

На правах рукописи

ЛЫСЕНКО Галина Сергеевна

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ ПОМЕХ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

Специальность: 05.09.05 – Теоретическая электротехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2013

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Внедрение инновационных технологий, в том числе информационных и телекоммуникационных, в практику проектирования, создания и эксплуатации электроэнергетических систем (ЭЭС) с целью повышения их энергоэффективности, надежности, экономичности, устойчивости к авариям весьма актуально. Важными требованиями к внедряемым технологиям является их непротиворечивость и согласованность с существующими решениями. Предполагается, что внедрение этих технологий решит ряд задач, стоящих перед современной электроэнергетикой, таких как: повышение надежности функционирования ЭЭС; поддержание показателей качества электроэнергии; снижение экономических затрат на передачу и распределение электроэнергии; гибкое оптимальное управление потоками мощности в ЭЭС при изменении генерации и потребления; уменьшение влияния объектов энергетики на экологию. Существенный вклад в исследование вопросов анализа процессов в электрических цепях, ЭЭС, решения обратных задач в ЭЭС внесли отечественные ученые (Бутырин П.А., Демирчян К.С., Шакиров М.А., Бондаренко А.В., Кучумов Л.А., Дмитриков В.Ф., Газизов Т.Р., Шишигин С.Л., и др.) и зарубежные (Moradloo M., Xu W., Li C.).

В настоящее время существует необходимость внедрения повсеместного инструментального мониторинга в режиме реального времени технической исправности и состояния износа энергооборудования, контрольных приборов и систем блокировки, а также качества электроэнергии. Нарушения качества электроэнергии могут привести к увеличению потребления реактивной мощности асинхронными двигателями, к выходу из строя батарей конденсаторов, а также вентильных преобразователей, нарушить нормальную работу и уменьшить срок службы электронной аппаратуры, снижается надежность работы энергооборудования и системы электроснабжения в целом. Поэтому проблема поддержания качества электроэнергии на должном уровне является актуальной для современной электроэнергетики и необходимо выявление объектов, вызвавших нарушение качества электрической энергии (источников помех), определение узлов их подключения к электрической цепи. Несмотря на значимость проблемы, к настоящему моменту не существует достаточно общего алгоритма, помогающего решить задачу локализации источника помехи. Ввиду этого, необходима разработка алгоритма, позволяющего точно и оперативно решать такую задачу.

Цель работы.

Разработка, исследование и совершенствование метода, позволяющего в режиме реального времени отслеживать возникновение источников помех в энергосистемах, а также определять их местонахождение.

Основные задачи исследования:

1. Обзор существующих методов локализации источников помех, исследование особенностей их применения, формирование перечня требований к универсальному современному методу локализации.
2. Разработка, исследование и тестирование универсального метода, позволяющего успешно локализовать источник помехи в энергосистеме.
3. Исследование работы метода локализации источников помех, использующего для решения результаты измерений напряжения в нескольких, предварительно выбранных (контрольных) узлах, с помощью математического моделирования и физической модели электрической цепи, сравнение результатов, выработка рекомендаций по его практическому использованию, получение оценок точности локализации в различных задачах.
4. Тестирование применения исследуемого метода для локализации источника помехи, вызванного включением электродуговой сталеплавильной печи в тестовую схему IEEE 118.
5. Разработка концепции построения интеллектуальной системы мониторинга показателей качества электроэнергии.

Методы исследования.

В работе использованы разделы современной теории электрических цепей и систем, математического анализа, матричной алгебры, цифровой обработки сигналов.

Научная новизна работы.

1. Исследован метод локализации источников помех, использующий для решения результаты измерений напряжения в контрольных узлах и получена оценка точности решения с его использованием в зависимости от количества используемых контрольных узлов, числа обусловленности матрицы узловых проводимостей исследуемой системы (числа Тодда), а также от погрешности измерений.
2. Проведено исследование метода с использованием математической и физической моделей цепи и вычислено соотношение между погрешностью измерительных приборов и точностью решения задач локализации с использованием метода.
3. Предложена методика выбора контрольных узлов на основе использования генетического алгоритма (ГА), позволяющая повысить точность решения задач локализации и в некоторых случаях снизить количество контрольных узлов.

Практическая значимость работы.

1. Исследован метод локализации источников помех в ЭЭС. Показано, что он позволяет сократить количество необходимых измерительных приборов в 10-20 раз по сравнению с методами, оценивающими направление потоков мощности.
2. На основе сравнения результатов экспериментов с использованием математической и экспериментальной моделей, рассчитана точность решения задач локализации при применении современных измерительных устройств с заявленной погрешностью $\delta \sim 10^{-4}$.

3. Предложена методика для выбора контрольных узлов, основанная на использовании генетического алгоритма, которая позволяет повысить точность решения задач локализации и в некоторых случаях снизить количество контрольных узлов, что снижает стоимость локализации.

4. Сформирована концепция построения системы мониторинга показателей качества электроэнергии, внедрение которой позволит повысить ПКЭ, сократить потери электроэнергии в элементах электрических сетей и снизить издержки, вызванные нарушением качества электроэнергии.

На защиту выносятся:

1. Метод локализации источников помех, использующий в качестве исходных данных параметры элементов энергосистемы и измерения напряжений в контрольных узлах.

2. Зависимость исследуемого метода от количества контрольных узлов, числа обусловленности матрицы узловых проводимостей исследуемой системы, а также от погрешности измерений.

3. Способы повышения точности решения задач локализации, основанные на оптимизации количества и местоположения контрольных узлов.

