

ЛИФШИЦ Андрей Семенович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ  
ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ  
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Специальность 05.14.02 -

«Электростанции и электроэнергетические системы»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иваново 2008

Работа выполнена на кафедре «Автоматическое управление электроэнергетическими системами» ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор **Шуин Владимир Александрович**

**Официальные оппоненты:**

Доктор технических наук, профессор **Назарычев Александр Николаевич**

Кандидат технических наук, доцент **Серов Вячеслав Ананьевич**

**Ведущая организация:** Магистральные электрические сети Центра – филиал ОАО «ФСК ЕЭС» (МЭС Центра)

Защита состоится « 11 » апреля 2008 г. в « 11 » часов на заседании диссертационного Совета Д 212.064.01 при Ивановском государственном энергетическом университете (ИГЭУ) по адресу: г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, ИГЭУ, корпус «Б», аудитория Б-237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью организации) просим высылать по адресу: **153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, ИГЭУ, Ученый совет.**

**Тел. (4932) 38-57-12, факс (4932) 38-57-01.**

**E-mail: uch\_sovet@ispu.ru.**

Автореферат разослан « 07 » марта 2007 г.

Ученый секретарь  
диссертационного Совета Д 212.064.01,  
доктор технических наук, профессор

**А.В. Мошкарин**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** На функционирование многих устройств релейной защиты (УРЗ) существенное влияние оказывают электромагнитные переходные процессы (ЭМПП), возникающие при коротких замыканиях (КЗ) и коммутациях в электроэнергетических системах (ЭЭС). К ним относятся, прежде всего, УРЗ линий электропередачи (ЛЭП) сверхвысокого и ультравысокого напряжения, мощных генераторов, трансформаторов и автотрансформаторов, систем электроснабжения предприятий ряда отраслей промышленности, к быстрдействию которых предъявляются жесткие требования.

Рост мощности и сложности ЭЭС, отдельных электроэнергетических объектов (ЭЭО) и единичных агрегатов, повышение чувствительности современных промышленных технологий к кратковременным нарушениям электроснабжения (КНЭ) обуславливают постоянное повышение требований к быстрдействию УРЗ.

Большинство УРЗ основано на использовании электрических величин промышленной частоты. Для таких УРЗ свободные составляющие токов и напряжений ЭМПП представляют собой помехи, вызывающие погрешности функционирования их измерительных органов (ИО). Устойчивость функционирования быстрдействующих УРЗ подобного типа в условиях влияния ЭМПП должна обеспечиваться выбором оптимальных принципов и алгоритмов распознавания вида и места повреждения, а также характеристик и параметров срабатывания ИО. В технике РЗ получают также все большее применение устройства, реагирующие непосредственно на электрические величины ЭМПП. В УРЗ этого типа свободные составляющие токов и напряжений переходных процессов являются уже не помехами, а сигналами, несущими информацию о виде и месте повреждения. Поэтому разработка и совершенствование методов и средств исследования ЭМПП в ЭЭС и динамических режимов функционирования УРЗ являются актуальной проблемой.

Разработкам методов расчета ЭМПП для решения задач повышения технического совершенства релейной защиты и исследованиям влияния ЭМПП на функционирование УРЗ посвящено множество работ. Большой вклад в исследование и разработку методов и средств анализа ЭМПП в ЭЭС и ЭЭО внесли российские ученые (Левинштейн М.Л., Лосев С.Б., Чернин А.Б., Евдокунин Г.А., Подгорный Э.В. и др.). Исследованию динамических режимов функционирования ИО РЗ в условиях ЭМПП, прежде всего, дистанционных, а также в разработке УРЗ, основанных на использовании электрических величин переходных процессов для построения быстрдействующих ИО РЗ посвящены работы Шнеерсона Э.М., Любарского Д.Р., Подгорного Э.В., Засыпкина А.С., Лямеца Ю.Я., Попова И.Н., Лачугина В.Ф., Шуина В.А.

Для исследования динамических режимов функционирования УРЗ, как правило, применяется имитационное моделирование на ЭВМ. Такой подход эффективен для УРЗ на электромеханической и микроэлектронной элементной базе. Созданию систем моделирования ЭМПП в целях моделирования УРЗ и комплексного моделирования системы «ЭЭО – УРЗ», в частности, были посвящены выполненные в 90-е годы в ИГЭУ работы (Мурзин А.Ю.<sup>\*</sup>, Фролова О.В.). В настоящее время в технике РЗ все большее применение получают устройства на микропроцессорной базе. Возможности математического моделирования на ЭВМ динамических режимов их функционирования ограничены, в частности, трудностями, а часто отсутствием возможности построения математических моделей функций РЗ современных микропроцессорных терминалов, алгоритмы функционирования которых являются коммерческой тайной фирм-разработчиков. В таких случаях более эффективным способом анализа динамических режимов функционирования УРЗ представляется физико-математическое имитационное моделирование, при котором электрические величины ЭМПП, полученные методами математического моделирования на ЭВМ, посредством согласующего программно-технического комплекса подаются на входы исследуемого устройства. В качестве такого программно-технического комплекса, в частности, может быть использована компьютерная система наладки и испытаний УРЗ «Реле-томограф», выпускаемая НПП «Динамика».

**Цели и задачи работы.** Целью работы является развитие и совершенствование методов и программных средств математического моделирования электромагнитных переходных процессов в электроэнергетических системах и физико-математического моделирования динамических режимов функционирования системы «электроэнергетический объект – устройство релейной защиты».

**Задачи исследований.** В работе решаются следующие основные задачи:

- обоснование структуры и принципов построения объектно-ориентированной системы моделирования ЭМПП в ЭЭС для решения задач разработки и проектирования УРЗ;
- совершенствование и развитие математических моделей и алгоритмов имитационного моделирования на ЭВМ ЭМПП в ЭЭС;
- разработка математического и программного обеспечения системы автоматизированного моделирования ЭМПП в ЭЭС;
- разработка инструментальной объектно-ориентированной подсистемы машинной графики системы автоматизированного моделирования ЭМПП в ЭЭС;
- разработка методики и исследование возможностей физико-математического моделирования динамических режимов функциониро-

<sup>\*</sup> Автор выражает благодарность к.т.н., доценту Мурзину А.Ю. за научные консультации при выполнении глав данной работы, посвященных разработке системы моделирования ЭМПП в ЭЭС.

вания УРЗ с применением разработанной системы моделирования ЭМПП в ЭЭС на ЭВМ и «Реле-томографа»;

- разработка библиотеки сигналов для исследования динамических режимов функционирования сложных устройств релейной защиты.

**Научная новизна и значимость полученных результатов работы,** по мнению автора, заключается в следующих основных положениях:

- разработаны принципы построения и структура объектно-ориентированной системы, обеспечивающей возможности математического моделирования ЭМПП в ЭЭС и физико-математического моделирования динамических режимов функционирования устройств релейной защиты с применением «Реле-Томографа»;

- разработаны дискретные математические модели всех основных элементов ЭЭС в фазных составляющих, обеспечивающие повышение эффективности (быстродействия и устойчивости) моделирования ЭМПП;

- с применением системы моделирования ЭМПП в ЭЭС и «Реле-томографа» разработана библиотека типовых испытательных сигналов в международном формате «COMTRADE», обеспечивающая возможность экспериментальных проверок и исследований динамических режимов функционирования сложных УРЗ.

**Практическая ценность работы:**

- разработанная система автоматизированного моделирования ЭМПП в ЭЭС и методика физико-математического моделирования комплексной системы «ЭЭС – УРЗ» могут быть использованы в научно-исследовательских и проектных институтах, вузах и других организациях для решения задач, возникающих при анализе и синтезе УРЗ, а также других задач, связанных с исследованием нестационарных режимов ЭЭС;

- на базе разработанного комплекса программных средств могут быть созданы компьютерные тренажеры и автоматизированные обучающие системы для повышения качества подготовки специалистов в области автоматического управления ЭЭС;

- разработанная графическая подсистема обработки, анализа и вывода осциллограмм применяется в составе SCADA-системы «АТЛАНТ» (ОАО «Ивэлектроналадка», г. Иваново), где выполняет функции анализа полученных в действующих электроустановках осциллограмм электрических величин аварийных и аномальных режимов работы ЭЭС на объектах ОАО «ФСК ЕЭС» и АК «Транснефть».

**Автор защищает:**

- программный комплекс имитационного моделирования на ЭВМ ЭМПП в ЭЭС для решения задач разработки и проектирования;

- дискретные математические модели основных элементов ЭЭС для моделирования ЭМПП;

– инструментальную объектно-ориентированную подсистему машинной графики системы автоматизированного моделирования ЭМПП в ЭЭС;

– методику и результаты исследования возможностей физико-математического моделирования динамических режимов функционирования УРЗ с применением системы моделирования ЭМПП в ЭЭС на ЭВМ и «Реле-томографа».

