

*На правах рукописи*

Баланцев Григорий Андреевич

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТ ПОВРЕЖДЕНИЙ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ  
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НАПРЯЖЕНИЕМ 110-220 КВ  
И РАЦИОНАЛЬНОЕ РАЗМЕЩЕНИЕ ФИКСИРУЮЩИХ ПРИБОРОВ  
НА ПОДСТАНЦИЯХ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ.**

Специальность 05.14.02 – Электростанции  
и электроэнергетические системы

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук.

Санкт-Петербург,  
2005

Диссертация выполнена на кафедре «Электрические системы и сети» государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургского государственного политехнического университета».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Смоловик Сергей Владимирович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Попов Владимир Анатольевич

кандидат технических наук  
Мельничников Сергей Александрович

Ведущая организация: ОАО «Архэнерго»

Защита состоится «23» декабря 2005 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета К 212.229.02 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д., 29, Главное здание ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Автореферат разослан «\_\_» ноября 2005 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета К 212.229.02  
кандидат технических наук, доцент

Попов М.Г.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Одним из предпочтительных путей снижения ущерба от перерывов электроснабжения является сокращение суммарного времени отыскания и устранения повреждений за определённый эксплуатационный период. Особенно важную роль в этом играют средства определения места повреждения (ОМП). В случае качественного ОМП ремонтная бригада быстро находит повреждение и в сжатые сроки может приступить к ремонту. В условиях пересечённой местности, слабого развития дорожной сети, при наличии ЛЭП значительной протяжённости успешное ОМП позволяет сократить время поиска повреждения в несколько раз.

За годы, прошедшие с момента создания первых средств дистанционного ОМП, многие отечественные и зарубежные учёные вели исследования в этой области. В их число входят Г.М. Шалыт, А.И. Айзенфельд, А.С. Малый, А.С. Саухатас, Ю.Я. Лямец, Б.В. Борозинец, Takagi, D.J. Novosel, D.G. Hart, E. Udren, E.O. Schweitzer и многие другие.

Несмотря на значительный объём исследований, посвящённых вопросу ОМП, и многолетний опыт применения различных методов, задача определения мест повреждений ЛЭП остаётся актуальной ввиду значительного ущерба, наносимого аварийными отключениями ЛЭП.

Методы ОМП, нашедшие широкое применение в практике энергосистем, обладают рядом существенных недостатков. Те из них, которые используют двухстороннее измерение параметров аварийного режима (ПАР), чувствительны к искажению одного или нескольких показаний фиксирующих приборов (ФП). Односторонние методы, реализованные в большинстве современных ФП, теряют точность при наличии переходного сопротивления в месте повреждения. Кроме того, при практической реализации подобных методов возникают трудности с учётом индуктивных связей воздушной ЛЭП (ВЛ), обслуживаемой прибором, с другими линиями.

Существующий подход к решению задач ОМП ориентирован на обеспечение достоверного ОМП отдельно взятой ЛЭП. Гораздо более эффективным представляется системный подход, направленный на обеспечение ОМП на комплексе ЛЭП энергосистемы.

Другой важной задачей является оптимизация системы аварийных измерений, используемых для определения места повреждения ВЛ. Задача актуальна ввиду высокой стоимости современных ФП, а также потенциальной возможности повышения качественных показателей ОМП за счёт оптимального выбора мест установки ФП. Работники служб, отвечающих за оснащение ЭС средствами аварийных измерений,

сталкиваются с задачей выбора мест установки приборов при техническом переоснащении подстанций (ПС) и вводе в строй новых ЛЭП. В отсутствие теоретически обоснованных подходов они вынуждены принимать решения на основе интуитивных соображений и собственного опыта. Эта проблема на сегодняшний день проработана недостаточно, о чём свидетельствует практически полное отсутствие публикаций, посвящённых вопросу.

**Цель работы.** Целью настоящей работы является повышение вероятности успешного ОМП на комплексе ВЛ 110 и 220 кВ энергосистемы при сокращении затрат на оснащение подстанций средствами аварийных измерений.

