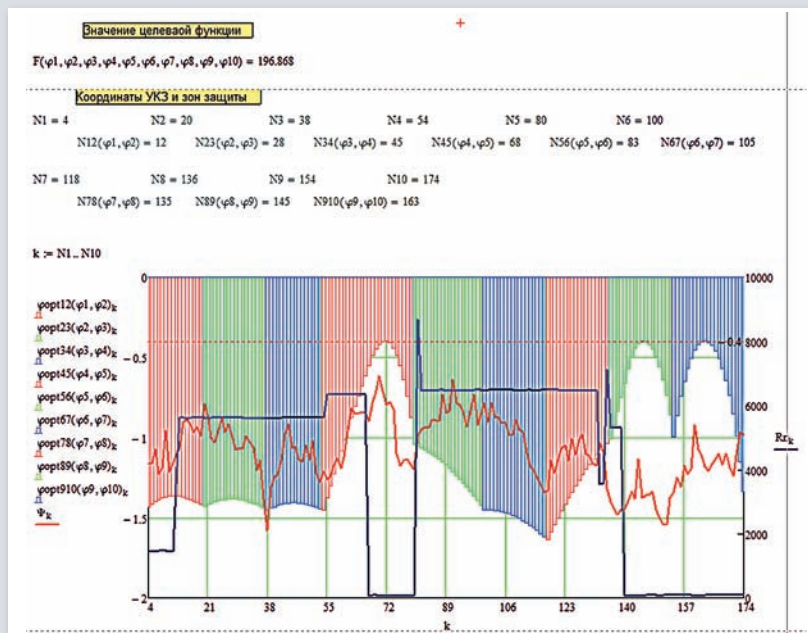


Рис. 5.

Результаты расчета оптимальных значений токов и напряжений СКЗ

Оптимальные значения режимов УКЗ										
	УКЗ 1	УКЗ 2	УКЗ 3	УКЗ 4	УКЗ 5	УКЗ 6	УКЗ 7	УКЗ 8	УКЗ 9	УКЗ 10
Ток, А	3,53	2,05	2,14	9,34	48,30	2,18	3,35	24,74	61,63	39,62
Напряжение, В	3,61	2,64	2,32	9,04	125,01	8,49	3,92	21,61	62,74	24,80

анализа функционирования СКЗ существующей системы ЭХЗ линейной части МН Куйбышев – Тихорецк.

Координаты УКЗ обозначены как N1, N2, ..., N10, а N12, N23, ..., N910 – координаты зон действия между УКЗ (координаты задаются в количествах шагов дискретизации, в данном случае 10 м).

На графике приведена зависимость переходного сопротивления трубы по длине трубопровода (синяя линия); зависимость измеренных защитных потенциалов за вычетом естественного потенциала трубы по длине трубопровода (красная кривая); области, выделенные цветом, представляют собой рассчитанные защитные потенциалы между СКЗ за вычетом естественного потенциала; пунктирная красная линия – минимально допустимое (по модулю) значение защитного потенциала за вычетом естественного потенциала.

Значения токов и напряжений УКЗ выдаются программой в табличном виде (см. рис. 3).

Как видно из таблицы (для системы исходных данных, полученных в ходе обследования [8]), 5-я и 9-я УКЗ работают в режиме с параметрами, выходящими за допустимые пределы (на трубопроводе установлены станции В-ОПЕ-М1-63-48-У1,  $I = 63$  А,  $U = 48$  В).

На рис. 4 приведена графическая интерпретация результатов расчета оптимальных режимов СКЗ существующей системы ЭХЗ линейной части МН Куйбышев – Тихорецк. Обозначения на рисунке сделаны те же, что и на рис. 2 (шаг дискретизации выбран равным 100 м для сокращения времени расчета).

Оптимальные значения токов и напряжений СКЗ, минимизирующие потребляемую электроэнергию при обеспечении необходимого уровня защиты, выводятся программой в таблицу (рис. 5).

Напряжение 5-й и 9-й УКЗ (установлены станции В-ОПЕ-М1-63-48-У1,  $I = 63$  А,  $U = 48$  В) превышают допустимые, а ток

9-й УКЗ находится на уровне, близком к максимальному. Это объясняется высоким сопротивлением растеканию тока анода у 5-й УКЗ и резким снижением переходного сопротивления трубы на участке установки 9-й УКЗ. Устранение этих несоответствий возможно за счет замены анода УКЗ № 5 и установки более мощной УКЗ № 9 или дополнительной станции между 8-й и 9-й или 9-й и 10-й УКЗ.

На основе предложенного методического подхода могут быть также решены и другие практические задачи, в частности, определение координат дополнительных СКЗ.

### Вывод:

Таким образом, предлагаемая методика обеспечивает определение оптимальных режимов работы станций катодной защиты системы электрохимической защиты трубопровода линейной части МН с учетом фактического состояния их антикоррозионных покрытий.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иваненков В. В., Гиззатуллин Р. Р., Гумеров К.М. Моделирование работы ЭХЗ методом конечных элементов // <http://www.tech-biblio.ru>. 10 с.
2. Болотнов А. М., Глазов Н. П. и др. Математическое моделирование и численное исследование электрических полей в системах с протяженными электродами // Вестник Башкирского университета. 2006. № 2. С. 17–21.
3. Ткаченко В. Н. Электрохимическая защита трубопроводов / Учебное пособие. Волгоград: НП ИПД «Авторское перо», 2005. 234 с.
4. РД-91.020.00-КТН-234-10. Нормы проектирования электрохимической защиты магистральных трубопроводов и сооружений НПС.
5. Методика выполнения расчетов электрических характеристик защищаемых объектов МН: ЗАО «ВНИИСТ-Диагностика». 2006. 13 с.
6. Руководство пользователя Mathcad® 15.0 // Parametric Technology Corporation, 2010. 193 с.
7. РД-91.020.00-КТН-259-10. Нормы и правила проектирования заземляющих устройств объектов магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов организаций системы «Транснефть».
8. ТО-75.200.00-ЧМН-ГЭД-24-09. Технический отчет по проведению комплексного обследования коррозионного состояния магистрального трубопровода Куйбышев – Тихорецк на участке 1193–1281 км.