

**АО «Гипрогазцентр»**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Ухтинский государственный технический университет»

На правах рукописи



**НИКУЛИН СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ  
КОРРОЗИИ НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ НА ОСНОВЕ  
ОПТИМАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ  
СТАНЦИЙ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ**

Специальность 25.00.19 – Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и  
хранилищ

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Ухта – 2015

Работа выполнена в АО «Гипрогазцентр» и на кафедре «Проектирование и эксплуатация магистральных газонефтепроводов» ФГБОУ ВПО «Ухтинский государственный технический университет».

Научный руководитель: Спиридович Евгений Апполинарьевич  
доктор технических наук, старший научный сотрудник

Официальные оппоненты: Земенков Юрий Дмитриевич, д. т. н., профессор,  
заведующий кафедрой транспорта углеводородных ресурсов Тюменского государственного нефтегазового университета

Юшманов Валерий Николаевич, к. т. н., начальник производственно-диспетчерской службы ООО «Газпром трансгаз Ухта»

Ведущая организация: Филиал ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта

Защита состоится 30 октября 2015 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.291.02 в Ухтинском государственном техническом университете по адресу: 169300, г. Ухта, Республика Коми, ул. Первомайская, 13.

С авторефератом и диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Ухтинский государственный технический университет», а также на сайте вуза по адресу [www.ugtu.net](http://www.ugtu.net) в разделе «Наука→Диссертации».

Автореферат разослан 28 августа 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук,

М. М. Бердник

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Критерием оценки эффективности электрохимической защиты от коррозии является защитный потенциал и защитная плотность тока, которые в каждой точке трубопровода зависят как от физико-химических свойств коррозионной среды, так и состояния оборудования противокоррозионной защиты и могут меняться в широких пределах.

Завышение по модулю защитных потенциалов относительно нормируемых значений приводит к перерасходу электроэнергии и, в целом, значительно удорожает эксплуатацию системы катодной защиты, отрицательно влияет на состояние изоляционного покрытия и ведет к изменению механических свойств металла трубы, повышенному растворению анодных заземлений. В свою очередь недостаточная катодная защита нефтегазопроводов приводит к повышению скорости коррозии стенки трубопровода и, как результат, к преждевременному выходу его из строя.

Существующие системы управления станциями катодной защиты (СКЗ) работают в функции поддержания заданного параметра без адаптации к изменяющимся условиям нагрузки, что приводит к снижению эффективности электрохимической защиты. При этом контроль управляемого параметра ведется только в точке дренажа, что не позволяет системе реагировать на изменения параметров грунта и изоляционных покрытий по трассе трубопровода, влияющих на распределение защитных потенциалов.

В условиях отсутствия информации по всем факторам, влияющим на коррозию, в том числе и изменяющихся во времени, задача обеспечения оптимальных выходных режимов работы станций катодной защиты, обеспечивающих защищенность по протяженности и во времени на всех сооружениях одновременно с минимальными энергозатратами, является актуальной.

Развитие систем дистанционного коррозионного мониторинга и управления дает возможность получения массива информации о состоянии магистрального трубопровода и степени его защищенности в различных его точках, а также удаленного изменения режимов работы станций катодной защиты. Однако до настоящего времени отсутствует методика, позволяющая на основе оценки совокупности коррозионных факторов, особенностей защищаемого участка, состояния оборудования электрохимической защиты принимать решение о выборе оптимальных режимов работы станций катодной защиты. Наличие апробированной методики оптимального регулирования режимов работы станций катодной защиты, повышающей эффективность электрохимической защиты, является актуальной необходимостью для объектов транспорта нефти и газа.

**Цель работы.** Совершенствование методов оптимального регулирования режимов работы и разработка алгоритмов оптимального управления станциями катодной защиты от коррозии магистральных трубопроводов.

### **Задачи исследования:**

- анализ современных методик оптимального регулирования режимов работы станций катодной защиты;
- разработка модели распределения потенциалов по трассе магистрального нефтегазопровода на основе идентификации модели «труба-земля»;
- выявление необходимых и достаточных критериев для решения задачи повышения эффективности катодной защиты от коррозии;
- нахождение методов решения многокритериальной задачи установления оптимальных параметров станций катодной защиты от коррозии;
- разработка алгоритмов оптимального регулирования режимов работы станций катодной защиты;
- апробация полученных результатов на объекте линейной части действующего магистрального газопровода.

### **Научная новизна:**

1. Усовершенствована модель распределения потенциалов по трассе магистрального нефтегазопровода в зависимости от управляющего воздействия, отличающаяся от известных уменьшением времени на проведение замеров для ее идентификации за счет использования систем дистанционного коррозионного мониторинга и введения понятия сторонняя разность потенциалов «труба-земля» трубопровода, которая учитывает влияние неизвестных источников тока на величину защитной суммарной разности потенциалов «труба-земля» в конкретной точке. Экспериментальным путем установлено, что погрешность вычисляемого значения защитной суммарной разности потенциалов «труба-земля» в конкретной точке, с помощью предложенной модели, не превышает 0,6% относительно измеряемой для данных условий проведения исследования.

2. Разработаны подходы на основе методов структурно-параметрической оптимизации для решения многокритериальной задачи нахождения оптимальных параметров станций катодной защиты.

3. Предложена формула интегрального показателя степени влияния коррозионных факторов  $Int_j$  на участке магистрального трубопровода, позволяющая ранжировать участки между станциями катодной защиты для принятия решений о возможности изменения режимов работы станций.

### **Основные защищаемые положения:**

1. Разработанная модель распределения потенциалов по трассе магистрального нефтегазопровода в зависимости от режимов работы СКЗ коррозии за счет введения понятия сторонняя разность потенциалов «труба-земля» и возможности сокращения времени за счет проведения дистанционного измерения параметров защищенности и регулирования режимов станций катодной защиты.

2. Разработанные методы идентификации модели «труба-земля» с использованием байесовской методологии, позволяющие повысить точность формируемой модели.

3. Многокритериальный подход к решению задачи повышения эффективности защиты от коррозии на основе применения методов структурной оптимизации для нахождения выходных параметров работы станций катодной защиты магистральных трубопроводов от коррозии.

4. Разработанные алгоритмы эффективного управления системой активной защиты от коррозии магистральных трубопроводов, учитывающие параметры защищаемого объекта, оборудования противокоррозионной защиты и коррозионного состояния участка трубопровода.

**Практическая ценность.** Полученные результаты позволяют проводить оптимальное регулирование режимов работы станций катодной защиты в реальном масштабе времени, как действующих магистральных трубопроводов, так и новых вводимых в эксплуатацию трубопроводов, позволяющие добиться как защищенности и энергоэффективности, так и продления срока службы элементов противокоррозионной защиты (изоляционных покрытий, анодных заземлений).

Полученные результаты использованы для проведения работ по оптимизации режимов работы средств ЭХЗ действующего магистрального газопровода «Саратов-Горький» км 92 - 147.

**Результаты работы** внедрены:

- при разработке мероприятий по обеспечению энергетической эффективности, определению оптимальных режимов работы станций катодной защиты, как при реконструкции существующих нефтегазотранспортных объектов, так и вновь строящихся объектов в АО «Гипрогазцентр» (шифр 4543 «Магистральный газопровод «Сила Сибири», «Общесистемные решения»; шифр 14/2225 «Математическое обеспечение оптимизации режимов работы станций катодной защиты ГТС «Сила Сибири»);

- в учебный процесс по дисциплинам «Защита объектов транспорта и хранения нефти и газа от коррозии» и «Электрохимические методы защиты нефтегазопроводов», которые входят в учебные программы подготовки магистров и бакалавров по направлению 131000 – «Нефтегазовое дело» на базовой кафедре «Проектирование и эксплуатация газонефтепроводов и газонефтехранилищ» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева в АО «Гипрогазцентр»;

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы представлялись, докладывались и обсуждались на следующих конференциях: научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электроэнергетики» (г. Нижний Новгород, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2012 г.), научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов научно-исследовательских и проектных организаций ОАО «Газпром» «Актуальные вопросы проектирования объектов добычи и транс-

портировки газа (г. Нижний Новгород, ОАО «Гипрогазцентр», 2013 г.), V международная молодежная научно-практическая конференция «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность» (г. Москва, ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 2013 г.), XX международная научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии. ИСТ – 2014» (г. Нижний Новгород, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2014 г.), XIII международная молодежная научно-техническая конференция «Будущее технической науки» (г. Нижний Новгород, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2014 г.), I научно-практическая конференция молодых специалистов ОАО «Гипрогазцентр» «Актуальные вопросы проектирования объектов транспорта нефти и газа» (г. Нижний Новгород, ОАО «Гипрогазцентр», 2014 г.), научно-практическая конференция специалистов АСПО Газпром «Научно-технологические инновации при проектировании объектов газовой промышленности» (г. Москва, АСПО Газпром, 2014 г.), VIII международная научно-техническая конференция «Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта» (г. Новополоцк Республика Беларусь, ПГУ, 2014 г.), XVI международная молодежная научная конференция «Севергеозкотех» (г. Ухта, УГТУ, 2015 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 15 работ, из них 5 в ведущих рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК России.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения. Содержит 144 страницы текста, включая 50 рисунков, 15 таблиц и список литературы из 97 наименований.

