

Академия наук Украины
Институт электродинамики

На правах рукописи

АВРАМЕНКО ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ

ПЕРЕХОДНЫЕ РЕЖИМЫ И ЖИВУЧЕСТЬ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

(МОДЕЛИ, МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТА НА ЭВМ)

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

Диссертация в форме
научного доклада
на соискание ученой
степени доктора техни-
ческих наук

К И Е В - 1 9 9 2

027.31

ЛНБ ім. В. Стефаника



00330658 (P)

Работа выполнена в Институте электродинамики АН Украины

Официальные оппоненты: академик АН Украины
 Пухов Георгий Евгеньевич —
 лауреат Государственной премии Украины
 доктор технических наук, профессор
 Перхач Владимир Степанович
 доктор технических наук, профессор
 Бушуев Виталий Васильевич

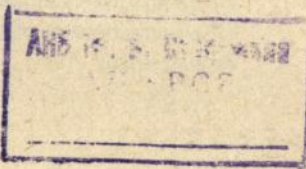
Ведущая организация: Государственный Украинский проектно-исследовательский и научно-исследовательский институт энергетических систем и электрических сетей "Укрэнергосетьпроект" (г. Харьков)

Защита состоится: " 15 " декабря 1992 г. в 15 часов на заседании специализированного совета Д.016.30.04 при Институте электродинамики АН Украины.
 (252380, Киев-57, проспект Победы, 56,
 тел. спецсовета: 446-91-15)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
 Института электродинамики АНУ.

Научный доклад разослан " " 1992 г.

Ученый секретарь совета
 доктор технических наук Г.М. Федоренко



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Ведущей тенденцией развития экономики во всем мире является интенсификация производства на основе научно-технических достижений. В области электроэнергетического производства это означает рост концентрации энергетических мощностей, увеличение единичных мощностей силового оборудования, повышение уровней напряжения линий электропередачи и сложности электрических сетей, создание и развитие энергообъединений и суперобъединений национального и континентального масштаба. В СССР электроэнергетика развивалась путем формирования Единой энергетической системы, характеризующейся большими потоками мощностей между регионами, малыми резервами запаса устойчивости, большой напряженностью режимов. Для Украины после провозглашения её независимости проблемы функционирования её энергосистем усугубляются трудностями с обеспечением энергетикой топливом, вывозом из эксплуатации энергоблоков Чернобыльской АЭС, сложностью электрических режимов, вызванных промежуточным состоянием объединенной энергосистемы (ОЭС) Украины между ОЭС России и ОЭС стран Восточной и Центральной Европы.

Мировой опыт последних десятилетий, начиная с аварии в Нью-Йорке 1965г., свидетельствует о том, что сложным техническим системам, к числу которых относятся современные энергообъединения, присуща проблема живучести, понимаемой как способность системы сохранять и восстанавливать основные функции при экстремальных воздействиях. Системные аварии, которые являются следствием недостаточной живучести энергообъединений, приводят к расстройству электроснабжения обширных районов и вызывают огромный экономический и социальный ущерб.

Проблема обеспечения устойчивости и живучести суперобъединений обостряется вследствие изменения их динамических свойств, проявляющегося в усложнении переходных процессов, увеличении их длительности и степени распространения по системообразующей сети, роста объёма и усложнения функций противоаварийной автоматики, без правильной и согласованной работы которой невозможно надежное функционирование ЕЭС и ОЭС, а при определенном наложении отказов которой создается угроза катастрофического ра-

звития аварийных процессов; чрезвычайного усложнения задач и функций оперативно-диспетчерского персонала, повышающего вероятность его ошибок в сложных аварийных ситуациях.

Целью работы является разработка и исследование математических моделей, методов и эффективных алгоритмов решения на ЭВМ задач расчёта переходных процессов и послеаварийных самоустанавливающихся режимов сложных ЭЭС и создание на этой основе программного обеспечения для анализа устойчивости и живучести энергообъединений.