**Апробация работы.** Основные положения диссертации были доложены и обсуждены на следующих конференциях:

- X международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. – Москва МЭИ, 2004 г.

- XI международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. – Москва МЭИ, 2005 г.

- XIII международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. – Москва МЭИ, 2007 г.

- XVII научно-технической конференции «Релейная защита и автоматика энергосистем – 2006». – Москва, ВВЦ, 2006 г.

- Региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов. – Иваново, ГОУ ВПО Ивановский гос. энерг. ун-т, 2006 г.

- Региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов. – Иваново, ГОУ ВПО Ивановский гос. энерг. ун-т, 2007 г.

**Публикации.** Основные результаты и положения диссертации опубликованы в 12 печатных работах, включая 6 статей и 6 тезисов докладов конференций.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка из 101 наименования и 2 приложений. Основной материал изложен на 157 страницах машинописного текста. Работа включает также 52 иллюстрации и 14 таблиц. Общий объем работы составляет 184 страницы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, положения научной новизны и практической значимости результатов работы, описана структура диссертации в целом.

**В первой главе** проведен анализ существующих имитационных систем, обеспечивающих возможность моделирования на ЭВМ ЭМПП в ЭЭС. Проанализированы основные недостатки универсальных систем

моделирования, предназначенных для решения широкого круга задач исследования динамических режимов функционирования сложных технических систем, включая ЭЭС, не позволяющие применять их в целях решения задач повышения технического совершенства УРЗ. Более подробно рассмотрен математический пакет моделирования Simulink комплекса программных средств MATLAB, включающий в себя библиотеку SimPowerSystems, содержащую готовые модели основных элементов ЭЭС.

Сформулированы требования к системе моделирования ЭМПП в ЭЭС для решения задач разработки и проектирования релейной защиты, основными из которых являются следующие:

- система моделирования должна обеспечивать возможность расчета ЭМПП в ЭЭС произвольной сложности и конфигурации;

- система моделирования должна быть основана на использовании концепции структурного моделирования, реализующей блочный принцип построения имитационных моделей исследуемых ЭЭО и ЭЭС из готовых блоков – структурных (схемных) моделей базовых компонентов;

- система моделирования должна включать в себя модели всех основных элементов ЭЭС, обеспечивая возможность расширения набора моделей исследуемых объектов;

- система моделирования должна обладать современным графическим интерфейсом ввода исходных данных и анализа результатов вычислительных экспериментов, обеспечивающим высокую степень иллюстративности, наиболее удобный и быстрый способ формирования схемной модели исследуемого ЭЭО и ее максимально наглядное представление;

- система моделирования должна обладать высоким быстродействием при проведении вычислительных экспериментов;

- интеграция программных средств в системе моделирования должна обеспечивать формирование и редактирование моделей исследуемых объектов, задание и перезадание режимов вычислительного эксперимента, вывод результатов моделирования в форме графиков, предоставление средств обработки и анализа этих результатов, обслуживание базы данных моделей и макромоделей базовых элементов и объектов, автоматизацию обработки результатов вычислительного эксперимента и т.п.

Рассмотрены два подхода к решению задачи формализации формирования общей математической модели исследуемого ЭЭО для построения системы имитационного моделирования ЭМПП в ЭЭС, основанные соответственно на использовании методов непрерывно-дискретного и дискретного представления математических моделей ЭЭО. Анализ опыта разработки и применения разработанных систем для моделирования ЭМПП в ЭЭС, а также работ по созданию современных моделирующих комплексов и программ, применяемых в близких к электротехнике областях, показал, что при создании системы имитационного моделирования, предназначенной для анализа ЭМПП в ЭЭС, предпочтительнее ис-

пользование подхода, базирующегося на дискретном методе моделирования электрических и электронных цепей.

Проанализированы недостатки реализованной в 90-е годы в ИГЭУ системы имитационного моделирования, базирующейся на дискретном представлении математических моделей ЭЭО. Определены направления развития данной системы, основными из которых являются следующие:

- создание полного набора моделей базисных элементов ЭЭС и внесение их в банк моделей системы моделирования;
- создание развитой интуитивно-понятной графической подсистемы ввода исходных данных, включающей электронные справочники по электроэнергетическому оборудованию;
- создание средств обработки и анализа результатов вычислительных экспериментов;
- программная организация физико-математического моделирования комплексной системы «ЭЭО – УРЗ» с применением системы моделирования ЭМПП в ЭЭС и «Реле-томографа».

Разработана модифицированная структура комплекса программных средств моделирования динамических режимов функционирования ЭЭС (рис. 1).

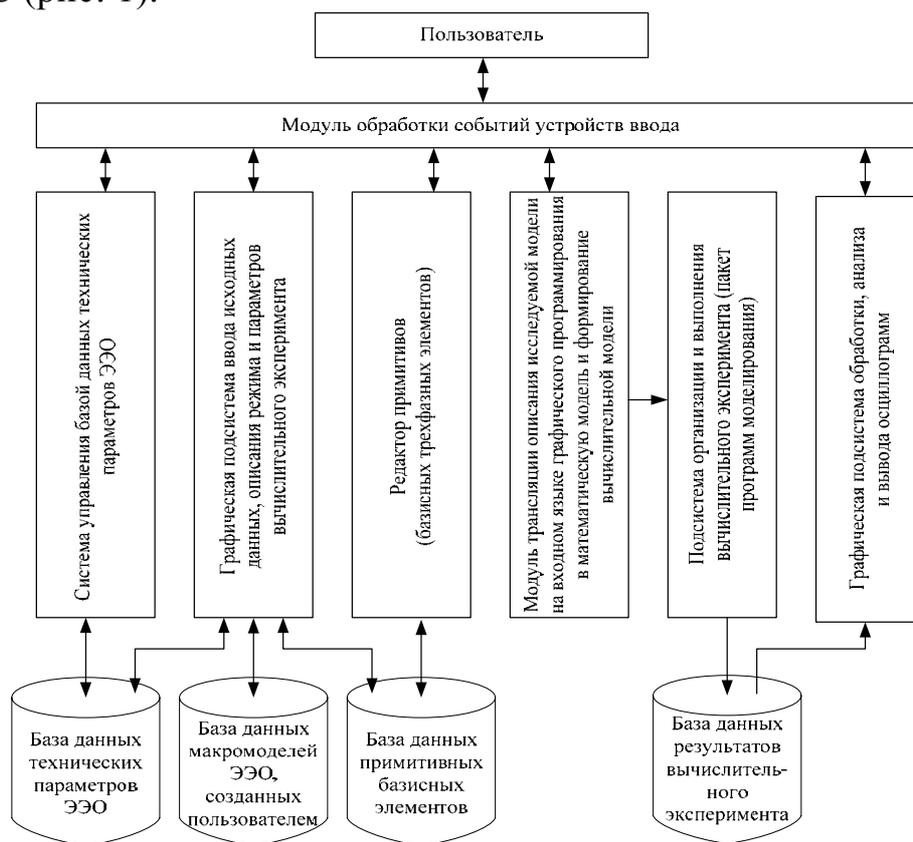


Рис. 1. Структура разрабатываемой системы моделирования ЭМПП в ЭЭС для решения задач разработки и проектирования УРЗ

**Вторая глава** посвящена разработке моделей и алгоритмов дискретного моделирования ЭМПП в ЭЭС.

Синтез дискретных схемных моделей типовых блоков и элементов ЭЭС при использовании предложенного подхода осуществляется с применением методики, базирующейся на следующих основных положениях:

- формировании исходной системы алгебро-дифференциальных уравнений (САДУ), описывающей переходные процессы в рассматриваемом элементе (при этом приведение СДУ к нормальной форме Коши не требуется);

- интегрировании полученной САДУ с использованием принятых неявных методов численного интегрирования, а именно жестко устойчивых неявных методов Гира 1 – 4-го порядка;

- решении полученной алгебраизованной системы уравнений относительно входных и выходных токов для момента времени  $t^{(n+1)}$  и приведении ее к форме

$$[I_p]^{(n+1)} = [J_p] + [G_p] \cdot [U_p]^{(n+1)}, \quad (1)$$

где  $[I_p]$ ,  $[J_p]$ ,  $[U_p]$ ,  $[G_p]$  – соответственно расширенные векторы токов, источников тока, напряжений и расширенная матрица проводимостей;

- получении схемного дискретного эквивалента (если это необходимо) моделируемого элемента по алгебраизованной системе уравнений с использованием метода синтеза схемы замещения по матрице проводимостей  $[G_p]$  и вектору источников токов  $[J_p]$ .