### **Содержание работы**

Во введении изложена актуальность темы работы, сформулированы цель и задачи исследования, показана научная новизна и практическая ценность, приведены основные положения, выносимые на защиту, сведения об апробации и публикациях по теме диссертационного исследования.

В первой главе *«Современное состояние защиты от коррозии стальных магистральных нефтегазопроводов, обзор существующих подходов к оптимальному регулированию режимов СКЗ»* рассмотрены условия эксплуатации и коррозионное состояние магистральных газонефтепроводов, методы защиты от коррозии, выделены основные технические особенности современных станций катодной защиты, систем и способов контроля за состоянием защищенности, проанализированы существующие подходы к вопросам оптимизации режимов работы станций катодной защиты.

В ходе анализа использовались как источники труды специалистов в области электрохимической защиты трубопроводов от коррозии и оптимизации режимов работы станций катодной защиты: Р. В. Агинея, Ю. В. Александрова, М. А. Башаева, Г. Г. Винокурцева, Н. П. Глазова, И. В. Глотова, Н. П. Жук, В. В. Палашова, Н. А. Петрова, В. В. Притула, Ф. К. Фатрахманова, W.v. Baeckmann, W. Schwenk, R. N. Parkins и др.

Влияние на распределение потенциала вдоль защищаемого участка оказывают изменяющиеся, как во времени, так и по протяженности параметры защищаемого объекта, оборудования противокоррозионной защиты и окружающей среды, такие как: удельное сопротивление грунта, сопротивление изоляции, сопротивление анодных заземлений. Проведя классификацию влияющих сопротивлений цепи установок катодной защиты (УКЗ), было произведено их разделение на три группы в зависимости от изменения их величины во времени. Были выделены условно постоянные параметры (к ним отнесены сопротивление металла трубопровода и соединительных проводов), изменяющиеся во времени с постоянным трендом (сопротивления изоляции и анодных заземлений) и сезонно изменяющихся (удельное сопротивление грунта) (рис.1).



$R_{тр}$ - продольное сопротивление трубопровода;  $R_{пр}$ - сопротивление соединительных проводов;  $R_{из}$ - сопротивление изоляционного покрытия;  $R_{аз}$ - сопротивление анодных заземлений;  $R_{гр}$ - удельное электрическое сопротивление грунта;  $t$  - время

**Рис. 1. Графическое отображение классификации влияющих на защитный потенциал сопротивлений**

В настоящее время восстановление полной защищенности участков магистрального трубопровода обеспечивается: применением дополнительных СКЗ, применением дополнительных анодных заземлений, ремонтом средств электрохимической защиты, переизоляции и регулированием режимов существующих СКЗ. Перечисленные варианты требуют значительных материальных вложений, поэтому наиболее предпочтительным и первоочередным является вариант с нахождением оптимальных режимов работы СКЗ, дающий возможность имеющимися средствами защиты восстановить защитный потенциал. Практически невозможно выставить такие выходные параметры СКЗ, позволяющие добиться 100% защищенности на всей протяженности участка трубопровода при минимальных энергозатратах и с учетом совокупностей коррозионных факторов, присутствующих на данном участке. Нахождение оптимальных параметров также актуально для новых трубопроводов или трубопроводов, подвергшихся переизоляции, СКЗ которых работают в мини-

мальных режимах и необходимо проведение регулирования режимов их работы. Кроме того, специалистами отмечается значительное падение КПД станций катодной защиты при их работе на минимальных режимах. Это характерно как для тиристорных, так и для инверторных типов современных станций и должно быть учтено при решении задачи оптимального регулирования.

Проведенный анализ нормативно-технической документации показал направленность на внедрение на магистральные трубопроводы систем коррозионного мониторинга для решения ряда задач, одной из которых является оптимальное управление станциями катодной защиты, при этом пути решения не указываются. Автором предложено использовать параметры систем дистанционного коррозионного мониторинга, устанавливаемых с определенной периодичностью по трассе магистральных трубопроводов, для решения задачи оптимального регулирования режимов работы станций катодной защиты.

Существующие методики оптимального регулирования режимов работы станций катодной защиты направлены в основном на конкретные локализованные объекты, такие как подземные трубопроводы промышленных площадок. Методики базируются на создании модели распределения защитных потенциалов в зависимости от выходных параметров СКЗ (1).

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1 &= A_{01} + A_{11}I_1 + A_{21}I_2 + \dots + A_{i1}I_n; \\ \varphi_2 &= A_{02} + A_{12}I_1 + A_{22}I_2 + \dots + A_{i2}I_n; \\ \varphi_k &= A_{0k} + A_{1j}I_1 + A_{2j}I_2 + \dots + A_{ij}I_n, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $\varphi_i$  - разность потенциалов  $i$ -ой точки подземных трубопроводов промплощадки,  $i = 1; 2; \dots; k$ ;

$I_j$  - сила тока  $j$ -ой станции катодной защиты,  $j = 1; 2; \dots; n$ ;

$A_{ij}$  - коэффициент влияния  $j$ -ой СКЗ на суммарную разность потенциалов в  $i$ -ой точке измерения.

Представленные модели описывают процессы токораспределения реального трубопровода с достаточной точностью и находятся методами регрессионного анализа. Для восстановления зависимостей необходим ряд измерений на реальном объекте. Существенный вклад в развитие этих методов внесли Ф. К. Фатрахманов, Г. Г. Винокурцев, Р. В. Агиней и И. В. Глотов.

М. Н. Башаевым предложена замена реального трубопровода математической моделью с последующей вычислительной процедурой определения оптимальных режимов СКЗ. Недостатком данной методики является обязательное наличие большого массива точных исходных данных о трубопроводе и его защищенности, что практически невозможно в условиях протяженного подземного объекта.

Все рассмотренные методики оптимального регулирования строятся на основе минимизации выходной мощности



$$\sum P_j = \sum_{j=1}^m I_j^2 \cdot R_j, \quad (2)$$

где  $I_j$  - сила тока  $j$ -ой СКЗ;

$R_j$  - сопротивление внешней цепи  $j$ -ой УКЗ.

При одновременном соблюдении ограничений на разности потенциалов:

$$|\Phi_{\min}| \leq |\Phi_i| \leq |\Phi_{\max}|, \quad (3)$$

где  $\Phi_{\min}$ ,  $\Phi_{\max}$  - минимальный и максимальный допустимый защитные потенциалы в точках согласно нормативно-технической документации.

К общим недостаткам рассмотренных подходов к оптимизации можно выделить:

- значительные временные затраты на проведения замеров для создания модели распределения защитных потенциалов по трассе магистрального трубопровода;

- оптимальное регулирование производится по параметру выходная мощность СКЗ, при этом другие параметры, такие как плотность защитного тока, КПД СКЗ не рассматриваются;

- при определении оптимальных режимов не учитываются коррозионные факторы и их совокупности на защищаемом участке.

Во второй главе *«Совершенствование моделей распределения потенциалов по трассе магистрального трубопровода»* автором было введено понятие сторонней разности потенциалов «труба-земля», необходимой для уменьшения времени проведения замеров на трассе трубопровода и восстановления зависимостей защитного потенциала от выходных параметров СКЗ, экспериментально проверена возможность его применения, разработаны и структурированы процедуры идентификации системы «труба-земля».

Понятие сторонней разности потенциалов «труба-земля» наложенной неизвестными источниками, определяющей стационарный потенциал металла трубопровода в совокупности с потенциалом, наложенным неизвестными источниками тока. Введение данного параметра в модель распределения потенциалов привело к возможности нахождения оптимальных параметров действующего трубопровода без отключения всех СКЗ на продолжительный срок и измерения стационарного потенциала металла трубопровода, а также, с применением систем дистанционного коррозионного мониторинга, к возможности дистанционного проведения замеров, что способствует облегчению проведения процедуры оптимального регулирования.