Достоверность результатов обеспечивается обоснованным выбором и корректным использованием современных методов измерения электрических параметров исследуемых систем; применением современных методик, позволяющих всесторонне изучить проблему; статистической обработкой полученных данных; использованием современных методов моделирования процессов в энергосистемах.

Личный вклад автора состоит в определении цели и методов исследования; проведении экспериментальных и теоретических исследований; обработке, обобщении и анализе полученных результатов. Все результаты исследований, представленные в работе, получены лично автором.

Апробация работы выполнена при представлении и обсуждении результатов на следующих конференциях:

1. Ninth International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering, TMCE 2012. 07.05 – 11.05.2012, Karlsruhe, Germany.

2. Научно-практическая конференция «Повышение эффективности энергетического оборудования Energy 2012». 13.11–15.11.12, Санкт-Петербург.

3. Седьмая Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов», 04.06 – 06.06.2013, Благовещенск.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 4 печатные работы, в том числе 1 работа в журнале, входящем в список ВАК.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация общим объемом 100 страниц состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы (39 наименований). Работа содержит 43 рисунка, 1 таблицу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, содержится постановка задачи исследований, определена цель диссертационной работы, приведены основные научные и практические результаты исследований.

Первая глава посвящена рассмотрению типов электромагнитных помех и их негативного воздействия на энергооборудование, анализу отечественных и зарубежных литературных данных о ранее разработанных методах локализации источников помех, а также рассмотрению свойств и характеристик современных информационно-измерительных устройств и их соответствия задаче локализации источников помех.

Отмечены негативные факторы влияния электромагнитных помех (ЭМП) на работу электроэнергетических сетей, среди которых увеличение потребления реактивной мощности асинхронными двигателями, нарушение нормальной работы и уменьшение срока службы электронной аппаратуры, появление дополнительных потерь в элементах ЭЭС, увеличение погрешности измерений индукционных счетчиков электроэнергии, снижение надежности работы электрооборудования и системы электроснабжения в целом. ЭМП приводят к снижению качества электроэнергии, которое нормируется в ГОСТ. Но, тем не менее, нарушения качества электроэнергии приводят к увеличению ее расхода и к экономическим потерям даже в тех случаях, когда ухудшение показателей качества лежит в пределах норм и соответствует ГОСТ. Нарушителями качества электроэнергии, которых будем далее рассматривать как источники ЭМП в энергосистеме, могут выступать как потребители, так и снабжающая сеть.

Локализация источников помех и дальнейшее устранение их нежелательного воздействия на качество электроэнергии являются актуальными задачами электроэнергетики. Поэтому разработаны и продолжают разрабатываться и исследоваться методы, позволяющие локализовать источники помехи в электроэнергетических системах. Методы локализации можно условно разделить на две группы. В первой, для локализации требуется произвести большое количество измерений электрических параметров ЭЭС (токов, напряжений, фазовых углов сдвига и т.д.) в большом количестве её узлов и ветвей, а затем произвести их аналитическую обработку. Ко второй группе отнесены методы, в которых количество измерений параметров сети минимально, но требуется их дальнейшая компьютерная обработка, а также наличие исходных данных об исследуемой системе, т.е. предварительная идентификация её параметров. В первом случае, при увеличении количества элементов ЭЭС требуется еще большее увеличение количества производимых измерений и приборов измерения, а во втором требуется лишь заменить в задаче исходные данные, а количество измерений остается прежним. Характеристики современных вычислительных устройств позволяют производить обработку больших объемов информации, что нацеливает на использование методов второй группы.

Подробно рассмотрен метод локализации источника помехи, изложенный в РД 153-34.0-15.502-2002. Показано, что его недостатком является большое количество

необходимых измерений различных параметров ЭЭС для принятия решения, а, следовательно, и большое количество необходимых измерительных устройств. Увеличение числа измерительных приборов ведет к повышению экономической стоимости проводимой процедуры, и кроме того, в такой системе повышается вероятность полного или частичного выхода измерительного оборудования из строя и получения некорректных экспериментальных данных. Поэтому построение системы мониторинга качества электроэнергии в режиме реального времени с его использованием затруднительно.

Отмечено, что растет доля использования измерительных устройств в современной энергетике, а характеристики современных средств измерения позволяют проводить измерение параметров с высокой точностью. Затем данные могут быть переданы на сервер с использованием современных технологий, таких как Internet и WiFi. Современные компьютерные технологии позволяют хранить и обрабатывать большие объемы информации, а их высокий уровень позволяет их использование в энергетике и, в том числе, для локализации источников помех. Сделан вывод о необходимости разработки метода локализации источников помех, позволяющего точно и оперативно решать задачу локализации, учитывая недостатки ранее разработанных методов, и использующего преимущества современных информационно-измерительных устройств.

Во второй главе приведены требования к методу локализации источников помех, а также приведено описание метода локализации на основе данных о напряжении в контрольных узлах.

Для изложения, обоснования и верификации алгоритмов работы метода введена в рассмотрение упрощенная математическая модель ЭЭС, измерительной системы и источника помехи, изображенные на рисунке 1. В качестве модели ЭЭС использована линейная цепь переменного тока ($\omega_0=2\pi f$, $f=50$ Гц), конфигурация цепи и параметры элементов которой известны. В качестве источника помехи рассмотрен изменяющийся во времени в общем случае непериодический источник тока $J_d(t)$, подключенный между некоторым узлом цепи и землей. В случае периодичности $J_d(t)$, в его частотном спектре должны присутствовать угловые частоты, отличные от ω_0 .