Общая вычислительная модель представляет собой алгебраизованную систему уравнений вида

$$[A_p] * [X_p] = [B_p], \quad (2)$$

где  $[A_p]$  – расширенная матрица узловых проводимостей;  $[X_p]$  – расширенный вектор узловых напряжений и токов в идеальных элементах;  $[B_p]$  – расширенный вектор источников.

Система вида (2) формируется поблочно из математических моделей базисных элементов схемы, с учетом ее топологии, с помощью модифицированного метода узловых потенциалов. Расчет переходного процесса при использовании метода дискретного моделирования сводится к решению системы уравнений (2) на каждом шаге интегрирования. Данная система, как правило, характеризуется высокой разреженностью и плохой обусловленностью. Поэтому в качестве метода численного решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) выбран метод LU-разложения.

Для обеспечения наибольшего быстродействия вычислений в процессе решения автоматически изменяется не только шаг интегрирования, но и порядок метода интегрирования. Поэтому параметры математических моделей базисных элементов определены для каждого из используемых методов интегрирования (неявных методов Гира 1 – 4 порядка).

На рис. 2 приведена модифицированная классификация базисного набора элементов системы имитационного моделирования для решения задач разработки и проектирования РЗ. Принятый набор элементов обеспечивает возможность создания расчетных схем и моделирования динамических режимов функционирования широкого класса ЭЭО.

Модели элементов ЭЭС, приведенные на рис. 2 на сером фоне, приведены в работах Мурзина А.Ю. Остальные модели разработаны автором в рамках данной работы. В диссертации разработаны математические модели коммутационных элементов (выключателя, ключа КЗ, ключа, имитирующего однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) в электрических сетях, работающих с изолированной нейтралью или с компенсацией емкостных токов), трансформаторов (двухобмоточных со схемами соединения обмоток  $Y/\Delta$ ,  $\Delta/\Delta$ , двухобмоточного автотрансформатора со схемой соединения обмоток  $Yo/Yo$ ), синхронного генератора.

В качестве примера, иллюстрирующего методику получения дискретной модели в фазных составляющих, можно привести модель синхронного генератора, описываемого следующей системой уравнений в  $d, q, 0$  координатах:

$$\left( \begin{array}{l} -u_d = \frac{d\psi_d}{dt} - \psi_q \cdot (1-s) \cdot \omega_s + r \cdot i_d; \\ -u_q = \frac{d\psi_q}{dt} + \psi_d \cdot (1-s) \cdot \omega_s + r \cdot i_q; \\ u_n - u_0 = L_0 \cdot \frac{di_0}{dt} + r_0 \cdot i_0; \\ u_0 - u_n = \frac{L_0}{3} \cdot \frac{di_n}{dt} + \frac{r_0}{3} \cdot i_n; \\ u_f = \frac{d\psi_f}{dt} + r_f \cdot i_f; \\ 0 = \frac{d\psi_{\Delta d}}{dt} + r_{\Delta d} \cdot i_{\Delta d}; \\ 0 = \frac{d\psi_{\Delta q}}{dt} + r_{\Delta q} \cdot i_{\Delta q}; \\ M_{об} - M_{мп} = \frac{3}{2} \cdot p_n \cdot (\psi_q \cdot i_d - \psi_d \cdot i_q) - J \cdot \Omega_s \cdot \frac{ds}{dt}; \\ \frac{d\gamma}{dt} = (1-s) \cdot \omega_s; \\ \omega_s = p_n \cdot \Omega_s, \end{array} \right. \quad (3)$$

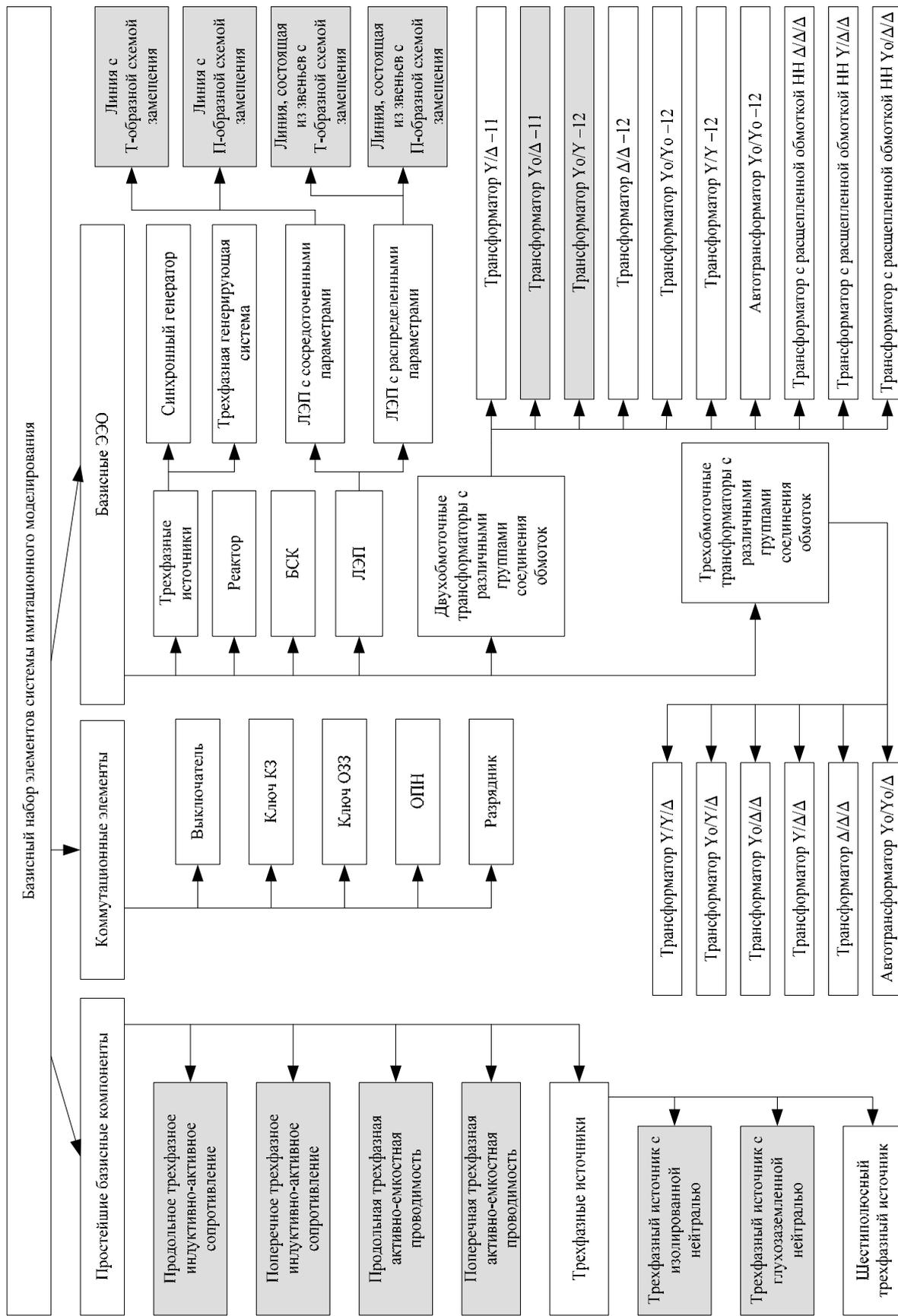


Рис. 2. Базисный набор элементов системы моделирования ЭМПП в ЭЭС

где  $u_f, i_f, r_f$  и  $\psi_f$  – напряжение, ток, активное сопротивление и потокосцепление контура возбуждения соответственно;  $i_{\varepsilon d}, r_{\varepsilon d}$  и  $\psi_{\varepsilon d}$  – ток, активное сопротивление и потокосцепление продольного эквивалентного демпферного контура генератора;  $i_{\varepsilon q}, r_{\varepsilon q}$  и  $\psi_{\varepsilon q}$  – ток, активное сопротивление и потокосцепление поперечного эквивалентного демпферного контура машины;  $M_{дв}$  – движущий момент;  $M_{тр}$  – момент трения;  $M_{эм}$  – электромагнитный момент;  $J$  – момент инерции вращающихся частей;  $\Omega_s$  – угловая частота вращения ротора;  $u_d, u_q$  и  $u_0$  – напряжения по поперечной, продольной осям и нулевой последовательности соответственно;  $\psi_d, \psi_q$  и  $\psi_0$  – потокосцепления в  $d, q, 0$  координатах;  $\omega_s$  – синхронная электрическая угловая частота;  $\gamma$  – угол, отсчитываемый в направлении вращения ротора от оси обмотки фазы  $a$  до продольной оси ротора;  $p_n$  – число пар полюсов ротора;  $u_n$  – напряжение нейтрали;  $i_0, r_0$  и  $L_0$  – ток, активное сопротивление и индуктивность нулевой последовательности.