Экспериментальная проверка восстановления зависимостей защитной разности потенциалов «труба-земля» от силы тока СКЗ с использованием данного параметра проведена на реальном участке магистрального газопровода «Саратов-Горький» км 99-117.

Изменяя силу тока на выходе СКЗ на 107 км, определяли значение сторонней разности потенциалов в точке дренажа данной станции по формуле:

$$\Phi_{\text{стор}} = \Phi_1 - A_{11} \cdot I_1 - A_{12} \cdot I_2 - \dots - A_{ij} \cdot I_j, \quad (4)$$

где  $\Phi_{\text{стор}}$  - сторонняя разность потенциалов трубопровода, В;

$\Phi_1$  - защитная суммарная разность потенциалов «труба-земля»;

$I_j$  - сила тока на выходе  $j$ -ой СКЗ.

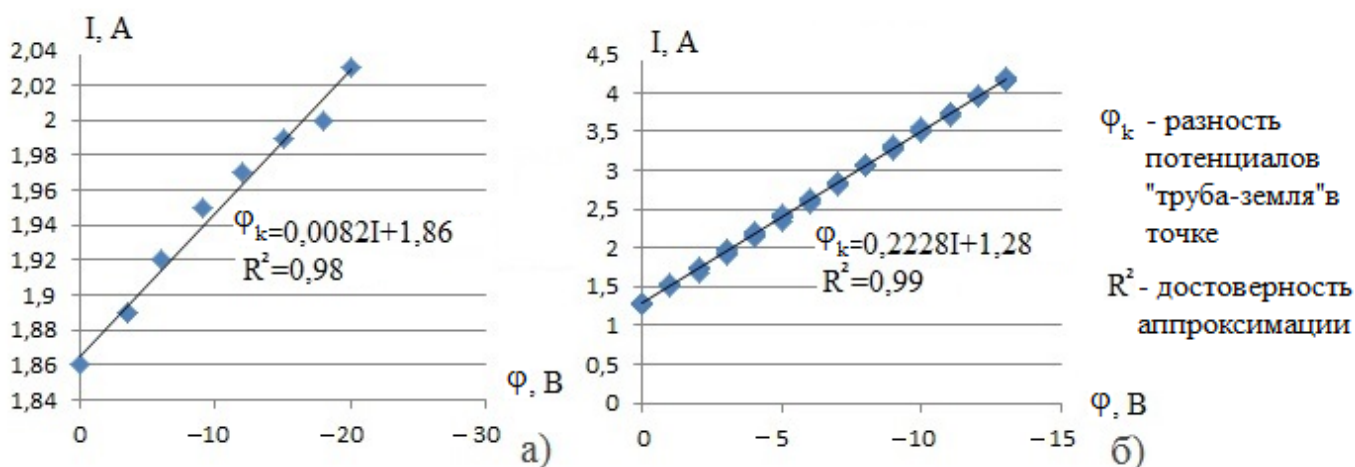
Особенностью критерия сторонняя разность потенциалов «труба-земля» является его значительное отличие от стационарного потенциала металла трубопровода, используемого во всех существующих моделях распределения защитных потенциалов, заключающееся в том, что сторонняя разность потенциалов включает в себя как потенциал наложенный станциями защиты, влияние которых не было определено, так и потенциал деполяризации трубопровода:

$$\Phi_{\text{стор}} = \Phi_{\text{ст}} + \Phi_{\text{деп}} + A_{ij} \cdot I_j, \quad (5)$$

где  $\Phi_{\text{деп}}$  - потенциал деполяризации трубопровода, В;

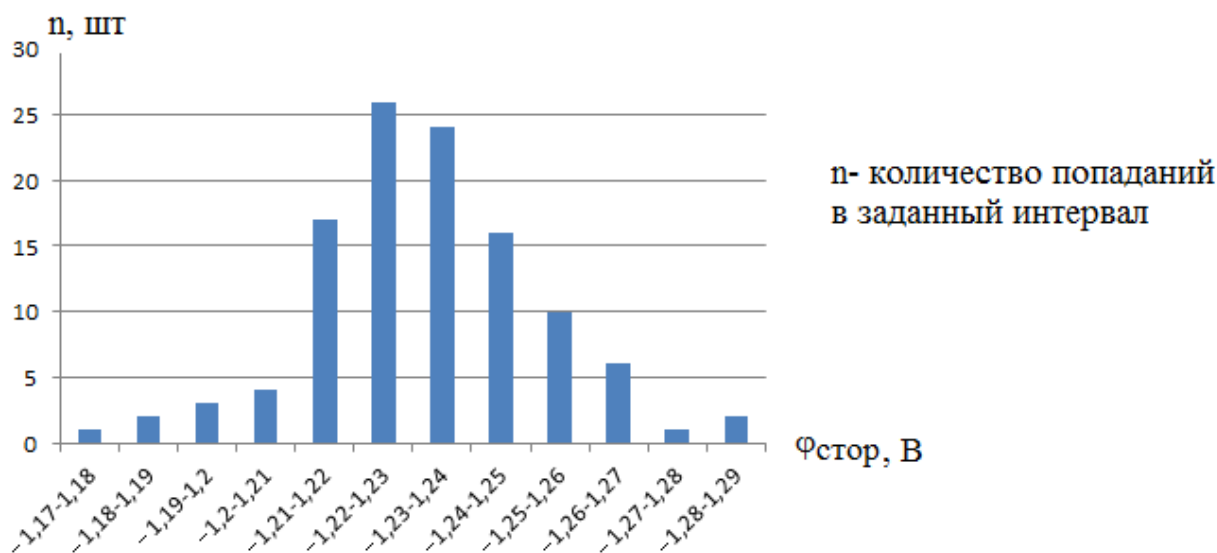
$\Phi_{\text{ст}}$  - стационарный потенциал металла трубопровода, В.

Коэффициенты влияния СКЗ на 107 км и двух смежных СКЗ (км 99, 117) были определены методами регрессионного анализа, по данным, полученным в результате изменения режимов работы станций (рис. 2).



**Рис. 2. Влияние СКЗ на суммарную разность потенциалов в точке измерения: а) смежная СКЗ 99 км, б) СКЗ в точке дренажа СКЗ**

По результатам вычислений было получено распределение вероятностей вычисленного значения сторонней разности потенциалов «труба-земля» в точке дренажа СКЗ (рис. 3).



**Рис. 3. Распределение вероятностей вычисленного значения сторонней разности потенциалов «труба-земля» в точке дренажа СКЗ**

Произведено сравнение измеренного значения суммарной разности потенциалов в точке испытания, равного минус 1,28 В, с вычисленными значениями методами математического ожидания, найденной модой и медианой данного распределения вероятностей. Для этого, из формулы (5) вычислено суммарное влияние смежных станций катодной защиты, равное 0,048 В. Вычисленные различными математическими методами значения сторонней разности потенциалов были суммированы с влияниями смежных станций и полученные значения суммарной разности потенциалов в контрольной точке соответственно равны минус 1,2804, 1,28 и 1,2792 В.

Относительная погрешность вычисления суммарной разности потенциалов в точке, с использованием сторонней разности потенциалов «труба-земля» для одиночного измерения, имеющего максимальную по абсолютной величине разность от его среднего вычисленного значения, составила 4,47%, значение погрешности суммарной разности потенциалов в точке, вычисленной предложенным методом, с учетом статистики в 112 измерений, не превышает 0,6%.

Задача идентификации системы «труба-земля», заключается в восстановлении зависимостей  $\varphi_i$ , по данным наблюдений. Используя эти данные, получаем обучающую выборку, содержащую значения токов СКЗ  $I_j(n)$ , и суммарной разности потенциалов в точках контроля (в том числе на контрольно-измерительных пунктах)  $\varphi_i(n)$ , измеренные на интервале стационарности в моменты времени  $t_n$ ,  $n=1;2;\dots N$ .

