

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

На правах рукописи

КОМАРЕНКО Елена Юрьевна

СТРУКТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ АНАЛИЗА ПЕРЕХОДНЫХ
ПРОЦЕССОВ В УПРАВЛЯЕМЫХ ЭНЕРГООБЪЕКТАХ
В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Специальность : 05.14.02 – Электрические станции (электрическая
часть), сети, электроэнергетические
системы и управление ими

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

КИЕВ – 1992



Ab 26.83

робота виконана в Інституті електродинаміки АН України

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент АН Украины,
И.В.ВОЛКОВ

Официальные оппоненты : доктор технических наук, профессор,
В.В.ЗОРИН

кандидат технических наук, доцент,
В.Н.БАЖЕНОВ

Ведущая организация – Институт проблем моделирования
в энергетике АН Украины, г.Киев

Защита состоится "14" апреля 1993 г.
в час., на заседании специализированного совета
Д 016.30.04 в Институте электродинаміки АН України по адресу :
252680, Киев-57, пр. Победы, 56, тел. 446-91-15

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института
электродинаміки АН України

Автореферат разослан "19" февраля 1993 г.

Ученый секретарь специализированного
совета, доктор технических наук

Г.М.ФЕДОРЕНКО

ЛННБ ім. В. Стефаника
АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Эффективность функционирования ЭЭО существенно зависит от переходных режимов, показатели качества которых изменяются при сменах факторов влияния возмущающих воздействий. Компенсация вредных последствий возмущений, вызывающих аварийную динамику переменных состояния, должна обеспечиваться на каждом этапе жизненного цикла сложной СДС.

Решая задачи автоматизированного проектирования ЭЭО, закладываются нормы на показатели качества ПП для получения потенциальной экономической эффективности, высокой надежности, качества электроснабжения при минимуме суммарных затрат, в развивающейся ЭЭС.

На этапах настройки и адаптации управляемых ЭЭО динамическое взаимодействие в рамках ЭЭС согласуется с алгоритмами функционирования человека-оператора БЩУ, работой СА, технической диагностики и релейной защиты.

В процессе эксплуатации ЭЭО осуществляется текущее слежение за переменными состояния во всех режимах работы ЭЭС для оперативной выработки мер по обеспечению целевых показателей эффективности СДС. С учетом постоянного роста требований к управляемым ЭЭО, необходимо совершенствовать методы моделирования для анализа ПП в разнотипных объектах энергетики. Моделирование для задач согласования динамических процессов в ЭЭО имеет ряд особенностей в соответствии со спецификой каждого этапа единого жизненного цикла СДС и режимами функционирования их в ЭЭС.

Во-первых, технический ресурс каждого ЭЭО подвергается исчерпанию при всех видах нормальных, аварийных и послеаварийных режимов работы ЭЭС, возникающих при коммутациях в электрических цепях, устройствах, сетях.

Во-вторых, возможны значительные структурно-функциональные изменения подсистем ЭЭО по мере развития ЭЭС и внедрения новых энерго и ресурсосберегающих технологий.

В-третьих, любые виды изменений в управляемых ЭЭО, неизбежно стимулируют внедрение новых адаптивных средств комплексного учета особенностей динамики взаимовлияний на ЭЭС при больших возмущениях. Все это обуславливает серьезные трудности при моделировании СДС высокой размерности с разнотемповыми подсистемами и разными законами управления взаимосвязанными процессами функционирования ЭЭО в ЭЭС.

Применение существующих универсальных и специализированных пакетов прикладных программ позволяет успешно решать в основном частные

задачи анализа ПП в локальных подсистемах невысокой размерности моделей традиционных ЭЭО. Для комплексного, многоаспектного согласования всего разнообразия факторов, на стадии предпроектной и проектной проработки, и в эксплуатации с минимальным временем расчетов требуется разработка соответствующей информационно-вычислительной среды и выбор эффективного метода моделирования.

Структурный метод моделирования и структурированные макромоделли ЭЭС позволяют повысить качество согласования ПП в ЭЭС. Это происходит благодаря тому, что непосредственно в процессе анализа можно адекватно эквивалентировать и детализировать динамику взаимосвязей и отношений в ЭЭО для комплексного согласования СРС в темпе ведения режимов эксплуатации ЭЭС.

Поэтому развитие метода структурного моделирования, разработка эффективных информационно-вычислительных средств для анализа ПП в ЭЭО и согласование системной динамики в ЭЭС являются актуальной задачей.

Основные положения диссертации разрабатывались в соответствии с целевыми программами и по темам: "Модель", "Модель-11", "Вектор", "Шит", "Маневр", "Маневр-ССТ", "Момент".

Цель работы и задачи исследования. Целью диссертационной работы является:

- создание новых средств структурного моделирования, разработка на их основе информационно-вычислительных средств диалогового моделирования, обеспечивающих повышение точности, скорости, гибкости анализа ПП при возникновении новых структурно-режимных ситуаций.