#### **Основные решаемые задачи:**

- Разработка метода ОМП, обеспечивающего повышение характеристик ОМП на всей совокупности ВЛ 110 и 220 кВ за счёт использования в расчёте дополнительной информации в виде показаний ФП, расположенных на ПС, не смежных непосредственно с повреждённой ВЛ, применения детализированной математической модели повреждённой ЭС и современных методов статистического анализа.

- Создание алгоритма и программного обеспечения автоматизированного ОМП ВЛ, на уровне инструментария, пригодного к использованию в инженерной практике.

- Разработка процедуры решения системы линейных алгебраических уравнений по методу узловых напряжений с применением технологии разреженных матриц, позволяющей наиболее эффективно использовать ОЗУ ПЭВМ для расчёта параметров аварийного режима (ПАР) для ОМП.

- Исследование взаимосвязи конфигурации электрической сети высокого напряжения, размещения ФП и качественных показателей ОМП на совокупности ВЛ энергосистемы.

- Определение базовых принципов рационального размещения ФП на ПС энергосистемы для целей повышения вероятности успешного ОМП на ВЛ. Выявление предпочтительных путей вычислительной реализации процедуры рационального размещения ФП.

#### **Новые научные результаты.**

1. Разработан и программно реализован новый метод ОМП на основе кластерного анализа расчётных расстояний, вычисляемых путём сопоставления ПАР, измеренных в ходе срабатывания ФП, и расчётных значений, определённых на математической модели ЭС. Метод ориентирован не на достижение высокой точности ОМП на одной отдельно взятой ЛЭП, а на обеспечение надёжного ОМП на всём комплексе ВЛ 110, 220 кВ энергосистемы.

2. Предложен подход к оценке качественных показателей ОМП, позволяющий учитывать не только характеристики измерительной цепи (ФП и первичных преобразователей), но и параметры ЭС.

3. Предложен критерий оптимальности для решения задачи о рациональном размещении ФП.

4. Сформулированы общие принципы рационального размещения ФП на ПС энергосистемы для снижения расходов на оснащение ПС измерительной аппаратурой при достижении заданного уровня вероятности успешного ОМП на всех ЛЭП энергосистемы при использовании для ОМП разработанного метода на основе кластерного анализа.

5. Предложены метод и алгоритм рационального размещения ФП, реализованные в вычислительной программе. Проведён анализ размещения ФП в конкретной энергосистеме.

#### **Практическая значимость и внедрение результатов работы.**

Сформулированные теоретические положения могут быть использованы в научно-исследовательских и проектных организациях при совершенствовании средств ОМП ВЛ.

Разработанный метод ОМП на основе кластерного анализа может быть использован службами релейной защиты и автоматики и оперативно-диспетчерским персоналом энергосистем в повседневной деятельности при определении мест повреждений ВЛ.

Предложенный метод рационального размещения ФП может быть использован при решении задач перспективного развития энергосистем.

Разработанное проблемно-ориентированное программное обеспечение для решения эксплуатационных и исследовательских задач внедрено в ОАО «Архэнерго».

**Опубликованные работы и апробация результатов.** Основные положения диссертационной работы докладывались на Всероссийской конференции молодых специалистов энергетики (Москва, 2000); научно-технической конференции «Электроснабжение, электрооборудование, энергосбережение» (Новомосковск, 2002 г). По теме диссертации опубликовано шесть работ.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, выводов по работе, приложения, списка литературы из 76 наименований. Содержание работы изложено на 148 страницах и иллюстрировано 33 рисунками и 15 таблицами.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность работы, формулируются её цели и основные задачи, приводятся положения, отражающие научную новизну и практическую значимость диссертации.

**В главе 1** рассмотрены методы определения места повреждения воздушных линий электропередачи высокого напряжения, которые подразделяются на топографические и дистанционные. Топографические методы подразумевают ОМП непосредственно при движении по трассе. Данные методы применяются в сетях 6-35 кВ, поэтому дальнейшее их рассмотрение в работе не выполняется. Дистанционные методы подразумевают установку приборов или устройств на подстанциях системы, позволяющих на основе их показаний определить место повреждения. Их можно разделить на нетрадиционные (радиолокация МП, видеоидентификация, применение систем искусственного интеллекта); высокочастотные (волновые, локационные, метод стоячих волн); по ПАР (двухсторонние на основе аналитических формул, односторонние на базе теории дифференциальных защит, односторонние по мгновенным значениям ПАР, ОМП по кривым спада ПАР).