Оценка параметров регрессионной модели может быть найдена по методу максимального правдоподобия, приводящего в случае гауссовских шумов наблюдения, к оценке по методу наименьших квадратов

$$\hat{\mathbf{A}}_i = (\mathbf{I}_{\text{СКЗ}}^T \mathbf{I}_{\text{СКЗ}})^{-1} \mathbf{I}_{\text{СКЗ}}^T \Phi_i, \quad (6)$$

где  $\Phi_i = [\varphi_i(1), \dots, \varphi_i(N)]^T$  – вектор измеренных значений защитных разностей потенциалов в  $i$ -й точке контроля;

$\hat{A}_i$  – вектор коэффициентов влияния СКЗ на значения защитных разностей потенциалов;

$\mathbf{I}_{\text{СКЗ}}^T$  – транспонированная матрица токов СКЗ;

$\mathbf{I}_{\text{СКЗ}}$  –  $(N_{\text{СКЗ}} \cdot (N_{\text{СКЗ}} + 1))$ -матрица, определяемая выражением

$$\mathbf{I}_{\text{СКЗ}} = \begin{bmatrix} 1 & I_1(1) & \dots & I_j(1) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & I_1(N_{\text{СКЗ}}) & \dots & I_j(N_{\text{СКЗ}}) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

При использовании байесовской методологии повышается устойчивость оценок параметров модели

$$\hat{A}_i = (\mathbf{I}_{\text{СКЗ}}^T \mathbf{I}_{\text{СКЗ}} + \tilde{\mu}_i \mathbf{I})^{-1} \mathbf{I}_{\text{СКЗ}}^T \Phi_i, \quad (8)$$

которые определяются аналогично, так называемой, гребневой регрессии. В последнем выражении  $\mathbf{I}$  – единичная матрица порядка  $(N_{\text{СКЗ}} + 1)$ ,  $\mu$  – параметр регуляризации, оценка которого определяется методом простых итераций.

Последовательная байесовская методология представляет целостный подход к решению задачи структурно-параметрической идентификации. Полученные в рамках этой методологии алгоритмы структурно-параметрического синтеза нейросетевых моделей очевидным образом накладываются на случай определения структуры модели линейной множественной регрессии (1).

Предлагается производить корректировку коэффициентов влияния СКЗ на значения защитных разностей потенциалов один раз в квартал, в связи с возможными значительными изменениями сопротивлений цепи растекания защитного тока.

В третьей главе «Способ нахождения эффективных режимов работы станций катодной защиты» описаны принципы решения задачи условной параметрической оптимизации режимов работы СКЗ, рассмотрена возможность применимости критерия перелома кривой Тафеля, как ограничивающего максимально допустимый потенциал, описаны разработанные процедуры решения многокритериальной задачи нахождения оптимальных параметров работы СКЗ методами структурно-параметрической оптимизации.

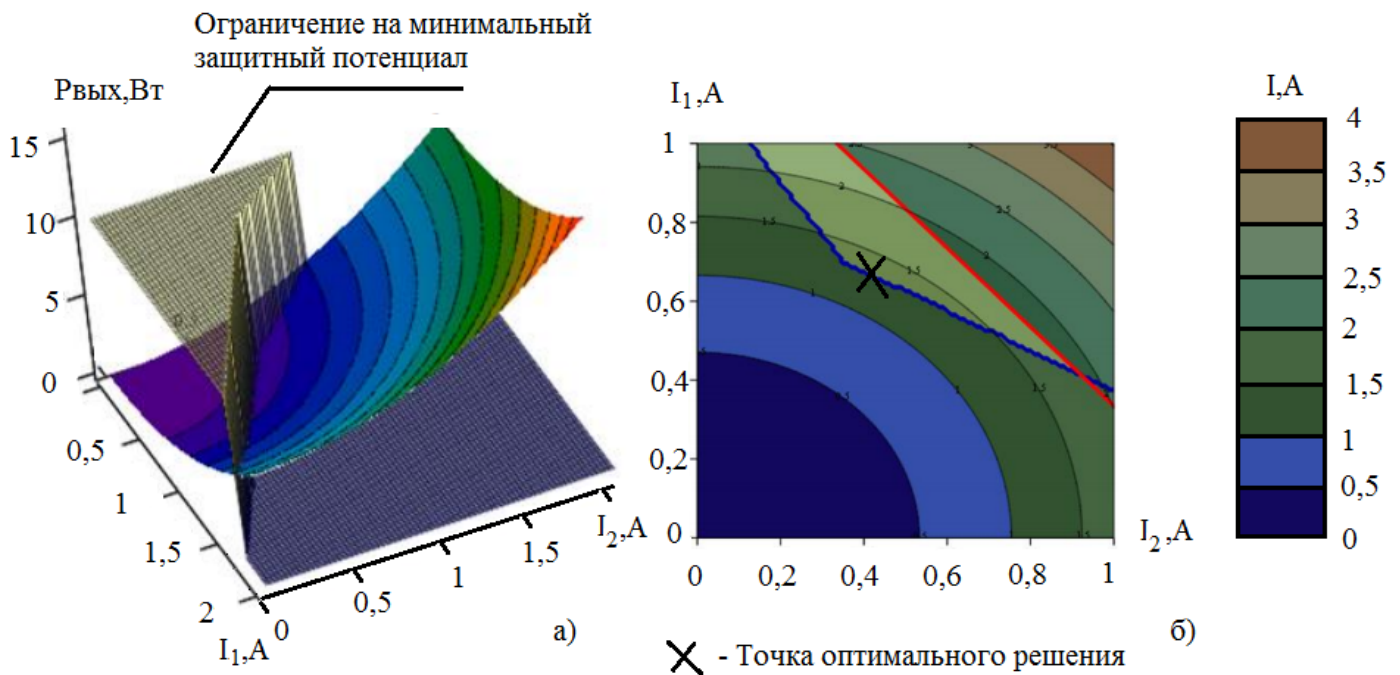
Решение параметрической задачи условной оптимизации строится на минимизации выходной мощности совокупности станций катодной защиты.

Вектор  $\hat{\mathbf{i}}_{\text{СКЗ}} = [\hat{I}_1, \dots, \hat{I}_j]^T$  оптимальных выходных токов для  $N_{\text{СКЗ}}$  станций катодной защиты, включающий управляющие величины для системы ЭХЗ, может быть найден из решения экстремальной задачи минимизации суммарной потребляемой мощности

$$W_{\Sigma}(\mathbf{i}_{\text{СКЗ}}) = \sum_{j=1}^{N_{\text{СКЗ}}} (R_j i_{\text{СКЗ}j}^2 + P_{\text{вн}j}), \quad (9)$$

при обеспечении условий защищенности магистральных трубопроводов, а также двухсторонних ограничений на неотрицательность и максимально возможные значения токов СКЗ. Параметрами целевой функции (9) являются сопротивления нагрузки  $R_j$  и потери электроэнергии  $P_{\text{вн}j}$  на внутреннее потребление  $j$ -й СКЗ. Зависимость защитного суммарного потенциала в точках контроля от токов СКЗ определяется выражением (6).

После проведения процедуры условной оптимизации выходной мощности был получен график, на котором пересечением линий допустимых ограничений, наложенных на минимизируемую величину, получена область допустимых решений (рис. 4).

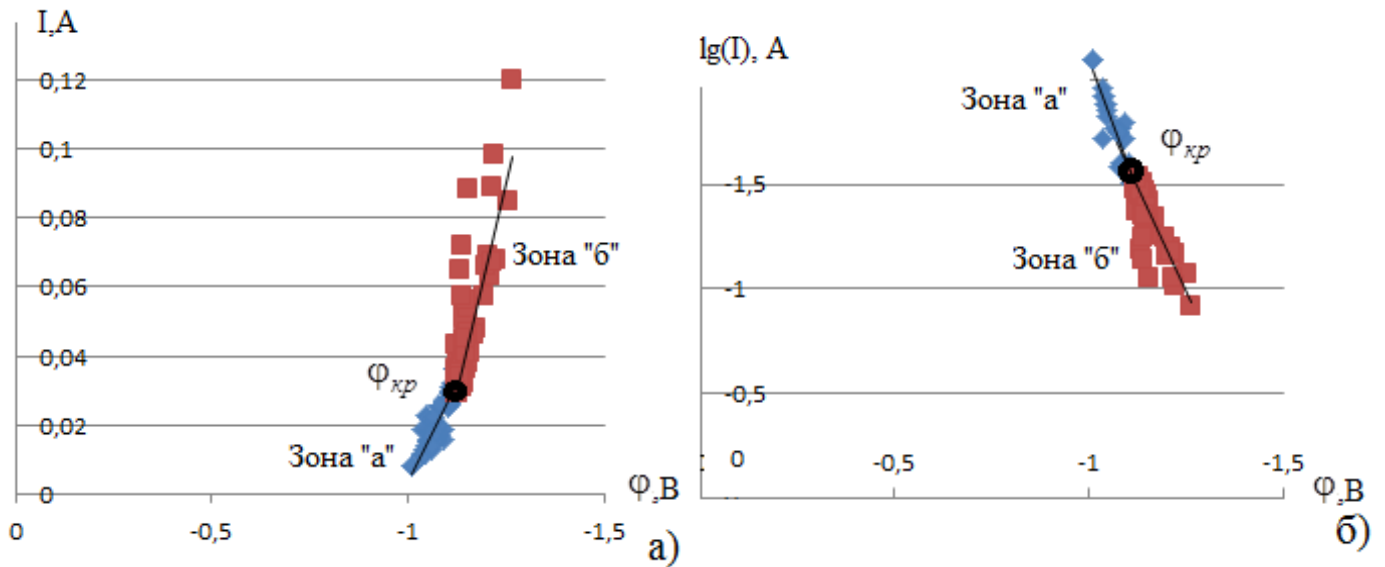


**Рис. 4. Область допустимых решений: а) трехмерное отображение, б) точка решения задачи оптимизации**

Решая задачу выбора оптимального сочетания выходных параметров станций катодной защиты, необходимо учесть возможное негативное влияние повышенной плотности тока, ухудшающей состояние изоляционного покрытия и ведущей к выделению водорода, влияющего на металл трубопровода.