Первым семи уравнениям системы соответствует схема замещения, приведенная на рис. 3.

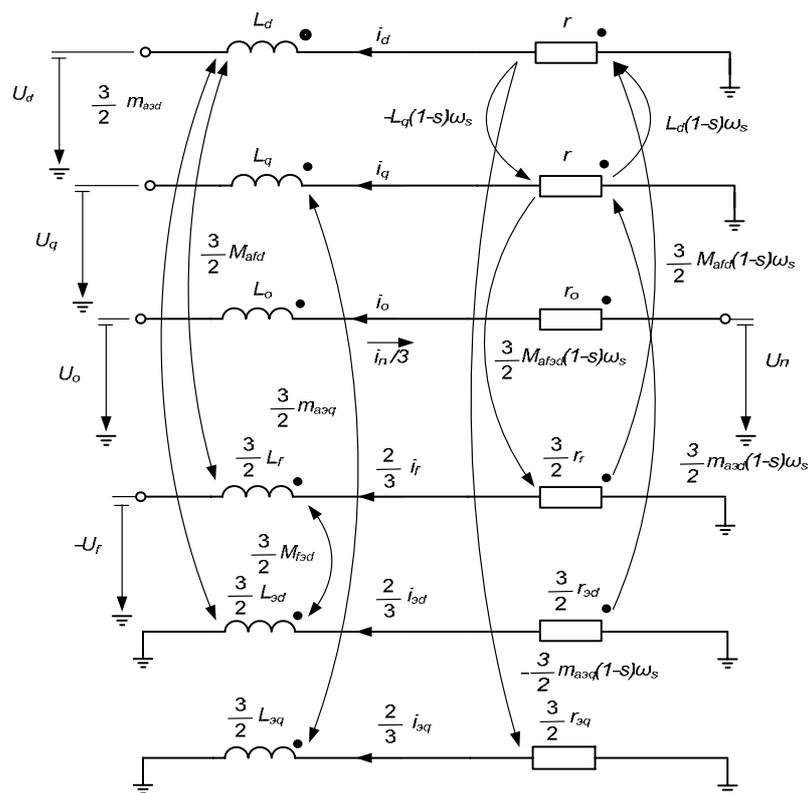


Рис. 3. Схема замещения синхронного генератора в  $d, q, 0$  координатах

После интегрирования системы (3) численными методами и переходом от  $d, q, 0$  к фазным координатам, дискретный схемный эквивалент синхронного генератора будет иметь вид, представленный на рис. 4.

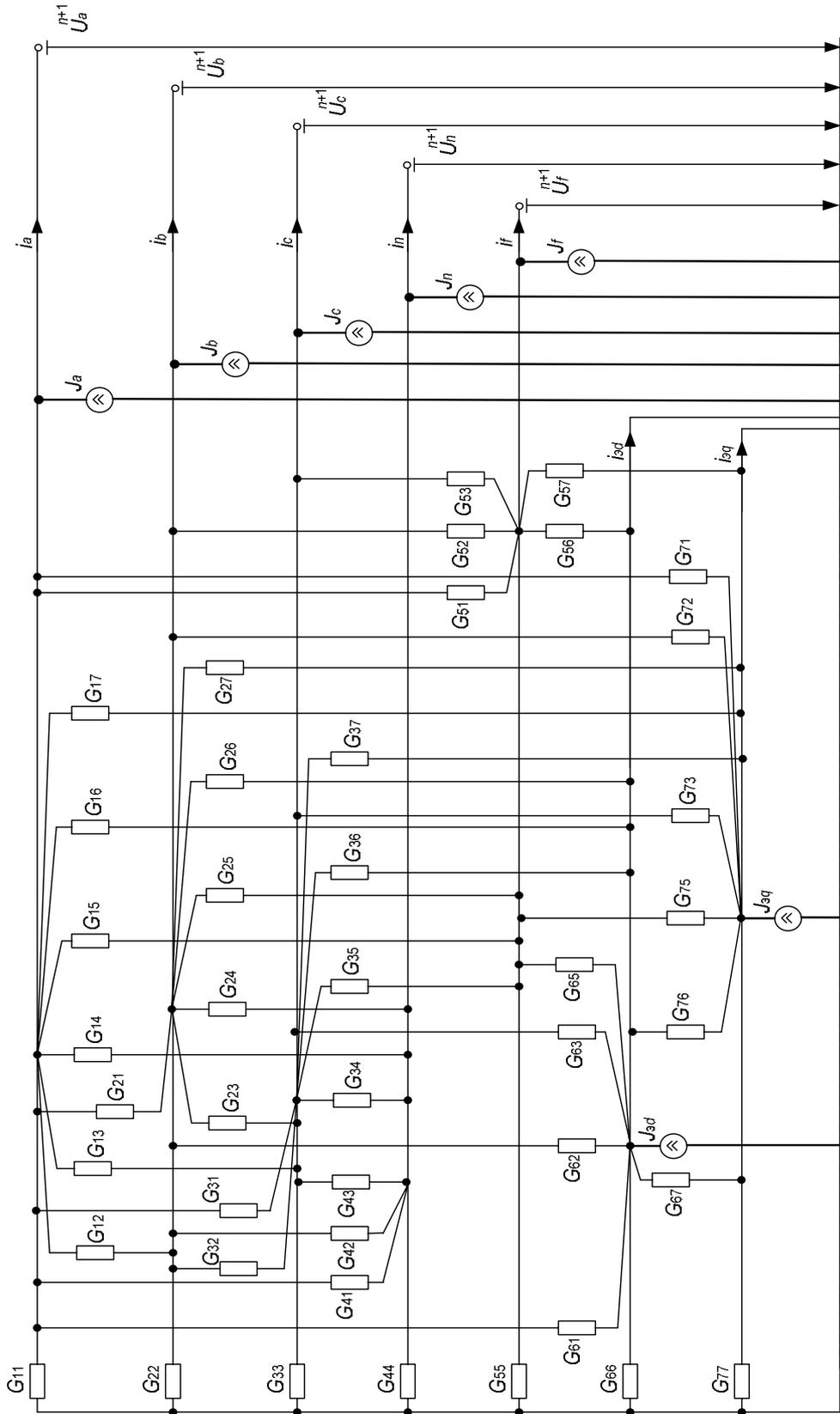


Рис. 4. Дискретный схемный эквивалент синхронного генератора в фазных координатах

Разработаны алгоритмы формирования вычислительной модели и выполнения вычислительного эксперимента. Блок-схема алгоритма выполнения вычислительного эксперимента представлена на рис. 5.



Рис. 5. Блок-схема алгоритма выполнения вычислительного эксперимента

**Третья глава** посвящена разработке инструментальной объектно-ориентированной подсистемы машинной графики для имитационного моделирования ЭМПП в ЭЭС. Процессы автоматизированного моделирования в различных областях техники, и в частности, в электроэнерге-

тике, в большой степени связаны с созданием и модификациями моделей исследуемых объектов. При описании пользователями моделей большинства исследуемых технических объектов значительная доля информации представляется в форме графических образов, а также их параметрами и характеристиками и т.п. Формирование данных, их поиск, хранение и модификация, организация представления этих данных на графических устройствах (мониторах, плоттерах и др.), а также решение других многочисленных задач обработки графической информации выполняется в настоящее время инструментальными системами машинной графики (графическими интерфейсами). Эффективное решение задач моделирования ЭМПП в ЭЭС с использованием ЭВМ также предполагает наличие в системе моделирования интерактивного инструментария, который бы позволял пользователю – специалисту-электроэнергетику конструировать с определенной степенью простоты и наглядности исследуемые схемы ЭЭС и ЭЭО любой сложности, а также проводить анализ полученных результатов в понятных ему терминах и образах.

Разработан язык графического программирования подсистемы ввода схемных моделей исследуемых ЭЭО, главное окно которой представлено на рис. 6.