Исходя из указанной цели были решены следующие задачи:

- предложены взаимозависимые модели СДС в виде структурированных многомерных описаний, содержащих полное отображение требуемых свойств и отношений для анализа ПП ЭЭО в ЭЭС;

- разработаны информационные модели основного электроэнергетического оборудования, устройств управления им в нормальных и аварийных режимах;

- разработаны средства моделирования разнотемповых СДС с типовыми структурными элементами в подсистемах, отражающих сложность состава анализируемого ЭЭО и значительный разброс скоростей процессов возмущенной ЭЭС, базирующиеся на методике алгебраизации динамических агрегатов и подсистем с линейными передаточными функциями и сложными структурами;

- предложен алгоритм распознавания моментов коммутаций и фаз смены СРС управляемых ЭЭО;

- разработаны программные средства для комплексного моделирования СДС при углубленном анализе ПП.

Методы исследования. В теоретических и экспериментальных иссле-

дованиях использованы основные положения теории электрических цепей, математического моделирования, электрических машин и ПП в электрических системах, вычислительной математики, дифференциального и интегрального исчисления, автоматического управления.

Научная новизна.

1. Впервые предложены средства реализации информационной модели ЭЭО, отличающиеся комплексной структуризацией классов схемно-режимных состояний и алгоритмами адекватного моделирования средств управления.

2. Развита метод структурного моделирования для объектов с иерархически сложными подсистемами и разнотемповыми технологическими процессами, за счет которого достигается распараллеливание вычислительных процедур и ускорение расчетов ПП.

3. Разработана новая методика алгебраически точного эквивалентирования динамических фрагментов структур, отличающаяся эффективными рекуррентными макромоделями, которые обеспечивают точность, быстродействие и вычислительную устойчивость нелинейной динамической модели с большим разбросом постоянных времени в элементах с разными передаточными функциями подсистем ЭЭО и средств автоматического управления ими.

4. Впервые разработан алгоритм обнаружения изменений свойств динамических подсистем, отличающийся применением типовых ДГФ для моделирования схемно-режимного состояния возмущенной подсистемы ЭЭО.

5. Впервые получены аналитические выражения для расчета коэффициентов в рекуррентных макромоделях при заданных сложных типовых схемах внутреннего соединения элементов подсистем с линейными передаточными функциями.

6. Разработаны комплексные структурные модели ДЭА и ЭБ ЭС, прикладное программное обеспечение для средств комплексного анализа ПП в электрической части блока.

Основные положения, выносимые на защиту.

Автор защищает следующие научные результаты :

1. Средства построения единой сложной динамической модели для анализа длительных ПП в управляемых ЭЭО, отличающиеся адекватными процедурами отображения изменений структуры отношений и взаимовлияний их на структурно-режимные состояния.

2. Средства моделирования разнотемповых СДС с переключаемыми СРС и разнотипными макромоделями динамических подсистем.

3. Алгоритмы алгебраического эквивалентирования дискретных макромоделей, распознавания моментов коммутации, моделирования фаз смены СРС.

4. Пакеты прикладных программ для комплексного моделирования ПП и структурного описания динамики.

Б. Результаты анализа пусковых режимов автоматизированных дизель-электрических систем, аварийных и эксплуатационных ПП в электрической части ЭБ согласно учебно-тренировочных заданий в тренажере оператора БЩУ АЭС с реактором ВВЭР-1000.

Практическая ценность диссертационной работы состоит в том, что разработанные средства структурного моделирования позволяют в темпе эксплуатации ЭЭС точно обнаруживать изменения свойств динамических подсистем, благодаря чему автоматизированные средства управления заблаговременно смогут выработать упреждающие воздействия для снижения ущерба и аварии. Это дает возможность повысить показатели эффективности работы ЭЭС в ЭЭС. При этом время расчета ПП в электрических машинах и аппаратах сокращается не менее, чем в два раза при сохранении требуемой высокой точности моделирования. Ускорение межмашинного обмена структурными моделями в сети из параллельно работающих ЭВМ снижает затраты информационно-вычислительных ресурсов по сравнению с существующими методами АСДУ.

Практическое использование средств моделирования позволило: получить рекомендации по оптимизации системы управления ДЭА в системах гарантированного питания СН ЭС; разработать комплекс программ моделирования режимов работы электрической части ЭБ АЭС с реактором ВВЭР-1000 в рамках полномасштабного тренажера операторов БЩУ.

Внедрение результатов диссертационной работы. Результаты диссертационной работы были использованы на п/я А-149Б при создании САПР дизель-электрических агрегатов и АРМ конструктора; НПО "Энергия" при проведении исследований способов контроля функциональных и полномасштабных тренажеров операторов БЩУ энергоблока АЭС; ЛГТУ, ДПИ и ИПРИ АН Украины для проведения научно-исследовательских работ с целью сокращения затрат на натурные эксперименты.

Апробация работы.