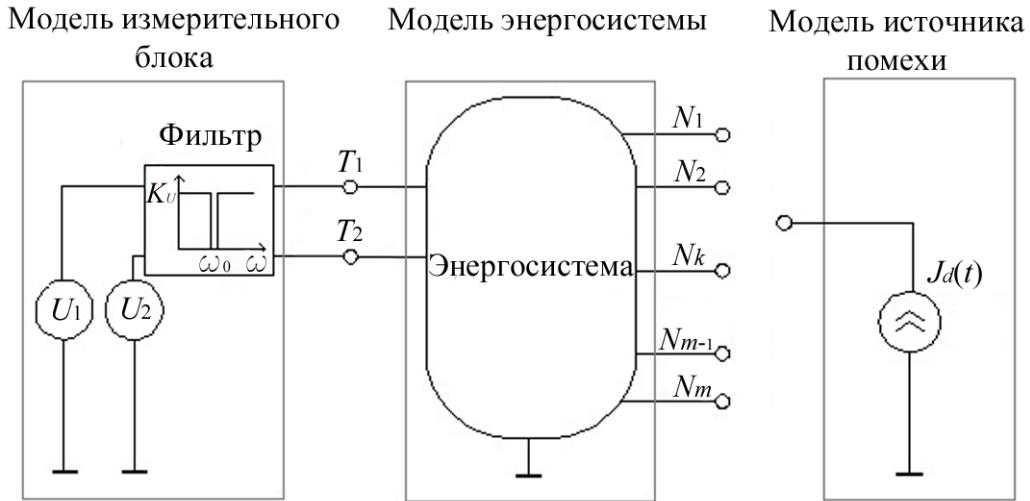


Рис. 1. Модель ЭЭС, измерительной системы и источника помехи.

Основываясь на принципе суперпозиции, рассмотрим только влияние источника J на цепь. Отметим, что при реализации метода, гармонические составляющие с частотами, близкими к рабочей, отфильтрованы с помощью узкополосного фильтра (рис. 1) входящего в состав измерительного оборудования. Рассмотрим простейший случай, когда в схеме, работающей на частоте ω_0 , помеха представлена одним синусоидальным источником с угловой частотой $\omega \neq \omega_0$. Задачу локализации такого источника помех назовем базовой и рассмотрим её решение, которое в рамках метода содержит расчетный и экспериментальный этапы.

Расчетный этап. Схема, рассматриваемая в базовой задаче, содержит один синусоидальный источник тока J_d с частотой $\omega \neq \omega_0$ и её состояние описывается с помощью метода узловых напряжений матричным уравнением $\mathbf{YU} = \mathbf{J}$. Откуда

$$\mathbf{U} = \mathbf{Y}^{-1}\mathbf{J} \quad \text{или} \quad \underbrace{\begin{bmatrix} \dot{U}_{1,0} \\ \dot{U}_{2,0} \\ \vdots \\ \dot{U}_{n,0} \end{bmatrix}}_{\mathbf{U}} = \underbrace{\begin{bmatrix} z_{1,1} & z_{1,2} & \cdots & z_{1,n} \\ z_{2,1} & z_{2,2} & \cdots & z_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n,1} & z_{n,2} & \cdots & z_{n,n} \end{bmatrix}}_{\mathbf{Z}} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \dot{J}_d \leftarrow k \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

где \mathbf{Y} – матрица узловых проводимостей цепи, \mathbf{U} , \mathbf{J} – векторы узловых напряжений и источников тока а $z_{i,j}$ – узловые сопротивления цепи. Пусть источник помехи подключен к некоторому узлу k , а контрольные узлы имеют номера T_1 и T_2 – соответственно ($k \neq T_1, T_2$). Из (1) вычислим вещественную константу $\alpha_k^{(T_1, T_2)}$, равную отношению действующих значений напряжений контрольных узлов и не зависящую от величины J_d , но зависящую от узла подключения помехи.

$$\alpha_k^{(T_1, T_2)} = \frac{U_{T_1, 0}}{U_{T_2, 0}} = \frac{|z_{T_1, k} \dot{J}_d|}{|z_{T_2, k} \dot{J}_d|} > 0. \quad (2)$$

Следовательно узел, к которому подключена помеха (узел с номером k), может быть идентифицирован по коэффициенту $\alpha_k^{(T_1, T_2)}$, который назовем локализирующим коэффициентом, определенным для пары контрольных узлов T_1 и T_2 . Аналогично определим локализирующие коэффициенты $\alpha_k^{(T_1, T_2)}$, $k = \overline{1, n}$, $k \neq T_1, T_2$ для всех n узлов системы и сохраним их для экспериментального этапа в «таблице локализирующих коэффициентов», устанавливающей соответствие между номерами узлов подключения помехи и значениями локализирующих коэффициентов.

Экспериментальный этап. При эксплуатации цепи выполняются измерения напряжений контрольных узлов T_1 и T_2 . Напряжение с частотой ω_0 не измеряется вольтметрами в узлах T_1 и T_2 , благодаря блоку заграждающих фильтров (рис. 1). Соответственно вольтметры, расположенные в этих узлах измеряют напряжения частоты ω , то есть частоты помехи. Если амплитуда (или действующее значение) помехи в как минимум в одном из контрольных узлов превышает некоторый допустимый уровень помехи (расположенной в неизвестном узле с номером x), то фиксируется факт появления помехи и запускается алгоритм ее локализации. При этом определяется экспериментальное значение локализирующего коэффициента $\hat{\alpha}_x^{(T_1, T_2)}$, и в таблице локализирующих коэффициентов производится поиск номера k узла, для которого $\hat{\alpha}_x^{(T_1, T_2)} = \alpha_k^{(T_1, T_2)}$ или, если точное равенство не выполняется,

$$k: R(k) = \left| \hat{\alpha}_x^{(T_1, T_2)} - \alpha_k^{(T_1, T_2)} \right| \xrightarrow{k} \min, \quad (3)$$

где R – функция невязки, модуль разности расчетного и экспериментального значений локализирующих коэффициентов. Узел k , для которого функция невязки равна нулю (минимальна) и есть узел подключения источника помехи. Данный алгоритм может быть также применен для локализации источника постоянного тока. В этом случае алгоритм остается прежним, но может быть упрощен.