Для достижения этой цели в работе решены следующие основные задачи:

- разработка единого подхода к расчёту переходных процессов и послеаварийных самоустанавливающихся режимов на основе адаптивной модели динамики ЭЭС;
- модификация методов и разработка эффективных алгоритмов расчёта переходных процессов и самоустанавливающихся режимов с целью обеспечения требуемых характеристик в отношении точности, быстродействия и надёжности получения решения;
- обоснование методики и нормативов анализа живучести энергообъединений с применением расчётов переходных режимов;
- разработка принципов построения и программ-прототипов режимного тренажёра диспетчера энергосистемы или энергообъединения на основе ЭВМ, предполагающего использование программ расчёта переходных и самоустанавливающихся режимов;
- разработка и апробация программного обеспечения для расчёта переходных режимов и динамической устойчивости сложных ЭЭС.

Методы исследований. В работе используются ориентированные на ЭВМ методы численного решения систем линейных и нелинейных алгебраических уравнений и обыкновенных дифференциальных уравнений; методы математического моделирования переходных процессов в ЭЭС; общая теория надёжности и живучести и метод имитационного моделирования. Достоверность результатов определяется обоснованным выбором методов исследования, соответствующих решаемой задаче, проведением специально организованных вычислительных экспериментов, сравнением результатов расчётов с зарегистрированным протеканием системных аварий, положительным опы-

том практического использования разработанных программ.

Автор защищает:

1. Единый подход к анализу с помощью ЭВМ переходных режимов ЭЭС, включая динамическую устойчивость, длительные переходные процессы (ДПП) и самоуставливающиеся режимы (СУР) ЭЭС.

2. Адаптивную модель динамики ЭЭС, предусматривающую автоматическое формирование в ходе расчёта моделей различных этапов ДПП и взаимные переходы между ними, а также к модели СУР.

3. Модифицированные методы и алгоритмы расчёта переходных процессов ЭЭС, учитывающие физические особенности исследуемого объекта.

4. Метод и алгоритмическую реализацию расчёта СУР ЭЭС.

5. Методику и нормативы анализа живучести ЭЭС на основе расчётов переходных режимов.

6. Принципы построения режимного тренажера диспетчера энергосистемы или энергообъединения на основе ЭВМ.

7. Программное обеспечение для расчёта переходных режимов сложных ЭЭС.

Научную новизну работы характеризуют следующие основные моменты:

1. Единство рассмотрения процессов, определяющих динамическую устойчивость ЭЭС, длительных переходных процессов и послеаварийных режимов, обобщаемых как переходные режимы ЭЭС.

2. Построение алгоритма адаптивной модели динамики ЭЭС на основе использования физического содержания электромеханического переходного процесса на различных стадиях его протекания.

3. Конструирование методов и алгоритмов расчёта переходных процессов и самоуставливающихся режимов, эффективно учитывающих особенности ЭЭС как объекта исследования.

4. Обоснование анализом статистики системных аварий в СССР норматива для проверки живучести ЭЭС - 3 тяжелых отказа в цепочке каскадной аварии.

5. Подход к оценке живучести ЭЭС с позиций многокритериального анализа, предусматривающего - в отличие от классической теории надежности - раздельный учёт лицом, принимающим решение, частоты тяжелых каскадных аварий и тяжести их последствий, при

котором отвергаются решения, приводящие к неприемлемому ущербу даже с весьма малой вероятностью.

6. Дискретное обобщенное уравнение динамики функционирования ЭЭС при отказах, связывающее изменение уровня функционирования с тяжестью независимого отказа, мобилизованным резервом и мерой неживучести системы.

7. Структура программного обеспечения режимного тренажера диспетчера энергосистемы (энергообъединения), предусматривающая - при информационном единстве - использование различных моделей ЭЭС на этапах подготовки тренировки и собственно тренировки, с применением на этапе тренировки модели самоуправляющихся режимов ЭЭС, что, с одной стороны, соответствует информационному полю, реально воспринимаемому диспетчером, а с другой стороны позволяет обеспечить быстрое действие программы в темпе оперативного управления.

