

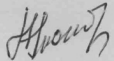
На правах рукописи

АЛЮНОВ Александр Николаевич

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПО ДАННЫМ РЕГИСТРАТОРОВ
АВАРИЙНЫХ ПРОЦЕССОВ**

Специальность 05.14.02 – Электростанции и
электроэнергетические системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Санкт-Петербург – 2004

Работа выполнена в Вологодском государственном техническом университете (ВолГТУ)

- Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Бульчен Александр Витальевич
- Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор
Смоловик Сергей Владимирович
- кандидат технических наук
Бельков Юрий Сергеевич
- Ведущая организация – филиал ОАО «СО-ЦДУ ЕЭС»
Вологодское РДУ

Защита состоится «10» в _____ 2004 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета К212.229.02 Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29) в аудитории 325 главного здания.

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

Автореферат разослан «10» декабря 2004 г.

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ
Библиотека
№: Б-155020
16 ППУ

Ученый секретарь
диссертационного совета

ИЗР

Терешкин А.В.,
канд. техн. наук, доцент

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Практические задачи анализа и синтеза электрических систем, как правило, решаются на основе эквивалентных схем замещения. При этом многие элементы электрических систем представляются идеализированными линейными моделями с сосредоточенными параметрами, в которых не учитываются взаимное влияние отдельных элементов, последствия термических, химических и механических воздействий окружающей среды, неточное изготовление и монтаж оборудования, случайные вариации параметров и другие эксплуатационные факторы. Эти факторы невозможно учесть при расчете режимов на основе существующих моделей электроэнергетических объектов.

Все это вызывает необходимость совершенствования процедур определения, проверки и корректировки параметров схем замещения электрических систем на базе современных средств обработки информации, обеспечивающих значительное расширение возможностей осуществления контроля за реальными процессами в электрических системах.

В связи с этим совершенствование методики определения параметров схем замещения электрических систем в части учета реальных условий эксплуатации является актуальной научно-технической проблемой, которая может быть решена путем использования в расчетах данных, фиксируемых регистраторами аварийных процессов. При этом, наряду с техническими способами снижения погрешности информации большой эффект может дать использование методов программного повышения точности информации, и в первую очередь, методов идентификации.

Исследования по теме диссертации выполнялись в соответствии с целевыми научно-техническими программами: «Повышение надежности, экономичности и экологичности энергетической системы России» и «Энергосбережение».

Цель работы заключается в разработке новой методики определения параметров схем замещения основных элементов электрических сетей напряжением 110-220 кВ по данным регистраторов аварийных процессов, обеспечивающей повышение достоверности определения параметров в аварийных и нормальных режимах расчетным путем.

Основные научные результаты и их новизна:

1. Разработаны новые методы идентификации параметров электрических систем по данным цифровых регистраторов аварийных процессов, обеспечивающие высокую степень адекватности математических моделей реальным электрическим системам.

2. Решена задача определения параметров схем замещения трансформаторов и автотрансформаторов с учетом влияния положения устройства регулирования под нагрузкой по результатам параметров режимов на их выводах цифровыми регистраторами.
3. Разработаны методы определения продольных сопротивлений линий электропередачи с учетом взаимовыдувки по результатам односторонних и двухсторонних измерений параметров аварийных режимов.
4. Исследованы метрологические свойства разработанных методов идентификации параметров электрических систем. Проведены натурные эксперименты, результаты которых позволили подтвердить приемлемую точность определения параметров электрических систем разработанными методами и правомерность допущений и ограничений, принятых при разработке этих методов.

Практическая ценность и реализация результатов работы:

1. Методы определения параметров электрических систем внедрены в службу релейной защиты и автоматики ОАО «Вологдаэнерго» и используются при расчете токов короткого замыкания и определении мест повреждений в электрических сетях 110-220 кВ.
2. Предлагаемые в работе методы и алгоритмы, реализованы в виде экспериментальных программ, позволяющих повысить точность определения параметров электрических систем.
3. Материалы теоретических, методических и практических разработок нашли отражение в учебно-методических работах и используются в учебном процессе, научно-исследовательских работах Вологодского государственного технического университета и в учебном центре «Энергетик» при повышении квалификации инженерно-технических работников.

