

Представлено функціонально повний комплекс задач, що дозволяє аналізувати роботу й оптимально планувати режими роботи засобів електрохімічного захисту магістральних газопроводів

Ключові слова: електрохімічний захист, магістральні газопроводи, оптимальне планування

Представлен функционально полный комплекс задач, позволяющий анализировать работу и оптимально планировать режимы работы средств электрохимической защиты магистральных газопроводов

Ключевые слова: электрохимическая защита, магистральные газопроводы, оптимальное планирование

In article is presented function full complex of the problems, allowing analyze work and optimum to plan the state of working facilities of electrochemical protection gas-main pipeline

Keywords: electrochemical protection, gas-main pipeline, optimum planning

КОМПЛЕКС ЗАДАЧ АНАЛИЗА И ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ СРЕДСТВ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

А. Д. Тевяшев

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
Кафедра прикладной математики*
Контактный тел.: 8 (057) 702-14-36
E-mail: tevjshev@kture.kharkov.ua

А. А. Ткаченко

Аспирант
Кафедра инженерно-компьютерной графики*
Контактный тел.: 8 (057) 702-18-91
E-mail: tvf@gisnet.kharkov.ua

А. Г. Долгоброд

Старший научный сотрудник
Кафедра прикладной математики*
*Харьковский национальный университет радиотехники
пр. Ленина, 14, г. Харьков, 61166
Контактный тел.: 8 (057) 702-14-36
E-mail: dolg@kture.kharkov.ua

1. Введение

Одной из основных причин аварий на трубопроводах является коррозия труб (более 30% всех отказов), что приводит к значительным экономическим потерям. Коррозия труб является причиной аварийных остановок и ремонтов технологического оборудования, связанных с заваркой каверн, наваркой заплат, заменой участков трубопроводов и поврежденных

коррозией конструкций, потерь транспортируемого продукта, загрязнения окружающей среды, простоев оборудования [1]. Для предотвращения этого необходимо применять научно обоснованные и практически оправданные методы защиты от коррозии.

Пассивный метод защиты от коррозии предполагает создание непроницаемого барьера между металлом трубопровода и окружающим его грунтом. Это достигается нанесением на трубу специальных защитных

покрытий (битум, каменноугольный пек, полимерные ленты, эпоксидные смолы и прочее).

Даже тщательно выполненное изоляционное покрытие в процессе эксплуатации стареет, теряет диэлектрические свойства, водоустойчивость. Встречаются повреждения изоляции при температурных перемещениях трубопровода, а также корнями растений. Кроме того, в покрытиях остается некоторое количество не замеченных при проверке дефектов. Следовательно, изоляционные покрытия не гарантируют необходимой защиты трубопровода от коррозии. Достаточно эффективная защита может быть обеспечена только при нанесении изоляционных покрытий и применении электрохимической защиты.

Электрохимическая защита (ЭХЗ) подземных трубопроводов от коррозии (**активный метод защиты**) может быть достигнута при помощи *катодной, протекторной и электродренажной защит* [2].

При *катодной защите* к трубопроводу подключают отрицательный полюс источника постоянного тока. Положительный полюс источника тока подключают к анодному заземлению. При включении источника тока создается электрическая цепь: плюсовая клемма источника тока - анодное заземление - почвенный электролит - трубопровод - минусовая клемма источника тока. На оголенных участках трубопровода в местах повреждения изоляции происходит процесс катодной поляризации.

Установка катодной защиты (УКЗ) - это комплекс сооружений, предназначенных для катодной поляризации трубопровода внешним током. В состав УКЗ входят: источник постоянного тока, анодное заземление, катодный вывод трубопровода, соединительные электролинии, защитное заземление. Составной частью цепи УКЗ являются защищаемый подземный трубопровод, расположенный в грунте, через который осуществляется электрическое замыкание анодного и катодного участков электрохимической защиты.

Анодные заземления УКЗ предназначены для создания электрического низкоомного контакта положительного потенциала источника тока УКЗ с грунтом при наложении на газопровод отрицательного потенциала.

Расходы на ремонт трубопровода, ликвидацию аварий и восстановительные работы превышают расходы на проектирование, сооружение и эксплуатацию систем катодной защиты в десятки раз, именно поэтому катодная защита стала неотъемлемой частью всех действующих подземных продуктопроводов. Если с помощью катодного тока обеспечить значение электрического потенциала труба-грунт на уровне $-0,85/-1,2$ В, то скорость коррозии трубной стали становится пренебрежительно малой. Катодная защита является самым распространенным методом активной защиты от коррозии на магистральных газопроводах (МГ).

2. Комплекс задач анализа и оптимального управления режимами работы средств электрохимзащиты магистральных газопроводов

Для анализа работы и оптимального управления режимами работы средств электрохимзащиты магистральных газопроводов разработан комплекс задач

„Анализ и оптимальное управление режимами работы средств электрохимзащиты магистральных газопроводов”, предназначенный для повышения надежности и безопасности эксплуатации МГ, снижения риска возникновения аварийных ситуаций и техногенных катастроф, вызванных нарушением защитного покрытия и коррозией металлов участков трубопроводов МГ.

В состав комплекса входят следующие задачи

1. „Автоматизация процесса проведения работ по замерам фактического распределения потенциала „труба-земля”;
2. „Построение профилей распределения защитного потенциала на линейной части (ЛЧ) МГ”;
3. „Определение фактического сопротивления изоляции по результатам измерения фактического распределения потенциала „труба-земля”;
4. „Определение места и площади повреждения изоляционного покрытия участков трубопроводов на ЛЧ МГ”;
5. „Прогнозирование изменения состояния изоляционного покрытия и оценка риска его повреждения”;
6. „Расчет распределения потенциала „труба-земля” между соседними УКЗ на участке трубопровода”
7. „Формирование оптимального плана режима совместной работы всех УКЗ ЛЧ МГ на заданном интервале времени с учетом фактического состояния изоляционного покрытия”;
8. „Стабилизация величины защитного потенциала в „диктующих” точках ЛЧ МГ”;
9. „Оптимальное перераспределение нагрузки между УКЗ при отключении или отказе одной или нескольких УКЗ”.

Источником информации при выполнении комплекса задач является система линейной телемеханики и система ЭХЗ. Периодичность и продолжительность выполнения комплекса задач устанавливаются согласно служебному регламенту служб ЭХЗ.

Задача 1. Автоматизация процесса проведения работ по замерам фактического распределения потенциала „труба-земля”

Задача предназначена для автоматизации процесса получения результатов прямых измерений величины защитного потенциала „труба-земля” и их предварительной обработки с целью получения оценок (косвенных измерений) значений защитного потенциала и удельного сопротивления грунта.

Решение задачи позволяет сформировать базу данных (БД) значений результатов этих измерений, информации о количестве экспериментальных замеров защитного потенциала на j -м участке, расстоянии от начала j -й участка до точки i -го замера потенциала, $i=1..N_j$, $j=1..ND$. Кроме этого выполняются расчеты косвенных измерений, отображение данных в виде экранных форм и печатных документов, редактирование введенных данных.

Задача 2. Построение профилей распределения защитного потенциала на ЛЧ МГ

Задача предназначена для построения профилей теоретического распределения значений защитного потенциала „труба-земля” по экспериментальным данным о режимах работы УКЗ на ЛЧ МГ и построения профилей распределения фактических значений защитного потенциала „труба-земля” по

экспериментальным данным, полученным путем проведения замеров. Отклонение между теоретическими и фактическими значениями защитного потенциала используется для получения оценок фактического сопротивления изоляции участка трубопровода ЛЧ МГ.