Нетрадиционные методы не нашли широкого применения в практике энергосистем в связи с высокой стоимостью и сложностью эксплуатации.

Внедрение высокочастотных методов в практику энергосистем было и остаётся ограниченным, т.к. их применение наталкивается на ряд трудностей, связанных для локационных методов, метода стоячих волн и односторонних волновых методов с наличием ложных замеров из-за неоднородностей ВЛ либо, для двухстороннего волнового метода, сложностью осуществления синхронного отсчёта времени на двух концах ВЛ с точностью до микросекунд.

Наиболее широкое распространение в электрических сетях высокого напряжения получила группа методов ОМП по ПАР.

Двухстороннее ОМП по интегральным ПАР с использованием аналитических формул. Параметры аварийного режима фиксируются аналоговыми ФП с обоих концов линии. Расстояние до МП вычисляется по аналитической формуле, составленной на основе уравнений теории цепей с сосредоточенными параметрами. Достоинства: наглядность при простой конфигурации ЛЭП, универсальность используемых схем замещения ЭС, независимость результатов от переходного сопротивления и токов нагрузочного режима. Недостатки: усложнение формул для ЛЭП сложной конфигурации; отказ или погрешность одного ФП могут приводить к значительной погрешности или невозможности выполнения ОМП. Дальнейшим развитием данной теории является метод пассивных

многополюсников для ОМП на линиях с ответвлениями, а также ряд методов, реализованных в ФП двухстороннего измерения.

Односторонние методы ОМП на базе теории дистанционных защит. Методы реализованы во многих цифровых ФП. В основу положено то, что расстояние до МП при металлическом КЗ пропорционально сопротивлению на зажимах дистанционного устройства. При КЗ через переходное сопротивление остаётся возможность вычислить расстояние в предположении, что переходное сопротивление носит активный характер. Преимущества методов заключаются в том, что расстояние определяется прибором, установленным на одном из концов ВЛ. Исключается необходимость каких бы то ни было расчётов для определения МП. Метод имеет существенные недостатки, поскольку из-за принятых допущений обладает методической погрешностью.

ОМП по таблицам или кривым спада. При ОМП по этому методу служба РЗ энергосистемы заранее рассчитывает значения различных ПАР или их комбинаций для основных режимов работы каждой ВЛ в 10-20 её точках. Диспетчер, получив данные с ФП, сопоставляет их с рассчитанными значениями и делает вывод о месте КЗ. К достоинствам метода относится наличие возможности учёта основных влияющих факторов (взаимоиндукции с несколькими ВЛ, переходного сопротивления, ответвлений и т.д.), обеспечивающее возможность построения на его базе комплексных высокоэффективных систем ОМП. Трудности реализации могут быть связаны с необходимостью централизованного расчёта ОМП, передачи данных и обеспечения достоверности и изохронности измерений ФП. Данный подход может быть принят за основу при создании автоматизированных программно-аппаратных комплексов для ОМП.

Измерения электрических величин, использующихся при дистанционном ОМП, выполняются в течение короткого периода времени, предшествующего отключению КЗ средствами релейной защиты. Многие факторы, влияющие на значения ПАР, носят неопределённый характер и могут быть учтены лишь косвенным образом. ФП, особенно устаревшие аналоговые устройства, имеют значительный процент отказов в работе. Совокупное действие различных процессов приводит к тому, что исходные данные для дистанционного ОМП зачастую оказываются неверными. Перед разработчиками методов ОМП встала задача исключения недостоверных измерений и компенсации неопределённости. Существует несколько подходов, основанных на исключении недостоверных значений ПАР и применении методов теории вероятности и математической статистики.