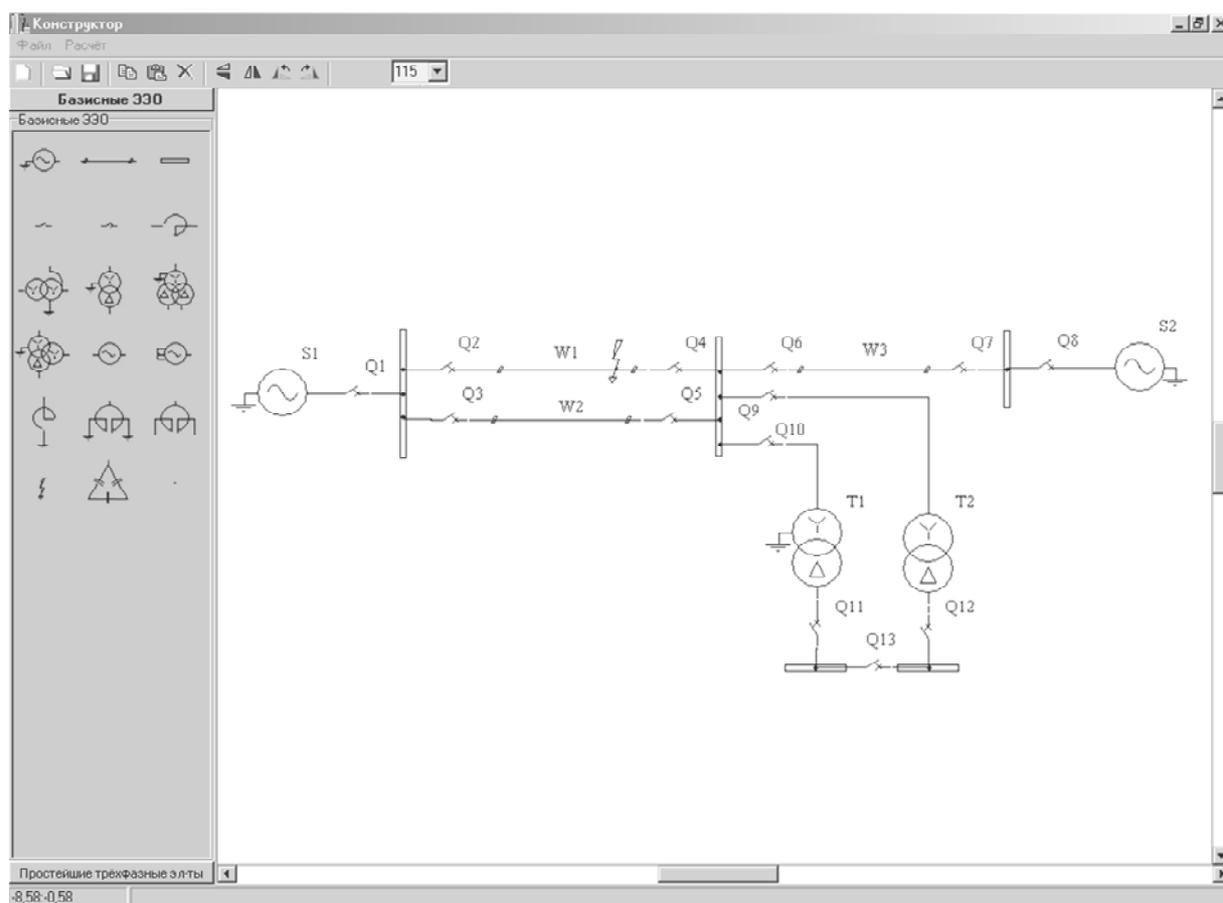


Рис. 6. Главное окно подсистемы ввода исходных данных системы моделирования

Разработан графический редактор базового набора компонентов, предназначенный для создания и редактирования графических образов элементов ЭЭС и структуры их параметров, используемых в языке графического программирования системы моделирования.

Приведены алгоритмы функционирования разработанной системы управления базой технических данных электроэнергетического оборудования, предназначенной для обеспечения возможности ввода параметров ЭЭС в соответствии с его техническими данными, хранящимися в электронном справочнике и сформированными в соответствии с материалами справочников на электротехническое оборудование. Основное окно системы управления базой данных в режиме редактирования представлено на рис. 7.

Устройства	Тип	Sном, кВА	Uвн	Uнн	Pх,Вт	Pк,Вт
1	ТС3-160/10	160	6	0,23	700	2700
2	ТС3-250/10	250	6	0,23	1000	3800
3	ТС3-250/15	250	13,8	0,4	1100	4400
4	ТС3-400/10	400	6	0,23	1300	5400
5	ТС3А-400/10-82УХЛ3	400	6	0,23	1300	5400

Рис. 7. Основное окно системы управления базой технических данных

Сформулированы задачи, которые должна решать графическая подсистема обработки, анализа и вывода осциллограмм, содержащих результаты расчета, а именно:

- представление результатов расчета в виде графических зависимостей электрических величин (токов и напряжений) в функции времени;
- формирование и построение векторных диаграмм фазных токов и напряжений промышленной частоты в функции времени;
- расчет действующих значений электрических величин для любого момента времени;
- формирование и графическое представление электрических величин;
- разложение контролируемых сигналов в ряд Фурье с выделением гармонических составляющих и организация вывода полученных в результате разложения зависимостей на экран;

- организация базы данных исследуемых электрических величин с сохранением информации в международном формате «COMTRADE»;
- организация вывода на печать результатов расчета и анализа в виде графиков и векторных диаграмм.

Изложены принципы построения и алгоритмы функционирования разработанной подсистемы. Главная блок-схема разработанной подсистемы обработки, анализа и вывода осциллограмм представлена на рис. 8.

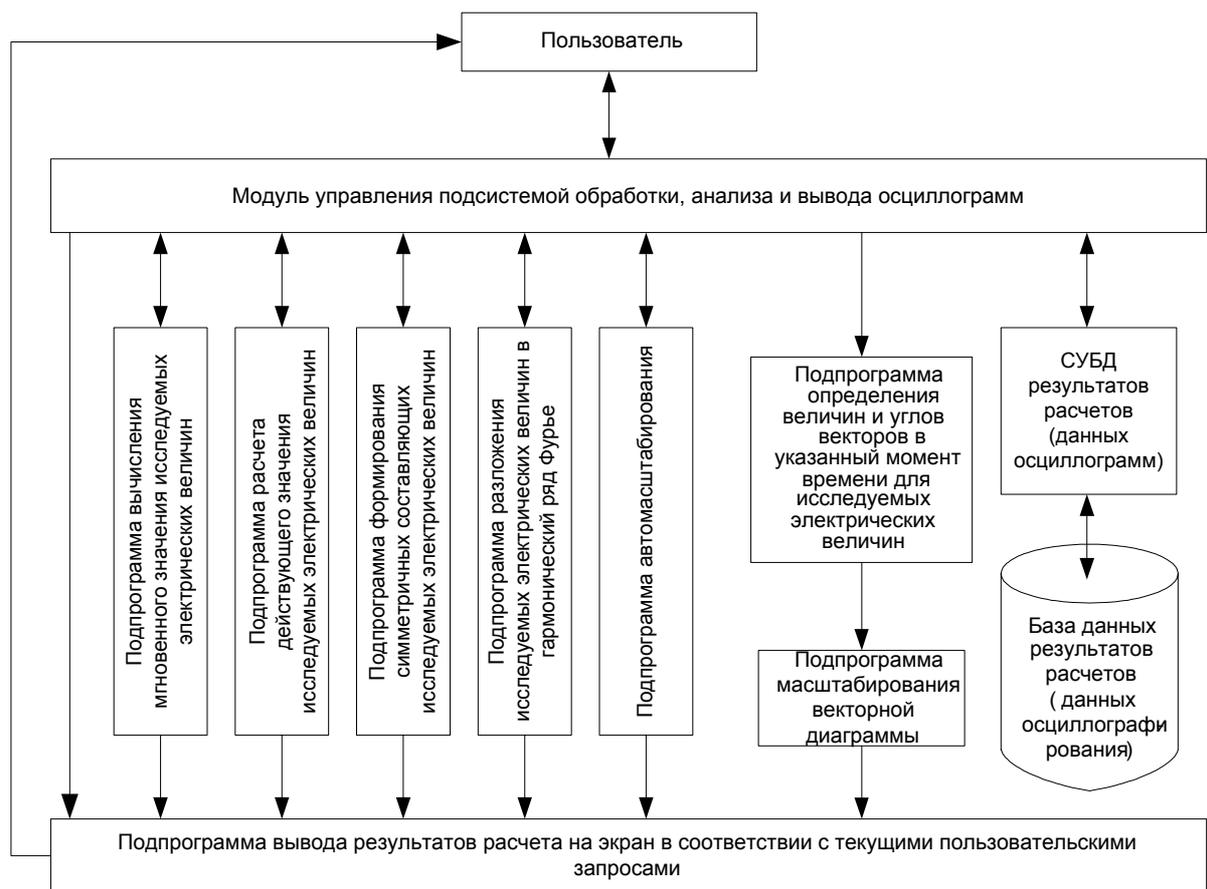


Рис. 8. Блок-схема подсистемы обработки, анализа и вывода осциллограмм

На рис. 9 показан пример представления и анализа результатов расчета системы моделирования с помощью разработанной графической подсистемы.