Входная информация состоит из нормативно-справочной информации и измеренных значений защитного потенциала в точках участков ЛЧ МГ.

Результатами решения задачи для каждой точки участков ЛЧ МГ является:

- рассчитанное теоретическое значение защитного потенциала „труба-земля”;
- рассчитанное фактическое значение защитного потенциала „труба-земля”;
- рассчитанное теоретическое значение сопротивления изоляции;
- рассчитанное теоретическое значение сопротивления грунта.

Математическая постановка задачи. Для участка подземного трубопровода с подключенными к нему УКЗ значение потенциала „труба-земля” в каждой точке x по всему участку трубопровода определяется значениями положительного потенциала грунта $U_{грi}(x)$ i -й УКЗ, которое создается полем анодного заземления, и отрицательного потенциала поверхности трубы $U_{Ti}(x)$, которое возникает за счет протекания катодного тока вдоль трубопровода [3].

Изолированный подземный трубопровод, который защищен УКЗ, можно представить в виде продольного электрического проводника с утечкой (рис. 1).

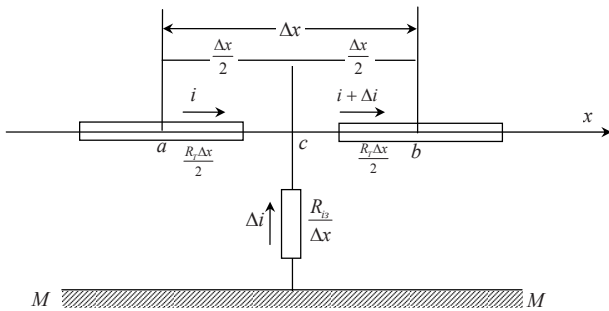


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема элементарного участка трубопровода

На рассмотренном участке:

$$ab = \Delta x, \tag{2.1}$$

$$ac = cb = \frac{\Delta x}{2}. \tag{2.2}$$

Если в точке a потенциал U_T и ток i , который протекает от точки a к точке c , а в точке b – потенциал $U_T + \Delta U_T$ и ток $i + \Delta i$, который протекает от точки c к точке b , тогда приращению Δx координаты x соответствует приращение потенциала ΔU_T и тока Δi .

Падение напряжения на участке Δx равно:

$$-\Delta U_T = i \frac{R_T \Delta x}{2} + (i + \Delta i) \frac{R_T \Delta x}{2}, \tag{2.3}$$

где Δi представляет собой ток на участке $ab = \Delta x$ между отрезком проводника и плоскостью MM (грунтом).

Величина тока Δi определяется потенциалом U_{Tc} точки c и переходным сопротивлением $\frac{R_{is}}{\Delta x}$.

$$U_{Tc} = U_T - i \frac{R_T \Delta x}{2}, \tag{2.4}$$

$$\Delta i = - \frac{U_{Tc}}{\frac{R_{is}}{\Delta x}} = - \frac{U_T - i \frac{R_T \Delta x}{2}}{R_T} \cdot \Delta x,$$

где R_T согласно СТП 320.30019801.072-2003 рассчитывается таким образом:

$$R_T = \frac{\rho_T 10^7}{\pi(10^3 D - \delta)\delta}, \tag{2.5}$$

где ρ_T – удельное электрическое сопротивление металла трубы;

D – внешний диаметр трубы;

δ – толщина стенки трубы.

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

Значение тока i_0 в точке подключения УКЗ определяется так:

$$i_0 = I_{укз} \tag{2.6}$$

Значение потенциала в точке подключения УКЗ определяется таким образом:

$$U_{Ti}[0] = I_{укз} \cdot \sqrt{\frac{R_{is} \cdot R_T}{\pi \cdot D}}. \tag{2.7}$$

Значение положительного потенциала грунта $U_{грi}(x)$, которое создается электрическим полем анодного заземления i -й УКЗ определяется таким образом:

$$U_{грi}(x) = \frac{I_{укз} \rho_{гр}}{2\pi L_A^i} \ln \left(\frac{(x - x_A^i) + \sqrt{(x - x_A^i)^2 + y_A^i}}{(x - (x_A^i + L_A^i)) + \sqrt{(x - (x_A^i + L_A^i))^2 + y_A^i}} \right) \tag{2.8}$$

где x_A^i, y_A^i, L_A^i – координаты размещения продольного анодного заземления i -й УКЗ.

Функция распределения потенциала труба-земля $U_{T3}(x)$ в каждой точке x по всему участку трубопровода определяется таким образом:

$$U_{T3}(x) = \sum_{i=1}^{NU} U_{Ti}(x) - \sum_{i=1}^{NU} U_{грi}(x) \tag{2.9}$$

Задача 3. Определение фактического сопротивления изоляции по результатам измерения фактического распределения потенциала „труба-земля”

Задача предназначена для получения оценок фактического сопротивления изоляции и их дисперсии на основании экспериментальных данных о фактическом распределении потенциала „труба-земля” вдоль участков ЛЧ МГ.

Входная информация состоит из нормативно-справочной информации и измеренных значений защитного потенциала в точках участков ЛЧ МГ.

Результатами решения задачи для каждой точки участка ЛЧ МГ являются значения фактического сопротивления изоляции.

Математическая постановка задачи. Для решения задачи структура ЛЧ МГ представлена в виде последовательного соединения ND участков трубопровода. На каждом j-и участке (j=1..ND) имеются результаты N измерений потенциала „труба-земля” $\tilde{U}_{Тзij}$ в i-x точках (i=1.. Nj).

Кроме этого используются результаты прямых измерений режима работы каждой k-й УКЗ, которая установлена на ЛЧ МГ, а именно:

- значение тока i_0 в точке подключения k-й УКЗ:

$$i_{0k} = \tilde{I}_{УКЗk} \quad (3.1)$$

- значение потенциала в точке подключения k-й УКЗ $\tilde{U}_{Тк}[0]$.

Вычисляем значение оценки эквивалентного сопротивления нагрузки $R_{э.2k}$ k-УКЗ:

$$R_{э.2k} = \sqrt{\frac{R_{из} \cdot R_{Г}}{\pi \cdot D}} = \frac{\tilde{U}_{Тк}[0]}{\tilde{I}_{УКЗk}} \quad (3.2)$$

Оценка сезонного значения удельного сопротивления грунта в i-й точке j-го участка в M-й (M=1,2,3...12) месяц рассчитывают по формуле:

$$\rho_{грj}^M = \hat{\rho}_{грj} \cdot K_{min}(M), \quad (3.3)$$

где $\rho_{грj}$ - измеренное значение удельного сопротивления грунта в i-и точке j-го участка;

$K_{min}(M)$ - коэффициент для определения минимального сезонного значения удельного сопротивления грунта принимается согласно [1].

Расчет оценок фактического значения сопротивления изоляционного покрытия $R_{изij}$ в i-й точке j-го участка, i=1.. Nj, j=1..ND выполняется путем решения задачи условной минимизации:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{ND} (\tilde{U}_{Тзij} - \hat{U}_{Тзij})^2 \rightarrow \min_{R \in \Omega}, \quad (3.4)$$

где $R = \{R_{изij}, i=1..N_j, j=1..ND\}$ - множество искомым оценок значений сопротивления изоляционного покрытия,

$\hat{U}_{Тзij} = \sum_{k=1}^{NU} U_{Тijk} - \sum_{k=1}^{NU} U_{ГРijk}$ - рассчитанное значение защитного потенциала в i-й точке j-го участка (i=1..Nj, j=1..ND) при текущих значениях оценок сопротивления изоляционного покрытия.