8. Метод расчёта СУР в программном обеспечении тренажера с имитацией действия противоаварийной автоматики по параметрам стационарного или квазистационарного режима ЭЭС.

Практическая ценность. Разработанные модели и программы расчёта переходных режимов ЭЭС предназначены для использования в составе автоматизированных систем диспетчерского управления и систем автоматизации проектирования для обеспечения устойчивости и живучести энергообъединений при управлении их функционированием и развитием. Эти программы необходимы для расчётов переходных процессов при выборе уставок и координации действия противоаварийной автоматики, которая является обязательным и важнейшим элементом современных энергообъединений. Это также аппарат для ретроспективного анализа имевших место системных аварий, что имеет исключительное значение как для непосредственного повышения надежности ЭЭС, так и для апробации используемых математических моделей на основе натурального материала, который не может быть получен иным способом. В сочетании с разработанными методическими положениями создается возможность оценивать живучесть энергообъединений при экстремальных воздействиях естественного или преднамеренного характера и на этой основе уменьшать опасность катастрофических последствий от недостаточного уровня живучести. Разработки в области трена-

жеров диспетчерского персонала также очень важны для обеспечения надежной работы энергообъединений, так как роль человека в оперативном управлении ЭЭС велика, а возможности приобретения в реальных условиях опыта управления в экстремальных ситуациях весьма ограничены.

Реализация результатов работы. Работа выполнялась по планам научно-исследовательских работ Института электродинамики АНУ в рамках тем "Методы" и "Режим-3" (Постановление СМ УССР № 530 от 29.II.1975 и ГКНТ СССР № 520 от 3.II.1975), "Атом" (Расп.СМ УССР № 245-Р от 2I.04.1977), "Меан" (задание 05.02.И2 общесоюзной целевой программы 0.Ц.063, утвержденной Пост.ГКНТ и Госплана СССР № 473/249 от 12.II.1980) и "Анализ" (задание 0I.07 программы 0.Ц.026, Пост.ГКНТ и Госплана СССР № 473/249 от 12.II.80, задание 07.0I.0I республиканской целевой программы РИ.Ц.00I "Энергокомплекс", Пост.Госплана УССР № 3 - дсп от 28.0I.1981), "Экстремум" (Пост.ГКНТ СССР № II4 от 23.03.1984), "Синтез" и "Комплекс" (задание 34.05.А общесоюзной научно-технической программы 0.80.02, Пост.ГКНТ СССР № 555 от 30.I0.1985 и задание 13.Ц.03.0I.П6 республиканской целевой программы РИ.Ц.00I "Энергокомплекс", Пост.СМ УССР № 250 от II.07.1986), "Будапешт-03-86" (Пост.ЦК КПСС и СМ СССР № 967-293 от 14.I0.1985) а также по хозяйственным договорам с Минэнерго УССР, ОДУ и энергосистемами Украины и других республик, ВГПИ и НИИ "Энергосеть-проект" (Москва) и др. организациями. Работа включалась в координационные планы ОБТПЭ АН СССР по проблеме I.9.3 "Межотраслевые проблемы и системные исследования в энергетике" (разделы I.9.3.5.2 и I.9.3.6.3).

Научные результаты, полученные при выполнении работы, реализованы при разработке программ расчёта на ЭВМ динамической устойчивости, переходных и послеаварийных режимов ЭЭС, внедренных в ОДУ, производственных энергетических объединениях и проектных организациях: Украины и СССР в составе программного обеспечения автоматизированных систем диспетчерского управления энергосистем и энергообъединений и систем автоматизации проектирования энергосистем.