Научные и практические результаты диссертации докладывались и обсуждались на Всесоюзных и Республиканских научно-технических конференциях, совещаниях, школах и семинарах:

1. Всесоюзных конференциях по физическому и математическому моделированию электроэнергетических систем, Рига, 1988; "Проблемы нелинейной электротехники", Киев, 1984, 1992; Всесоюзных межвузовских конференциях по теории и методам расчета нелинейных цепей и систем, Ташкент, 1982; "Динамические режимы работы электрических машин и электроприводов", Каунас, 1988; Всесоюзных конференциях "Методы и средства обработки сложной графической информации", Горький, 1985; "Современное состояние, проблемы и перспективы энергетики и технологии в энергостроении",

Иваново, 1989; "Технико-экономические проблемы оптимизации режимов электропотребления промпредприятий", Челябинск, 1987; "Распределенная обработка информации IV", Новосибирск, 1991; "Перспективы развития и применения средств вычислительной техники для моделирования и автоматизированного исследования", Москва, 1991; Всесоюзной школе "Расчет и управление ние надежностью больших механических систем", Свердловск-Звенигород, 1984.

2. Республиканских научно-технических совещаниях: "Устройства преобразования информации для контроля и управления в энергетике", Харьков, 1982, 1998; "Создание и использование тренажеров и систем обучения операторского персонала атомных и тепловых станций, диспетчеров энергосистем", Киев-Триполье, 1988.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 33 научные работы.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем составляет 238 страниц, включая 20 таблиц, 56 рисунков, списка литературы из 170 наименований. Основной текст составляет 135 страниц.

СО Д Е Р Ж А Н И Е Р А Б О Т Ы

Во введении обоснована актуальность, сформулирована цель и задачи, дана краткая характеристика работы и перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен анализ временных рядов фактического изменения показателей эффективности управляемых ЭЭО. Выявлены структурно-функциональные особенности систем управления в ЭЭС. Показано, что повышение точности анализа ПП в управляемых ЭЭО зависит от способа моделирования комплекса существенных взаимосвязей и причин изменения структурно-режимных состояний ЭЭС. Проведенный в этой главе обзор методов анализа ПП в управляемых ЭЭО показал, что для обоснования новых технических решений, затрагивающих электротехническую специфику режимов работы и законы управления, следует предъявлять к средствам моделирования комплекс требований по обеспечению вычислительной производительности. Сделан вывод о том, что известные методы математического моделирования разнотемповых ПП в ЭЭО не удовлетворяют этим требованиям и не позволяют по ходу моделирования учитывать изменения смен СРС ЭЭО и развития системной динамики взаимодействия в ЭЭС.

Вторая глава посвящена разработке средств структурного описания моделей с адекватным отображением задачных особенностей динамического взаимодействия ЭЭО в автоматизированных ЭЭС. Решение поставленной задачи базируется на подходе к анализу ПП с помощью системы структурного моделирования на ЭВМ. Расчеты реализуются непосредственно по блок-схемам нелинейных динамических моделей. Комплексы адекватных

моделей взаимосвязаны между собой структурным графом $G(B, Q)$, отражающим в ЕИМ сложного объекта все B - вершины (узлы) и Q - дуги (связи) (5,11).

При формировании конкретных ЕИМ управляемых ЭЭО структуризация анализируемых ПП выполняется согласно следующей методики:

1. Наиболее быстрые электромагнитные процессы в ЭЭО с общими режимами работы электрических цепей моделируются с выделением передаточных функций источника питания $G(\rho)$, с.э.т. $X_d(\rho)$, $X_q(\rho)$ и нагрузки:

$$G(\rho) = \frac{E(\rho)}{U_f(\rho)} ; \quad X_d(\rho) = \frac{E_d(\rho)}{I_d(\rho)} ; \quad X_q(\rho) = \frac{E_q(\rho)}{I_q(\rho)} ;$$

$$X_H(\rho) = \frac{I_H(\rho)}{U_H(\rho)} \quad (1)$$

Коммутации приводят к изменениям СРС, для которых определяются соответствующие передаточные функции. Модели $G_3(B_3, Q_3)$ предназначены для анализа изменений ЭДС $e(t)$, напряжений $u(t)$ и токов $i(t)$ в длительных межкоммутационных интервалах. Переключения от одного СРС к другому реализуется сменой прежней модели на адекватную новому состоянию.

2. Учет факторов изменения частоты f и мощностей (P, Q) в ЭЭС реализуется в структурных моделях электромеханических ПП в управляемых ЭЭО. Передаточные функции $G_{эм}(B_{эм}, Q_{эм})$ характеризуют влияние изменений электромагнитного момента $M_3(t)$ на валу электрической машины и механического момента $M_D(t)$ на особенности ПП с изменением угловой скорости $\omega(t)$, скольжения $s(t)$ и угла $\delta(t)$ машины между ЭДС $E(t)$ и вектором напряжения на шинах.

Структурные модели $G_{эм}(B_{эм}, Q_{эм})$ раскрывают взаимосвязи с токами и потокораспределениями в нелинейных электрических схемах, приводящих к изменениям $M_3(t)$ из-за пусковых и аварийных режимов ЭЭО.