В ходе решения задачи условной минимизации (4) значение потенциала трубы, создаваемое k-й УКЗ, $U_{Тijk}$, и значение потенциала грунта $U_{ГРijk}$ вычисляются в соответствии с алгоритмом задачи 2 „Построение профилей распределения защитного потенциала на ЛЧ МГ”.

Решение задачи 3.4 выполняется методом множителей Лагранжа и модифицированным методом Ньютона.

Задача 4. Определение места и площади повреждения изоляционного покрытия участков трубопроводов на ЛЧ МГ

Задача предназначена для определения места и площади повреждения изоляционного покрытия участков трубопроводов на ЛЧ МГ по экспериментальным данным измерений значений защитного потенциала „труба-земля”.

Входная информация состоит из рассчитанного фактического значения защитного потенциала „труба-земля”, полученного в ходе решения задачи „Построение профилей распределения защитного потенциала на ЛЧ МГ”; измеренных значений защитного потенциала „труба-земля” в точках участков ЛЧ МГ; результатов решения задачи „Определение фактического сопротивления изоляции по результатам измерения фактического распределения потенциала „труба-земля”.

Результатами решения задачи являются координаты и площадь повреждения изоляционного покрытия на ЛЧ МГ.

Математическая постановка задачи. Для решения задачи „Определение места и площади повреждения изоляционного покрытия на ЛЧ МГ” структуру ЛЧ МГ представлено в виде ND участков. Для решения задачи используются данные оценок фактического значения сопротивления изоляции в i-й точке j-го участка, i=1.. Nj, j=1..ND $\hat{R}_{изij}$, полученные в результате решения задачи 3 „Определение фактического сопротивления изоляции по результатам измерения фактического распределения потенциала „труба-земля”.

Значение оценок фактического значения сопротивления изоляции в i-й точке j-го участка, i=1.. Nj, j=1..ND $\hat{R}_{изij}$ сравниваются с минимальным значением сопротивления изоляции R^- и рассчитывается вероятность того, что оценка фактического значения изоляционного покрытия в i-й точке j-го участка будет меньше заданного значения δ :

$$\Phi_0\left(\frac{\hat{R}_{изij} - R^-}{\sigma_{R_{изij}}}\right) > \delta, \quad (4.1)$$

где Φ_0 - функция Лапласа.

Если условие (4.1) выполняется, то принимаем решение в том, что в точке $i^* = i$, j-го участка возможно повреждение изоляционного покрытия. Проводятся дополнительные измерения защитного потенциала „труба-земля” $U^*_{Тзkj}$ в окрестности точки i^* от i^*-1 точки j-го участка к точке i^*+1 j-го участка с шагом $\Delta x = 1$ м, $k = i^* - 1 + 0.1 \cdot l, l = 1, 2, \dots, 20$.

По данным измерений проводится расчет оценок фактического значения сопротивления изоляционного покрытия $\hat{R}_{изkj}$ на участке трубопровода от i^*-1 точки j-го участка до i^*+1 точки j-го участка с шагом $\Delta x = 1$ м согласно алгоритму задачи 3.

Площадь повреждения изоляционного покрытия $S_{изij}$, в окрестности точки i^* j-го участка трубопровода рассчитывают по формуле:

$$\Delta S_{изkj} = \pi \cdot D_{kj} \cdot \Delta x \left(1 - \frac{\hat{R}_{изkj}}{R_{изkj}}\right) \quad (4.2)$$

$$S_{изij}^* = \sum_k \Delta S_{изkl} \quad (4.3)$$

где π - постоянная, $\pi = 3.14159$;

D_{kj} - внешний диаметр трубы k -й точки j -го участка;

\hat{R}_{iskj} - оценка фактического значения сопротивления изоляционного покрытия в k -й точке j -го участка;

R_{iskj} - оценка теоретического значения сопротивления изоляционного покрытия в k -й точке j -го участка с учетом срока введения трубопровода в эксплуатацию;

ΔS_{iskj} - площадь повреждения изоляционного покрытия.

Задача 5. Прогнозирование изменения состояния изоляционного покрытия и оценка риска его повреждения

Задача предназначена для получения оценок прогноза изменения состояния изоляционного покрытия, оценок риска его повреждения и их дисперсии.

Математическая постановка задачи. Для решения задачи „Прогнозирование изменения состояния изоляционного покрытия и оценка риска его повреждения” рассмотрим математическую модель изменения фактического сопротивления изоляционного покрытия в точке X_{ij} .

Скорость изменения удельного сопротивления изоляционного покрытия участков трубопровода зависит от большого количества факторов, которые не контролируются, и в общем случае являются случайными величинами.

Пусть y_t значение оценки фактического сопротивления изоляции \hat{R}_{ij} в i -й точке j -го участка, в момент времени t , $y_t = \hat{R}_{ij}$.

Тогда математическую модель изменения фактического сопротивления изоляционного покрытия в зависимости от времени можно представить в виде модели авторегрессии второго порядка:

$$(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2)y_t = a_t \tag{5.1}$$

где B – оператор сдвига назад $B y_t = y_{t-1}$,
 a_t – остаточная ошибка модели,

ϕ_1, ϕ_2 – коэффициенты авторегрессии, численные значения которых находятся в результате решения задачи оценивания параметров модели (5.1).

Оценивание параметров модели (5.1) осуществляется по всем входным данным \hat{R}_{ijt} , $t = 1, 2, \dots, T$ т.е. по выборке оценок фактического сопротивления изоляции, полученных в предыдущие моменты времени $t = 1, 2, \dots, T$ путем решения задачи минимизации суммы квадратов остаточных ошибок модели (5.1):

$$S(\phi_1^*, \phi_2^*) = \min_{\phi_1, \phi_2 \in \Omega} \sum_{t=1}^T a_t^2, \tag{5.2}$$

$$\Omega: -1 \leq \phi_1 \leq 1; -1 \leq \phi_2 \leq 1.$$

где ϕ_1^*, ϕ_2^* – оптимальные значения оценок параметров модели (5.1).

Решение задачи (5.2) осуществляется методом оптимизации с ограничениями Марквардта для нелинейного метода наименьших квадратов [2].

Оценки остаточной дисперсии получаются из суммы квадратов остаточных ошибок модели (5.1) на последней итерации метода Марквардта по формуле:

$$\sigma_a^2 = \frac{1}{T-2} S(\phi_1^*, \phi_2^*) \tag{5.3}$$

Ковариационная матрица оценок V исчисляется по формуле:

$$V = \{V_{ij}\} = (X' \cdot X)^{-1} \sigma_a^2, \tag{5.4}$$

где X – регрессионная матрица в линейризованной модели, которая вычислена на последней итерации в методе Марквардта. Стандартные ошибки равны:

$$\sigma_i = \sqrt{V_{ii}}, i = 1, 2. \tag{5.5}$$

Для вычисления прогнозов в момент времени t с упреждением l запишем модель (5.1) в виде:

$$(1 - \phi_1^* B - \phi_2^* B^2)y_{T+l} = a_{T+l}, l = 1, 2, 3, \dots, LL \tag{5.6}$$

или

$$y_{T+l} = \phi_1^* y_{T+l-1} + \phi_2^* y_{T+l-2} + a_{T+l}. \tag{5.7}$$

Прогнозы в момент времени T с предубеждением l вычисляются по формулам:

$$y_T(1) = \phi_1^* y_T + \phi_2^* y_{T-1}, \tag{5.8}$$

$$y_T(2) = \phi_1^* y_T(1) + \phi_2^* y_T, \tag{5.9}$$

$$y_T(3) = \phi_1^* y_T(1-1) + \phi_2^* y_T(1-2), l = 3, 4, 5, \dots, LL \tag{5.10}$$

Вычисление доверительных границ прогнозов, в которых с заданной вероятностью будет находиться истинное значение сопротивления изоляции вычисляются по формуле:

$$y_{T+l}(\pm) = y_T(l) \pm U \sqrt{V(l)}, l = 1, 2, 3, \dots, LL \tag{5.11}$$

где $U = 1,96$ или $2,58$ в зависимости от того, находится ли будущее значение y_{T+l} в середине границ с вероятностью $0,95$ или $0,99$.