Достоверность основных положений и выводов диссертации обеспечивается корректным использованием строго обоснованных методов математического моделирования исследуемых процессов, совпадением результатов, полученных путем моделирования, с результатами натурных экспериментов в действующих электрических сетях и с результатами, опубликованными в научно-технических изданиях.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на XV международной научно-технической конференции «Релейная защита и автоматика энергосистем – 2002» г. Москва, на III международной научно-практической конференции «Современные энергетические системы и комплексы и управление ими» г.Новочеркасск, на вологодской научно-технической конференции «Электроснабжение. Новые

технологии» г.Вологда, региональных межвузовских научно-технических конференциях «Вузовская наука региону» г.Вологда и на заседаниях кафедр «Электрические станции и автоматизация электрических систем» СПбГПУ и «Электроснабжение» ВоГТУ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация содержит: введение, 4 главы, заключение, список литературы и приложения. Общий объем работы – 226 страниц. Список литературы содержит 83 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования и показана структура диссертации.

Первая глава диссертационной работы посвящена анализу традиционных методов эквивалентирования электрических систем и разработке концепции построения новой методики определения параметров схем замещения электрических систем.

Изменения параметров электрической системы являются неизбежными под влиянием различных факторов. Так, например, деформации обмоток силовых трансформаторов при коротких замыканиях (КЗ), изменения в структуре сердечников трансформаторов, ошибки задания коэффициентов трансформации приводят к ощутимым (до 12 %) изменениям сопротивлений в их схемах замещения. Взаимное влияние линий электропередачи и других объектов (например, трубопроводов в земле), воздействие погодных условий, неточное задание среднегеометрического расстояния между проводами и эквивалентного радиуса приводят погрешностям в расчетах продольных активных и индуктивных сопротивлений линий электропередачи, достигающих 20 %.

Традиционно параметры схем замещения элементов электрических систем определяются на основе паспортных и справочных данных. Такие методы расчета являются достаточно точными, однако они не могут учитывать всех условий, в которых эксплуатируются объекты электрической системы. Отсутствие обратных связей между объектами и их математическими моделями не позволяет отражать изменения параметров объектов в процессе эксплуатации. Следовательно, расчеты параметров схем замещения объектов электрических систем по их паспортным данным все же не обеспечивают достаточную адекватность объектов и их моделей в реальных условиях эксплуатации.

Изменение параметров объектов в процессе эксплуатации отражается на точности результатов расчетов токов короткого замыкания, определения мест повреждений и решении других технологических задач.

Показано, что требуется уточнение параметров схем замещения основных элементов электрической системы. Проведение активных экспериментов на действующих объектах с целью уточнения их параметров не всегда возможно, так как это связано с большими экономическими затратами. Поэтому требуется разработка методов определения параметров трансформаторов, основанных на их идентификации в процессе эксплуатации.

Элементы электрической системы по составу априорной информации относятся к объектам, для которых известны уравнения состояния. В этом случае задача идентификации сводится к уточнению начальных значений параметров, входящих в уравнения. Для определения этих параметров могут использоваться данные, полученные в результате пассивных и активных экспериментов.

Новые технические средства, внедряемые в электроэнергетическую систему, позволяют решать задачу определения параметров элементов схемы замещения непосредственно из измерений параметров электрического режима в темпе формирования необходимых для этого данных. Для оценки качества идентификации параметров схем замещения элементов электрической системы предложено сопоставлять результаты расчетов токов и напряжений по математическим моделям с действительными токами и напряжениями, зафиксированными в электрических системах регистраторами.