**В четвертой главе** приводятся результаты исследований достоверности и оценки точности разработанных математических моделей и алгоритмов дискретного моделирования ЭМПП в ЭЭС.

Проверка достоверности и оценка точности математических моделей и алгоритмов, используемых в разработанной системе моделирования, осуществлялась следующими способами:

сравнением результатов вычислительных экспериментов с результатами, полученными аналитическим путем для простейших модельных задач в переходных и установившихся режимах;

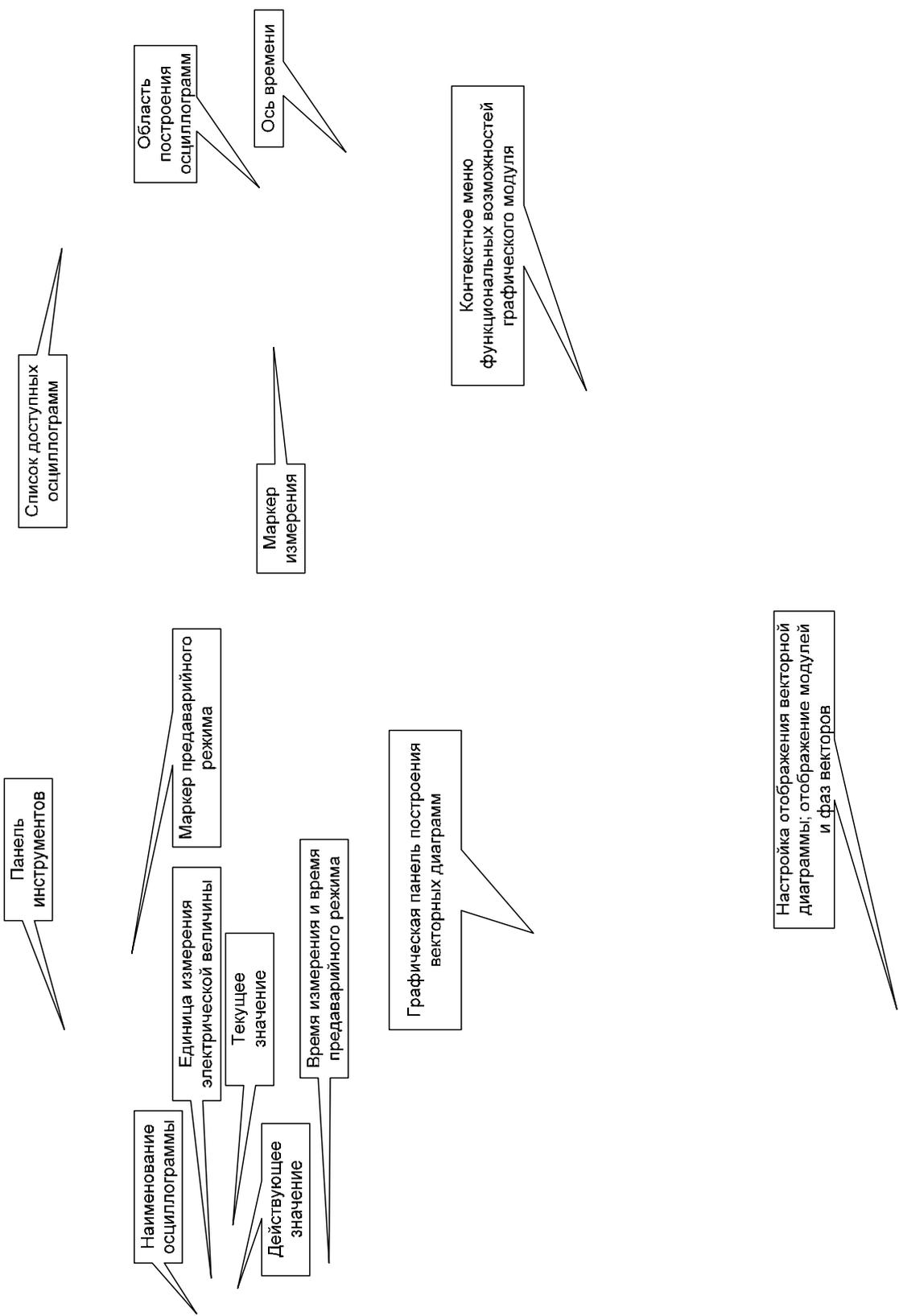


Рис. 9. Главное окно графической подсистемы обработки, анализа и вывода осциллограмм

сравнением результатов вычислительных экспериментов с результатами, полученными с применением других программ, используемых для моделирования ЭМПП и расчетов установившихся аварийных режимов ЭЭС;

сравнением результатов вычислительных экспериментов с результатами, полученными другими авторами и опубликованными в различных источниках;

сравнением результатов вычислительных экспериментов с реальными осциллограммами ЭМПП, записанными современными регистраторами аварийных процессов и микропроцессорными терминалами РЗА.

В качестве примера приведен результаты сравнения расчета для схемы, показанной на рис. 10 средствами пакета Simulink (а) и разработанной системы моделирования (б). Графические представления результатов расчетов показаны на рис. 11 для математического пакета моделирования Simulink (вверху) и для разработанной версии системы моделирования (внизу).

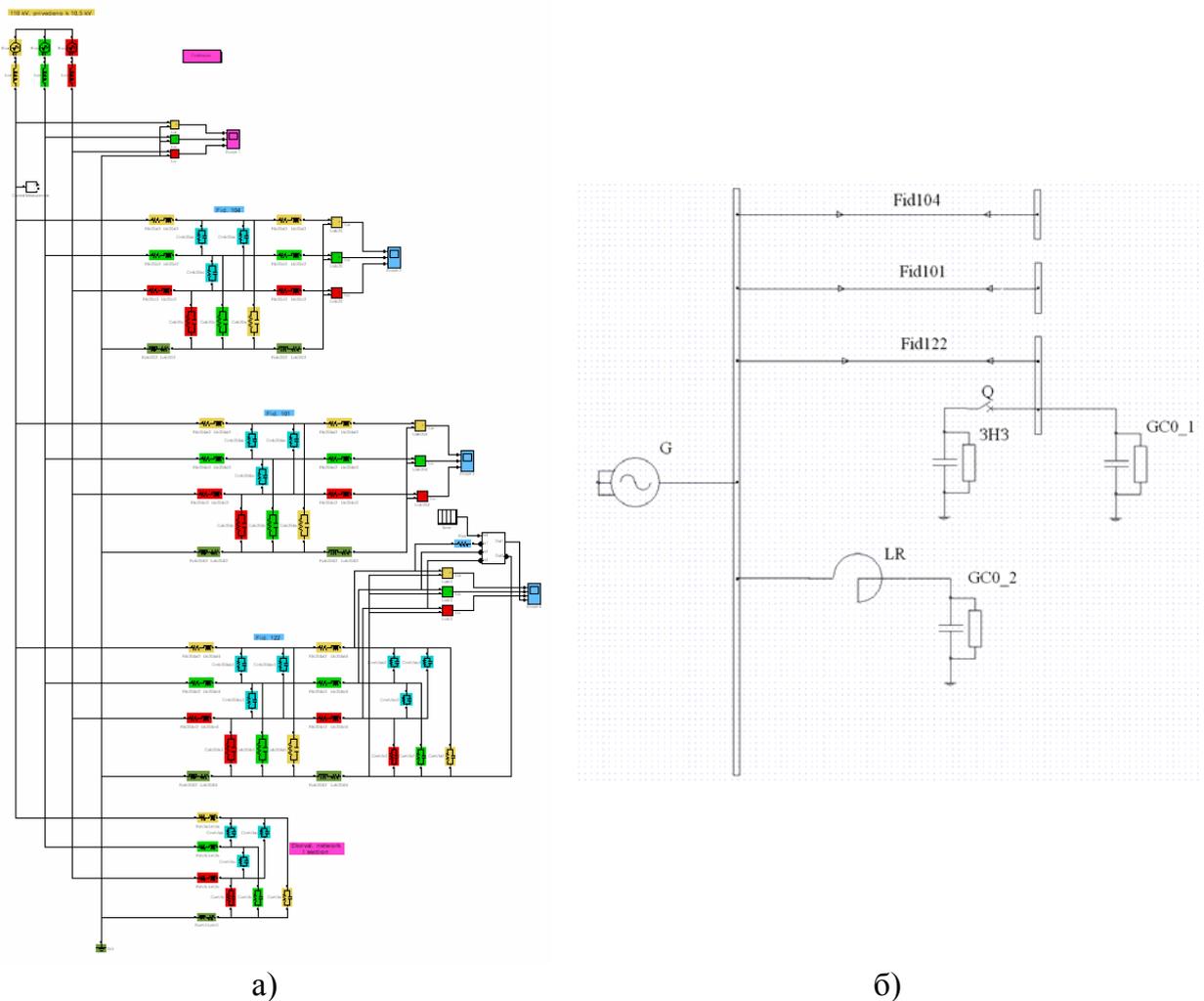


Рис. 10. Представление исследуемой схемы ЭЭО (участка кабельной сети системы электроснабжения предприятия) в математическом пакете моделирования Simulink (а) и в разработанной системе моделирования ЭМПП (б)