Оценка дисперсии прогнозов:

$$V(l) = \sigma_a^2 \sum_{j=1}^{l-1} \psi_j^2, \tag{5.12}$$

где

$$\psi_j = \begin{cases} 1, & j = 0; \\ \sum_{i=1}^l \phi_i^* \psi_{j-i}, & j = 1, 2, \dots, LL. \end{cases}$$

Вычисление прогнозов и их доверительных границ осуществляется для каждой из оценок $\hat{R}_{ijt}(l)$, $i = 1, 2, \dots, N_j$, $j = 1, 2, \dots, ND$, $l = 1, 2, 3, \dots, LL$.

Оценки рисков повреждения изоляционного покрытия $RR_{ij}(l)$ в моменты времени $T+l$, $l = 1, 2, 3, \dots, LL$, вычисляются как вероятность того, что значение сопротивления изоляционного покрытия, которое прогнозируется $\hat{R}_{ijt}(l)$, будет меньше минимально допустимого уровня R_{ij}^- .

$$RR_{ij}(l) = P(\hat{R}_{ijt}(l) \leq R_{ij}^-) = \Phi_0 \left(\frac{\hat{R}_{ijt}(l) - R_{ij}^-}{\sigma_{R_{ij}}} \right), l = 1, \dots, LL, \tag{5.13}$$

где $\Phi_0(\cdot)$ - функция Лапласа.

Нахождение множества точек (i^*, j^*) , в которых оценка риска повреждения изоляционного покрытия вычислена согласно (5.13) при $l=1$ и больше нуля, выполняется согласно выражению:

$$(i^*, j^*) = (i, j) \text{ при } \hat{R}_{\text{ИТ}}(1) > 0. \tag{5.14}$$

Нахождение точки (i^{\max}, j^{\max}) , в которой оценка риска повреждения изоляционного покрытия есть максимальной, выполняется по формуле:

$$(i^{\max}, j^{\max}) = \max_{(i,j)} \hat{R}_{\text{ИТ}}(1), l=1,2,3,\dots,LL. \tag{5.15}$$

Задача 6. Расчет распределения потенциала „труба-земля” между соседними УКЗ вдоль участка трубопровода

Задача предназначена для получения информации о фактическом распределении значений защитного потенциала „труба-земля” между двумя произвольными УКЗ вдоль участка трубопровода. Расчет выполняется при наличии фактических данных режима работы УКЗ, между которыми рассчитывается потенциал „труба-земля” и оценок фактического сопротивления изоляции участка трубопровода между УКЗ.

Задача решается по запросу оператора, в случае необходимости, позволяет получить информацию о фактическом распределении значений защитного потенциала „труба-земля” на любом участке трубопровода между двумя УКЗ.

Математическая постановка задачи. Согласно алгоритму задачи 2 значение потенциала U_T и тока i в каждой точке участка трубопровода с шагом Δx от его начала рассчитывается с помощью рекуррентных зависимостей:

$$U_{Tc} = U_T - i \frac{R_T \Delta x}{2}, \tag{6.1}$$

$$\Delta i = - \frac{U_{Tc}}{R_{\text{ia}}} = - \frac{U_T - i \frac{R_T \Delta x}{2}}{R_T} \cdot \Delta x, \tag{6.2}$$

где R_T согласно СТП 320.30019801.072-2003 рассчитывается таким образом:

$$R_T = \frac{\rho_T 10^7}{\pi(10^3 D - \delta) \delta}, \tag{6.3}$$

где ρ_T - удельное электрическое сопротивление металла трубы;

D - внешний диаметр трубы;

δ - толщина стенки трубы.

Значение тока i_0 в точке подключения УКЗ определяется так:

$$i_0 = I_{\text{УКЗ}} \tag{6.4}$$

Значение потенциала в точке подключения УКЗ определяется таким образом:

$$U_{T1}[0] = I_{\text{УКЗ}i} \cdot \sqrt{\frac{R_{\text{ia}} \cdot R_T}{\pi \cdot D}}. \tag{6.5}$$

Значение потенциала грунта $U_{\text{гpi}}(x)$, которое создается электрическим полем анодного заземления k -й УКЗ определяется таким образом:

$$U_{\text{гpi}}(x) = \frac{I_{\text{УКЗ}i} \rho_{\text{гп}}}{2\pi L_A^i} \cdot \ln \left(\frac{(x - x_A^i) + \sqrt{(x - x_A^i)^2 + y_A^i}}{(x - (x_A^i + L_A^i)) + \sqrt{(x - (x_A^i + L_A^i))^2 + y_A^i}} \right), \tag{6.6}$$

где x_A^i, y_A^i, L_A^i - координаты размещения продольного анодного заземления k -й УКЗ.

Согласно алгоритму задачи 1 функция распределения потенциала „труба-земля” в каждой i -й точке участка трубопровода, $i=1..N$ определяется таким образом:

$$U_{T3}(x_i) = \sum_{k=1}^2 U_{Tк}(x_i) - \sum_{k=1}^2 U_{\text{гpk}}(x_i), \tag{6.7}$$

Задача 7. Формирование оптимального плана режима совместной работы всех УКЗ ЛЧ МГ на заданном интервале времени с учетом фактического состояния изоляционного покрытия

Задача предназначена для получения оптимального плана режима совместной работы всех установок катодной защиты ЛЧ МГ, что приводит к минимизации суммарных затрат на эксплуатацию всех УКЗ в заданный период времени. Задача принадлежит к классу задач нелинейного математического программирования с ограничениями в виде нелинейных неравенств и двусторонней ограниченностью переменных.

Математическая постановка задачи. Система электрохимической защиты полностью выполняет свое функциональное назначение на интервале управления $[0, T]$ только в том случае, если вероятность того, что фактическое значение потенциала „труба-земля” для любой точки защищенного участка трубопровода, и для другого момента времени будет находиться в допустимом интервале $[U_{T3}^-, U_{T3}^+]$, и будет не меньше заданной величины P_0 , значение которой близко к единице:

$$\forall t \in [0, T] \wedge \forall x \in L \wedge \forall \omega \in \Omega,$$

$$P(U_{T3}^- \leq U_{T3}(t, x, \omega) \leq U_{T3}^+) \geq P_0 \tag{7.1}$$

Для реальных систем ЭХЗ условие (7.1) оказывается трудновыполнимым, кроме того, для больших интервалов управления $[0, T]$ ему не удовлетворяет практически ни одна реальная система ЭХЗ. Это означает, что для реальных систем ЭХЗ вероятность выхода значения разности потенциалов „труба-земля” за допустимые границы будет больше, чем $(1 - P_0)$.