Во второй главе рассмотрены новые аналитические решения задачи идентификации, разработаны алгоритмы идентификации параметров схем замещения силовых трансформаторов и линий электропередачи напряжением 110-220 кВ по данным регистраторов аварийных процессов, обеспечивающие высокую степень адекватности реальных электрических систем и их математических моделей.

Идентификация параметров схем замещения элементов электрических систем производится путем сопоставления расчетных и измеренных параметров режимов (рис. 1). Степень совпадения параметров режимов может быть оценена с помощью следующих выражений:

$$\left. \begin{aligned} F(\xi, R_f) &= f[P(C), P(M)] \rightarrow \min; \\ \xi &= \psi(C). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $F(\xi, R_f)$ – критерий близости параметров схемы замещения ξ модели и электрической системы; R_f – переходное сопротивление в месте повреждения; $P(C)$, $P(M)$ – функция зарегистрированных режимов (C) и соответствующих им расчетных (M) значений параметров режимов; f – функционал, обеспечивающий оптимальный поиск параметров ξ ; $\bar{\xi}$ – результат оценки параметров по массиву измерений C; $\psi(C)$ – функция, представляющая собой вектор аналитических решений задачи идентификации параметров схем замещения отдельных элементов электрической системы.

Совпадение параметров режима M, рассчитанных по программе расчета режимов (например, токов короткого замыкания) и параметров C, зафиксированных цифровым регистратором, позволяет судить о корректности заданных параметрах модели. В противном случае делается вывод о необходимости уточнения параметров схемы замещения того или иного объекта электрической системы.



Рис. 1. Структурная схема идентификации

При выделении из множества зарегистрированных параметров режимов C значений токов и напряжений и представления функционала f в виде суммы квадратов разности, критерий $F(\xi, R_f)$ принимает конкретный вид:

$$F(\xi, R_f) = \sum_j^{l-1} \sum_p^{l-1} \left(\frac{I_{j0}}{I_{jp}} - \frac{I_{pj}}{I_{pp}} \right)^2 + \sum_k^{m-1} \sum_q^{m-1} \left(\frac{U_{jk}}{U_{jq}} - \frac{U_{pk}}{U_{pq}} \right)^2, \quad (2)$$

где I_{j0}, I_{j0p} – фактические токи, зафиксированные в ветвях j и p ; I_{pj}, I_{pp} – расчетные токи этих же ветвей; l – число регистраторов, измерявших токи при коротком замыкании; U_{jk}, U_{jq} – фактические напряжения, зафиксированные в узлах k и q ; U_{pk}, U_{pq} – расчетные напряжения этих же узлов; m – число регистраторов, измерявших напряжения при коротком замыкании.

Поиск оптимальных параметров всей модели электрической системы производится на основе результатов уточнения параметров схем замещения отдельных ее элементов (линий электропередачи, силовых трансформаторов) и заключается в определении набора параметров математической модели i -го элемента системы Y_i ($Y_i \in \xi$) при измерении множества токов $I_{N,i}$ и напряжений $U_{N,i}$.

Если уравнение модели i -го элемента электрической системы можно представить в виде:

$$I_{N,i} = \varphi(U_{N,i}, Y_i, \epsilon_i), \quad (3)$$

то идентификация параметров Y_i по результатам N измерений приведет к оценкам

$$\tilde{Y}_{i,N} = \Psi(I_{N,i,0}^N, U_{N,i,0}^N), \quad (4)$$

где ϵ_i – вектор ненаблюдаемых погрешностей; $(I_{N,i,0}^N, U_{N,i,0}^N)$ – массив измерений от 0 до N ; $\tilde{Y}_{i,N}$ – оценка параметров Y_i ; Ψ – функция поиска оптимальных параметров.

Поскольку оптимальные параметры $\tilde{Y}_i \in \xi$, то множество параметров схем замещения всей модели электрической системы приближается к оптимальному состоянию.