Рассмотрим задачу локализации источника тока с широким амплитудно-частотным спектром, полученном при разложении помехи в ряд Фурье с базовой частотой разложения, например, $\omega_0/10$. Соответственно, для выполнения разложения в ряд Фурье необходимо сохранять напряжения тестовых узлов в течение временного интервала $T_d = 10T_0 = 10(2\pi/\omega_0)$. Выделим из полученного спектра некоторый набор частот $f_1 \dots f_M$. В общем случае этот набор может содержать все полученные частоты. Локализация источника помехи, как и в алгоритме решения базовой задачи, выполняется в два этапа. На расчетном этапе вычисляются локализирующие коэффициенты $\alpha(f_p)_k^{(T_1, T_2)}$, $k = \overline{1, n}$, $k \neq T_1, T_2$; $p = \overline{1, M}$ для частот $f_1 \dots f_M$. Важно, что для каждого k -го узла локализирующий коэффициент стал дискретной функцией частоты. Определение этих коэффициентов выполняется в соответствии с соотношениями (1)-(2) базового

алгоритма. На экспериментальном этапе, при возникновении помехи, цифровое устройство сохраняет кривые напряжений контрольных узлов $u_{T_1}(t)$ и $u_{T_2}(t)$ на временном интервале длительностью не менее $T_d = 10T_0$. Далее проводится разложение полученных кривых в ряд Фурье, определение амплитуд спектральных составляющих напряжений с частотами $f_1 \dots f_M$ и нахождение дискретной функции $\hat{\alpha}(f_p)_x^{(T_1, T_2)}$, $p = \overline{1, M}$. Затем, для локализации помехи (определения номера узла k , к которому она подключена) решается задача аналогичная (3).

Отмечено, что дискретная функция $\hat{\alpha}(f_p)_x^{(T_1, T_2)}$, $p = \overline{1, M}$ неизменна при действии одного источника помехи в сети. При локализации двух (или более) источников помехи J_s и J_r , эта не постоянна, следовательно, по её изменению можно судить о наличии в энергосистеме двух или более источников помехи. В случае N источников помех в электрической цепи, для их локализации необходимо производить измерения напряжений в $N+1$ узлах. Рассмотрим далее локализацию двух источников помех J_s и J_r , подключенных к узлам с номерами s и r соответственно, для чего необходимо производить измерения напряжения в трех контрольных узлах T_1, T_2, T_3 . Тогда

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{T_1,0} \\ \dot{U}_{T_2,0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{T_1,s} & z_{T_1,r} \\ z_{T_2,s} & z_{T_2,r} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{J}_s \\ \dot{J}_r \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \dot{J}_s \\ \dot{J}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{T_1,s} & z_{T_1,r} \\ z_{T_2,s} & z_{T_2,r} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_{T_1,0} \\ \dot{U}_{T_2,0} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

$$\dot{U}_{T_3,0} = \begin{bmatrix} z_{T_3,s} & z_{T_3,r} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{J}_s \\ \dot{J}_r \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} z_{T_3,s} & z_{T_3,r} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} z_{T_1,s} & z_{T_1,r} \\ z_{T_2,s} & z_{T_2,r} \end{bmatrix}^{-1}}_{\begin{bmatrix} \alpha_1^{(T_1, T_2, T_3)} & \alpha_2^{(T_1, T_2, T_3)} \end{bmatrix}} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_{T_1,0} \\ \dot{U}_{T_2,0} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\dot{U}_{T_3,0} = \begin{bmatrix} \alpha_1^{(T_1, T_2, T_3)} & \alpha_2^{(T_1, T_2, T_3)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_{T_1,0} \\ \dot{U}_{T_2,0} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

Соотношение (6) справедливо только если источники подключены к узлам s и r цепи. Вектор $\alpha_{123} = \begin{bmatrix} \alpha_1^{(T_1, T_2, T_3)} & \alpha_2^{(T_1, T_2, T_3)} \end{bmatrix}^T$ - векторный локализирующий коэффициент. Таким образом, для локализации двух источников требуется выбрать такие коэффициенты $\alpha_1^{(T_1, T_2, T_3)}$ и $\alpha_2^{(T_1, T_2, T_3)}$, которые делают выражение (6), содержащее измеренные напряжения, истинным. Минимум функции невязки определяет узлы подключения источников помех.

Определим линейное соотношение между напряжениями контрольных узлов для локализации любого количества источников помех в системе аналогично изложенному ранее. Алгоритм может быть очевидным образом обобщен для N источников помех. В этом случае необходимо использовать $(N+1)$ контрольных узлов, и, соответственно, вектор локализирующих коэффициентов имеет вид:

$$\alpha^{(T_1, T_2 \dots T_{(N+1)})} = \begin{bmatrix} \alpha_1^{(T_1, T_2 \dots T_{(N+1)})} & \alpha_2^{(T_1, T_2 \dots T_{(N+1)})} & \dots & \alpha_N^{(T_1, T_2 \dots T_{(N+1)})} \end{bmatrix}^T. \quad (8)$$

Заметим, что предварительно не известно точное количество источников помех, поэтому на расчетном этапе необходимо определить их условное предельное количество L и рассчитать локализирующие коэффициенты для количества источников помех от 1 до L . На экспериментальном этапе количество источников помех определяется проверкой постоянства локализирующих коэффициентов.

