

УДК 681.51.015

## АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

СКЛЯРОВ С. А.

(Системы и процессы управления)

**Аннотация:** Разработан алгоритм оптимизации режимов работы системы противокоррозионной защиты магистральных трубопроводов. Алгоритм позволяет минимизировать затраты электроэнергии на защиту от коррозии участка трубопровода с учетом ограничений, определенных стандартом. Приведены рекомендации по интерпретации результатов расчета, и предложены варианты принятия решений по повышению эффективности работы системы противокоррозионной защиты.

### 1. Постановка задачи

Метод катодной защиты металла от коррозии основан на уменьшении скорости растворения металла по мере смещения разности потенциалов труба-грунт в область значений, меньших, чем стационарный потенциал стали в грунте ( $E_{ст}$ ). В частности, для смещения разности потенциалов труба-грунт в отрицательную сторону от  $E_{ст}$  т.е. для катодной поляризации, избыточные электроны должны подводиться к металлу за счет внешнего источника тока  $i_{вн}$ , который определяется разностью скоростей анодного и катодного процессов. Катодная поляризация трубопровода осуществляется подключением станции катодной защиты к сооружению и грунту, которая представляет собой источник постоянного тока [5].

Эффективно защитная разность потенциалов может выполнять свое назначение только в том случае, если он не меньше определенной, так называемой, минимальной защитной разности потенциалов  $U_{т-г\ min} = -0,85\ В$  [1, 3]. Смещение защитной разности потенциалов в область более отрицательных значений не оказывает существенного влияния на коррозию металла. Однако, при чрезмерном увеличении  $U_{т-г}$  по сравнению с  $U_{т-г\ min}$  между изоляцией и поверхностью металла скапливается водород, выделяющийся в результате катодного процесса. Это может привести к отслоению изоляции и ухудшению защитных свойств покрытия [5].

Если учитывать естественную разность потенциалов труба-грунт, существовавшую до наложения защитной разности потенциалов, то максимально допустимая разность потенциалов будет

$$U_{т-г\ max} = E_{ст} + U_{н\ max},$$

а минимальная

$$U_{т-г\ min} = E_{ст} + U_{н\ min},$$

где  $U_{н\ max}$  и  $U_{н\ min}$  — соответственно максимально и минимально допустимые наложенные разности потенциалов;  $U_{т-г\ max}$  и  $U_{т-г\ min}$  — максимальная и минимальная разность потенциалов труба-грунт по отношению к медно-сульфатному неполяризующемуся электроду сравнения. Значения  $U_{т-г\ max}$  и  $U_{т-г\ min}$  опреде-

лены стандартом [3] и составляют:

$$U_{\text{т-г min}} = -1,1 \text{ В}, U_{\text{т-г max}} = -0,85 \text{ В}. \quad (1)$$

Изоляционное покрытие трубопровода нельзя назвать идеальным диэлектриком, так как на нем всегда имеются дефекты, вызванные недостаточным качеством укладки трубы в грунт, старением изоляционного материала, другими физическими факторами. В связи с этим происходит утечка защитного тока в грунт, что приводит к падению защитного потенциала при удалении от точки подключения станции катодной защиты (СКЗ). Для поддержания защитной разности потенциалов в заданном интервале (1) по всей протяженности магистрального трубопровода, необходимо подключение нескольких СКЗ через определенные промежутки. При этом в каждой точке трубопровода разность потенциалов труба-грунт определяется суперпозицией потенциалов, наложенных всеми (или, по крайней мере, несколькими близлежащими) СКЗ. Таким образом, проблема состоит в том, чтобы установить такие режимы работы СКЗ, при которых общие затраты электроэнергии были минимальны и обеспечивалась защитная разность потенциалов по протяженности в соответствии с (1).

Задачу оптимизации режимов работы СКЗ можно записать в виде

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n P_i^{\text{СКЗ}} \rightarrow \min \\ U_{\text{т-г max}} \geq U_{\text{т-г}} \geq U_{\text{т-г min}} \end{cases}, \quad (2)$$

где  $P_i^{\text{СКЗ}}$  — выходная мощность  $i$ -ой СКЗ;  $U_{\text{т-г}}$  — разность потенциалов труба-грунт в любой точке трубопровода.