Так, например, для определения оптимальной величины продольного сопротивления однородной линии электропередачи по данным N измерений параметров режимов коротких замыканий необходимо, чтобы имело наименьшее значение следующая функция:

$$\Phi(Z_{\text{Л}}) = \sum_{n=1}^N (\Delta U_{N,n} - I_{N,n} \cdot Z_{\text{Л}})^2 = \min,$$

где $\Delta U_{N,n}$ – разность напряжений по концам линии при n -ом измерении; $I_{N,n}$ – ток в линии при n -ом измерении.

Чтобы найти значение оценки сопротивления $\tilde{Z}_{\text{Л}}$, необходимо воспользоваться условием экстремума функции одной переменной:

$$\Phi'_{\text{Л}}(\tilde{Z}_{\text{Л}}) = 2 \sum_{n=1}^N (\Delta U_{N,n} - I_{N,n} \cdot \tilde{Z}_{\text{Л}}) \cdot I_{N,n} = 0.$$

Откуда, оптимальная, с точки зрения минимума среднеквадратичной ошибки, оценка сопротивления линии записывается в виде:

$$\tilde{Z}_{\text{Л}} = \frac{\sum_{n=1}^N \Delta U_{N,n} \cdot I_{N,n}}{\sum_{n=1}^N I_{N,n}^2}.$$

С каждым новым циклом измерений оценка сопротивления линии $\tilde{Z}_{\text{Л}}$ будет уточняться, а следовательно будет уточняться вся модель электрической системы.

Эффективное значение R_f является неизвестным, однако его нельзя не учитывать на этапе нахождения минимума F . Поэтому, минимизация функционала F производится в цикле при вариации величины R_f от 0 до реально возможного значения.

Поскольку в действующей электрической системе существуют различные ограничения, связанные со сбором информации от большого количества цифровых регистраторов, то необходимы практические методы определения параметров схем замещения отдельных элементов электрической системы по данным ограниченного количества контролируемых режимов.

Третья глава посвящена разработке практических методов идентификации параметров схем замещения трансформаторов, автотрансформаторов и линий электропередачи. Получены аналитические решения для определения сопротивлений трансформаторов и автотрансформаторов при произвольном положении устройства регулирования напряжения на основе данных цифровых регистраторов аварийных процессов.

Идентификация сопротивлений схемы замещения прямой (нулевой) последовательности двухобмоточного трансформатора, представленной в виде П-образной схемы (рис.2),

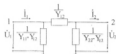


Рис. 2

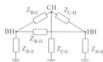


Рис. 3

по данным измерений в двух различных режимах его работы сводится к определению матрицы узловых проводимостей

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_1^{(1)} & i_1^{(2)} \\ i_2^{(1)} & i_2^{(2)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1^{(1)} & U_1^{(2)} \\ U_2^{(1)} & U_2^{(2)} \end{bmatrix}^{-1} \quad (5)$$

где i_1, i_2 – измеренные значения токов прямой (нулевой) последовательности на сторонах 1 и 2 трансформатора; шифры в скобках соответствуют номеру режима измерений.

Результатом решения матричного уравнения (5) являются оптимальные Y-параметры трансформатора, удовлетворяющие как минимум двум режимам его работы.

Идентификация параметров трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов реализуется на основе схем замещения в виде полного 3+1-полносника (рис. 3). В этом случае искомая матрица узловых проводимостей имеет вид:

$$Y = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_{B-C}} + \frac{1}{Z_{B-H}} + \frac{1}{Z_{B-0}} & -\frac{1}{Z_{B-C}} & -\frac{1}{Z_{B-H}} & -\frac{1}{Z_{B-0}} \\ -\frac{1}{Z_{B-C}} & \frac{1}{Z_{B-C}} + \frac{1}{Z_{C-H}} + \frac{1}{Z_{C-0}} & -\frac{1}{Z_{C-H}} & -\frac{1}{Z_{C-0}} \\ -\frac{1}{Z_{B-H}} & -\frac{1}{Z_{C-H}} & \frac{1}{Z_{B-H}} + \frac{1}{Z_{C-H}} + \frac{1}{Z_{H-0}} & -\frac{1}{Z_{H-0}} \end{bmatrix}$$

а поиск ее элементов осуществляется аналогично (5), причем диагональная симметричность матрицы обеспечивает достаточность данных от двух различных измеренных режимов.