Комплексная программа УДАР-2 анализа динамической устойчивости -

ности сложной энергосистемы на ЦЕМ М-4030 была внедрена в ОДУ Юга, ПЭО "Киевэнерго", ОДУ Средней Азии, РУ "Гужаэнерго"; программа "ЧАСТОТА-2" расчёта электромеханического переходного процесса при внезапно возникшем небалансе активной мощности - в ОДУ Урала, ОДУ Сибири; комплекс УДАР-3 - ЧАСТОТА-2 расчёта на ЭЕМ III поколения динамической устойчивости и длительного переходного процесса - в ПЭО "Днепроэнерго", "Донбассэнерго", ОДУ Средней Волги, ПОЭ и Э "Азглавэнерго"; комплексная программа УДАР-4 анализа динамической устойчивости сложной ЭЭС, без программного ограничения количества узлов расчётной схемы - в ОДУ Северного Кавказа. Комплекс АВР-3 анализа возмущенных режимов сложных ЭЭС (200 активных узлов расчётной схемы) был внедрен в ВГПИ и НИИ "Энергосетьпроект" (г. Москва); комплекс АВР-13 расчёта и анализа переходных и самоустанавливающихся режимов сложных ЭЭС (500 активных узлов расчётной схемы) - в "Энергосетьпроект" (г. Москва), ПЭО "Днепроэнерго", Горьковском отделении института "Энергосетьпроект"; комплекс АВР-14 (без программного ограничения количества узлов расчётной схемы) - в ОДУ Северного Кавказа, ПОЭ и Э "Краснодарэнерго". Программа АВР-40 расчёта на персональных ЭЕМ самоустанавливающихся послеаварийных режимов ЭЭС внедрена в ПОЭ и Э "Туркменглавэнерго"; программа АВР-4I расчёта на персональной ЭЕМ послеаварийных режимов ЭЭС с учётом действия противоаварийной автоматики - в ПОЭ и Э "Кировэнерго"; АВР-50 - первая версия комплексной программы расчёта на персональной ЭЕМ доаварийного режима, динамической устойчивости и послеаварийного режима ЭЭС - в ПОЭ и Э "Таджикглавэнерго", ПОЭ и Э "Ставропольэнерго", институте "Южэнергопроект". Методика исследования живучести, апробированная на базовом варианте перспективного развития ЕЭС СССР, передана Сибирскому энергетическому институту СО АН СССР.

Общий документально подтвержденный экономический эффект от внедрения программ, разработанных под руководством и при непосредственном участии автора, составляет 813.5 тыс. руб., в том числе долевой эффект автора - 490.8 тыс. руб.

В 1988г. за разработку и внедрение программного обеспечения АСДУ энергосистем автор награжден серебряной медалью ВДНХ СССР. - В 1991г. за разработку методов, алгоритмов и программы

для расчёта на ЭВМ режимов и устойчивости энергосистем автору присуждена премия имени академика С.А.Лебедева Академии наук Украины.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях, совещаниях и семинарах: Всесоюзной научной конференции "Моделирование электроэнергетических систем" (Талинн, 1977, Баку, 1982, Рига, 1987, Каунас, 1991), Всесоюзной научно-технической конференции "Проблемы нелинейной электротехники" (Киев, 1981, Шацк, 1984, Черкассы, 1988), Республиканской (УССР) конференции "Современные проблемы энергетики" (Киев, 1973, 1976, 1980, 1985), Всесоюзных научно-технических совещаниях "Вопросы устойчивости и надежности энергосистем СССР" (Ташкент, 1984, Душанбе, 1989), "Исследование длительных переходных процессов энергосистем" (Новосибирск, 1982), "Автоматизированные системы диспетчерского управления в энергетике" (Москва, 1986), Всесоюзных симпозиумах "Системы энергетики - тенденции развития и методы управления" (Иркутск, 1980), "Комплексные проблемы развития и методы управления системами энергетики страны и районов" (Иркутск, 1985), 26-м Международном научном коллоквиуме (ГДР, Ильменау, 1981), Международном семинаре ЕЭК ООН по сравнению моделей планирования и эксплуатации ЭЭС (Москва, 1987), Всесоюзных семинарах "Имитационный подход к изучению больших систем энергетики" (Иркутск, 1985, Фрунзе, 1986), "Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики" (Иркутск, 1987), "Методы анализа режимов ЭЭС" (Киев), Всесоюзных заседаниях секции Научного совета ОУТПЭ АН СССР по комплексным проблемам энергетики, совещании-семинаре академии наук соц. стран "Физико-технические проблемы энергетики" (Киев, 1989), научно-технических конференциях "Проблемы комплексной автоматизации ЭЭС на основе микропроцессорной техники" (Киев, 1990), "Математическое моделирование в энергетике" (Киев, 1990), "Методы и средства вычислительной техники в энергетике" (Одесса, 1991).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 48 научных работ, в том числе 1 брошюра и 4 препринта.