3. Для анализа ПП с учетом регулирования f и P в ЭЭС согласно законов управления выделенным составом маневренного оборудования структурные модели раскрывают: нелинейные характеристики регуляторов $Y = F(X, Z)$, запаздывания $e^{-T\rho}$ в каналах связи, передаточные функции $W_i(\rho)$ модулей средств управления и динамические характеристики $W_i(\rho)$ разнотипного оборудования, включаемого для покрытия переменного графика $P_H(t)$, возмущаемого набросами ΔP_H и сбросами нагрузок потребителей ЭЭС.

В моделях $G_{fP}(B_{fP}, Q_{fP})$ применимы передаточные функции, параметры которых вычисляются методами идентификации непосредственно в процессе

эксплуатации ЭЭО, либо фрагменты $G_i \langle V_i, Q_i \rangle$ детализированных $\forall i = 1, N$ структурных описаний законов управления и функционирования ЭЭО, известных по этапам САПР.

Пошаговое представление переменных $x_k \langle t \rangle, \forall k = \overline{1, n}$ реализуется после расчета ПП непосредственно по $G_{jP} \langle V_{jP}, Q_{jP} \rangle$ структурным моделям, отражающим взаимосвязи и темпы изменений управляемых общесистемных параметров состояния ЭЭС.

4. В структурных моделях $G_T \langle V_T, Q_T \rangle$ (котлов, турбин, энергетических преобразователей) отражается учет наиболее существенных факторов и взаимосвязей по технологическим переменным (расходы, давления, температуры, и т.д.). Процессы в технологическом оборудовании управляемых ЭЭО структурируются с раскрытием взаимосвязей по передаточным функциям и функциям нелинейных преобразований. Модели регулируемых ЭБ и подсистем предназначены для анализа взаимовлияний медленных (технологических) и быстрых электромагнитных (электромеханических) подсистем при длительных ПП с каскадной работой автоматики и сменами СРС.

Анализ каждой из указанного класса моделей выполняется с раскрытием структурных особенностей в зависимости от целей анализа ПП сложного управляемого ЭЭО. Предложенные принципы структуризации применялись и для задач контроля и диагностики управляемых ЭЭО (3-8).

Новизна полученных результатов заключается в комплексной структуризации $G = \bigcup_{j=1}^N G_j$ формировании ЕИМ и описании всех структурных схем G_j в средствах макросхем базиса моделирования на ЭВМ.

Третья глава посвящена теоретическим основам построения новых средств структурного моделирования для повышения эффективности анализа длительных ПП в управляемых ЭЭО.

Высокая степень структурной сложности, ситуативные коммутации в цепях и связях, режимно-параметрическая изменчивость динамических характеристик - все это требовало разработки информационно-адресных средств моделирования по ЕИМ для комплексного отображения динамики изменений всех видов СРС и свойств возмущенного ЭЭО.

Структурированные $G_j \langle V_j, Q_j \rangle$ модели поэлементно описываются в виде: $\{ S, P, R, N, A \}_k, \forall k \in K, \quad (2)$ где S - объектные характеристики с указанием S_1 имени, S_2 - класса принадлежности $S_1 \in S_2$, выполняемой $f \in F$ функции и $C \in \Xi$ цели применения; P - существенные свойства и характеристики S_1 объекта; R - внешние и внутренние отношения, характеризующие условия моделирования объекта S_1 в форме $m_i \in M$ модели и $A_i \in A$ алгоритма решения $d_i \in D_i$ задачи.

За счет явного списания структур знаний получена возможность оперативно выполнять информационно-вычислительные преобразования для эквивалентирования и детализации. В процедурах $G_{k_i} \langle B_i, Q_i \rangle \rightarrow G_{k_j} \langle B_j, Q_j \rangle$ применяются разработанные мета-макро и микро элементы построения расчетных моделей по типовым структурам. Параметрическая настройка ЕИМ осуществляется по разработанному СИФ и базам данных.

Анализ длительных ПП реализуется методом последовательных интервалов \langle кадров моделирования с шагом $DT \rangle$. Комплексная $G \langle B, Q \rangle$ модель преобразуется в набор моделей $\{ \text{РОМ} - \text{ЯСП}_i, \forall i = 1, n \}$ и $\{ \text{АИС} - \text{ЯСП}_p \}$, где конкретные РОМ в виде ЯСП описывают входо-выходные $G_i \langle B_i, Q_i \rangle$ соотношения с однотемповыми причинно-следственными взаимовлияниями; АИС и ЯСП межпланарных иерархических взаимосвязей $\{ \text{ЯСП}_i \}$ указывают конкретные источники и приемники значений $x_p, \forall p \in P$ переменной состояния СДС и функциональные формы их связей. Предложенное разделение ЕИМ на подсистемы $\{ \text{ЯСП}_i \}$ и АИС - ЯСП существенно повышает эффективность моделирования длительных ПП в разнотемповых СДС с переключаемыми СРС и параметрическими изменениями в зависимости от фазовых особенностей системной динамики.