Предлагается находить параметр  $\varphi_{\text{кр}}$ , определяющий начало процесса выделения водорода, по перелому кривой Тафеля и использовать данный параметр, как верхнюю границу максимума диапазона допустимого изменения защитного потенциала по трассе магистрального трубопровода.

Была проведена проверка получения  $\varphi_{\text{кр}}$  по данным, полученным с реального объекта магистрального газопровода «Саратов-Горький» (рис. 5).



**Рис. 5. Нахождение параметра  $\varphi_{кр}$  : а) по силе тока, б) по логарифму силы тока**

Задача структурно-параметрической оптимизации может быть представлена в виде двух вложенных задач. Внешней задачей является выбор структур (конфигураций) режимов работы станций катодной защиты. Для решения задачи структурной оптимизации предлагаются алгоритмы полного перебора возможных решений с нахождением множества Парето-оптимальных решений. Внутренней задачей является выполнение процедуры параметрической оптимизации с целью улучшения найденных эффективных решений.

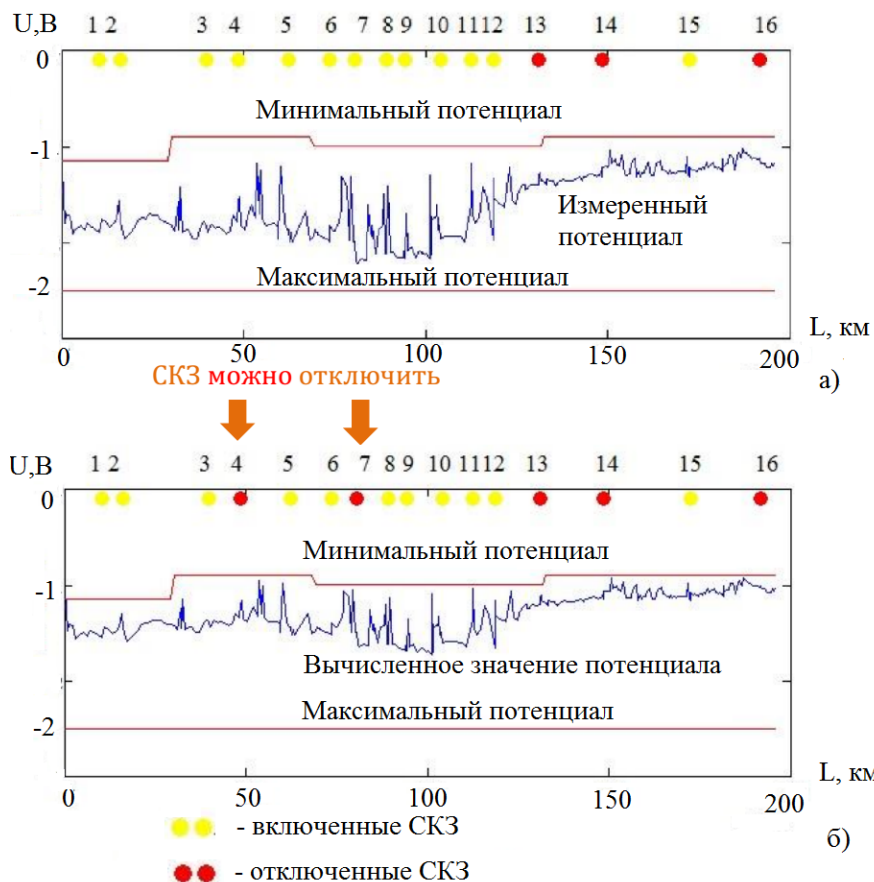
Конфигурация СКЗ																Средний КПД					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18				
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	567.5				
3	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	497.5				
4	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	443.7				
5	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	439.8				
6	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	425.3				
7	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	400.3				
																63	71.86	52.67	68.17	67.08	65.03

0- СКЗ вкл.  
1- СКЗ выкл.

Потребляемая мощность

**Рис. 6. Выбор оптимальной структуры в пакете MathCAD**

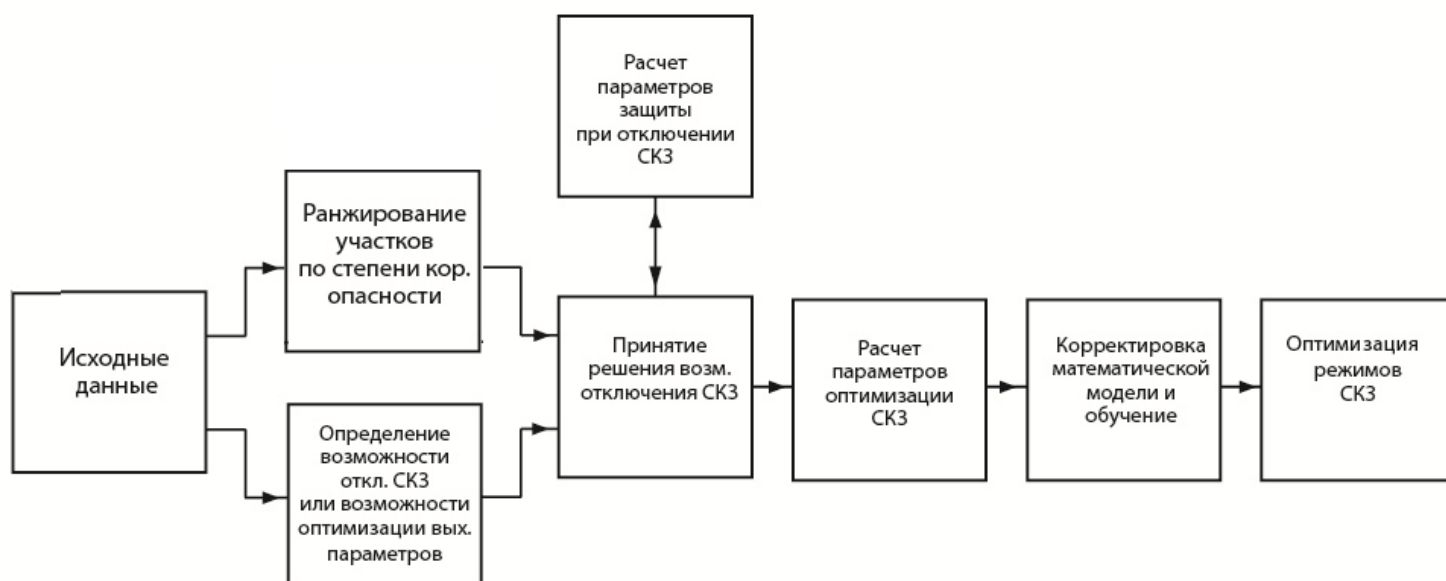
Проведена проверка решения задачи структурно-параметрической оптимизации с использованием реальных данных о состоянии защищенности объекта магистрального газопровода с использованием пакета MathCAD. Проверка показала, что на защищаемом шестнадцатью станциями катодной защиты участке магистрального газопровода, три из которых выведены в резерв, можно дополнительно вывести в резерв еще две станции катодной защиты, при этом будет обеспечиваться защищенность (рис. 7,8).



**Рис. 7. Проверка решения задачи структурно-параметрической оптимизации в пакете MathCAD: а) график защищенности до оптимизации, б) график защищенности после структурно-параметрической оптимизации**

В четвертой главе «*Разработка основных алгоритмов оптимального регулирования режимов станций катодной защиты от коррозии*» приводятся алгоритмы решения задачи оптимального регулирования режимов работы станций катодной защиты с учетом параметров нагрузки, состояния оборудования и совокупностей коррозионных факторов на защищаемых участках.