Выбор контрольных узлов, является самостоятельной и важной в рамках предлагаемого метода задачей, т.к. от него может зависеть точность локализации источника помех. Процедура выбора оптимальной комбинации контрольных узлов должна быть осуществлена на начальном этапе, до проведения расчетов локализирующих коэффициентов. Критерий их выбора – минимальная погрешность локализации источника помехи, которая может возникнуть, например, в случае использования неточных данных о параметрах цепи или в случае сложной топологии цепи. Контрольные узлы могут быть выбраны с использованием метода перебора, генетического алгоритма (ГА) или др. Перебор возможных комбинаций тестовых узлов и их сравнение по выбранным критериям используется в случаях, когда рассматриваемая цепь невелика. В случае, когда число возможных комбинаций тестовых узлов велико, эффективнее для данной цели будет применение генетического алгоритма. В результате применения ГА получаем набор тестовых узлов, наиболее пригодный для расчета локализирующих коэффициентов и для установки в нем измерительной аппаратуры.

Работа всех предложенных в главе алгоритмов протестирована с помощью математического моделирования и приведены примеры их использования в тестовых схемах IEEE. Показано, что алгоритмы работоспособны. Показана методика выбора контрольных узлов, базирующаяся на использовании генетического алгоритма. Использование генетического алгоритма для выбора контрольных узлов позволяет значительно повысить точность локализации источников помех.

В третьей главе исследован алгоритм идентификации, позволяющий получить исходную информацию о системе в виде данных о её топологии и параметрах элементов, что может быть сделано однократно при её проектировании и запуске в эксплуатацию. Отмечено, что использование алгоритма идентификации, основанного на применении принципа повторных измерений, позволяет идентифицировать параметры систем, включающих в себя особые сечения, т.е. проходящие только по ветвям с проводимостью, малой по отношению к проводимостям остальных ветвей.

Представлены основные экспериментальные результаты, связанные с оценкой точности локализации источников помех Ω в зависимости от погрешности измерений, числа обусловленности матрицы узловых проводимостей цепи Θ , количества контрольных узлов. Расчеты проведены для тестовых схем IEEE 14 и IEEE 57.

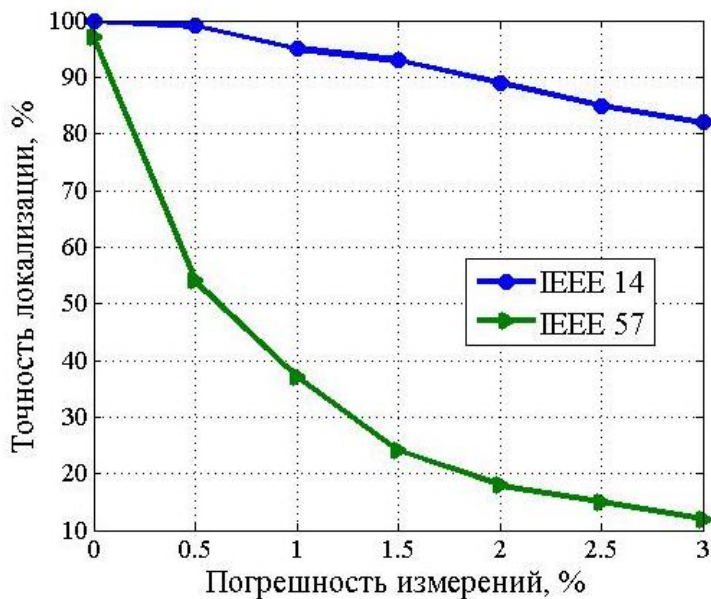


Рис. 2. Зависимость точности локализации источника помехи в тестовых схемах IEEE 14 и IEEE 57 от погрешности измерений ε .

измерений. При выделении в цепи искусственно составленного особого сечения, проведена оценка влияния значения Θ на точность локализации для тестовых схем IEEE 14 и IEEE 57. На рисунке 3 представлена такая зависимость для схемы IEEE 14.