Несмотря на большое количество существующих методов, задача определения места повреждения ВЛ остаётся актуальной, поскольку ни

один из существующих методов в полной мере не удовлетворяет требованиям, предъявляемым службами энергосистем.

**Глава 2** посвящена вопросам математического моделирования установившегося аварийного режима электрической сети. В предыдущей главе показано, что ОМП ВЛ по ПАР во многих методах осуществляется за счёт сопоставления зафиксированных при конкретной аварии ПАР с расчётными значениями в различных точках ЭС. Отсюда возникает необходимость расчёта параметров установившегося аварийного режима ЭС. Учитывая задачи диссертации, наличие исходных данных и требования к точности результата моделирования для расчёта ПАР был выбран метод симметричных составляющих. Несмотря на проработанность основных вопросов, изложенных в данной главе, в диссертации уделено внимание применению рассматриваемых методов и подходов к расчёту параметров аварийного режима для целей ОМП.

Для расчёта ПАР по методу симметричных составляющих используются выражения, в которые входят сопротивления прямой последовательности  $Z_{\Sigma 1}$ , обратной -  $Z_{\Sigma 2}$ , нулевой -  $Z_{\Sigma 0}$  и эквивалентная ЭДС  $\dot{E}_{\Sigma}$  относительно точки короткого замыкания, вычисление которых для схем, содержащих больше количество узлов, само по себе представляет сложную математическую задачу. Для вычисления указанных значений использовано решение системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). СЛАУ составляется по методу узловых напряжений (МУН) в форме баланса токов исходя из описания схемы замещения ЭС, составленного в форме табличного кодирования. СЛАУ для реальной энергосистемы включает до тысячи и более неизвестных в комплексной форме (для энергосистемы «Архэнерго» - около 700).

Для того, чтобы сократить затраты времени на расчёт ПАР перед проведением основных вычислений, схема замещения приводится к виду, включающему минимально необходимое число узлов. Эквивалентирование схемы замещения с целью сокращения числа входящих в неё узлов равнозначно сокращению порядка СЛАУ, составленной по МУН, для чего использован метод Гаусса с выбором ведущего элемента в матрице в целях обеспечения численной устойчивости. Для оптимизации использования ОЗУ ЭВМ реализовано хранение матрицы узловых проводимостей с учётом её разреженности. В качестве структуры хранения разреженной матрицы использованы связанные списки смежности.

**В главе 3** описан разработанный метод определения мест повреждения ВЛ-110,220 кВ на основе кластерного анализа.

Исследования, проведённые автором совместно со службой РЗА ОАО «Архэнерго» имели цель восполнить недостатки методов ОМП по



ПАР. Предполагалось выяснить возможность применения статистических приёмов анализа на основе большего, чем в традиционных методах, числа показаний ФП. Разработка не преследовала цели максимального повышения точности ОМП за счёт усовершенствования аппаратной базы. Целью метода является повышение статистической надёжности ОМП на ВЛ. Основные характеристики такого подхода включают централизованную обработку показаний ФП, достаточно точное отображение топологии системы и параметров режима, прямой учёт переходного сопротивления в месте КЗ, возможность использования большого числа исходных данных. Имеются в виду показания ФП не только на аварийной, но и на других ВЛ.

В случае, когда кривая спада ПАР является монотонной функцией, при заданном переходном сопротивлении измеренная величина рассматриваемого ПАР может соответствовать единственному месту повреждения ЛЭП. При изменении предполагаемого переходного сопротивления значения расстояния до МП, определяемого по рассматриваемому ПАР, образуют множество точек. Анализ этих множеств удобно производить в системе координат  $l - r_{\partial}$ , по оси абсцисс которой откладывается расстояние до МП, отнесённое к длине аварийной ВЛ, а по оси ординат – переходное сопротивление в месте повреждения. Для реальных повреждений координаты рассматриваемых точек являются множеством решений уравнений вида  $A_p(r_{\partial}, l) = A_{изм}$ , где  $A_{изм}$  – измеренное фиксирующим прибором значение параметра аварийного режима;  $A_p$  – рассчитанное значение параметра аварийного режима.