Объём диссертации и её структура. Диссертация представлена в форме научного доклада и состоит из 5 разделов.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первый раздел объединены работы [5, 6, 11, 12, 26, 29, 16, 30, 10, 31, 36], в которых рассмотрены вопросы создания единого подхода к анализу переходных режимов ЭЭС, как органического единства переходных процессов и самоустанавливающихся послеаварийных режимов, и эффективного моделирования ЭЭС в переходных режимах.

Важнейшей характеристикой длительного переходного процесса (ДПП) является его стадийность - чередование этапов, фаз с различной скоростью и интенсивностью переходного процесса. В ДПП обычно присутствует стадия изменения общей частоты в системе (или изолированной подсистеме) при незначительном (по сравнению с основным) взаимном движении синхронных машин. Поскольку характерные частоты этого процесса на порядок ниже, чем те, которыми характеризуются взаимные колебания, возникает идея использования адекватной этому процессу - одночастотной модели (ОЧМ) и соответственно увеличенного шага численного интегрирования при расчёте переходного процесса. Суть ОЧМ заключается в предположении и фиксации в расчёте равенства скоростей движения (скольжения) синхронных машин: $S_i = idem = S_c$.

Скорость (скольжение) центра инерции системы S_c определяется, исходя из суммарного небаланса механической и электрической мощностей генераторов системы:

$$\frac{dS_c}{dt} = \frac{\sum P_{mi} - \sum P_{эл i}}{\omega_c T_{Jc}}, \quad (I)$$

где $\omega_c = \omega_0(1 + S_c)$ - общая скорость (частота) системы.

Входящие в (I) P_{mi} определяются в результате численного интегрирования уравнений автоматических регуляторов частоты вращения (АРЧВ) агрегатов, а $P_{эл i}$ - из расчёта на каждом шаге переходного процесса квазистационарного электрического режима системы. При этом индивидуальные ускорения, соответствующие режиму при полученных интегрированием предыдущего интервала значениях углов ЭЭС синхронных машин, в общем случае не равны ускорению системы [30]. Чтобы обеспечить равенство ускорений, выполняется итерационная коррекция режима. Поскольку АРЧВ могут иметь постоянные времена, соизмеримые с шагом расчёта, допустимым для ОЧМ, для уравнений АРЧВ предложено численно-аналитическое реше-

ние.

Ускорение i -й машины относительно системы может быть представлено в виде:

$$\frac{d(S_i - S_c)}{dt} = \frac{\Delta P_{i-c}}{\omega_i T_{Ji}}, \quad (2)$$

где ΔP_{i-c} -небаланс мощности в этом относительном движении.

$$\Delta P_{i-c} = P_{Mi} - P_{Эл.i} - \left(\sum P_{Mi} - \sum P_{Эл.i} \right) \frac{T_{Ji}}{T_{Jc}} \quad (3)$$

Предложенный вариант реализации ОЧМ, в котором на каждом шаге расчёта фигурирует в явном виде ΔP_{i-c} -небаланс мощности в движении i -й машины по отношению к системе, открывает путь к адаптивному моделированию длительных переходных процессов в ЭЭС [26, 12, 36]. Особенность этого подхода заключается в том, что во-первых, критерий допустимости применения ОЧМ (ΔP_{i-c}) заключен в самой модели и не требуется никаких дополнительных вычислений, во-вторых, ΔP_{i-c} , характеризуя степень возмущенности i -го генератора по отношению к движению системы как целого в каждый момент процесса, позволяет немедленно реагировать на большие возмущения, связанные с внешними воздействиями или реакцией на них противоаварийной автоматики и создающие опасность нарушения устойчивости системы, а следовательно определяющие невозможность использования ОЧМ и необходимость перехода на модель индивидуального движения (МИД), используемую для расчётов динамической устойчивости и в полной мере отражающую взаимные движения синхронных машин.