Разработана структура модуля оптимизации (рис. 8).



**Рис. 8. Структура модуля оптимизации**

Определены методики и алгоритмы определения необходимости оптимизации, ранжирования участков по степени коррозионной опасности, определения оптими-

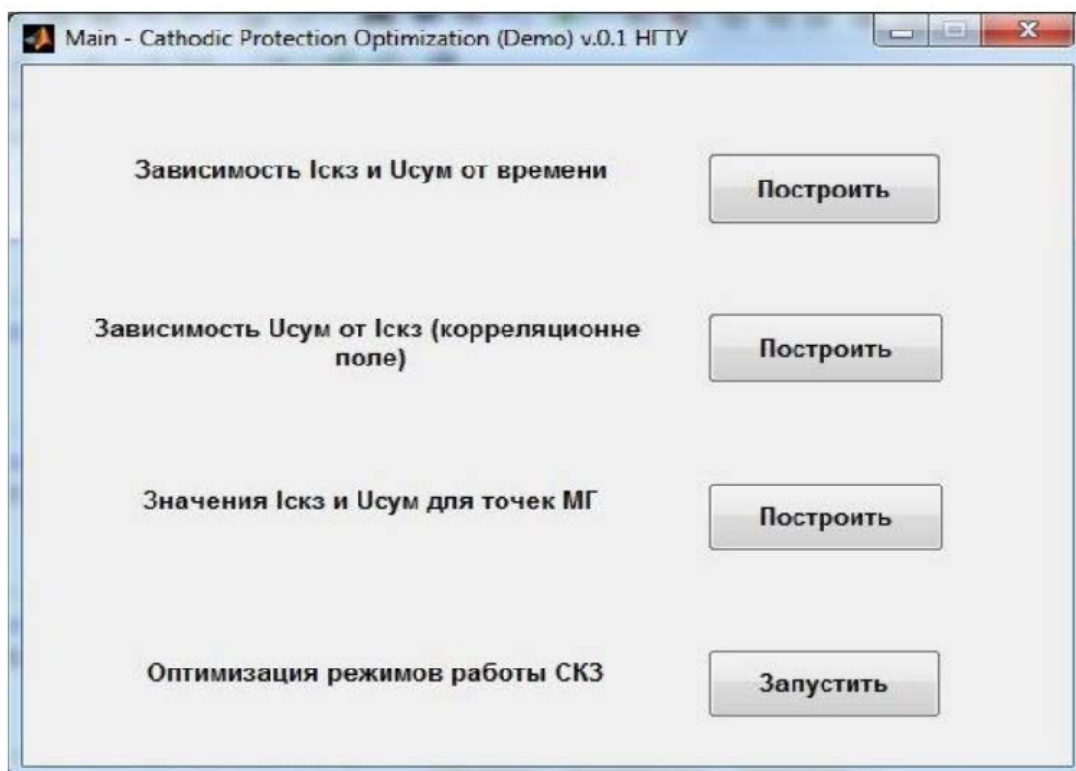
зированных режимов работы СКЗ, возможности вывода СКЗ в резерв. Алгоритмы учитывают степень влияния коррозионных факторов на участках между СКЗ, рассчитываемую по предложенной формуле

$$Int_j = \frac{w_1 n_{1j} Id_{1j} + w_2 n_{2j} Id_{2j} + \dots + w_{11} n_{11j} Id_{11j}}{w_1 n_1 + w_2 n_2 + \dots + w_{11} n_{11}} \quad (10)$$

где  $w_i$  – весовой коэффициент ( $i = \overline{1,11}$ );  $n_i$  – количество  $i$ -го фактора по всем участкам мониторинга;  $n_{ij}$  – количество  $i$ -го фактора на  $j$ -ом участке мониторинга;  $Id_{ij}$  – индекс фактора опасности ( $i$ ) на  $j$ -ом участке ( $Id_{ij}=1$ , если на  $j$ -ом участке присутствует соответствующий фактор;  $Id_{ij}=0$ , если на  $j$ -ом участке отсутствует соответствующий фактор).

Результатом ранжирования является массив значений интегрального показателя в порядке убывания его величины по каждому участку между СКЗ. Согласно алгоритму производится перебор возможностей отключения СКЗ, начиная с участков где интегральный показатель наименьший, до участков с наибольшим показателем, с учетом невозможности отключения СКЗ, работающих в зонах высокой коррозионной опасности и при наличии блуждающих токов.

Проведены работы по созданию прототипа программного обеспечения, направленного на поддержку принятия решений специалиста службы защиты от коррозии, в направлении оптимального регулирования СКЗ. Инструментарием прототипа является пакет прикладных программ MATLAB 7 Simulink (рис. 9).

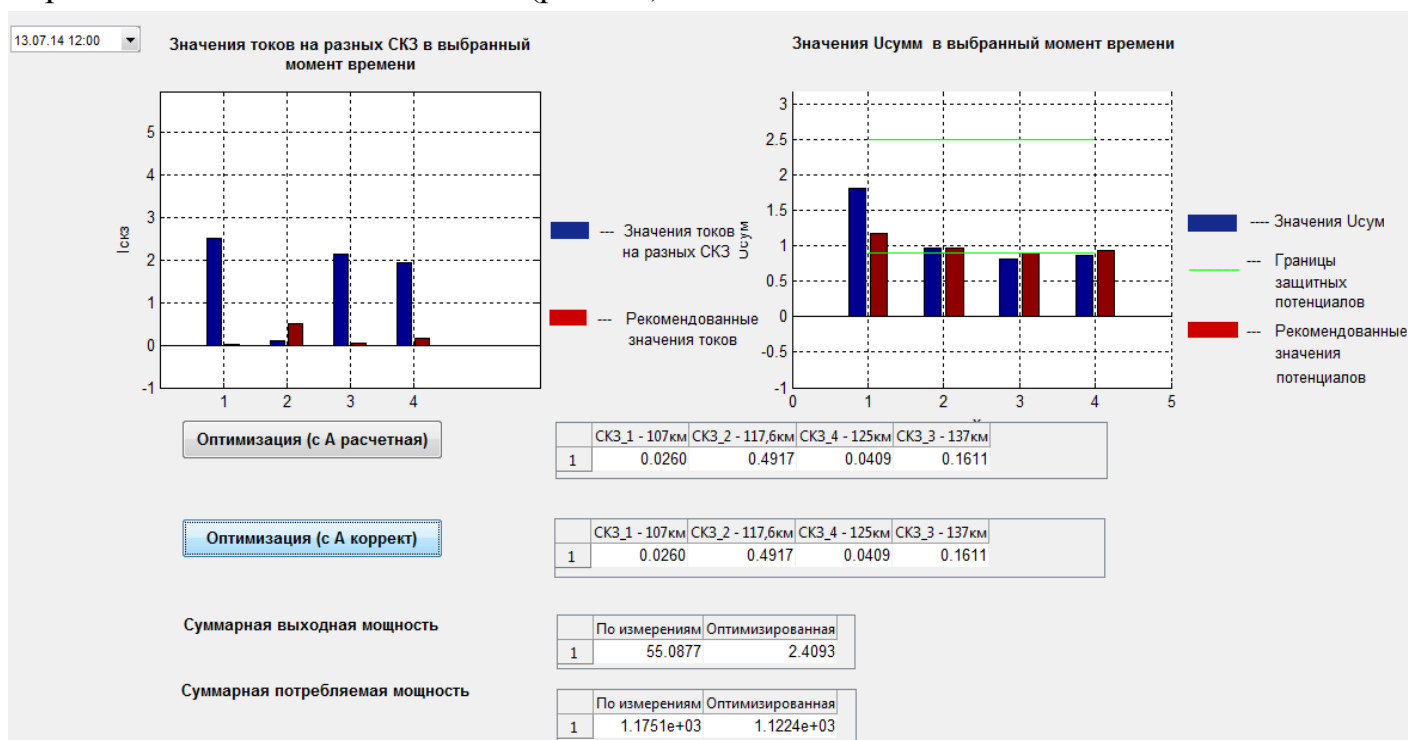


**Рис. 9. Основная экранная форма прототипа программного обеспечения**

В прототипе программного обеспечения производится обработка поступившей информации в следующей последовательности: оценка матрицы коэффициентов



влияния по измерительным данным и определение выходных токов СКЗ в результате решения задачи оптимизации (рис. 10).