Разность потенциалов труба-грунт, измеренная на участке трубопровода длиной  $L$  в точке  $x$ , есть некоторая функция, зависящая от режимов работы всех СКЗ участка

$$U_{\text{т-г}} = F(\bar{I}^{\text{СКЗ}}, \bar{U}^{\text{СКЗ}}, x), \quad (3)$$

где  $\bar{I}^{\text{СКЗ}} = (i_1^{\text{СКЗ}}, i_2^{\text{СКЗ}}, K, i_n^{\text{СКЗ}})$ ,  $\bar{U}^{\text{СКЗ}} = (u_1^{\text{СКЗ}}, u_2^{\text{СКЗ}}, K, u_n^{\text{СКЗ}})$  — вектора выходных токов и напряжений всех СКЗ участка. Вывод аналитического выражения зависимости (3) на основании измерений по методике [8] представлен в работе [7].

Значение разности потенциалов труба-грунт в любой точке участка трубопровода, защищаемого несколькими СКЗ, есть линейная суперпозиция разности потенциалов наложенных всеми СКЗ [8], следовательно, будут справедливы следующие тождества:

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_1 = \varphi_1 + \varphi_2 \cdot e^{-\alpha_1 l_1} + \varphi_3 \cdot e^{-\alpha_2 l_2} \cdot e^{-\alpha_1 l_1} + \dots + \varphi_p \cdot \prod_{i=1}^{n-1} e^{-\alpha_i l_i} \\ \omega_2 = \varphi_1 \cdot e^{-\alpha_1 l_1} + \varphi_2 + \varphi_3 \cdot e^{-\alpha_2 l_2} + \dots + \varphi_n \cdot \prod_{i=2}^{n-1} e^{-\alpha_i l_i} \\ \omega_3 = \varphi_1 \cdot e^{-\alpha_1 l_1} \cdot e^{-\alpha_2 l_2} + \varphi_2 \cdot e^{-\alpha_2 l_2} + \varphi_3 + \dots + \varphi_n \cdot \prod_{i=3}^{n-1} e^{-\alpha_i l_i} \\ \dots \\ \omega_n = \varphi_1 \cdot \prod_{i=1}^{n-1} e^{-\alpha_i l_i} + \varphi_2 \cdot \prod_{i=2}^{n-1} e^{-\alpha_i l_i} + \varphi_3 \cdot \prod_{i=3}^{n-1} e^{-\alpha_i l_i} + \dots + \varphi_n \end{array} \right. \quad (4)$$

где  $\omega_i$  — разность потенциалов труба-грунт в точке подключения  $i$ -й СКЗ,  $\varphi_i$  — разность потенциалов труба-грунт в точке подключения  $i$ -й СКЗ без учета влияния остальных катодных станций участка.  $\alpha_i$  — коэффициент затухания на интервале между  $i$ -й и  $(i+1)$ -й СКЗ,  $l_i$  — расстояние между  $i$ -й и  $(i+1)$ -й СКЗ:

$$l_i = X_{i+1} - X_i, \quad (5)$$

где  $X_i$  и  $X_{i+1}$  — координаты подключения  $i$ -й и  $(i+1)$ -й СКЗ к трубе относительно начала участка.

Коэффициент затухания  $\alpha$  есть интегральный показатель проводимости изоляционного покрытия, который определяется на участке между двумя СКЗ при решении задачи параметрической идентификации [7].

Коэффициенты зависимости собственной разности потенциалов  $\varphi_i$  от выходных токов СКЗ выражаются следующим образом:

$$R_i = \frac{\varphi_i}{I_i}, \quad (6)$$

где  $I_i$  — значение тока  $i$ -й СКЗ.

Таким образом, при изменении выходного тока  $i$ -й СКЗ на  $\Delta I_i$ , изменение разности потенциалов труба-грунт в точке подключения данной СКЗ будет:

$$\Delta \omega_i = \Delta I_i \cdot R_i \quad (7)$$

Изменение разности потенциалов труба-грунт  $\Delta U_{т-г}$  в любой точке  $x$  при изменении выходного тока  $i$ -й СКЗ на участке трубопровода, защищаемого  $n$  станциями катодной защиты определяется как

$$\Delta U_{т-г}(x) = \Delta \omega_i e^{\alpha_i(x-X_i)}; \text{ при } X_i < x \leq X_{i+1}; \quad (8)$$

$$\Delta U_{т-г}(x) = \Delta \omega_i e^{\alpha_{i-1}(X_i-x)} \text{ при } X_{i-1} < x \leq X_i; \quad (9)$$

$$\Delta U_{T-г}(x) = \Delta \omega_i e^{\alpha_k(x-X_k)} \prod_{j=i}^{k-1} e^{\alpha_j(X_{j+1}-X_j)} \text{ при } X_k < x \leq X_{k+1}; n > k > i; \quad (10)$$

$$\Delta U_{T-г}(x) = \Delta \omega_i e^{\alpha_k(X_{k+1}-x)} \prod_{j=k+1}^{i-1} e^{\alpha_j(X_{j+1}-X_j)} \text{ при } X_k < x \leq X_{k+1}; 0 < k < i-1. \quad (11)$$