Таким образом, предлагается контроль допустимости применения ОЧМ строить на проверке условия $|\Delta P_{i-c}| > \Delta P_{max}$, где ΔP_{max} -максимально допустимая величина модуля небаланса ΔP_{i-c} при использовании ОЧМ. Поскольку указанная проверка имеет целью выявить опасность нарушения устойчивости, ΔP_{max} следует задавать как функцию $\delta_{i-c} = \delta_i - \delta_c$, где δ_c -средневзвешенный угол ЭДС генераторов системы, что позволит, уменьшая ΔP_{max} с ростом δ_{i-c} учесть тяжесть рассматриваемого режима.

$|\Delta P_{i-c}| > \Delta P_{max}$ соответствует возможности нарушения обычной динамической устойчивости. Проверяется также условие $|\delta_{i-c}| > \delta_{max}$, которое при $|\Delta P_{i-c}| < \Delta P_{max}$ соответствует случаю возможного нарушения устойчивости, вызванного медленным изменением режима.

Численные параметры функции $\Delta P_{max} = f(\delta_{l-c})$ определяются на основе оценок, которые можно сделать для двухмашинной модели, уточненных с помощью расчётов на реальных задачах.

В адаптивном моделировании длительных переходных процессов есть и другая сторона - организация обратного перехода МИД \rightarrow ОЧМ, когда это возможно. Реализация этого перехода осуществляется на основе проверки отклонения индивидуальной скорости (скольжения) генераторов от скорости движения центра инерции системы $S_{l-c} = S_l - S_c$ сравнением его с максимально допустимой величиной S_{max} . Как и в случае ΔP_{max} , ΔS_{max} следует задавать в виде функции от δ_{l-c} .

После реализации воздействий устройствами противоаварийной автоматики, которые были запущены в процессе расчёта ДПП, возможен переход с ОЧМ (МЧМ) на модель самоустанавливающегося послеаварийного режима (МПР), если частота системы находится в диапазоне $(\omega_0 \pm \Delta\omega)_{MPR}$ и изменяется в направлении ω_0 (снизу или сверху).

Расчётные исследования адаптивной модели динамики подтвердили её эффективность при расчёте ДПП. Заданные с небольшим запасом численные характеристики критериев перехода чётко выявляют необходимость перехода ОЧМ \rightarrow МИД и допустимость перехода МИД \rightarrow ОЧМ. Использование ОЧМ, интегрируемой с шагом 0,4-0,5 с обеспечивает даже в случае значительной составляющей взаимного движения погрешность по сравнению с эталонным расчётом не более 0,1-0,12 Гц, т.е. на уровне погрешности реле частоты в автоматике частотной разгрузки, что вполне приемлемо для многих практических задач, основанных на расчётах переходных режимов.

Задача анализа переходных режимов ЭЭС в полном объёме предусматривает после расчёта ДПП также расчёт соответствующего ему самоустанавливающегося по частоте послеаварийного режима. Особенность такой - единой - постановки задачи заключается в том, что исходной информацией для расчёта послеаварийного режима является состояние ЭЭС, возникшее в результате ДПП, в ходе расчёта которого наиболее корректно реализовались действия противоаварийной автоматики. С другой стороны, модель послеаварийного режима (МПР), должна предусматривать, наряду с учётом статизма АРЧВ генераторов и статических характеристик нагрузки

не только по напряжению, но и по частоте, такие особенности, как возможность деления системы на электрически не связанные подсистемы, а также самоотключения нагрузки (СОН) при значительных и длительных снижениях напряжения. Большая неопределенность параметров СОН, особенно временных характеристик (задержек времени) реальных потребителей делает целесообразным учёт СОН именно при расчёте послеаварийного режима, а не в расчёте ДПП.