Представление схем замещения силовых трансформаторов в виде многополосников позволило получить аналогичные (5) аналитические решения для идентификации параметров схем замещения автотрансформатора с вольтодобавочным трансформатором, автотрансформатора с регу-

лировочным трансформатором на стороне высокого напряжения и трансформатора с линейным регулировочным трансформатором.

Показано, что сопротивление силового трансформатора изменяется в зависимости от положения устройства регулирования под нагрузкой (РПН) в соответствии с выражением:

$$Z_{Ti} = Z_T k_i^{(n+2)} \quad (6)$$

где Z_{Ti} – сопротивление трансформатора при i -ом положении устройства РПН; Z_T – сопротивление трансформатора при среднем положении устройства РПН; k_i – относительный коэффициент трансформации; n – показатель степени зависимости изменения напряжения короткого замыкания от положения устройства РПН ($n=2+0,5$ для трансформаторов 110 кВ и выше).

В общем виде выражение для величины n можно записать так:

$$n = \frac{\ln \left(\frac{k_i^2 \cdot Z_{Tj}}{k_j^2 \cdot Z_{Ti}} \right)}{\ln \left(\frac{k_i}{k_j} \right)} \quad (7)$$

где i и j соответствуют двум различным положениям устройства РПН.

С учетом (7) формула (6) принимает вид

$$Z_{Tj} = Z_{Ti} \cdot \exp \left[n \cdot \ln \left(\frac{k_i}{k_j} \right) \right] \cdot \left(\frac{k_j}{k_i} \right)^2 \quad (8)$$

Согласно (7) и (8), известные (идентифицированные) значения сопротивлений трансформатора в двух произвольных положениях устройства РПН позволяют рассчитать сопротивление трансформатора во всех положениях устройства РПН. Формула (8) дает более точные результаты по сравнению с известными ранее аналогичными аналитическими решениями. Полученные характеристики подтверждены экспериментальными данными из литературных источников.

Исследования показали, что идентификацию параметров схем замещения линий электропередачи напряжением 110-220 кВ в зависимости от количества имеющейся информации целесообразно производить с применением методов определения места повреждения (ОМП) с использованием в расчетах дополнительного параметра – расстояния до места повреждения. В этих условиях нет необходимости учитывать емкостную поперечную проводимость ЛЭП и схема замещения линии может быть представлена продольным сопротивлением.

Учитывая возможности регистрации повреждений как на самих ЛЭП, так и за их пределами, разработаны способы определения параметров ЛЭП по данным одно- и двухсторонних измерений. Получены аналитические решения для идентификации параметров ЛЭП, имеющих взаимноиндуктивную связь с другой линией на всей или части, а также с отпаечной трансформаторной подстанцией при регистрации повреждений как на самой ЛЭП, так и за ее пределами.

Так, например, для системы ЛЭП, изображенной на рис. 4,

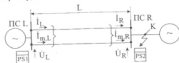


Рис. 4

сопротивление прямой последовательности Z_1 одной ЛЭП определяется по формуле

$$Z_1 = \frac{\dot{U}_{L1} - \dot{U}_{R1} \cdot a_5}{I_{L1}}, \quad (9)$$

где $\dot{U}_{L1}, \dot{U}_{R1}$ – векторы напряжений прямой последовательности, измеренных на подстанциях L и R, соответственно; I_{L1} – ток прямой последовательности, измеренный на подстанции L; a_5 – вектор, компенсирующий угол сдвига системы векторов, измеренных на подстанции L относительно подстанции R.