Каждое уравнение соответствует одному ПАР, количество уравнений определяется числом ПАР, измеренных ФП в момент повреждения. Если допустить абсолютную адекватность применяемой математической модели реальной ЭС и отсутствие погрешностей измерения ПАР, все линии, определяемые уравнениями  $A_p(r_{\partial}, l) = A_{изм}$ , будут иметь пересечение в точке, соответствующей действительному МП. Однако измеренные ПАР и рассчитанные на модели ЭС их значения обладают некоторой, порой весьма существенной погрешностью. График точек совпадения расчётных и измеренных величин для реального повреждения характеризуется наличием многих центров пересечения, что свидетельствует о нечёткости исходной информации. Возникает задача выделения возможных мест повреждения и выбора наиболее вероятного из них.

Методы теории кластерного анализа позволяют разделить множество объектов на группы, элементы которых наиболее близки друг к другу. Объекты представляются в виде точек в многомерном пространстве, каждое измерение характеризует одно из свойств анализируемых объектов. Для отнесения объектов к одной группе (кластеру) может применяться критерий минимума различия. Различие можно рассматривать как

нечёткое отношение (НО) различия  $\mathbf{D}(\mathbf{L} \times \mathbf{L})$ , определённое на множестве точек  $\mathbf{L}$

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} \mu_D(l_1, l_2) & \mu_D(l_1, l_3) & \cdots & \mu_D(l_1, l_n) \\ & \mu_D(l_2, l_3) & \cdots & \mu_D(l_2, l_n) \\ & & \cdots & \cdots \\ & & & \mu_D(l_{n-1}, l_n) \end{pmatrix}$$

с функцией принадлежности  $\mu_D(l_i, l_j) = [0; 1]$ .

При заданном переходном сопротивлении  $r_\delta$  определяются  $l_1, l_2, \dots, l_n$  – расстояния, отнесённые к длине ВЛ, для которых совпадают соответствующие расчетные и замеренные величины. Элемент матрицы различия  $\mathbf{D}$  определяется выражением  $\mu_D(l_i, l_j) = |l_i - l_j|$ .

Для кластеризации множества точек совпадения расчётных и измеренных ПАР предлагается подвергать НО различия  $\mathbf{D}$  разложению на  $\alpha$ -уровни согласно теореме декомпозиции:  $\mu_D = \bigcup_{\alpha \in [0;1]} (\alpha \cdot \mu_{D\alpha})$ , где

$$\mu_{D\alpha}(l_i, l_j) = \begin{cases} 1, & \text{если } \mu_D(l_i, l_j) \geq \alpha \\ 0, & \text{если } \mu_D(l_i, l_j) < \alpha \end{cases} . \text{ Кластер } \mathbf{L}_k \text{ образуют элементы}$$

множества  $\mathbf{L}$ , для которых  $\mu_{D\alpha}(l_i, l_j) = 1, \forall l_i, l_j \in \mathbf{L}_k$ .

Для выделения кластеров используется величина  $\alpha = 0,075$ . Значение константы не обосновано теоретически. Оно уточнялось в ходе многократных расчетов мест повреждений и обеспечивает наибольшую надежность определения. Выбор наиболее вероятного места повреждения в координатах  $l - r_\delta$  осуществляется путём поиска максимума целевой статистической функции, определяющей "степень близости" значений  $l_i$  внутри кластера. В качестве целевой предложена функция вида

$$\xi = \sum_{k=1}^{N_{\text{гп}}} \left( \frac{1}{d_{(ij)k}} \cdot p_{(ij)k} \right), \text{ где } d_{(ij)k} - \text{расстояние в относительных единицах между}$$

двумя соседними местами, определёнными по различным ПАР при одном переходном сопротивлении;  $p_{(ij)k}$  – весовой коэффициент, учитывающий взаимное расположение ФП и другие факторы.

Величина  $\xi$  является суммой функций, имеющих гиперболический характер, т.е. при  $d_{(ij)k} \rightarrow 0$  функция  $\xi(d) \rightarrow \infty$ , поэтому минимальное значение величины  $d_{(ij)k}$  ограничено константой.