Разность потенциалов труба-грунт в точке  $x$  определяется как

$$U_{T-г}(x) = U_{T-г}(x) + \Delta U_{T-г}(x) \quad (12)$$

## 2. Алгоритм решения задачи

Пусть имеется участок трубопровода длиной  $L$ , который защищается  $N$  станциями катодной защиты с выходными токами  $I [1..N]$  и выходными напряжениями  $U[1..N]$ .

Шаг 1. Определяем входные сопротивления всех СКЗ на участке

$$R [i] = U[i] / I [i], (i = 1..N)$$

Шаг 2. Устанавливаем токи всех СКЗ участка в максимальное значение

$$I [i] = I_{\max}, (i = 1..N) \text{ и, используя выражения (7, 8, 9, 10, 11, 12),}$$

определяем  $U_{T-г}(x)$ . Проверяем условие  $U_{T-г}(x) \geq U_{T-г \min}$ . Если оно не выполняется, то останов.

Шаг 3. Рассчитываем суммарную потребляемую мощность всех СКЗ

$$P = \sum_{i=1}^N I[i]^2 R[i]$$

Шаг 4.  $j = 1$  – индекс СКЗ.

Шаг 5. Определяем минимальное значение тока  $I_{\min}$   $j$ -й СКЗ, при котором выполняется условие  $U_{T-г}(x) \geq U_{T-г \min}$ . Токи остальных СКЗ участка при этом фиксируются. Для расчета разности потенциалов  $U_{T-г}(x)$  используются выражения (7, 8, 9, 10, 11, 12).

Шаг 6. Определяем величину уменьшения тока  $j$ -й СКЗ:  $\Delta I [j] = I [j] - I_{\min}$

Шаг 7.  $j = j + 1$ . Если  $j \leq N$ , то перейти на шаг 5.

Шаг 8.  $k = 1$  – индекс СКЗ,  $P_{\min} = P$

Шаг 9. Изменяем значение тока  $k$ -й СКЗ:  $I [k] = I [k] - \Delta I [k] / 2$

Шаг 10. Рассчитываем текущую суммарную мощность:  $P_T = \sum_{i=1}^N I[i]^2 R[i]$

Шаг 11. Если  $P_{\min} > P_T$ , то  $k_{\text{opt}} = k$ ,  $P_{\min} = P_T$

Шаг 12. Восстанавливаем значение тока  $k$ -й СКЗ в начальное значение:

$$I [k] = I [k] + \Delta I [k] / 2$$

Шаг 13.  $k = k + 1$ . Если  $k \leq N$ , то перейти на шаг 9

Шаг 14. Уменьшаем ток СКЗ с номером  $k_{\text{opt}}$ :  $I [k] = I [k_{\text{opt}}] - \Delta I [k_{\text{opt}}] / 2$

Шаг 15. Если  $\Delta I [k_{\text{opt}}] > \varepsilon$ , то перейти на шаг 3. Иначе — останов.

### 3. Интерпретация результатов решения задачи

В зависимости от состояния элементов системы противокоррозионной защиты и изоляционного покрытия, возможны следующие результаты решения задачи оптимизации.

Случай 1. После установки максимальных токов всех СКЗ (определяются техническими характеристиками и типами), разность потенциалов труба-грунт на участке между двумя СКЗ не удовлетворяет ограничению  $U_{т-г}(x) \geq U_{т-г \min}$ , а в точках подключения этих СКЗ не выполняется условие  $U_{т-г} \leq U_{т-г \max}$ . Это говорит о плохом качестве изоляционного покрытия трубопровода на данном участке. Такая ситуация является наиболее опасной, поскольку в середине участка трубопровод будет не защищен, а в точках подключения СКЗ, разность потенциалов труба-грунт будет недопустимо высокая [2]. В данном случае необходим ремонт изоляционного покрытия участка трубопровода. Однако ремонт изоляции требует высоких материальных затрат. Поэтому в некоторых случаях в точке с минимальным защитным потенциалом целесообразно установить дополнительную катодную станцию или протектор.