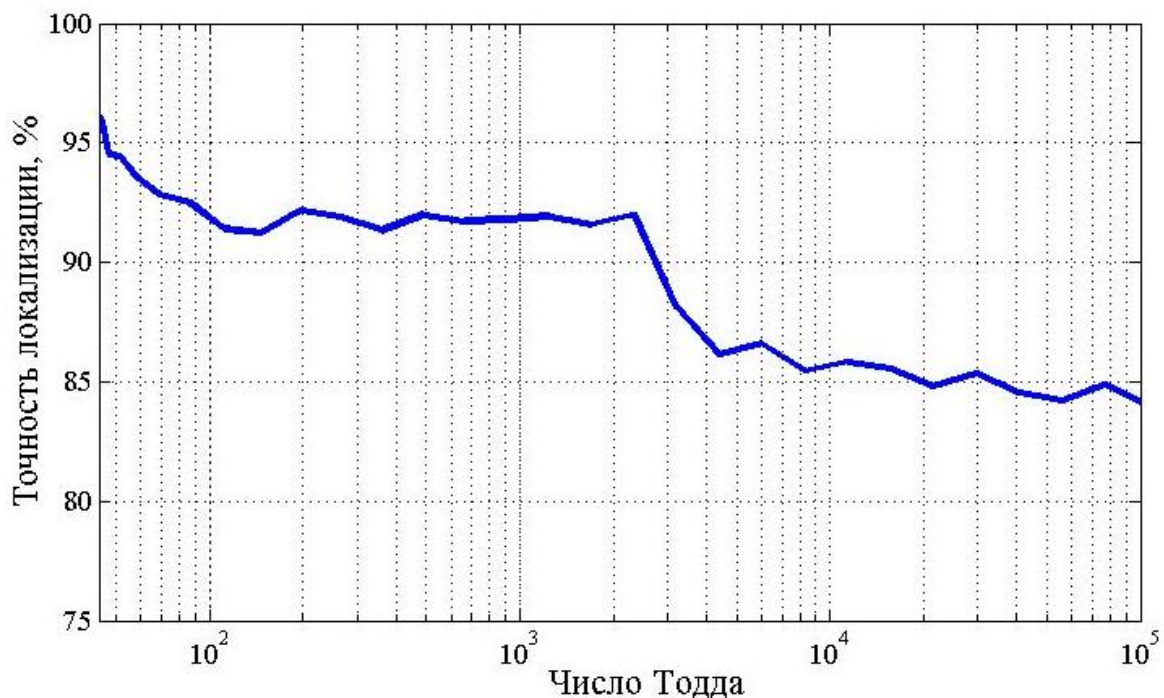


Рис. 3. Зависимость точности локализации источника помехи Ω в тестовой схеме IEEE 14 от числа Тодда Θ при относительной погрешности измерений $\varepsilon=1\%$.

$$\Omega = n/N \cdot 100\%,$$

где n - количество верных решений задачи локализации, N - количество экспериментов.

Исследования показали, что точность локализации снижается при увеличении погрешности измерений, причем эта зависимость более сильная при более высоком числе Тодда, как, например, в тестовой схеме IEEE 57 (рис. 2)

При возрастании числа обусловленности матрицы узловых проводимостей цепи, точность локализации очень сильно зависит от погрешности

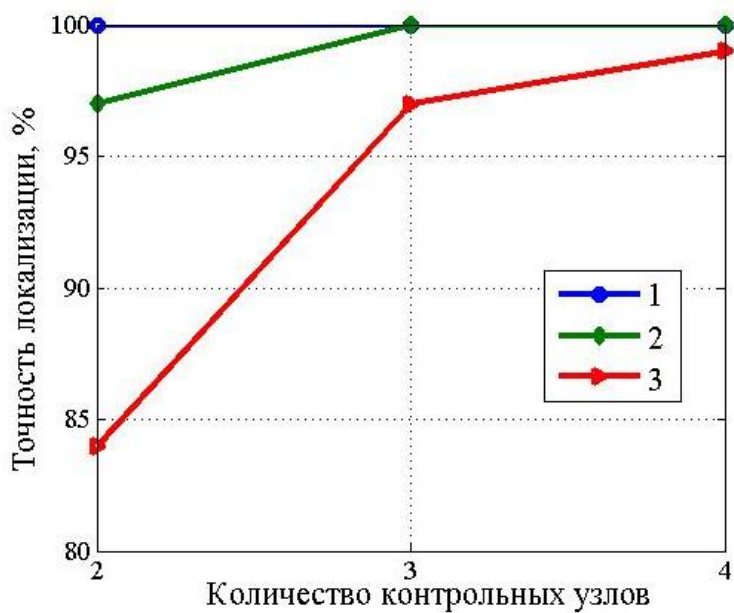


Рис. 4. Зависимость точности локализации источника помехи Ω в тестовой схеме IEEE 14 от количества контрольных узлов. 1-относительная погрешность измерений $\varepsilon=0\%$, 2 - $\varepsilon=1\%$, 3 - $\varepsilon=3\%$.

Точность решения задачи локализации источников помех и её устойчивость к погрешности измерений может быть повышена благодаря увеличению количества контрольных узлов и выбору их оптимального расположения посредством, например, генетического алгоритма Рисунок 4 иллюстрирует повышение точности локализации с увеличением количества контрольных узлов для схемы IEEE 14.

В четвертой главе проведено сравнение результатов локализации источников помех с использованием математической и физической моделей цепи и вычислено соотношение между погрешностью измерительных приборов и точностью локализации. Для исследования работы технологии локализации источников помех, необходимо построить наиболее точную модель системы, для чего нужно, в частности, учесть погрешность измерительных приборов. Физическое моделирование проведено на экспериментальной установке (рис. 5), в которой для измерений используется LСARDE14-140-Мс заявленной погрешностью $\delta \sim 10^{-4}$. Экспериментальная установка включает в себя электрическую цепь, модель источника помехи (источник тока), измерительный блок, а также имеет соединение с персональным компьютером, на котором установлена программа, реализующая исследуемый алгоритм. Вычислена погрешность измерения напряжений узлов обусловленная δ , и, затем, используя это значение в математической модели, рассчитана точность локализации источника помехи.