Качество функционирования систем ЭХЗ на интервале времени $[0, T]$ будем определять на основе локальных критериев, которые количественно выражают целевое назначение системы, режим работы и параметры УКЗ. Оценки качества функционирования систем ЭХЗ на основе таких критериев должны в явном виде включать требования вида (7.1) и рассматриваться как стохастичный функционал, определенный на пространстве случайных функций переходного сопротивления изоляционного покрытия подземного

трубопровода и сопротивления грунта вдоль трасы трубопровода. Как конкретные локальные показатели качества функционирования систем ЭХЗ могут быть использованы такие статистические характеристики этого функционала, как математическое ожидание и дисперсия.

Рассматривается однниточный участок подземного трубопровода $[0, L]$, на которой установлено NU УКЗ, с координатами $x_i, i=1...NU$. Назовем i -й участок трубопровода между $[x_{i-1}, x_i]$ точками подключения $(i-1)$ -й и i -й УКЗ.

Функция распределения потенциала $U_{T-3}(t, x, \omega)$ на интервале $[x_{i-1}, x_i]$ между $(i-1)$ -й и i -й УКЗ представляет собой выпуклую по $x \in [x_i, x_{i+1}]$ функцию, которая имеет два минимума в точках x_{i-1} и x_i и один максимум в некоторой внутренней точке x^* интервала $[x_{i-1}, x_i]$.

Локальной «диктующей точкой» системы ЭХЗ в момент времени $t \in [0, T]$ на интервале $[x_{i-1}, x_i]$ называется такая точка $x_i^*(t, \omega) \in [x_{i-1}, x_i]$, в которой функция $U_{T-3}(t, x, \omega)$ достигает максимума.

Локальной «диктующей точке» соответствует точка максимума случайной величины $U_{T-3}(t, x, \omega)$. Практически это означает, что локальная «диктующая точка» также является случайной величиной и для $\forall \omega \in \Omega \wedge \forall t \in [0, T]$ может принимать значения из некоторого открытого интервала $X_i^* = (x_{i-1}^*, x_i^{*+})$, являющегося подмножеством множества $[x_{i-1}, x_i]$, т.е. $X_i^* \subset [x_i, x_{i+1}]$.

Подмножество $X_i^* \subset [x_{i-1}, x_i]$ называется множеством «диктующих точек» системы ЭХЗ на интервале $[x_{i-1}, x_i]$.

Глобальной «диктующей точкой» систем ЭХЗ на интервале $[x_{i-1}, x_i]$ называется такая точка $x_i^* \in X_i^*$, для которой выполняется условие:

$$\forall t \in [0, T] \wedge \forall \omega \in \Omega : x_i^* = \arg \max_{x \in X_i^*} U_{T-3}(t, x, \omega) . \quad (7.2)$$

Знание местоположения глобальной «диктующей точки» на интервале $[x_{i-1}, x_i]$ позволяет получить оценки качества функционирования системы ЭХЗ на этом интервале на основании оценок вида (7.2), вычисленных при $x = x_i^*$.

Так как функция распределения потенциала $U_{T-3}(t, x, \omega)$ на интервале $[x_{i-1}, x_i]$ достигает минимального значения только в точках x_{i-1} и x_i оценки качества функционирования системы ЭХЗ будут иметь вид:

$$G : \forall t \in [0, T] \wedge \forall \omega \in \Omega, i=1, n ;$$

$$P(U_{T-3}(x_i^*, t, \omega) \leq U_{T-3}^+) \leq \alpha , \quad (7.3)$$

$$P(U_{T-3}(x_i, t, \omega) \geq U_{T-3}^-) \leq \beta . \quad (7.4)$$

Критерием оценки качества функционирования системы ЭХЗ, является ограничение вероятности выхода значения потенциала труба-земля за пределы верхней границы $U_{T-3}^+ = -0.85$ [В] с вероятностью не ниже $\alpha = 0.98$; нижней границы $U_{T-3}^- = -1.15$ [В] с вероятностью ниже, чем $\beta = 0.95$.

Для рассматриваемого однниточного участка подземного трубопровода энергетические затраты на ра-

боту i -й СКЗ в момент времени $t \in [0, T]$ определяется мощностью по постоянному току на выходе преобразователя СКЗ $C_{i\text{эксн}}$, [кВт·ч]:

$$C_{i\text{эксн}} = P_i(t) \cdot t , \quad (7.5)$$

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

$$P_i(t) = U_{\text{имп}}(t) I_i , \quad (7.6)$$

где $U_{\text{имп}}(t) = I_i \cdot [R_{\text{ил}} + R_{\text{иаз}} + z_i]$ – напряжение на выходе преобразователя i -й СКЗ [В] в момент времени t ;

- $I_i(t)$ – величина силы тока на выходе i -й СКЗ [А] в момент времени t ;

- $R_{\text{ил}}$ – сопротивление соединительных линий i -й СКЗ [Ом];

- $R_{\text{иаз}}$ – сопротивление анодного заземления i -й СКЗ [Ом];

- $z_i = \sqrt{R_{\text{имп}} \cdot R_{\text{иаз}} \cdot (\pi D)^{-1}}$ – характеристическое сопротивление трубопровода [Ом];

- $R_{\text{имп}}$ – продольное сопротивление подземного трубопровода, [Ом/м] на участке $[x_{i-1}, x_i]$;

- $R_{\text{иаз}}$ – среднее значение переходного сопротивления изоляционного покрытия, [Ом·м²] на участке $[x_{i-1}, x_i]$.

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

Как следует из (7.6) мощность i -й СКЗ P_i является в этом случае функцией от случайно величины $z_i(t, \omega)$ и, в свою очередь, также будет случайной величиной, т.е.

$$P_i(t, \omega) = I_i^2 [R_{\text{ил}} + R_{\text{иаз}} + z_i(t, \omega)] . \quad (7.7)$$

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

$$J_i(T, \omega) = \int_0^T P_i(t, \omega) dt = \int_0^T I_i^2 [R_{\text{ил}} + R_{\text{иаз}} + z_i(t, \omega)] dt . \quad (7.8)$$

Численное значение $J_i(T, \omega)$ характеризует суммарные затраты мощности i -й СКЗ на интервале времени $[0, T]$ и, как следует из (7.8) является случайной величиной.

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

Получили задачу стохастического программирования М-типа с вероятностными ограничениями. Целевая функция данной задачи является суммой энергетических затрат по эксплуатации каждой станции катодной защиты на промежутке времени $[0, T]$. Регулирование мощности СКЗ определяет величину защитного потенциала труба-земля, которая должна удовлетворять критериям, определяющим область G .

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

$$M_{\omega} \sum_{i=1}^n J_i(T, \omega) \rightarrow \min_{I \in G} \quad (7.9)$$

На основании показателей оценки качества функционирования системы ЭХЗ область допустимых решений G определяется системой неравенств

$$G: \forall t \in [0, T] \wedge \forall \omega \in \Omega, i = \overline{1, n},$$

$$P(U_{T-3}(x_i^*, t, \omega) \leq U_{T-3}^+) \leq \alpha, \quad (7.10)$$

$$P(U_{T-3}(x_i, t, \omega) \geq U_{T-3}^-) \leq \beta, \quad (7.11)$$

$$0 \leq I_i \leq I_i^{\max}, \quad (7.12)$$

где I - вектор значений силы тока СКЗ $I = [I_1, I_2, \dots, I_n]$
 - $U_{T-3}^+ = -0.85$ - максимальное значение защитного потенциала [В];
 - $U_{T-3}^- = -1.15$ - минимальное значение защитного потенциала [В];
 - I_i^{\max} - максимальные значения силы тока СКЗ [А].