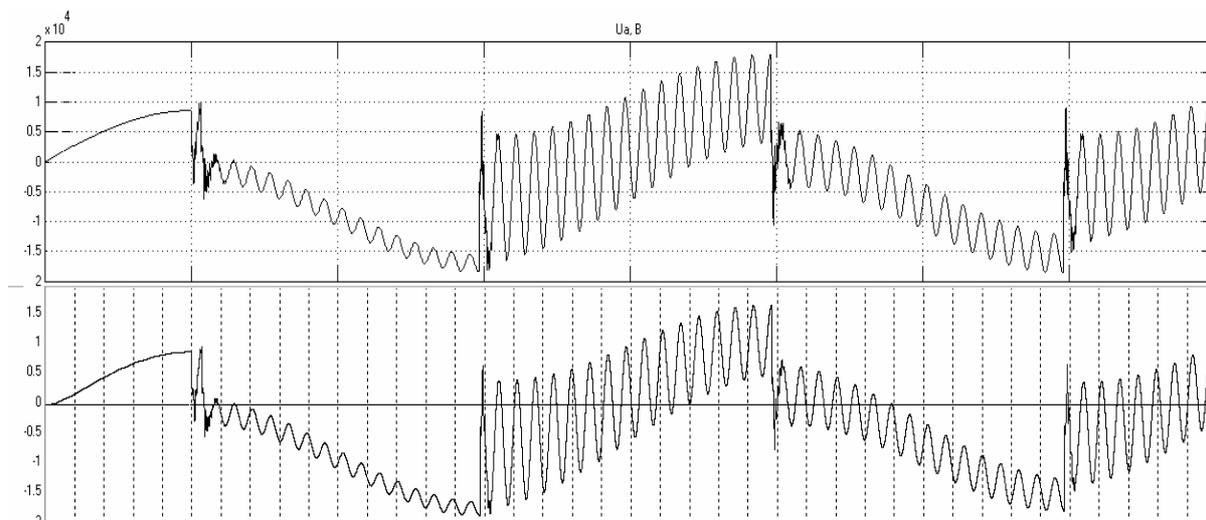


Рис. 11. Сравнение результатов расчета ЭМПП при ОЗЗ в электрической сети по рис. 10, выполненных с использованием математического пакета моделирования Simulink (вверху) и разработанной системы моделирования ЭМПП (внизу)

Сравнение результатов расчета установившихся режимов и ЭМПП, выполненных для различных схем и параметров ЭЭО с использованием разработанной системы моделирования, с результатами, полученными для различных модельных задач указанными выше способами, показало их достаточно точное совпадение (расхождение результатов расчетов не превышало 3-5%).

Как уже отмечалось выше, наиболее эффективным способом анализа функционирования УРЗ в динамических режимах ЭЭС является комбинированный способ физико-математической имитации электромагнитных переходных процессов во входных цепях тока и напряжения УРЗ. При использовании указанного способа рассчитанные на ЭВМ временные зависимости входных токов и напряжений для заданных объектов и условий программно-техническим способом преобразуются во входные сигналы исследуемого УРЗ в реальном масштабе времени с использованием специального устройства согласования с объектом (УСО). Наиболее распространенным устройством, позволяющим реализовать способ физико-математической имитации динамических режимов функционирования УРЗ, является серия испытательных приборов НПП «Динамика» типа «РЕТОМ». Структура испытательной схемы представлена на рис. 12. Рассматриваемые приборы позволяют моделировать выходные сигналы в необходимом для большинства УРЗ диапазоне. Однако частота выходных сигналов ограничена 500 Гц (10-й гармоникой), что не позволяет применять «РЕТОМ» при исследованиях УРЗ, измерительные органы которых реагируют на гармоники, выше десятой.

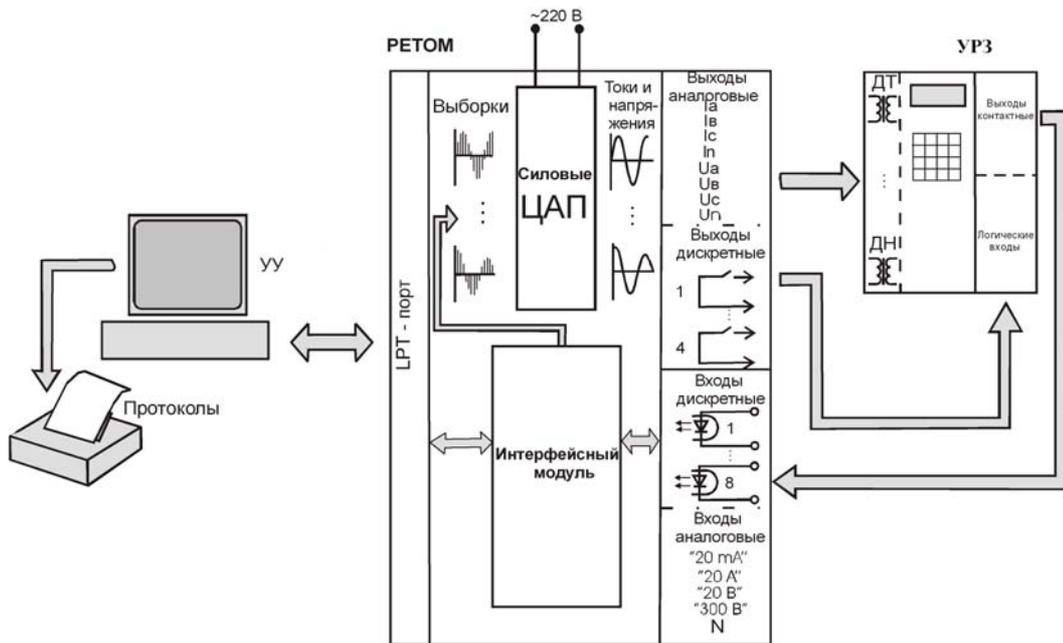


Рис. 12. Структура испытательной схемы с применением устройств серии «РЕТОМ»

Исследованы возможности физико-математического моделирования динамических режимов функционирования УРЗ с использованием разработанной системы моделирования ЭМПП в ЭЭС и устройства типа «РЕТОМ», осуществляемого по следующей методике:

- ввод схемы и исходных данных об исследуемом ЭЭО в систему имитационного моделирования;
- выбор режимов работы ЭЭС и видов аварийных ситуаций, необходимых для исследования функционирования УРЗ;
- проведение вычислительных экспериментов и сохранение их результатов в формате «COMTRADE»;
- подача входных воздействий (токов и напряжений) на исследуемое УРЗ посредством программы воспроизведения аварийных процессов, записанных цифровыми осциллографами, входящей в состав программного обеспечения «РЕТОМ»;
- анализ эффективности функционирования УРЗ посредством программного обеспечения «РЕТОМ» или с применением разработанной подсистемы обработки, анализа и вывода результатов расчета и осциллограмм.

Для проведения комплексных испытаний микропроцессорных УРЗ в лабораторных условиях разработан испытательный стенд, имитирующий также дискретные входные и выходные сигналы УРЗ в реальном ЭЭО. Имитация внешнего дистанционного управления выключателем обеспечивается применением устройства согласования с объектом типа SCADAPack32, управляемого посредством автоматизированной системы управления (АСУ). В качестве АСУ применяется SCADA-система «АТЛАНТ», разработанная

ОАО «Ивэлектроналадка» с участием автора. АСУ применяется также для управления выключателем непосредственно через терминал защиты, а также для автоматического считывания осциллограмм, записанных исследуемым микропроцессорным УРЗ. На рис. 13 представлены осциллограммы, полученные в результате проведенных вычислительных экспериментов системы моделирования ЭМПП в ЭЭС и осциллограммы, записанные микропроцессорным терминалом MiCOM P123 после воздействия на него посредством устройства «РЕТОМ-31».