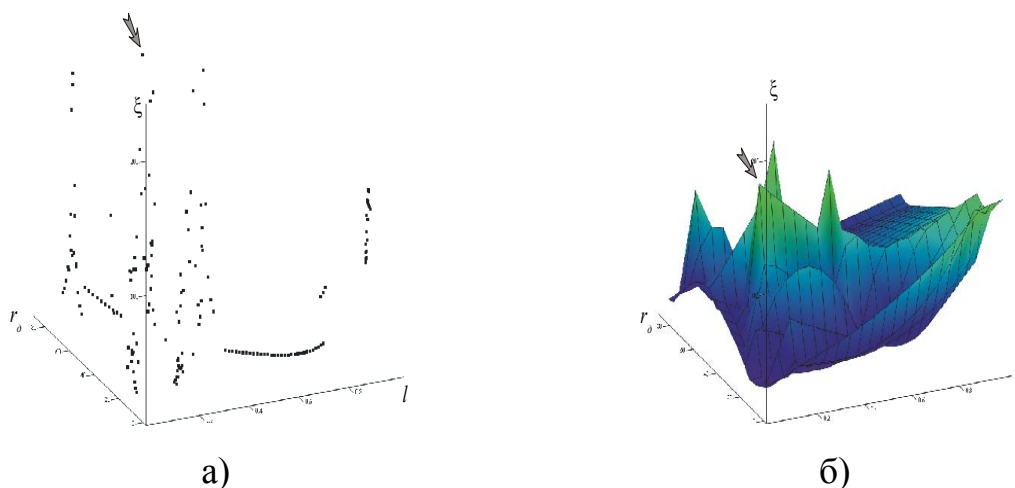


Рис. 1. Трёхмерный график целевой функции (а) и соответствующая сглаженная поверхность (б). ↘ - точка на графике, соответствующая наиболее вероятному месту повреждения.

В процессе ОМП путём перебора расстояния до МП в пределах от 0 до 1 и переходного сопротивления в пределах от 0 до максимально возможного значения для каждого зафиксированного ПАР определяются точки, в которых его значение совпадает с расчётным. В случае, если точки совпадения расчётных и фактических значений различных ПАР отклоняются друг от друга на значение, не превосходящее величины  $\alpha$ , они объединяются в кластер и для них вычисляется значение  $\xi$ . В координатах  $l-r_0$  строится семейство кривых, на которых определена функция  $\xi$ . Графически результат вычислений представлен на рис. 1. Из рисунка видно, что математическая сторона задачи есть поиск глобального максимума функции в трёхмерном пространстве.

В сформированных кластерах вычисляется средневзвешенное значение  $l_{C.B.}$ . Принимается, что повреждение произошло при таком сопротивлении дуги, при котором величина  $\xi$  максимальна. Местом повреждения считается  $l_{C.B.}$  того кластера, кучность которого максимальна.

Предложен подход к оценке качественных показателей ОМП: точности и вероятности успешного ОМП, связывающих эти характеристики с комбинацией ФП, показания которых применялись для нахождения искомого расстояния до МП. Основой предлагаемого подхода являются известные положения о связи чувствительности с крутизной кривых спада ПАР.

Погрешность предполагается неизменной в зависимости от измеряемой величины  $A$  и постоянной в пределах аварийной линии при ОМП по рассматриваемому показанию  $A$  ФП. Тогда чувствительность ФП

к изменению расстояния до МП на ВЛ характеризуется коэффициентом чувствительности  $g$ , который можно определить, как  $g = \frac{|A' - A''|}{L}$ ; где  $A'$  – измеряемое ФП значение ПАР при КЗ в начале ЛЭП;  $A''$  – измеряемое ФП значение ПАР при КЗ в конце ЛЭП;  $L$  – длина К”G, км. Погрешность ОМП  $\delta l$  по показанию рассматриваемого ФП при заданном переходном сопротивлении определяется из выражения  $\delta l = \frac{\delta A}{g}$ .