**Рис. 10. Модуль вывода текущих и расчетных значений силы тока СКЗ и защитных потенциалов в различных точках магистрального трубопровода**

В пятой главе «Проведение натурных исследований по оптимальному регулированию режимов СКЗ на действующем объекте магистрального газопровода» рассмотрена проверка разработанных методик оптимального регулирования на участке действующего магистрального газопровода «Саратов-Горький» км 92-147.

В качестве экспериментальной проверки разработанных принципов оптимального управления была проведена работа на объекте магистрального газопровода «Саратов-Горький», 92 – 147 км. Диаметр газопровода 720 мм, толщина стенки 8 мм. Газопровод введен в эксплуатацию в 1963 году. На данном участке газопровод подвергался переукладке в 2001 году. Тип изоляции - заводская двухслойная, полимерная. Электрохимическая защита участка осуществляется восемью станциями катодной защиты. Две станции катодной защиты на 96 и 125 км поддерживают необходимый защитный потенциал, как на линейной части магистрального газопровода, так и на технологическом оборудовании газораспределительных станций, находящихся вблизи магистрального газопровода. По всей трассе магистрального газопровода обеспечивается защищенность по ГОСТ 51164-98, станции, работают в минимальных режимах, при этом защитный суммарный потенциал стремится к верхней границе максимума. На газопроводе имеются участки между СКЗ с «провалами» потенциалов, вследствие наличия повреждений изоляционного покрытия, заземлений оборудования, переходов через автомобильные и железные дороги, совместной защитой со смежными коммуникациями и т.д. Для гарантированного обеспечения на данных участках минимально допустимого уровня защитных и поляризационных потенциалов с учетом форсмажорных обстоятельств (например, выход из строя СКЗ или эле-

ментов электроснабжения), как правило, эксплуатация поддерживает завышенные режимы СКЗ и потенциалы в точках дренажа с возможностью перекрытия зон защиты.

После установки на участке подсистем дистанционного коррозионного мониторинга, по разработанным методикам были произведены замеры распределения защитных суммарных потенциалов по трассе исследуемого участка в зависимости от режимов работы СКЗ, по результатам которых был получен массив данных для проведения процедур идентификации системы «труба-земля».

Таблица 1 – Показатели идентификации модели «труба-земля» на МГ «Саратов-Горький»

Точки	$\Phi_{\text{стор}}$	СКЗ 92 км	СКЗ 96 кран	СКЗ 99 км	СКЗ 107 км	СКЗ 117 км	СКЗ 125км	СКЗ 137 км	СКЗ 147 км
СКЗ 92 км	1,40102	0,0785	0,014	0,0098	0,0078	0	0	0	0
СКЗ 96 кран	1,28402	0,0081	0,0413	0,0005	0	0	0	0	0
СКЗ 99 км	1,12583	0,0064	0,0095	0,0804	0,0082	0	0	0	0
99,3 а/д	1,21757	0	0,009	0,1179	0,0138	0	0	0	0
СКЗ 107 км	1,24929	0	0,0029	0,0086	0,223	0	0	0	0
117,3 а/д	0,73704	0	0	0,0071	0,0115	0,227	0,029	0,0192	0,0044
СКЗ 117 км	0,73397	0	0	0,0017	0,0109	0,2993	0,015	0,0061	0,0025
117,6 ж/д	0,70663	0	0	0,0045	0,0162	0,3182	0,031	0,0077	0,0021
СКЗ 125 км	0,8822	0	0	0	0	0	0,323	0,13	0,001
СКЗ 137 км	1,43336	0	0	0	0	0	0,064	0,097	0,0354
142 река	1,52256	0	0	0	0	0	0	0,0383	0,065
СКЗ 147 км	1,47728	0	0	0	0	0	0	0,0254	0,189

Использование формулы расчета интегрального показателя (11) позволяет получить ранжированный список участков между СКЗ по относительной степени коррозионной опасности (таблица 2).

Таблица 2 – Коррозионные факторы на участках между СКЗ

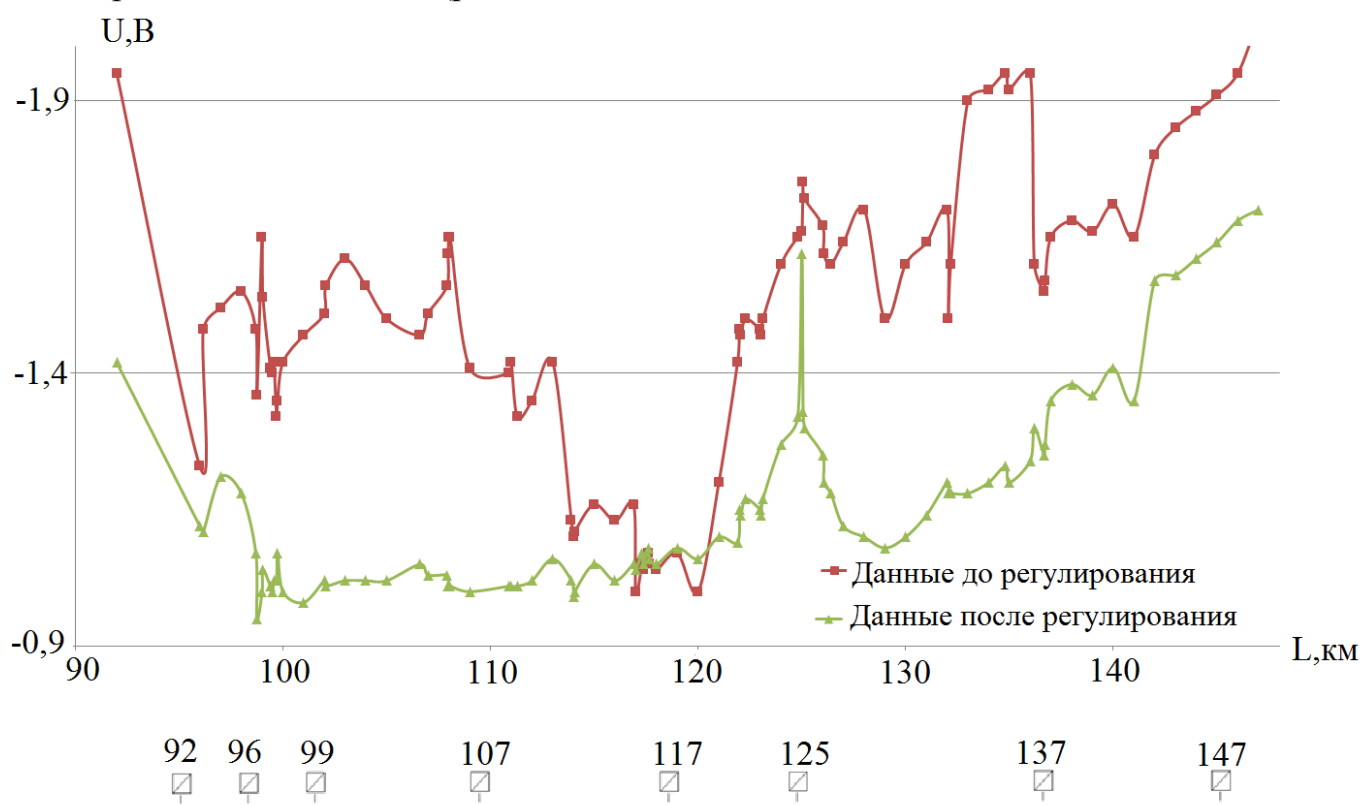
Участок МГ, км	Пересечение с водными преградами, коэффициент 4	Пересечение с автомобильными дорогами, коэффициент 3	Пересечение с железными дорогами, коэффициент 3	Наличие блуждающих токов, постоянных, коэффициент 10	Наличие блуждающих токов, переменных, коэффициент 7	Величина интегрального показателя
92-96	-	-	-	-	+	0,33
96-99	-	+(1)	-	-	+	0,47
99-107	-	+(2)	-	-	+	0,62
107-117	-	+(3)	-	+	+	1,23
117-125	-	+(1)	+(2)	+	+	1,23
125-137	-	+(2)	-	-	+	0,47
137-147	+	-	-	-	+	0,52

Наличие на участках защиты СКЗ 117 км коррозионного фактора - блуждающие постоянные токи, приводит к тому, что согласно алгоритму определения необходимости оптимизации режимов СКЗ, данная станция не может быть выведена в резерв. Кроме того, СКЗ 96 и 125 км работают в режиме поддержания защитного по-

тенциала, как на линейной части МГ, так и на технологической части ГРС. Следовательно, изменение режимов данных СКЗ не представляется возможным. Остальные СКЗ проверяются на возможность отключения по разработанным алгоритмам в порядке уменьшения интегрального показателя.