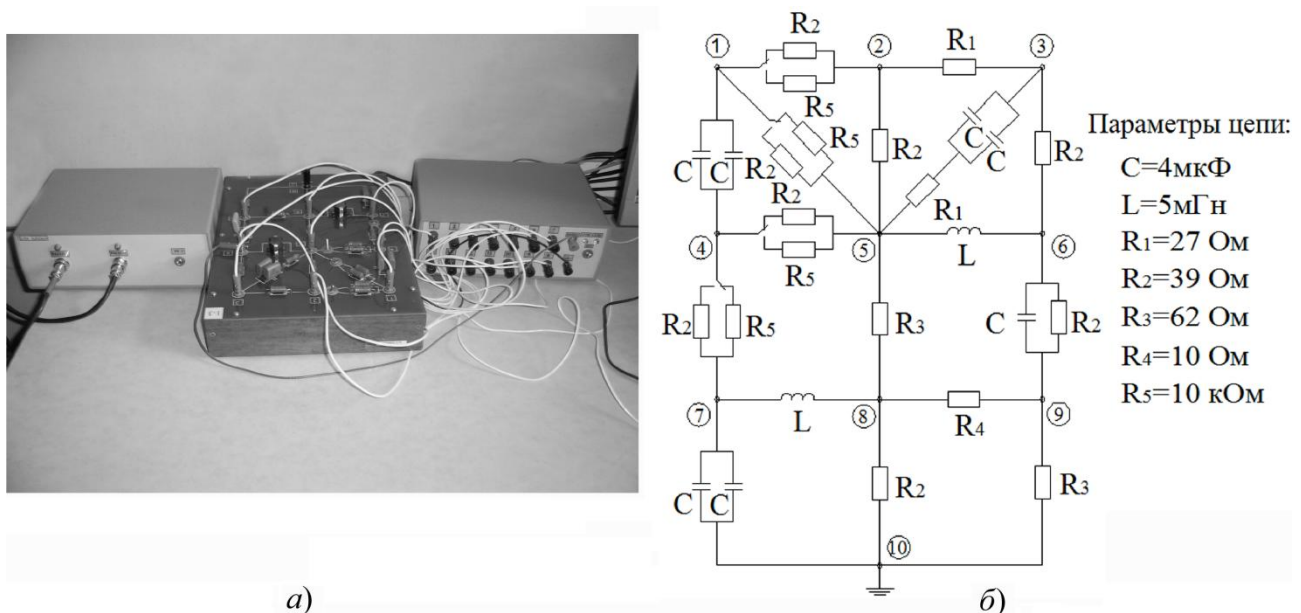


Рис. 5. Фотография экспериментальной установки (а) и схема электрической цепи (б)

В результате исследования получено, что погрешность измерения напряжений узлов обусловленная δ равна значению $\varepsilon \sim 2.8 \cdot 10^{-2}$. Далее, вводя в математическую модель $\varepsilon = 2.8 \cdot 10^{-2}$, проведено 1000 опытов локализации источника помехи и определена точность решения. Полученное значение составляет 99,87%.

Рассмотрение практических задач локализации источников помех проведено с использованием тестовой схемы IEEE 118. Для этого проведен подготовительный этап, на котором определено число обусловленности матрицы узловых проводимостей цепи, определена погрешность локализации источников помехи для различного количества контрольных узлов и, с использованием генетического алгоритма, найдены такие комбинации контрольных узлов, которые обеспечивают минимальную погрешность локализации.

В результате вычислений получено высокое значение $\Theta=10^3$, что говорит о плохой обусловленности матрицы узловых проводимостей и сильной зависимости точности локализации от погрешности измерений. Значит, необходимо тщательно выбрать количество и расположение контрольных узлов для локализации источников помех. Проведен расчет точности локализации источника помехи при изменении количества контрольных узлов от двух и выше сначала для произвольно выбранной комбинации узлов, а затем для комбинации, найденной с помощью ГА.

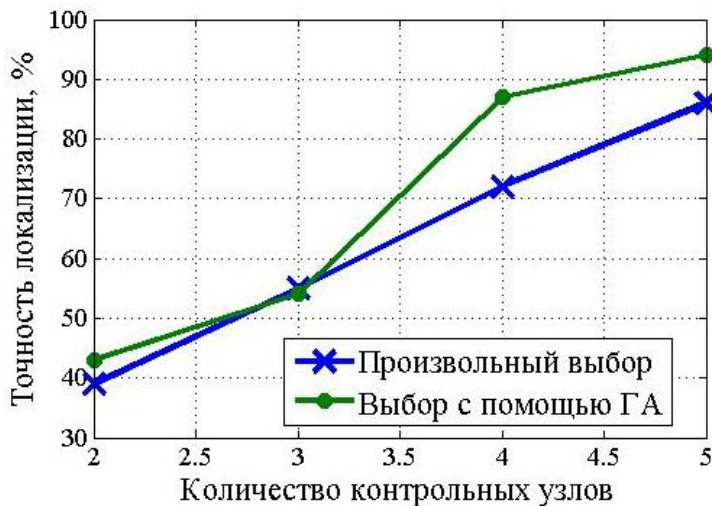


Рис. 6. Зависимость точности локализации источника помехи от количества контрольных узлов в тестовой схеме IEEE 118 при значении $\varepsilon=1 \cdot 10^{-2}$

Сделан вывод о том, что при оптимальном выборе контрольных узлов, существует возможность повышения точности локализации в задаче до 94% при пяти T против 85% при произвольном выборе T . В результате проведенных расчетов, установлено, что комбинация узлов 31, 41, 54, 85 и 111 обеспечивает наиболее высокую точность локализации источника помехи.

Рассмотрим задачу локализации источника помехи, вызванной включением в сеть дуговой печи. Сначала вычислим расчетные локализирующие коэффициенты для всех возможных пар контрольных узлов из выбранной посредством ГА комбинации T . Для проведения экспериментального этапа, построим модель источника помехи, вызванной включением дуговой печи на основе данных о токе в ней (рис. 7).