Комплексный анализ ПП в современных управляемых ЭЭО основан на учете взаимовлияний процессов различной физической природы: волновых, электромагнитных, электромеханических, электрофизических, механических, тепловых, аэрогидродинамических, технологических, информационно-управленческих. Мерой точности анализа каждого типа ПП внутри $\{ \text{ЯСП}_i \}$ является шаг h_i на дискретной решетке событий. В кадре DT моделирования СДС на временной решетке образуется последовательность $h_0 < h_i < h_j < h_k < h_l < DT$, обеспечивающая точность описания разнотемповых процессов по быстрым $\{ \text{ЯСП}_m \} \forall m = 0, i, j$ и по медленным $\{ \text{ЯСП}_n \} \forall n = j, k, l$ макромоделлям подсистем ЭЭО.

Алгоритм моделирования динамики взаимосвязей разнотемповых процессов СДС разработан на основе следующих процедур.

1. Структурного моделирования $\{ \text{ЯСП}_i \}$ шагом $h_i = 2^i$ по рекуррентным соотношениям:

$$x_{i+1} = \gamma x_i + \alpha U_{i+1} + \beta U_i \quad (3)$$

$$y_{i+1} = \alpha y_i + \beta y_{i-1} + \gamma U_i + \delta U_{i-1} \quad (4)$$

2. Структурного уравнивания по внешним сопределяющим переменным, описываемым согласно ЕИМ и АИС - ЯСП системные взаимоотношения и взаимосвязи, изменение которых возможно либо на границе кадра при $T_i = T_{i+1} + DT$ либо на границе совпадения временных интервалов h , дискретизированных кратностями K по всем разнотемповым процессам, когда:

$$k_0 h_0 = h_i, \quad k_i h_i = h_j, \quad k_j h_j = h_l, \quad k_l h_l = h = DT / h. \quad (5)$$

3. Эквивалентирования по выходным переменным состояния $\{ЯСП_i\}$ любой сложности в форме вектора состояния, переменные которого моделируем ДГФ в форме: $Z_{i+1} = \alpha Z_i + \beta Z_{i-1} + \gamma$ (6)

4. Экстраполирования внешних переменных быстрых процессов с целью прогноза за $\langle k_j, k_i, k_0, h_0 \rangle$ шагов изменения входных межсистемных параметров на основе ДГФ и с учетом заданных кратностей на временной решетке дискретных событий. Прогноз быстрых процессов к требуемым моментам времени расчета медленных процессов в $\{РОМ - ЯСП\}_k$ ведется на межкоммутационных интервалах постоянства СРС.

5. Интерполирования медленно изменяющихся переменных состояния на решетке $k_i, k_0, h_0 \langle k_i, k_j, k_i, k_0, h_0 \rangle$ с меньшими шагами для моделирования входных воздействий $\{РОМ - ЯСП\}_i$, когда быстрая подсистема за счет управления коммутаторами изменяет СРС и параметры взаимосвязи.

6. Алгебраического агрегирования линейных фрагментов типовых структур в моделях и идентификации параметров $\{ДГФ_i\}$ при скачкообразных импульсных и коммутационных изменениях СРС конкретной $\{РОМ - ЯСП\}_i$. Новые параметры алгебраических макромоделей вычисляются с целью повышения эффективности моделирования длительных интервалов ПП на межкоммутационных промежутках.

7. Программно-целевого и ситуативно-временного управления на множествах M и A анализируемой ЕИМ $\langle S, P, R, M, A \rangle$ с учетом заданных условий изменения графиков электрических нагрузок и других переменных параметров ЭЭО в ЭЭС.

Предложены новые формулы вычисления коэффициентов $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ рекуррентных моделей с учетом кратностей (5) для экстраполирования и интерполирования согласно требований $\{АИС - ЯСП\}_s$ модели межсвязей ЭЭО. Алгоритмы календарей событий, временных диаграмм и ситуационного управления коммутационными элементами типа \langle ключ \rangle, \langle переключатель \rangle, \langle дискретный автомат \rangle реализованы в форме таблиц принятия решений.

Алгебраическое эквивалентирование динамических агрегатов и подсистем ЭЭО разработано с использованием конкретных фрагментов структуры $\langle B \in B, Q \rangle$, где типовые дуги с интегро-дифференциальными передаточными функциями моделируются в виде (3) и (4) на шаге k расчета. На основе точных аналитических преобразований линейно-каскадных, параллельных и замкнутых обратной связью структур из i типовых элементов обоснован унифицированный алгоритм макромоделирования:

$$X_{i, n+1} = C_{i0} U_{n+1} + C_{in} \quad (7)$$

где коэффициенты C_0 вычисляются на этапе настройки, а C_{in} пересчитываются при переходе от $\langle n + 1 \rangle$ -го момента времени к $\langle n + 2 \rangle$ -му, после

окончания расчета $\{x_{n+1}\}_i$, $\forall i = \overline{1, N}$ нелинейной СДС.