Послеаварийный режим описывается нелинейной системой алгебраических уравнений:

$$P_{mi} - P_{эл,i} = 0, \quad i \in G, \quad (4)$$

$$\sum_{i \in G} P_{эл,i} = \sum_{j \in N} P_{nj} + \Delta P_{сети},$$

где G - множество генераторных узлов системы, N - множество узлов системы, P_{nj} - активная мощность нагрузки в узлах, $\Delta P_{сети}$ - потери активной мощности в сети,

$$P_{mi} = P_{ном,i} \frac{\omega_c - \omega_0}{\omega_0 \cdot \beta_i}, \quad P_{min,i} \leq P_{mi} \leq P_{max,i}, \quad (5)$$

$P_{nj} = f_{nj}(U_j, \omega_c)$ - в соответствии со статической характеристикой нагрузки (СХН) в узле.

Трактуя послеаварийный режим как режим ЭЭС, устанавливающийся под действием автоматических регуляторов без вмешательства персонала, следует учесть не только действие АРЧВ, изменяющих механическую мощность генераторов в соответствии с (5), но и действие АРВ в отношении регулирования напряжения. Статизм АРВ по напряжению можно отразить, заменяя генераторы Э.Д.С. за реактивным сопротивлением $X_{ei} = X_{qi} \sqrt{\beta_i + 1}$, где $-X_{qi}$ - реактивное сопротивление по поперечной оси, β_i - коэффициент регулирования возбуждения по отклонению напряжения. При этом через ограничения Э.Д.С. E_{qi} , пропорциональной току ротора,

$$E_{qmin,i} \leq E_{qi} \leq E_{qmax,i} \quad (6)$$

должны учитываться осуществляемые АРВ ограничения тока ротора и тока статора. Угол Э.Д.С. за сопротивлением X_{ei} обозначим δ_i . Вектора Э.Д.С. генераторов $E_i^{(0)}$, $\delta_i^{(0)}$, необходимые для расчёта послеаварийного режима, вычисляются для доаварийного

установившегося режима, который должен быть получен с помощью программ расчёта нормального установившегося режима (в обычной постановке).

При такой модели генераторов искомыми переменными системы (4) являются совокупность углов δ_i , а также частота системы ω_c , поскольку электрический режим системы и его параметры — $\dot{U}_i, \dot{U}_j, P_{эл.i}, P_{н.j}, \Delta P_{сет}$ — полностью определяется этими переменными.

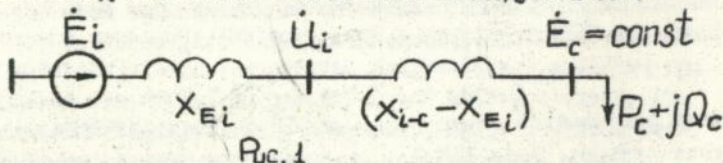
Для решения системы (4) с ограничениями (6), (5) строится итерационный процесс, который предусматривает линеаризацию системы на каждой итерации путем замены нагрузки проводимостью с использованием напряжения и частоты предыдущей итерации и линеаризации $P_{эл.i}$. Указанная линеаризация осуществляется приближенно, с использованием физических соображений. Учитывая, что в электрических системах $P_{эл.i}$ определяется главным образом переменной δ_i , т.е. диагональным членом, линеаризация проводится лишь с помощью частной производной $\partial P_{эл.i} / \partial \delta_i$, вычисленной с использованием параметров предыдущей итерации. Таким способом осуществляется преобразование исходной нелинейной системы $f_i(x_1, x_2, \dots, x_m) = 0, i = 1, 2, \dots, m$ к виду $x_i = g_i(x_1, x_2, \dots, x_m)$ в соответствии с методом простой итерации.

Решение линеаризованной системы осуществляется методом упорядоченного исключения Гаусса. Соответствующий алгоритм описан в разделе 2.