При построении детерминированного эквивалента задачи стохастического программирования (7.9)-(7.12) будем предполагать, что случайные величины сопротивления изоляции $R_{из}(\omega)$ и сопротивления грунта $\rho_{гр}(\omega)$ распределены по нормальному закону распределения с известными параметрами, т.е. $R_{из}(\omega) \equiv N(\overline{R_{из}}, \sigma_{R_{из}}^2)$, $\rho_{гр}(\omega) \equiv N(\overline{\rho_{гр}}, \sigma_{\rho_{гр}}^2)$, где $\overline{R_{из}}$, $\overline{\rho_{гр}}$ - математические ожидания случайных величин сопротивления изоляции и удельного сопротивления грунта соответственно, $\sigma_{R_{из}}^2$, $\sigma_{\rho_{гр}}^2$ - дисперсия случайных величин сопротивления изоляции и удельного сопротивления грунта соответственно. На заданном интервале управления $[0, T]$ параметры распределения случайных величин $R_{из}(\omega)$ и $\rho_{гр}(\omega)$ будем считать постоянными.

После подстановки выражения для вычисления затрат мощности i -й СКЗ (7.8) и выражения характеристического сопротивления участка трубопровода, целевая функция задачи (7.9) будет иметь вид:

$$\sum_{i=1}^n M_{\omega} \left\{ \int_0^T I_i^2 [R_{ил} + R_{из} + \sqrt{R_{инп} \cdot R_{из}(\omega) \cdot (\pi D)^{-1}}] t dt \right\} \rightarrow \min_{I \in G} \quad (7.13)$$

После вычисления определенного интеграла выражение (7.13) можно представить в виде:

$$\sum_{i=1}^n M_{\omega} \left\{ I_i^2 [R_{ил} + R_{из} + \sqrt{R_{инп} \cdot R_{из}(\omega) \cdot (\pi D)^{-1}}] \frac{T^2}{2} \right\} \rightarrow \min_{I \in G} \quad (7.14)$$

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 $Mf(x, \eta(\omega)) \geq f(M\eta(x, \eta(\omega)))$, если функция $f(x, \eta(\omega))$ выпуклая, и $Mf(x, \eta(\omega)) \leq f(M\eta(x, \eta(\omega)))$, если функция $f(x, \eta(\omega))$ вогнута.

Характерный вид графика зависимости функции затрат мощности i -й УКЗ (7.8) от значения случайная величина $R_{из}(\omega)$ приведена на рис. 2.

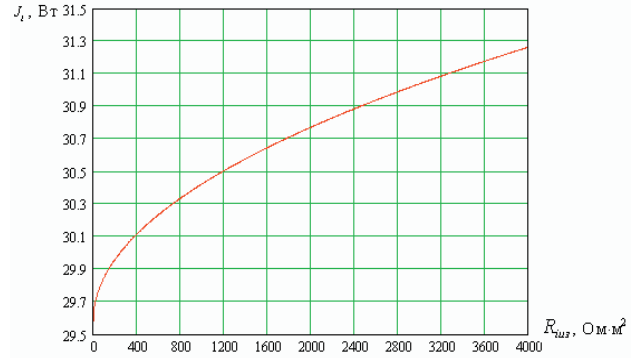


Рис. 2. Зависимости функции затрат мощности i -й УКЗ от значения случайная величина $R_{из}(\omega)$

Из графика зависимости (7.8) видно что функция, которая определяет затраты при эксплуатации УКЗ, вогнутая, т.е. имеет место неравенство:

$$\sum_{i=1}^n M_{\omega} \left\{ I_i^2 [R_{ил} + R_{из} + \sqrt{R_{инп} \cdot R_{из}(\omega) \cdot (\pi D)^{-1}}] \frac{T^2}{2} \right\} \leq \sum_{i=1}^n \left(I_i^2 [R_{ил} + R_{из} + \sqrt{R_{инп} \cdot \overline{R_{из}} \cdot (\pi D)^{-1}}] \frac{T^2}{2} \right) \quad (7.15)$$

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

Рассмотрим неравенства (7.10)-(7.11) определяющие область G задачи стохастического программирования, для построения детерминированного эквивалента задачи необходимо нахождение функции распределения разности потенциалов труба-земля $U_{T-3}(x, t, \omega)$ в диктующих точках.

Как уже рассматривалось ранее, потенциал «труба-земля» в точке x представляет собой сумму потенциалов создаваемой каждой СКЗ и является разницей отрицательного потенциала трубы и положительного потенциала грунта:

$$U_{T-3}(x, t, \omega) = \sum_{i=1}^n U_T^i(x, R_{из}(\omega, t)) - \sum_{i=1}^n U_{гр}^i(x, \rho_{гр}(\omega, t)) \quad (7.16)$$

Найдем распределение случайной величины отрицательного потенциала трубы $U_T^i(x_k^*, R_{из}(\omega, t))$ i -й СКЗ в диктующей точке x_k^* при известном распределении случайной величины сопротивления изоляции $R_{из}(\omega) \equiv N(\overline{R_{из}}, \sigma_{R_{из}}^2)$. С помощью критерия Пирсона проверки статистической гипотезы о распределении случайной величины принимаем, что случайная величина $U_T^i(x_k^*, R_{из}(\omega, t))$ имеет нормальное распределение:

$$U_T^i(x_k^*, R_{из}(\omega, t)) \equiv N(\overline{U_T^i(x_k^*)}, \sigma_{U_T^i(x_k^*)}^2) \quad (7.17)$$

Найдем распределение случайной величины положительного потенциала грунта $U_{гр}^i(x, \rho_{гр}(\omega, t))$ i -й СКЗ в диктующей точке x_k^* при известном распределении удельного сопротивления грунта $\rho_{гр}(\omega) \equiv N(\overline{\rho_{гр}}, \sigma_{\rho_{гр}}^2)$. Как видно из выражения

$$U_{гр}^i(x, \rho_{гр}(\omega, t)) = \frac{I_i \rho_{гр}(\omega, t)}{2\pi(b_i - a_i)} \ln \left(\frac{(x - a_i) + \sqrt{(x - a_i)^2 + y_i^A}}{(x - b_i) + \sqrt{(x - b_i)^2 + y_i^A}} \right) \quad (7.18)$$

Случайная величина $U_{гр}^i(x, \rho_{гр}(\omega, t))$ является линейной функцией от нормально распределенного аргумента удельного сопротивления грунта т.о. является нормально распределенной случайной величиной:

$$U_{гр}^i(x_k^*, \rho_{гр}(\omega, t)) \equiv N(\overline{U_{гр}^i(x_k^*)}, \sigma_{U_{гр}^i(x_k^*)}^2). \quad (7.19)$$

Таким образом, потенциал «труба-земля» в диктующих точках представляет собой сумму нормально распределенных случайных величин также является нормально распределенной случайной величиной, при этом случайные величины сопротивления изоляции $R_{из}(\omega)$ и удельного сопротивления грунта $\rho_{гр}(\omega)$ являются независимыми случайными величинами:

$$U_{Т-3}(x_k^*, \omega) \equiv N(\overline{U_{Т-3}(x_k^*)}, \sigma_{U_{Т-3}(x_k^*)}^2). \quad (7.20)$$