Сопротивления нулевой последовательности Z_0 и взаимоиндукции Z_m определяются решением системы:

$$\left. \begin{aligned} Z_0 &= \frac{\dot{U}_{LA} - \dot{U}_{RA} \cdot a_5 - \dot{I}_{LA} \cdot Z_1 + \dot{I}_{L0} \cdot Z_1 - \dot{I}_{L0m} \cdot Z_m}{\dot{I}_{L0}} \\ Z_m &= \frac{\dot{U}_{R0} \cdot a_5 - \dot{U}_{L0}}{\dot{I}_{L0}} - Z_0, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где $\dot{U}_{LA}, \dot{U}_{RA}$ – напряжение фазы A, измеренное на подстанциях L и R, соответственно; $\dot{I}_{LA}, \dot{I}_{L0}$ – ток фазы A и ток нулевой последовательности, измеренные на подстанции L; \dot{I}_{L0m} – ток нулевой последовательности в параллельной линии; $\dot{U}_{L0}, \dot{U}_{R0}$ – напряжения нулевой последовательности, измеренные на подстанциях L и R, соответственно.

Поскольку при односторонних измерениях влияние переходного сопротивления в месте повреждения на результат идентификации параметров ЛЭП неизбежно, то с достаточной степенью точности возможно определять только индуктивные параметры поврежденных ЛЭП с односторонним питанием. Показано, что при односторонних измерениях набор уточняемых параметров ЛЭП (Z_1, Z_0, Z_m) зависит от вида короткого замыкания.

В четвертой главе проведено обобщение результатов расчетных и натурных исследований предложенных методов идентификации. Исследованы характеристики тракта прохождения сигналов при регистрации через электромагнитные трансформаторы тока (ТТ) и напряжения (ТН). Проведено исследование методов идентификации по данным расчетов и экспериментов на действующих объектах электрической системы.

Поскольку статические характеристики преобразователей сигналов (ТТ, ТН, регистраторов), как правило, известны и содержатся в документации, предоставляемой изготовителями, основное внимание уделено динамическим характеристикам ТТ.

На рис. 5 и рис. 6 показаны осциллограммы переходных процессов, полученные при физическом моделировании прохождения отрезков синусоидальных сигналов через трансформаторы тока с различными нижними граничными частотами. Здесь $x(t)$ и $y(t)$ – входной и выходной, соответственно, сигналы ТТ.

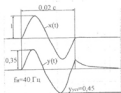


Рис. 5

Выходной сигнал ТТ $y(t)$, у которого нижняя граничная частота f_n равна 40 Гц, как видно (см. рис.5) значительно отличается от входного сигнала $x(t)$ по относительному значению амплитуды и фазы. Кроме того, видно, что сигнал на выходе ТТ при $t > \tau$ (τ – время периода) отличается от нуля. Трансформатор тока, для которого $f_n = 0,4$ Гц, преобразует входной сигнал с более высокой точностью (рис. 6). Его погрешность не превышает 5%.

В связи с тем, что результаты идентификации используются при расчетах режимов (например, коротких замыканий) электрических систем, рекомендуется подключение регистраторов аварийных процессов проводить к трансформаторам тока, предназначенным для целей релейной защиты и автоматики, а не для измерений. В этом случае идентифицируемые параметры учитывают погрешности измерений и, следовательно, расчет параметров режимов для целей релейной защиты и автоматики будет более точным. Кроме того, ТТ для релейной защиты лучше передают сигналы в переходных режимах, чем ТТ для измерений.