Программа «Поиск КЗ», реализующая описанный метод, на протяжении 5 лет используется для расчётов по ОМП службой релейной защиты и автоматики ОАО «Архэнерго». По имеющейся статистике, 65% установившихся повреждений за этот период было определено с погрешностью менее 5% от длины ВЛ, 75% - с погрешностью менее 10% от длины ВЛ.

Задача рационального размещения фиксирующих приборов на подстанциях энергосистемы рассмотрена в **Главе 4**.

Оптимизацию системы аварийных измерений, подразумевающую выбор числа фиксирующих приборов и мест их установки, целесообразно проводить по критерию стоимости (количество приборов) при минимальном ограничении вероятности успешного ОМП (надёжности). Ключевым вопросом, требующим решения для проведения такой оптимизации, становится функционал, связывающий конфигурацию измерительной системы (количество приборов и их размещение) и величину  $P$  – обеспечиваемую вероятность успешного ОМП.

Связь размещения фиксирующих приборов и множества обслуживаемых ими ЛЭП обеспечивает отношение влияния  $G$ . Данное отношение можно представить в виде прямоугольной матрицы влияния.

$$G = \begin{pmatrix} g_{1,1} & g_{1,2} & g_{1,3} & \cdots & g_{1,n} \\ g_{2,1} & g_{2,2} & g_{2,3} & \cdots & g_{2,n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ g_{m,1} & g_{m,2} & g_{m,3} & \cdots & g_{m,n} \end{pmatrix},$$

где  $g_{i,j}$  – коэффициент влияния, характеризующий статистическую достоверность ОМП  $j$ -й ЛЭП по показаниям прибора, установленного в  $i$ -м узле. Понятие коэффициентов влияния в предложенной интерпретации тождественно коэффициентам чувствительности, определённым для данных ЛЭП и узлов согласно общим принципам, изложенным выше.

Используя известные положения теории вероятности, можно записать выражение для вероятности решения задачи ОМП:  $p_i = p_m * (1 - (1 - p_{gi} * (1 - p_{np})^k) * (1 - p_{gi}^{(1)} * (p_{np})^1) * \dots * (1 - p_{gi}^{(k-2)} * (p_{np})^{k-2}))$ , где  $k$  – количество анализируемых показаний приборов;  $p_{np}$  – вероятность промаха или пропуска измерения ФП;  $p_m$  – вероятность соответствия используемой

математической модели происходящему повреждению;  $p_{gi}^{(l)}$  – вероятность нахождения расчётного МП на допустимом удалении от истинного МП при условии пропуска  $l$  показаний. Величина  $p_{gi}^{(l)}$  определяется из комбинаций всех возможных состояний, когда из  $k$  показаний  $l$  отсутствуют.

Последующий анализ заключается в поиске комбинации приборов, удовлетворяющей двум условиям: 1) вероятность успешного ОМП на любой ЛЭП должна быть не ниже заданного значения, не превышающего единицу; 2) общее количество узлов, в которых устанавливаются приборы, должно быть минимальным. Поиск такой комбинации следует производить путём перебора всех комбинаций и сравнения полученной минимальной вероятности решения задачи с заданным значением  $p_{min}$ . В главе рассмотрена модельная задача, на примере которой показано определение рационального размещения ФП для ЭС, включающей 10 узлов и 10 линий.

Применительно к системе с большим числом узлов методика может быть применена при ряде ограничений. Увеличение числа узлов приводит к резкому росту числа комбинаций, подлежащих анализу. Для обеспечения возможности расчёта на больших схемах предложено три способа, позволяющих уменьшить число анализируемых комбинаций: 1) Разделить общую задачу перебора комбинаций на  $N$  подзадач, решаемых параллельно при помощи  $N$  вычислительных систем (отдельных ЭВМ либо нескольких процессоров одной ЭВМ). 2) На каждом шаге расчёта узел, обеспечивающий достижение критерия на наибольшем числе линий исключать из последующего анализа. 3) Разделить все линии на группы и производить расчёт в пределах каждой группы с учётом тех ФП, расстановка которых была определена при анализе предыдущей группы.