При известных параметрах математического ожидания и дисперсии случайной величины потенциала «труба-земля» в диктующих точках выражение

$$P(U_{Т-3}(x_i^*, t, \omega) \leq U_{Т-3}^+) = P(U_{Т-3}(x_i^*, t, \omega) - U_{Т-3}^+ \leq 0) = \Phi\left(-\frac{\overline{U_{Т-3}(x_i^*)} - U_{Т-3}^+}{\sigma_{U_{Т-3}(x_i^*)}}\right) \leq \alpha, \quad (7.21)$$

неравенство (4.6) представим в виде:

$$\Phi^{-1}(\alpha) \cdot \sigma_{U_{Т-3}(x_i^*)} \geq -(\overline{U_{Т-3}(x_i^*)} - U_{Т-3}^+), \quad (7.22)$$

где $\Phi^{-1}(\alpha)$ - обратная функция Лапласа. Выражение (7.22) можно представить в виде:

$$P(U_{Т-3}(x_i, t, \omega) \geq U_{Т-3}^-) = P(U_{Т-3}(x_i, t, \omega) - U_{Т-3}^- \geq 0) = \Phi\left(\frac{\overline{U_{Т-3}(x_i)} - U_{Т-3}^-}{\sigma_{U_{Т-3}(x_i)}}\right) \leq \beta, \quad (7.23)$$

неравенство (7.23) представим в виде:

$$\Phi^{-1}(\alpha) \cdot \sigma_{U_{Т-3}(x_i)} \geq \overline{U_{Т-3}(x_i)} - U_{Т-3}^-. \quad (7.24)$$

Таким образом, детерминированный эквивалент задачи (7.9)-(7.12) принимает вид:

$$\sum_{i=1}^n \left(I_i^2(t) [R_{ил} + R_{из} + \sqrt{R_{имп} \cdot R_{из} \cdot (\pi D)^{-1}}] \frac{T^2}{2} \right) \rightarrow \min_{I \in G} \quad (7.25)$$

$$G: i = \overline{1, n}: \Phi^{-1}(\alpha) \cdot \sigma_{U_{Т-3}(x_i^*)} \geq -(\overline{U_{Т-3}(x_i^*)} - U_{Т-3}^+), \quad (7.26)$$

$$\Phi^{-1}(\alpha) \cdot \sigma_{U_{Т-3}(x_i)} \geq \overline{U_{Т-3}(x_i)} - U_{Т-3}^-, \quad (7.27)$$

$$0 \leq I_i \leq I_i^{\max}. \quad (7.28)$$

Задача 8. Стабилизация величины защитного потенциала в „диктующих” точках ЛЧ МГ

Задача предназначена для поддержки принятия решений специалистами служб ЭХЗ относительно корректирующих действий по стабилизации величины защитного потенциала в „диктующих” точках ЛЧ МГ.

Математическая постановка задачи. Стабилизация величины защитного потенциала $U_{ТЗ}(x_k, t, \omega)$ в глобальных „диктующих” точках (ГДТ) ЛЧ МГ x_k на $j-9, j=1, 2, \dots$ участке трубопровода осуществляется путем изменения силы тока I_k k-й УКЗ на величину $\pm \Delta I_k$. Изменение силы тока I_k k-й УКЗ осуществляется путем изменения значения уставки на величину $\pm \Delta I_k$.

Выбор номеров УКЗ и знаков прироста ΔI осуществляется по следующему алгоритму.

1 Вычисление оценки математического ожидания значения защитного потенциала „труба-земля” $U_{ТЗ}(x_k, t, \omega)$ в ГДТ каждого j-го участка трубопровода:

$$\widehat{U}_{ТЗ}(x_k) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T U_{ТЗ}(x_k, t, \omega) \quad (8.1)$$

2 Вычисление значения индикаторной функции:

$$\eta_k(t) = \begin{cases} U_{ТЗ}(x_k, t, \omega) - U_{ТЗ}^+ = 1, & \text{если } U_{ТЗ}(\cdot) > U_{ТЗ}^+; \\ U_{ТЗ}(x_k, t, \omega) - U_{ТЗ}^+ = 0, & \text{если } U_{ТЗ}(\cdot) \leq U_{ТЗ}^+. \end{cases} \quad (8.2)$$

3 Оценка вероятности того, что фактическое (измененное) значение защитного потенциала $U_{ТЗ}(x_k, t, \omega)$ в ГДТ x_k больше максимально допустимого значения $U_{ТЗ}^+$, которое определяется нормативным документом ДСТУ Б В. 25-29:2006.

$$\widehat{P}(x_k) = P(U_{ТЗ}(x_k, \omega) > U_{ТЗ}^+) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \eta_k(t) \quad (8.3)$$

4 Ранжирование ГДТ выполняется в два этапа

Этап 1. Вычисление величины отклонения оценки математического ожидания $\widehat{U}_{ТЗ}(x_k)$ в „диктующей точке” x_k от максимально допустимого значения $U_{ТЗ}^+$:

$$\widehat{\delta}(x_k) = U_{ТЗ}^+ - \widehat{U}_{ТЗ}(x_k), \quad k=1, 2, \dots \quad (8.4)$$

Этап 2. Ранжирование ГДТ по двум показателям: $\widehat{\delta}(x_k), \widehat{P}(x_k)$.

$$\widehat{\delta}_1(x_k) \leq \widehat{\delta}_2(x_k) \leq \dots \leq \widehat{\delta}_i(x_k) \leq \dots \leq \widehat{\delta}_{ND}(x_k) \quad (8.5)$$

$$\widehat{P}_1(x_k) \geq \widehat{P}_2(x_k) \geq \dots \geq \widehat{P}_j(x_k) \geq \dots \geq \widehat{P}_{ND}(x_k) \quad (8.6)$$

5 Выбор номера УКЗ, режим которой должен быть скорректированным. Процедура осуществляется таким образом:

$$5.1 \text{ Проверка условия для ряда (8.6). Если } \widehat{P}_j(x_k) > \alpha, j=1, 2, \dots, ND, \quad (8.7)$$

то $j=j^*$ и переходим к пункту 5.6, если условие (8.7) не выполняется, то к пункту 5.2.

$$5.2 \text{ Проверка условия для ряда (8.5). Если } \widehat{\delta}_i(x_k) > \delta_0, \quad (8.8)$$

то $i=i^*$ и переходим к пункту 5.3, если другое, то к пункту 5.4.

5.3 Выполнение условия (8.8) для некоторых $i=i^*$ означает, что математическое ожидание значения защитного потенциала $U_{ТЗ}(x_k, t, \omega)$ находится существенно ниже его допустимого значения и может быть скорректировано в сторону его уменьшения. Если i^* это единственная точка, для которой выполняется

условие (8.8), то для корректирования режима выбирается УКЗ с номером $k = i^*$. Переходим к пункту 5.5. Если условие (8.8) выполняется для ряда последовательно размещенных ГДТ, например $i_1^* = j, i_2^* = j+1$, то для корректирования режима выбираем УКЗ, которые находятся между j - м и $j+1$ участками трубопровода и тому подобное. Переходим к пункту 5.5.

5.4 Невыполнение условий (8.7), (8.8) означает, что значение защитного потенциала по всем ГДТ на защищенном участке трубопровода находятся в допустимых границах и корректирование режимов работы УКЗ не нужно.

Переходим к пункту 5.8.

5.5 Выдача управляющего действия на k - ю УКЗ для изменения ее тока на величину

$$I_k^* = I_k - \Delta I \tag{8.9}$$

Расчет нового значения мощности для k - й УКЗ:

$$N_k^* = U_k I_k^* \tag{8.9a}$$

Переход к пункту 5.8.