Вычислительная эффективность данной модели тем выше, чем большее число итераций (шагов оптимизации) необходимо совершить для получения точного решения системной нелинейной задачи с многими подсистемами, агрегатами и коммутаторами. Данное свойство достигнуто за счет того, что коэффициенты c_0 и c_{in} , соответственно, эквивалентируют трудоемкие вычислительные операции:

$$c_{i0} = \prod_{i=1}^l \alpha_i \cdot c_{in} = \left\{ \beta_i \prod_{i=1}^l \alpha_i U_n + \sum_{i=1}^l c_i x_{in} \right\}, \quad (8)$$

$$c_{i0} = \sum_{i=1}^l \alpha_i \cdot c_{in} = \left\{ \sum_{i=1}^l \beta_i U_n + \sum_{i=1}^l \gamma_i x_{in} \right\}, \quad (9)$$

$$c_{i0} = \left(\frac{\alpha}{1+\alpha} \right) \cdot c_{in} = \left\{ \frac{\beta}{1+\beta} U_n + \frac{\gamma-\beta}{1+\alpha} x_n \right\}, \quad (10)$$

Вычислительная устойчивость моделирования ЭЭО с разнотипными регуляторами скорости, возбуждения, группового распределения активных и реактивных мощностей, управляемых статических источников реактивной мощности и другими средствами управления в ЭЭС достигается тем, что шаг расчета h выбирается с учетом того, что $c_0 < 1$. Это свойство обеспечивается для разработанных макромоделей при значительной жесткости $\frac{h}{2T_i} > 1$ внутренних элементов моделируемых фрагментов $\sigma \in (b, a)$.

Средства алгоритмического согласования схем моделирования при коммутационных возмущениях и воздействиях типа скачков разработаны на основе точных методов структурных преобразований возмущаемых фрагментов $\sigma \in (b, a)$. Алгебраические решения подзадач анализа быстрых ПП в κ , l , c цепях при коммутационных переключениях точно преобразуются в ДГФ и вычисляются по формулам (6) совместно с нелинейными алгоритмическими и рекуррентными (3), (4), (7) соотношениями.

Конструктивно-схемные нарушения, переключения и срабатывание средств автоматики влияют на качество ПП и, соответственно, на параметры $\langle \alpha_{k+1}, \beta_{k+1} \rangle$, характеризующие СРС на межкоммутационных интервалах. Разработан алгоритм распознавания моментов коммутации и фаз моделирования длительных ПП. Классификация СРС выполнена в пространстве параметров ДГФ, что повышает эффективность моделирования во всем диапазоне эксплуатационных режимов и всех видах возмущений в любой момент времени. Показано, что своевременный переход на новые адаптивные средства управления ЭЭО и новые силовые преобразователи для электроэнергетики возможен на основе разработанных средств моделирования процессов выработки решений по коду развития аварийных процессов.

В четвертой главе представлены результаты практического использования разработанных численно-аналитических средств и их алгоритмической реализации в виде пакетов прикладных программ моделирования.

Применительно к задачам АСНИ и САПР, оптимизирующим жизненный цикл ЭЭО разработан пакет программ САД с новыми модулями для моделирования: разнотемповых подсистем, дискретных динамических агрегатов, адаптивных средств изменения структуры и параметров.

С их помощью были исследованы каскадные ПП в системах гарантированного питания СН ЭС при включении автоматизированных ДЭА на комплексную нагрузку соизмеримой мощности. Отличительной особенностью проведенных расчетов является детальный анализ новых схемно-конструктивных мероприятий в САР скорости, возбуждения, момента дизеля и соплового регулирования в системе воздухообеспечения процессов сгорания топлива в цилиндрах. На рис. представлены расчетная модель дизель-генератора и кривые изменения моментов, скорости и движения рейки топливоподачи. Каскады и частотные пуски электродвигателей потребовали соответствующей корректировки законов группового иерархического регулирования. В результате моделирования установлено, что целесообразна специальная автоматика для согласования фаз ПП собственно дизеля с электромеханическими ПП в коммутируемой электрической части. Для выбора согласованных законов управления ПП в ней применены методы оптимизации по интегральным критериям качества за весь интервал ПП.

Применительно к средствам поддержания качества подготовки операторов БДУ ЭБ ВВЭР-1000 на АЭС в рамках полномасштабного тренажера был разработан комплекс структурного моделирования электрической части станции с подробным учетом основных секций СН. Изменяя учебно-тренировочное задание, инструктор приводит к активизации соответствующей комплексы структурных моделей «СВ.Ω». Наблюдаемая реакция основного электротехнического оборудования моделируется подпробно, а остальные части и подсистемы участвуют динамическими эквивалентами. Высокий уровень сложности взаимозависимостей режимов технологических подсистем функционирования реактора с переходными режимами в электрической части станции потребовал решения конфликтной проблемы стоимости полномасштабного тренажера и вычислительной производительности новейших ПЭВМ. Разработанные в диссертации методы и модели обеспечивают эффективное решение данной проблемы за счет согласования информационных моделей ЭС высокой размерности с расчетными вычислительными моделями, где рационально сочетаются детализированные и эквивалентные макромоделли.