Случай 2. После установки максимальных токов всех СКЗ, разность потенциалов труба-грунт на участке между двумя СКЗ не удовлетворяет ограничению  $U_{т-г}(x) \geq U_{т-г \min}$ , однако в точках подключения этих СКЗ условие  $U_{т-г} \leq U_{т-г \max}$  выполняется. Такая ситуация может возникнуть в случае повышения сопротивления растеканию анодного тока СКЗ [4]. Необходимо провести исследование состояния заземлителей и, возможно, принять решение об их замене.

Случай 3. После решения задачи найден минимум при удовлетворении ограничений (2). Необходимо проанализировать физические запасы мощности СКЗ участка. Если запас мощности какой либо СКЗ не удовлетворяет требованиям, определенным стандартом [3], необходимо принять решение о замене данной станции на более мощную.

Для принятия решений по результатам расчетов, необходимо проанализировать дополнительные факторы, которые в большинстве случаев не являются формализуемыми (время года, определяющее условия и затраты на проведения полевых ремонтных работ, характер местности, укомплектованность материалами и техникой и т.п.) и использовать ранее накопленные знания по принятию решения в аналогичных ситуациях. Эффективным средством анализа и автоматизации принятия решений в данной ситуации может быть экспертная система, построенная с использованием опыта высококвалифицированных экспертов, который должен быть организован в виде базы знаний и правил формирования рекомендаций директив или стратегических решений.

Разработанный алгоритм был реализован в программном комплексе "Оптимизация режимов работы систем противокоррозионной защиты магистральных трубопроводов". Комплекс сдан в промышленную эксплуатацию.

**Список литературы** 1. Палаиов В.В., Расчет полной катодной защиты. — Л.: “Недра”, 1988. — 136 с. 2. Harrel D., Clerk M. Determination of the current required for cathodic protection Petrol. Eng. — 1989. — 10, N 1. — P. 38. 3. ГОСТ 25812–83. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии. — Введ. 27.05.83. 4. Зиневич А. М., Глазков В. И., Котик В. Г. Защита трубопроводов и резервуаров от коррозии. М.: “Недра”, 1975, 288 с. 5. Бородавкин П.П., Березин В.Л. Сооружение магистральных трубопроводов, М., “Недра”, 1977, с. 407. 6. Макурин М.С. Технологічні експертні системи у виробництві: Навчальний посібник. — Харків: ХТУРЕ, 1998. — 160с. — Рос. мовою. 7. Склярров С.А. Математическая модель идентификации распределения защитного потенциала вдоль магистрального трубопровода при заданных режимах работы установок катодной защиты. // АСУ и приборы автоматики. /Под ред. В.В.Семенец. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 1998. Вып. 107. С. 77 – 85. 8. Остапенко В.Н., Ягупольская Л.Н., Лукович и др. Электрохимическая защита трубопроводов от коррозии — Киев: Наук. думка, 1988.—192 с.

УДК 681.51.015

**Алгоритм оптимізації режимів роботи системи протикорозійного захисту магістральних трубопроводів / С. О. Склярров //**

Розроблений алгоритм оптимізації режимів роботи системи протикорозійного захисту магістральних трубопроводів, який дозволяє мінімізувати витрати електроенергії на захист від корозії ділянки трубопровода з урахуванням обмежень, що визначені стандартом. Приведені рекомендації по інтерпритації результатів розрахунку, та запропоновані варіанти прийняття рішень, що до підвищення ефективності роботи системи протикорозійного захисту.

Бібліогр.: 8 назв.

UDC 681.51.015

**Optimization algorithm of work regimes system of arterial pipelines anticorrosion protection. /S. A. Sklayrov//**

Optimization algorithm of anticorrosion work systems regimes of arterial pipeline, which allows minimizing the expenses of electricity on corrosion protection of the pipeline interval with the account of restrictions standard defined, is worked out. Recommendations on interpretation of results of calculations are given and variants of decisions made on improvement anticorrosion system protection are proposed.

Ref. 8 items.

**Склярров Станислав Александрович**, аспирант кафедры ПО ЭВМ ХТУРЭ, инженер НИПИАСУТрансгаз. Научный интерес представляет математическое моделирование, теория принятия решений. Служебный адрес: г.Харьков, ул. Конева 16, комната 702, тел. 20-57-89. Домашний адрес: г.Харьков, просп. Л.Свободы 46б, кв. 39, тел. 37-49-48.