Рис. 13. Осциллограмма, полученная в разработанной системе моделирования (внизу) и осциллограмма, записанная микропроцессорным терминалом (вверху)

С использованием разработанной системы моделирования ЭМПП и «Реле-Томографа» разработана библиотека типовых испытательных сигналов в международном формате «COMTRADE» для экспериментальных исследований динамических режимов функционирования сложных УРЗ. В частности, получены сигналы для исследования функционирования устройств защиты от однофазных замыкания на землю (ОЗЗ) в электрических сетях 6-10 кВ, работающих с изолированной нейтралью или с компенсацией емкостных токов, при дуговых перемежающихся ОЗЗ, а также сигналы для исследования динамических режимов функционирования дистанционных измерительных органов на ЛЭП большой протяженности.

Разработанная подсистема обработки, анализа и вывода осциллограмм применяется для просмотра и анализа осциллограмм в составе SCADA-системы «АТЛАНТ». Заложенные в подсистему функциональные возможности удовлетворяют всем существующим требованиям к программному обеспечению такого рода. Применение указанной подсистемы

темы в качестве средства просмотра и анализа осциллограмм, записанных микропроцессорными терминалами защит, обеспечено благодаря реализации поддержки стандартного формата хранения осциллограмм «COMTRADE» как в графической подсистеме просмотра и анализа осциллограмм, так и в SCADA-системе «АТЛАНТ». Разработанное для подсистемы обработки, анализа и вывода осциллограмм математическое и программное обеспечение легло в основу создания динамических и статических трендов, применяемых в составе SCADA-системы «АТЛАНТ».

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ**

В работе решены теоретические и практические задачи, связанные с разработкой математических моделей и алгоритмов и созданием комплекса программных средств математического моделирования электромагнитные переходные процессы (ЭМПП) в электроэнергетических системах (ЭЭС) и физико-математического моделирования системы «электроэнергетический объект - устройство релейной защиты» (ЭЭО – УРЗ) с применением серийно выпускаемой системы «РЕТОМ». Основные теоретические и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Показано, что для решения задач многовариантного анализа, возникающих при разработке новых и совершенствовании существующих УРЗ, а также при решении ряда задач проектирования релейной защиты ЭЭС целесообразно применять специализированные объектно-ориентированные системы автоматизированного моделирования динамических режимов функционирования ЭЭС, выполненные на основе блочного построения моделей исследуемых ЭЭО с применением метода дискретного моделирования.

2. Сформулированы требования к системе моделирования ЭМПП в ЭЭС для решения задач разработки и проектирования релейной защиты, обоснована структура и принципы построения объектно-ориентированной системы моделирования ЭМПП в ЭЭС для решения задач разработки и проектирования УРЗ.

3. Разработаны дискретные математические модели основных базисных трехфазных и однофазных элементов: коммутационных элементов, узлов несимметрии, генератора, трансформаторов и автотрансформаторов с различными схемами соединения обмоток и др., обеспечивающих возможность имитации ЭМПП в ЭЭО различной сложности.

4. Разработано математическое и программное обеспечение для системы моделирования ЭМПП в ЭЭС.

5. На основе требований, предъявляемых к инструментальной системе машинной графики системы моделирования ЭМПП, разработаны структура программного обеспечения графической подсистемы ввода ис-

ходных данных и специализированный объектно-ориентированный инструментарий с высокой степенью наглядности и иллюстративности, эффективно реализующие концепцию структурного моделирования применительно к ЭЭО. Создан язык графического программирования с возможностью конструирования и описания сложных схем ЭЭО различной конфигурации.

6. Разработана СУБД технических параметров электроэнергетического оборудования, отвечающая предъявленным к ней требованиям и обладающая высокой степенью наглядности.

7. Разработанная графическая подсистема обработки, анализа и вывода осциллограмм имеет в своем составе все основные средства, необходимые пользователю при анализе результатов вычислительных экспериментов, выполненных с использованием системы имитационного моделирования: представление результатов в форме графиков, векторных диаграмм, фильтрация симметричных составляющих, вывод на экран действующих значений электрических величин и др.

8. Сохранение результатов вычислительных экспериментов в формате «COMTRADE» обеспечило возможность использования разработанной графической подсистемы для просмотра и анализа реальных осциллограмм аварийных режимов ЭЭС, а также использования результатов вычислительных экспериментов, выполненных в системе моделирования, в целях физико-математического моделирования динамических режимов функционирования УРЗ с применением системы «РЕТОМ».

9. Сравнение результатов расчета установившихся режимов и ЭМПП, выполненных для различных схем и параметров ЭЭО с использованием разработанной системы моделирования, с результатами, полученными для различных модельных задач с использованием других (сертифицированных или апробированных) систем и программ моделирования или другими авторами подтвердило достоверность разработанных моделей и алгоритмов для расчета ЭМПП в фазных составляющих.

10. Результаты исследований подтвердили возможность реализации метода физико-математического моделирования динамических режимов функционирования УРЗ с использованием разработанной системы моделирования ЭМПП в ЭЭС и устройства типа «РЕТОМ».

11. С применением разработанной системы моделирования ЭМПП в ЭЭС и «Реле-Томографа» создана библиотека типовых испытательных сигналов для экспериментальных исследований динамических режимов функционирования сложных УРЗ (защит от однофазных замыканий на землю для электрических сетей 6-10 кВ при дуговых перемежающихся ОЗЗ, дистанционных защит).

12. Разработанное математическое и программное обеспечение для системы моделирования ЭМПП в ЭЭС применяется в составе SCADA-

системы «АТЛАНТ» для отображения и анализа информации об электрических величинах действующих ЭЭО.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК**

1. **Шуин В.А., Мурзин А.Ю., Лифшиц А.С.** Выбор методов неявного интегрирования для построения дискретных моделей элементов электроэнергетических систем // Вестник ИГЭУ. – Иваново, 2004. – Вып. 4. – С. 52–55.

2. **Мурзин А.Ю., Лифшиц А.С.** Графический модуль обработки, анализа и вывода электрических величин переходных и установившихся режимов работы электроэнергетических систем // Вестник ИГЭУ. – Иваново, 2003. – Вып. 6. – С. 87–95.

### **Публикации в других изданиях**

3. **Шуин В.А., Мурзин А.Ю., Лифшиц А.С.** Математические модели силовых двухобмоточных трансформаторов для моделирования электромагнитных переходных процессов // Вестник ИГЭУ. – Иваново, 2002. – Вып. 6. – С. 80–86.

4. **Шуин В.А., Мурзин А.Ю., Лифшиц А.С.** Математические модели коммутационных элементов электроэнергетических систем // Повышение эффективности работы энергосистем: Тр. ИГЭУ. – Вып. 8. – Иваново, 2007. – С. 490–497.

5. **Апухтин Д.Ю., Лифшиц А.С., Савинов А.А.** SCADA-система "АТЛАНТ" – инструмент автоматизации электрических сетей / Журнал "Автоматизация в промышленности", № 7. 2005. – С. 19–21.

6. **Апухтин Д. Ю., Лифшиц А. С., Савинов А. А.** SCADA-система для электроэнергетики / Энергетик, № 2. 2005. – С. 37–38.

7. **Апухтин Д. Ю., Лифшиц А. С., Савинов А. А.** Опыт реализации и внедрения автоматизированной системы управления SCADA «АТЛАНТ» // Сборник докладов науч.-тех. конференции «Релейная защита и автоматика энергосистем-2006». М.: ВВЦ, 2006. – С. 46–47.

8. **Лифшиц А.С.** Применение метода дискретного моделирования для исследования электромагнитных переходных процессов в ЭЭС в целях релейной защиты / Радиоэлектроника, электротехника и энергетика // Десятая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. в 3-х т. М.: МЭИ, 2004. Т.3. – С. 317.

9. **Лифшиц А.С.** Графический модуль анализа результатов расчета электромагнитных переходных процессов в электроэнергетических системах/ Радиоэлектроника, электротехника и энергетика // Одиннадцатая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. в 3-х т. М.: МЭИ, 2005. Т.3. – С. 287.

10. **Лифшиц А.С.** Графический интерфейс пользователя системы моделирования переходных процессов в электроэнергетических системах / Радиоэлектроника, электротехника и энергетика // Тринадцатая Международ. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. в 3-х т. М.: МЭИ, 2007. Т.3. – С. 280–281.

11. **Лифшиц А.С.** Графический интерфейс для системы моделирования режимов функционирования электроэнергетических систем // Тез. докл. регион. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. – Иваново: ГОУ ВПО Ивановский гос. энерг. ун-т, 2006. – С. 54–56.

12. **Лифшиц А.С.** Физико-математическое моделирование динамических режимов функционирования устройств релейной защиты и автоматики // Тез. докл. регион. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. – Иваново.: ГОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет. – Иваново, 2007. – Т.3. С. 46–50.