Таким образом, требуемая вычислительная производительность с ускоренным масштабом моделирования электромеханических ПП обеспечивает-

ся за счет структуризации моделей на основе точного учета: особенностей взаимовлияний логико-динамических причинно-следственных событий; СРС в электрической части в межкоммутационные интервалы; уставок срабатывания коммутационных аппаратов, выключателей, реле и автоматики; технического состояния технологических агрегатов и допустимого уровня располагаемых мощностей. Анализ экспериментальных расчетов согласно графиков покрытия ЭС неравномерной нагрузки ЭЭС показал, что разработанные средства моделирования позволяют решать не только задачи улучшения динамических свойств технологических подсистем регулирования мощности котла и турбины, но и в целом задачи повышения экономической эффективности за счет внедрения регулируемого электропривода для маневренных ЭБ. Расчеты были выполнены для ряда ЭС ПО "Донбассэнерго".

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Развита методика структурного моделирования и на основе результатов разработки информационно-вычислительных средств показано, что повышение эффективности управления в переходных режимах современными автоматизированными генераторами, ЭБ, подстанциями, электропередачами высокого напряжения и другими ЭЭС зависит от согласованного обмена структурными моделями между энергетическими решающими подсистемами.

2. Предложен подход к построению системы управления ЭЭС с выделением информационно-алгоритмического взаимодействия и роли адекватных моделей на каждом этапе жизненного цикла ЭЭС. Новизна подхода заключается в явной структуризации объектов, свойств, отношений для каждой компоненты ЭЭС, что обеспечит в адекватной форме сохранение свойств эмергентности, многофункциональности, многорежимности, управляемости, инерции, пространственно-временной и организационно-ситуативной иерархии ЭЭС. Разработаны информационные вычислительные модели ЭЭС, реализующие требуемые преобразования учета внешних системных и внутренних локальных факторов, отражающих разнообразный комплекс эксплуатационных возмущений, вызывающих ПП в ЭЭС и ЭЭС.

3. Разработаны средства информационного и вычислительного моделирования основного электроэнергетического оборудования и средств управления им в нормальных, аварийных и послеаварийных режимах для задач анализа ПП в ЭЭС. Новизна заключается в структурировании операций преобразования моделей при эквивалентировании, детализации, принятии решения, распознавании образов и ситуаций, кодировании результатов и нормировании алгоритмических процедур, которые на базе обобщенных структурных графов с унифицированными записями для узлов и дуг повышают эффективность анализа ПП в ЭЭС.

4. Разработана методика алгоритмизации динамических агрегатов и

систем с линейными передаточными функциями и сложными структурами. Это позволяет существенно сократить затраты машинного времени по сравнению с традиционными методами, когда приходится снижать размерность модели и обеспечивать вычислительную устойчивость за счет выбора малого шага расчета. Предлагаемые средства моделирования типовых ПП со сложными взаимовлияниями позволяют сохранить высокий уровень наблюдения и измерения параметров состояния, необходимых для детального анализа причин рассогласования взаимодействия в ПП ЭЭО.

Б. Предложен алгоритм распознавания моментов коммутации и фаз смены СРС управляемых ЭЭО по параметрам ДГФ, что даст возможность повысить эффективность моделирования ПП для анализа моментов взаимодействия современных адаптивных систем управления с распределенной информационно-вычислительной структурой и формирования управляющих воздействий на исполнительные органы.

6. Практическое использование разработанных средств информационно-вычислительного моделирования в автоматизированной системе САД ИЭД АН Украины позволило получить практические рекомендации по оптимизации комплексной системы управления дизельгенераторами в системе гарантированного питания СН ЭС; дать рекомендации по средствам построения цифровых полномасштабных тренажеров операторов БЩУ ЭБ АЭС с коррекцией учебно-тренировочных занятий и изменениями темпа моделирования для выработки реакций персонала в различных ситуациях.

7. Результаты диссертационной работы были использованы на заводе имени Малышева (г. Харьков), в ЛГТУ, ДПИ, ИПРИ АН У, ИЭД АН У при проведении НИР: Модель, Модель-2, Вектор, Щит, Маневр, Маневр-ССТ, Момент.

Автор выражает искреннюю и глубокую благодарность доктору технических наук Баранову Георгию Леонидовичу за многолетнее плодотворное сотрудничество и ценные научные консультации.

По теме диссертации опубликованы 33 работы, из них основные :

1. Комаренко Е.Ю. Оценка расчетных параметров для прогнозирования располагаемых активной и реактивной мощностей генератора с учетом надежности // Надежность энергетических электромашин.- Киев:Наук.думка, 1981.- С.164-170.