С применением разработанных алгоритмов и прототипа программного обеспечения, был проведен расчет оптимальных режимов работы станций катодной защиты на исследуемом участке. Полученные данные показали, что на участке трубопровода можно вывести в резерв 5 станций катодной защиты (СКЗ 92, 99, 107, 137, 147 км), при этом будет обеспечиваться защищенность.

После этого были проведены экспериментальные исследования по измерению защитных суммарных потенциалов на участке МГ после отключения 5 СКЗ и изменения режимов остальных (рис. 11).



**Рис. 11. Распределение потенциалов на исследуемом участке до и после оптимального регулирования режимов работы СКЗ**

Результатами апробации разработанных процедур нахождения оптимальных режимов работы станций катодной защиты на реальном объекте магистрального газопровода явилось:

- обеспечение защищенности на всей протяженности исследуемого участка;
- уменьшение суммарной мощности СКЗ в 4 раза;
- увеличение КПД системы электрохимической защиты от коррозии на 3%.

Применение методов структурной оптимизации, введение ограничений на величину максимального допустимого потенциала и снижение суммарного выходного тока системы помимо увеличения энергоэффективности влечет за собой ряд существенных преимуществ, таких как:

- уменьшение влияния на свойства металла и изоляционные покрытия повышенной плотности тока;
- уменьшение силы тока системы в 4 раза приведет к пропорциональному уменьшению скорости растворения анодного заземления;
- увеличение ресурса выведенных в резерв УКЗ.

### **Основные выводы:**

1. Введено понятие сторонняя разность потенциалов «труба-земля», определяющего стационарный потенциал металла трубопровода в совокупности с наложенным неизвестными источниками и позволяющая восстановить модель распределения потенциалов по трассе магистрального нефтегазопровода дистанционно без отключения станций катодной защиты на продолжительный срок, что способствует упрощению проведения процедуры регулирования. Полученные данные показывают, что найденная разность потенциалов «труба-земля» в точке измерения с использованием усовершенствованной модели распределения потенциалов и параметра сторонняя разность потенциалов «труба-земля», совпадает с фактическим потенциалом с погрешностью 0,6%, что является достаточной для инженерных задач точностью.

2. Решена задача эффективного регулирования совокупностью станций на участке трубопровода, с возможностью минимизации выходной мощности, увеличения КПД установок катодной защиты, и при этом поддержания защитных потенциалов в границах определяемых ГОСТ 51164-98 и, не превышая критические значения, определяемые по критерию перелома кривой Тафеля.

3. Разработаны алгоритмы оптимального управления, позволяющие производить выбор режимов работы станций катодной защиты, с учетом внешних влияющих факторов и использованием введенного интегрального показателя коррозионного состояния на участках, а также параметров системы «труба-земля» для определения оптимального режима работы, что в совокупности приводит к повышению эффективности защиты от коррозии.

4. Разработанные технические решения внедрены на магистральном газопроводе «Саратов-Горький», участок «Починки-Нижний Новгород» км 92-147. Результатом применения разработанных методик оптимального регулирования является вывод в резерв 5 СКЗ на 92, 99, 107, 137 и 147 км, при этом обеспечивается защищенность, что подтверждается экспериментальными данными. После изменения режимов работы станций суммарная выходная мощность системы уменьшилась в 4 раза, а интегральный КПД повысился на 3%.

**Основные положения диссертации опубликованы  
в следующих работах:**

***Статьи в изданиях, включенных в «Перечень...» ВАК Минобрнауки РФ***

1. Никулин, С. А. Оптимизация режимов установок электрохимической защиты / С. А. Никулин, Е. Л. Карнавский // Системы управления и информационные технологии. – 2014. – № 2. – С. 24-30.

2. Никулин, С. А. Интеллектуализация процедур управления системой защиты от коррозии / С. А. Никулин, Е. Л. Карнавский, В. Р. Милов, В. Г. Баранов // Нейрокомпьютеры. – 2014. – № 11. – С. 73-79.

3. Никулин, С. А. Структурно-параметрическая идентификация системы «труба–земля» в задаче электрохимической защиты магистральных газопроводов / С. А. Никулин, Е. Л. Карнавский, В. Р. Милов, Р. Л. Шиберт // Нейрокомпьютеры. – 2014. – № 11. – С. 79-85.

4. Никулин, С. А. Процедуры управления режимами работы станций катодной защиты / С. А. Никулин, Е. Л. Карнавский, В. Р. Милов, Р. Л. Шиберт, М. Г. Модина // Информационно-измерительные и управляющие системы – 2015. - № 3. – С. 20-27

5. Никулин, С. А. Экспериментальное исследование точности определения силы тока в трубопроводе трехкомпонентным датчиком магнитного поля / С. А. Никулин, В. В. Мусонов, С. С. Гуськов, Е. Л. Карнавский, М. В. Третьякова // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2013. – № 6. – С. 30-33

***Публикации в журналах и научно-технических сборниках***

1. Никулин, С. А. Автоматизация процессов управления средствами ЭХЗ / С. А. Никулин, Е. Л. Карнавский // Коррозия территории нефтегаз. – № 3 (26). – 2013. – С. 60 – 61.

2. Никулин, С. А. Способы электрохимической защиты магистральных трубопроводов / С. А. Никулин // Материалы научно-технической конференции «Актуальные проблемы электроэнергетики» (22-23 ноября 2012 г.). – Н. Новгород, НГТУ, 2012. – С. 118-121.

3. Никулин, С. А. Разработка системы управления выходными параметрами станции катодной защиты на базе нечеткой логики / С. А. Никулин // Материалы научно-практической конференции молодых ученых и специалистов научно-исследовательских и проектных организаций ОАО «Газпром» «Актуальные вопросы проектирования объектов добычи и транспорта газа» (24-27 сентября 2013 г.). – Н. Новгород: ОАО «Гипрогазцентр», 2013. – С.52-54.

4. Никулин, С. А. Особенности построения системы автоматического управления средствами ЭХЗ / С. А. Никулин // Материалы V международной молодежной научно-практической конференции «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность» (20-22 ноября 2013 г.). – Москва, ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 2013. – С. 90.

5. Никулин, С. А. Оптимизация режимов электрохимической защиты / С. А. Никулин, Е. Л. Карнавский // Материалы XX международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии. ИСТ – 2014» (15-17 апреля 2014 г.). – Н. Новгород, НГТУ, 2014. – С. 158.

6. Никулин, С. А. Принципы решения многокритериальной задачи оптимизации работы средств электрохимической защиты магистральных трубопроводов / С. А. Никулин // Сборник научных трудов: материалы XIII международной молодежной научно-технической конференции «Будущее технической науки» (23 мая 2014 г.). – Н. Новгород, НГТУ, 2014. – С. 234.

7. Никулин, С. А. Реализация системы дистанционного коррозионного мониторинга с функциями оптимизации режимов работы средств ЭХЗ / С. А. Никулин // материалы I научно-практической конференции молодых специалистов ОАО «Гипрогазцентр» «Актуальные вопросы проектирования объектов транспорта нефти и газа» (17-18 сентября 2014 года). – Нижний Новгород: ОАО «Гипрогазцентр», 2014. – С. 21.

8. Никулин, С. А. Реализация принципов оптимального управления средствами электрохимической защиты магистральных трубопроводов / С. А. Никулин // материалы научно-практической конференции специалистов АСПО Газпром «Научно-технологические инновации при проектировании объектов газовой промышленности» (19 ноября 2014 г.). – Москва: АСПО Газпром, 2014. – С. 16-17.

9. Никулин, С. А. Применение подсистем дистанционного коррозионного мониторинга с расчетно-аналитическим блоком для обеспечения надежности и повышения эффективности работы системы электрохимической защиты / С. А. Никулин, Е. Л. Карнавский // Материалы VIII международной научно-технической конференции «Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта» (25-28 ноября 2014 г.). – Новополоцк, Республика Беларусь, 2014. – С. 94-95.

10. Никулин, С. А. Решение задачи структурно-параметрической оптимизации режимов работы средств электрохимической защиты / С. А. Никулин // Материалы XVI международной молодежной научной конференции «Севергеоэкотех» (25-27 марта 2015 г.). – Ухта: УГТУ, 2015. – С. 237.