С целью оценки достоверности разработанных методов проведен сравнительный анализ результатов расчета режимов по идентифицированным параметрам электрических сетей и результатов расчета режимов по паспортным данным объектов. Для программного моделирования процедуры идентификации в исследованиях использовалась математическая система Mathcad, а расчеты режимов проводились с помощью программного комплекса ТКЗ-3000. Рассмотрены примеры идентификации параметров автотрансформатора на подстанции «Ростылово» АО «Вологдаэнерго» по результатам регистрации случайного однофазного короткого замыкания в сети высшего напряжения. Методы идентификации параметров линий электропередачи подтверждены результатами пасивных экспериментов на примере линий «Тотьма» и «Юбилейная» АО «Вологдаэнерго», имею-

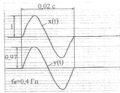


Рис. 6

щих взаимную индуктивную связь на части трассы. Замена параметров схем замещения этих объектов на вновь полученные параметры при расчетах токов короткого замыкания привело к улучшению сходимости расчетных и зарегистрированных значений на 2% по сравнению с токами, рассчитанными по паспортным данным.

Результаты сопоставления расчетных и зарегистрированных значений токов короткого замыкания подтвердили правомерность допущений, принятых при разработке методов и алгоритмов идентификации и подтвердили возможность применения методов на практике.

В приложениях приведены примеры расчетов параметров различных типов силовых трансформаторов, автотрансформаторов с учетом влияния устройств РПН и линий электропередачи различных конфигураций по измеренным в моменты коротких замыканий токам и напряжениям; оциллограммы аварийных процессов на линиях электропередачи и трансформаторах; описания и инструкции по применению вспомогательных компьютерных программ для идентификации параметров элементов электрических систем; акты внедрения научно-исследовательских работ и программных продуктов.

При работе над диссертацией автор пользовался консультациями канд. техн. наук, доцента В.А. Бабарушкина.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Осуществлена разработка новых методов идентификации параметров электрических систем по данным цифровых регистраторов аварийных процессов, обеспечивающих высокую степень адекватности реальных электрических систем и их математических моделей. Вновь разработанные методы на основе данных о предаварийных и аварийных процессах позволяют адаптировать параметры схем замещения электрических систем к реальным условиям эксплуатации, что обеспечивает повышение достоверности определения параметров в аварийных и нормальных режимах расчетным путем.
2. Решена задача определения параметров схем замещения трансформаторов и автотрансформаторов по результатам измерений токов и напряжений на их выводах цифровыми регистраторами. Предложено обеспечивать достаточность исходных данных для математических моделей объектов путем использования результатов регистрации нескольких режимов. Обоснована целесообразность представления схем замещения трансформаторов и автотрансформаторов в виде многополюсников.

- Получены аналитические решения для определения сопротивлений трансформаторов и автотрансформаторов при произвольном положении устройства регулирования напряжения на основе данных цифровых регистраторов аварийных процессов. Проведен анализ погрешностей. Показано, что для достижения наиболее высокой точности определения сопротивлений в предложенном аналитическом виде при произвольном положении регуляторов необходимо использовать результаты предварительной идентификации параметров трансформаторов, соответствующих среднему и крайним положениям регуляторов напряжения.
- Разработаны методы определения продольных сопротивлений линий электропередачи с учетом взаимовлияния по результатам односторонних и двухсторонних измерений параметров аварийных режимов. Предложено, с целью повышения точности определения сопротивления линий, дополнительно использовать точные координаты мест повреждения.
 - Исследованы метрологические свойства разработанных методов идентификации параметров электрических систем. Проведен анализ погрешностей тракта регистрации сигналов и даны рекомендации по повышению точности работы этого тракта при регистрации токов короткого замыкания. Предложено регистраторы аварийных процессов подключать к трансформаторам тока для релейной защиты, имеющим лучшие метрологические характеристики в динамических режимах работы, чем трансформаторы тока для измерений. Проведены натурные эксперименты, результаты которых позволили подтвердить приемлемую точность определения параметров электрических систем разработанными методами и правомерность допущений и ограничений, принятых при разработке этих методов.
 - Разработанные методы определения параметров электрических систем внедрены и используются в службе релейной защиты и автоматики ОАО «Вологодэнерго» при расчете токов короткого замыкания и определении мест повреждений в электрических сетях. Материалы теоретических, методических и практических разработок нашли отражение в учебных пособиях и используются в учебном процессе и научно-исследовательских работах Вологодского государственного технического университета и в учебном центре «Энергетик» при повышении квалификации инженерно-технических работников ОАО «Вологодэнерго».