2. Задачи, принципы и структурные схемы систем контроля и технической диагностики состояния генераторов: Разработать систему цифрового контроля теплового состояния маневренных турбогенераторов с целью снижения их аварийности и повышения ресурса: Отчет о НИР; Руководитель Г.Г.Счастливый; Исполнители: Баранов Г.Л., Комаренко Е.Ю. - Гос.рег. N 80077794.- Киев, 1982.- С.12-59.

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

3. Баранов Г.Л., Баранов В.Л., Комаренко Е.Ю. К построению системы контроля нагрузочных возможностей маневренных энергетических электромашин // Физико-технические проблемы надежности электрических машин: Сб. научн. трудов. - Киев: Наук. думка, 1986. - С.55-63.

4. Баранов Г.Л., Баранов В.Л., Комаренко Е.Ю. Цифровые регуляторы для систем управления электроэнергетическими объектами // Автоматизация и релейная защита в энергосистемах: Сб. научн. тр. - Киев: Наук. думка, 1986. - С.13-25.

5. Баранов Г.Л., Соболев В.Н., Комаренко Е.Ю. Оптимизация динамических характеристик дизель-электрических агрегатов. - Киев, 1986. - 54 с. - <Препринт-444/ Институт электродинамики АН УССР>.

6. Баранов Г.Л., Комаренко Е.Ю. Автоматизация расчетов переходных процессов в электромеханических преобразователях энергии // Регулируемые асинхронные двигатели : Сб. научн. тр. - Киев: Наук. думка, 1986. - С.99-103.

7. Волков И.В., Баранов Г.Л., Жуков В.Н., Комаренко Е.Ю. Моделирование маневренных режимов электростанций с регулируемым электприводом собственных нужд // Энергетика и электрификация. - 1987. - №4. - С.43-45.

8. Баранов Г.Л., Жуков В.Н., Комаренко Е.Ю. Структурное моделирование режимов работы регулируемого электропривода маневренных электростанций // Системные исследования в энергетике. - Киев: АН УССР, Ин-т проблем энергосбережения, 1988. - С.135-139.

9. Баранов Г.Л., Комаренко Е.Ю. Структурное моделирование способов технико-экономической оптимизации энергосберегающей технологии // Системные исследования в энергетике. - Киев: АН УССР. Ин-т проблем энергосбережения, 1988. - С.157-161.

10. Волков И.В., Баранов Г.Л., Комаренко Е.Ю. и др. Комплекс информационно-программного обеспечения для анализа способов покрытия электрических нагрузок // Информационный листок ЦЕТИ Минэнерго УССР. Киев : Укр НИИНТИ, 1989. - № 89-0046. - 4 с.

11. Баранов Г.Л., Комаренко Е.Ю. Структурное моделирование сложных динамических объектов на ЭВМ // Вопросы радиоэлектроники: Сер. вычислительная техника. - 1992. - Вып.2. - С.75-83.

Личный вклад автора.

В совместных работах автору принадлежит: новый подход к построению единой сложной динамической модели для анализа длительных ПП в управляемых ЭЭО, оснащенных многосвязанными средствами регулирования, автоконтроля и защиты (1-2), отличающийся адекватными процедурами отображения изменений структуры отношений и взаимовлияний в ЭЭО (8,9), являющихся причинами смены СРС с соответствующим комплексом технико-

экономических показателей (2,3,5); алгоритмы информационно-программных средств моделирования разнотемповых СДС с переключаемыми СРС и разнотипными макромоделями динамических подсистем (2,5,7,10); разработка алгоритмов и программ алгебраического эквивалентирования дискретных макромоделей высокой размерности (9,11), а также средства распознавания моментов коммутации и моделирования фаз смены СРС пакеты прикладных программ для комплексного моделирования ПП и структурного описания динамики в виде аналоговых структур и рабочих моделей ЭЭО (2,3-6,9-11); результаты анализа ПП и пусковых режимов автоматизированных ДЭ систем гарантированного питания СН ЭС (5), также аварийных и эксплуатационных ПП в электрической части ЭБ согласно учебно-тренировочных заданий в тренажере оператора БЩУ АЭС с реактором ВВЭР-1000 ; результаты моделирования на ЭВМ средств регулирования, автоконтроля и защиты ЭЭО (4,8).

Список принятых сокращений:

АИС - адресно-информационная ссылка;
БД - БЗ - база данных, база знаний;
БЩУ - блочный щит управления;
ДГФ - дискретный генератор функций;
ДЭГ - ДЭА - дизель-электрический генератор, ДЭ агрегат;
ЕИМ - единая информационная модель;
ПП - переходный процесс;
РОМ - расчетно-оперативная модель;
СА - системная автоматика;
СДС - сложная динамическая система;
СИФ - справочно-информационный фонд;
СН - собственные нужды;
СРС - структурно-режимное состояние;
ЭБ - энергоблок;
ЭЭО - электроэнергетический объект;
ЭС - электрическая станция;
ЭЭС - электроэнергетическая система;
ЯСП - ярус структурного подобия.

47074

AB 26.832

AB 26.832