В целях обеспечения возможности расчёта рационального размещения фиксирующих приборов при практической реализации метода был принят ряд допущений: 1) Измерительные устройства, размещаемые на подстанциях ЭС, обладают одинаковым классом точности. 2) На ЛЭП происходят только однофазные КЗ, как наиболее вероятный вид повреждения. 3) Для целей ОМП измеряется один вид ПАР. Схема ЭС «Архэнерго», сокращённая до 45 узлов и 55 ветвей, была подвергнута анализу с применением указанных допущений. Выбран вариант размещения (в 30 узлах из 45 устанавливаются приборы), в большей мере отвечающий условиям, характерным для исследуемой системы. Такое размещение в целом не противоречит вариантам специалистов службы релейной защиты и автоматики ЭС, разработанным для той же модели. Результат расчётов по предложенному методу был принят в качестве исходного варианта при переоснащении энергосистемы «Архэнерго» фиксирующими приборами.

**В приложении** приведены результаты расчётов по программе «Поиск КЗ» в ОАО «Архэнерго».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан новый метод ОМП ВЛ напряжением 110, 220 кВ на основе кластерного анализа расчётных расстояний, вычисляемых исходя из параметров установившегося аварийного режима, измеряемых ФП. Отличительное свойство метода – его ориентация не столько на повышение локальной точности ОМП на отдельной ВЛ, сколько на увеличение статистики удачных ОМП за определённый эксплуатационный период.

2. Метод реализован в вычислительной программе «Поиск КЗ», применяемой в качестве основного средства ОМП службы релейной защиты и автоматики ОАО «Архэнерго» с 2002 г.

3. Предложен подход к оценке качественных показателей ОМП, позволяющий учитывать не только характеристики измерительной цепи (ФП и первичных преобразователей), но и параметры энергосистемы.

4. Исследована статистика ОМП с использованием Программы «Поиск КЗ». Вероятность успешного ОМП по результатам анализа 45 случаев повреждений составила 0,65 при допустимой относительной погрешности 5% от длины ЛЭП.

5. Предложены базовые принципы рационального размещения фиксирующих приборов на подстанциях энергосистемы.

6. Проведён анализ размещения ФП на модели ЭС «Архэнерго». Результат расчётов по предложенному методу был принят в качестве исходного варианта при переоснащении энергосистемы «Архэнерго» фиксирующими приборами.

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

1. Баланцев Г.А., Надеин В.Ф. К вопросу о повышении надёжности определения мест повреждения на воздушных линиях электропередачи, Конференция молодых специалистов энергетики 2000. Сборник докладов. Издательство НЦ ЭНАС, М.: 2000 г. с. 195-196

2. Апанасов В.В. Баланцев А.Р. Баланцев Г.А. , Надеин В.Ф. О повышении надёжности определения мест повреждения на ВЛ 110-220 кВ и рациональном размещении фиксирующих приборов // Электрические станции. - 2001г. - №11. с. 41-44.

3. Баланцев Г.А. Определение мест повреждений на воздушных линиях электропередачи 110-220 кВ на основе статистического анализа показаний фиксирующих приборов // Научно-техническая конференция

«Электроснабжение, электрооборудование, энергосбережение», тезисы докладов / Издательский центр НИРХТУ, Новомосковск: 2002 г., с. 54-55.

4. Апанасов В.В., Баланцев Г.А. Определение коэффициентов влияния в задаче рационального размещения фиксирующих приборов на подстанциях энергосистемы //Оптимизация и интенсификация технологических процессов и производств. Сборник научных трудов, Архангельск: Издательство АГТУ, - 2004 - с. 27-35

5. Баланцев Г.А., Надеин В.Ф. О рациональном размещении фиксирующих приборов для целей определения мест повреждений воздушных линий электропередачи 110, 220 кВ. //Оптимизация и интенсификация технологических процессов и производств. Сборник научных трудов, Архангельск: Издательство АГТУ, 2004 - с. 35-41.

6. Баланцев Г.А. Особенности организации расчёта параметров аварийного режима энергосистемы для целей ОМП на ЭВМ // Фундаментальные исследования в технических университетах: Материалы VIII всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы 26-27 мая 2004 г., СПб:СПбГПУ, 2004 - с. 146-147.