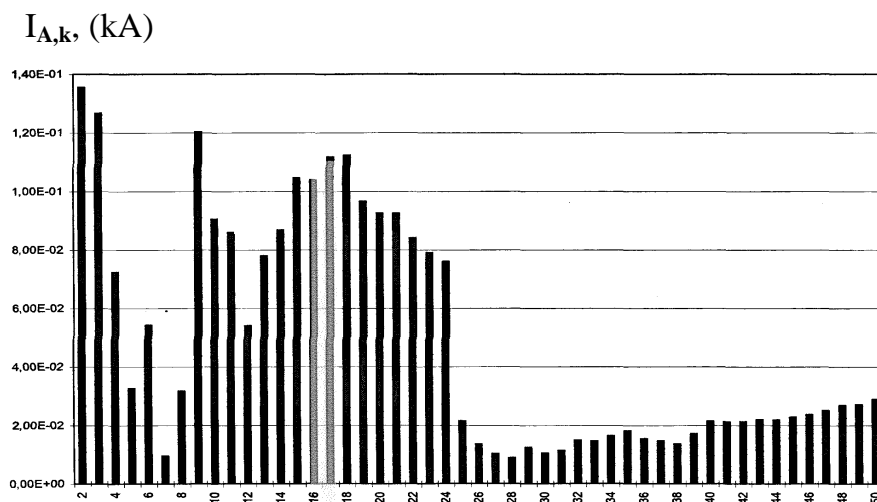


Рис. 7. Амплитудно-частотная характеристика тока в дуговой сталеплавильной печи.

После подключения источника помехи к произвольному узлу цепи (пусть это узел 30), вычисляем экспериментальные расчетные коэффициенты и производим их сравнение с расчетными. В результате, для каждой из пар контрольных узлов, составленной из комбинации $T_1 \div T_5$,

получаем некоторый ряд узлов предположительного присоединения источника помехи. Сравнивая эти значения, находим, что узел 30 является наиболее вероятным узлом присоединения помехи, т.к. чаще всего встречается среди решений. Вычисленное решение соответствует действительности.

Итак, исследование алгоритма локализации источника помехи с помощью экспериментальной установки, а также пример решения задачи поиска узла присоединения к цепи дуговой сталеплавильной печи, вызвавшей возникновение в ней электромагнитной помехи, доказывает работоспособность метода. Приведен пример расчета оптимального количества контрольных узлов в цепи, состоящей из 118 узлов и показано, что применение ГА позволяет снизить количество необходимых контрольных узлов.

Основные выводы и результаты работы:

1. В настоящей диссертационной работе исследованы вопросы локализации источников помех в энергосистеме и предложен метод локализации источников помех, соответствующий требованиям технологий интеллектуальных сетей.

2. Показано, что применение современных информационных технологий сбора, передачи, обработки и хранения информации в исследованном методе обеспечивает достаточное быстродействие и позволяет локализовать источник помехи в режиме реального времени. Это позволяет уменьшить негативное влияние электромагнитных помех на работу электрооборудования и снизить энергетические и экономические потери, связанные с нарушением качества электроэнергии. Несмотря на то, что метод ориентирован на применение современных информационных технологий, оборудование, необходимое для его реализации, не является уникальным, что позволяет снизить затраты на проведение мероприятий по локализации источников помех.

3. Предложен метод снижения количества измерительных устройств для локализации источников помех по сравнению с методами поиска источников помех по направлению активной и реактивной мощности. Например, для энергосистемы из 20 - 30 узлов достаточно измерений напряжений в двух-трех узлах. Благодаря уменьшению количества необходимых измерений и измерительных устройств, снижается стоимость мероприятий по локализации источников помех.

4. Показано, что метод поиска местоположения источников помех может быть использован в электроэнергетических сетях и системах различных типов и классов напряжения.

5. Рассмотрены алгоритмы локализации одного, двух и произвольного количества источников электромагнитных помех, а также предложена методика выбора контрольных узлов, базирующаяся на использовании генетического алгоритма. Работа всех рассмотренных в главе алгоритмов протестирована с помощью математического моделирования и приведены примеры их использования в тестовых схемах IEEE. Проведено исследование эффективности применения предложенного метода в различных по сложности задачах и выявлены зависимости точности локализации от

погрешности измерительной системы, числа обусловленности матрицы узловых проводимостей, количества контрольных узлов.

6. Исследованы недостатки метода- хранение и обработка большого объема информации в случае выбора большого количества контрольных узлов, а также влияние топологии цепи на точность локализации. Доказано, что точность локализации может быть повышена благодаря предложенному в работе алгоритму выбора количества и расположения контрольных узлов.

7. Метод исследован с использованием экспериментальной установки, проведено сравнение результатов экспериментов с использованием физической и математической моделей цепей. Приведены примеры использования метода для локализации источников помех в практических задачах. Показано, что алгоритмы, построенные на базе метода, работоспособны и обеспечивают высокую точность локализации.

8. Показана возможность построения и внедрения в ЭЭС интеллектуальной системы мониторинга показателей качества электроэнергии, возникшая благодаря тому, что при использовании исследуемого метода, обнаружение и локализация помех могут производиться в режиме реального времени. Отмечено, что система, построенная на основе метода, является расширяемой: при развитии электрической сети и увеличении числа её ветвей и элементов, необходимо увеличить количество измерений, то есть установить дополнительный измерительный блок в одном из её узлов.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. **Лысенко, Г.С. Технология локализации источников помех в энергосистемах / Г.С. Лысенко, Н.В. Коровкин // Известия РАН. Серия Энергетика. – 2013.– №2.– С. 121 – 130.**

2. *Лысенко, Г.С. A method of a disturbance source localization in power system / Г.С. Лысенко // Proceedings of TMCE 2012. – Karlsruhe. – 2012. – P. 811 – 820.*

3. *Лысенко, Г.С. Использование технологии локализации источников помех в энергосистемах для построения интеллектуальной системы мониторинга показателей качества электроэнергии / Г. С. Лысенко // Материалы конференции «Повышение эффективности энергетического оборудования».– Санкт-Петербург.– 2012.– Т. 1. – С. 379-386.*

4. *Лысенко, Г.С. Локализация источников помех в энергосистемах / Г. С. Лысенко // Сборник трудов седьмой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов».– Благовещенск.– 2013. – С. 177 – 182.*