5.6 Если j^* это единственная ГДТ, в которой выполняется условие (8.7), то для корректирования режима выбираем УКЗ с номером $k = j^*$ и переходим к пункту 5.7. Если условие (8.7) выполняется для ряда последовательно размещенных ГДТ, например $j_1^* = j, j_2^* = j+1$, то для коррекции режима выбираем УКЗ, которые находятся между j - м и $j+1$ участками трубопровода и тому подобное. Переходим к пункту 5.7.

5.7 Вычисление фактического значения мощности k -й УКЗ при изменении ее тока на $+\Delta I$:

$$N_k^* = U_k (I_k + \Delta I) . \tag{8.10}$$

Проверяем условие, которое $N_k^* \leq N_{kmax}$. Если условие выполняется, то выдаем управляющее действие на k - ю УКЗ для изменения ее тока на величину

$$I_k^* = I_k + \Delta I \tag{8.11}$$

Если условие не выполняется, то переход к пункту 5.8.

5.8 Конец

Задача 9. Оптимальное перераспределение нагрузки между УКЗ при отключении или отказе одной или нескольких УКЗ

Задача предназначена для получения оптимального плана перераспределения нагрузки между УКЗ при отключении или отказе одной или нескольких УКЗ на защищаемом участке ЛЧ МГ, за счет оптимизации текущего режима работы тех УКЗ, которые работают. Решение задачи выполняется итерационно, причем на каждом шагу итерации рассчитывается распределение защитного потенциала „труба-земля” при отключении j -й УКЗ, осуществляется анализ выхода значений защитного потенциала за границы максимально допустимого значения $U_{ТЗ}^+$, корректируются режимы работы соседних УКЗ по левую сторону и по правую сторону. Задача оптимального перераспределения нагрузки между УКЗ принадлежит к классу задач нелинейного математического программирова-

ния с ограничениями в виде нелинейных неравенств и двусторонней ограниченностью переменных.

Математическая постановка задачи. Согласно алгоритму задачи 2 функция распределения потенциала „труба-земля” в каждой i -й точке j -го участка трубопровода, $i=1..N_j, j=1..ND$, определяется таким образом:

$$U_{ТЗ}(x_{ij}) = \sum_{k=1}^{NU} U_{ik}(x_{ij}) \cdot b_k - \sum_{k=1}^{NU} U_{гpk}(x_{ij}) \cdot b_k , \tag{9.1}$$

где $b_k = 1$, если k -я УКЗ в работе, и $b_k = 0$, если k -я УКЗ отключена.

Согласно [4], задача оперативного планирования режимов работы УКЗ в стохастической постановке будет иметь вид:

$$M_{\omega} \sum_{k=1}^{NU} J_k(T, \omega) \cdot b_k \rightarrow \min_{I \in G} \tag{9.2}$$

где $I = \{I_k\}_{k=1}^{NU}$ - вектор значений тока по всему УКЗ. Если k -я УКЗ отключена, то считаем $I_k = 0$.

На основании показателей оценки качества функционирования системы ЭХЗ область допустимых решений определяется системой неравенств

$$\begin{cases} P(U_{ТЗ}(t, x^*, \omega) \leq U_{ТЗ}^+) \geq \alpha, \\ P(U_{ТЗ}(t, x_i, \omega) \geq U_{ТЗ}^-) \geq \beta, \\ 0 \leq I_k \leq I_k^{\max}, \end{cases} \tag{9.3}$$

$$G: \forall t \in [0, T] \wedge \forall \omega \in \Omega, k = 1..NU$$

где I_k - сила тока k -й УКЗ;
 I_k^{\max} - максимально допустимое значение силы тока на k -и УКЗ.

Детерминированный эквивалент задачи (9.3) принимает вид:

$$\sum_{k=1}^{NU} \left(I_k^2 \left[R_{klij} + R_{казij} + \sqrt{R_{кпрij} \cdot R_{кisij}(\omega) \cdot (\pi D)^{-1}} \right] \cdot \frac{T^2}{2} \cdot b_k \right) \rightarrow \min_{I_k \in G} \tag{9.4}$$

$$G: k = 1..NU$$

$$\begin{cases} \Phi^{-1}(\alpha) \cdot \sigma_{U_{ТЗ}(x^*)} \leq -(\bar{U}_{ТЗ}(x^*) - U_{ТЗ}^+) \\ \Phi^{-1}(\alpha) \cdot \sigma_{U_{ТЗ}(x^*)} \leq (\bar{U}_{ТЗ}(x_k) - U_{ТЗ}^-) \\ 0 \leq I_k \leq I_k^{\max} \end{cases} \tag{9.5}$$

3. Выводы

Рассмотрен функционально полный комплекс задач «Анализ и оптимальное управление режимами работы средств электрохимзащиты магистральных газопроводов», решение которого обеспечивает повышение эффективности принятия решений специалистами служб электрохимической защиты магистральных газопроводов при эксплуатации системы ЭХЗ.

Научная новизна полученных результатов заключается в строгой математической постановке всех задач анализа и управления режимами работы средств электрохимзащиты магистральных газопроводов.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что использование результатов комплекса задач обеспечивает реальное повышение эффективности эксплуатации средств ЭХЗ магистральных газопроводов, позволяет сократить количество отказов трубопроводов и сократить затраты электроэнергии на УКЗ.

Литература

1. ДСТУ 4219:2003 Трубопроводи сталеві магістральні. Загальні вимоги до захисту від корозії

Дано опис метода діагностування корпоративної IP-мережі, в якому реалізована концепція інтелектуального аналізу даних. В якості джерела даних пропонується використовувати базу даних діагностичної інформації, яка містить опис роботи компонентів IP- мережі у вигляді набору подій

Ключові слова: IP-мережа, методи діагностики, асоціативні правила, інтелектуальний аналіз даних

Описан метод диагностирования корпоративной IP-сети, в котором реализована концепция интеллектуального анализа данных. В качестве источника данных предлагается использовать базу данных диагностической информации, которая содержит описания работы компонентов IP-сети в виде событий

Ключевые слова: IP-сеть, методы диагностики, ассоциативные правила, интеллектуальный анализ данных

The method of diagnostics of corporate IP networks, conception of intellectual analysis of data is realized in which, is described. As a source of data it is suggested to use the database of diagnostic information which contains descriptions of work of components of IP networks as events

Keywords: IP- networks, methods of diagnostics, associative rules, intellectual analysis of data

УДК 681.003.66

МЕТОД ПОИСКА ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ В БАЗЕ ДАННЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ КОРПОРАТИВНОЙ IP-СЕТИ

А. Л. Стокипный

Офицер отдела

Восточное региональное управление Государственной пограничной службы Украины

г. Харьков

Контактный тел.: 8 (057) 700-92-06

E-mail – a.stokipny@gmail.com

1. Введение

На сегодняшний день в ходе создания подавляющего большинства современных корпоративных информационно-телекоммуникационных систем применяются IP-технологии и протоколы. Корпоративная IP-сеть является основой функционирования ключевых компонентов современных информационных

систем – пользовательских служб, распределенный характер которых выдвигает высокие требования к доступности используемой сети передачи данных. Повысить доступность корпоративной IP-сети можно путем сокращения времени простоя, составляющими которого с одной стороны является время, необходимое для проведения плановых работ по техническому обслуживанию, а с другой – время, затрачиваемое об-