- Алонов, А. Н. Уточнение параметров модели электрической сети по данным регистраторов аварийных процессов / А.Н. Алонов, В.А. Бабарушкин, А.В. Булычев // Вузовская наука - региону: Материалы III региональной межвузовской научно-технической конференции. - Вологда: ВоГТУ, 2002. - С.96-97.
- Алонов, А. Н. База данных о повреждениях линий электропередачи / А.Н. Алонов, В.Н. Чернышев // Вузовская наука - региону: Материалы III региональной межвузовской научно-технической конференции. - Вологда: ВоГТУ, 2002. - С.99-100.
- Алонов, А. Н. Определение параметров электрических сетей по оциллограммам аварийных процессов / А.Н. Алонов, А.В. Булычев // Молодые исследователи - региону: Материалы межрегиональной научной конференции студентов и аспирантов - Вологда, 2002. - С.336.
- Алонов, А. Н. Уточнение параметров модели электрической сети по данным регистраторов аварийных режимов / А.Н. Алонов, В.А. Бабарушкин, А.В. Булычев // Релейная защита и автоматика энергосистем 2002: Материалы XV научно-технической конференции. - Москва, 2002. - С.98-99.
- Алонов, А. Н. Коррекция параметров модели электрической сети на основе данных эксплуатации энергетических объектов / А.Н. Алонов, В.А. Бабарушкин, А.В. Булычев // Электроснабжение. Новые технологии: Доклады межвузовской электронной научно-технической конференции. - Вологда: ВоГТУ, 2002. - С.26-27.
- Алонов, А. Н. Проблемы определения места повреждения на линиях электропередачи и пути их решения // Электроснабжение. Новые технологии: Доклады межвузовской электронной научно-технической конференции. - Вологда: ВоГТУ, 2002. - С.30-31.
- Алонов, А. Н. Определение параметров воздушных линий электропередачи на основе данных односторонних измерений токов короткого замыкания / А.Н. Алонов, В.А. Бабарушкин, А.В. Булычев // Электроснабжение. Новые технологии: Доклады межвузовской электронной научно-технической конференции. - Вологда: ВоГТУ, 2002. - С.32-33.
- Алонов, А. Н. Диагностика силовых трансформаторов / А.Н. Алонов, В.А. Бабарушкин, А.В. Булычев // Вузовская наука - региону: Материалы IV региональной межвузовской научно-технической конференции. - Вологда: ВоГТУ, 2003.

9. Алюнов, А. Н. Идентификация параметров схем замещения силовых трансформаторов / А.Н. Алюнов, В.А. Бабарушкин, А.В. Булычев // Современные энергетические системы и комплексы и управление ими: Материалы III Международной научно-практической конференции. Ч.2. - Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2003. – С.51-55.
10. Алюнов, А.Н. Прохождение сигналов релейной защиты через электромагнитные трансформаторы тока / А.Н. Алюнов, А.В. Булычев, В.А. Гуляев // Электричество – 2004. – №7 С.29-33.
11. Патент РФ № 2237254. МКИ G01R31/02, H02H7/04. Способ диагностики силовых трансформаторов / А. Н. Алюнов, В.А. Бабарушкин, А.В. Булычев, В.А. Гуляев. Опубл. В БИ, 2004, №27.

Подписано в печать 22.10.2004
Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,0.
Тираж 100 экз. Заказ N 406.

Отпечатано: РИО ВоГТУ, г. Вологда,
ул. Ленина, 15