Для вычисления упомянутой частной производной на каждой итерации для каждого генератора определяются параметры выражения

$$P_{эл.i} = F_i(\delta_i, E_c, \delta_c), \quad (7)$$

где E_c, δ_c — модуль и угол Э.Д.С. системы, которой приближенно эквивалентуруется вся остальная часть исследуемой ЗЭС.



Рассмотрим двухмашинную модель: генератор, представленный

э.д.с. E_i с углом δ_i , и система, обладающая $E_c = \text{const}$ углом δ_c (в абсолютных координатах), связанные чисто реактивным сопротивлением X_{i-c} (рис. 1). Идея этой модели заключается в том, чтобы точку $U = \text{const}$ ности с шина генератора на некоторое расстояние X_{i-c} , величину которого определить, используя данные электрического режима на двух итерациях

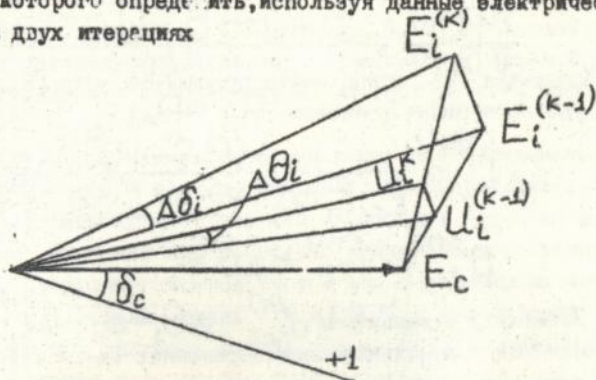


Рис. 2.

Для такой модели на соседних итерациях (k-1) и (k) справедлива векторная диаграмма, показанная на рис. 2. Из этой диаграммы следует:

$$\frac{\Delta U_i}{\Delta E_i} = \frac{X_{i-c} - X_{E_i}}{X_{i-c}}$$

$$\Delta U_i \cong U_i \Delta \theta_i / \cos \gamma \cong U_i \Delta \theta_i / \sqrt{1 - (\delta_i^{(k)} - \theta_i^{(k)})^2}$$

$$\Delta E_i \cong E_i \cdot \Delta \delta_i.$$

Следовательно

$$\alpha_{ci}^{(k)} = \frac{X_{E_i}}{X_{i-c}} = 1 - \frac{U_i \cdot \Delta \theta_i}{E_i \Delta \delta_i \sqrt{1 - (\delta_i^{(k)} - \theta_i^{(k)})^2}} \quad (8)$$

Имея выражение (8), можно для данной двухмашинной модели записать $P_{эл.i}$ в функции $\delta_i, E_c, \delta_c, E_i$.

$$P_{эл.i} = \frac{E_i E_c}{X_{i-c}} \cdot \sin(\delta_i - \delta_c),$$

а также частную производную по углу δ_i

$$\frac{\partial P_{эл.i}}{\partial \delta_i} = \frac{E_i E_c}{X_{i-c}} \cdot \cos(\delta_i - \delta_c).$$

В соответствии с диаграммой (рис.2)

$$E_c \cos(\delta_i - \delta_c) = 0B = E_i - \frac{E_i - U_i \cos(\delta_i - \theta_i)}{X_{EI} / X_{Ic}},$$

где θ_i - угол вектора напряжения U_i .

Следовательно,

$$\frac{\partial P_{Mi}}{\partial \delta_i} = \frac{E_i [E_c \alpha_{ci} - E_i + U_i \cos(\delta_i - \theta_i)]}{X_{EI}} \quad (9)$$

Используя (9), можно найти приращение угла δ_i , необходимое для удовлетворения уравнения $P_{Mi} = P_{Mi}$:

$$\Delta \delta_i^{(k+1)} = \frac{(P_{Mi}^{(k)} - P_{Mi}^{(k)}) X_{EI}}{E_i [E_c \alpha_{ci}^{(k)} - E_i + U_i \cos(\delta_i^{(k)} - \theta_i^{(k)})]} \quad (10)$$

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k+1)}$$

Поскольку в выражении $\alpha_{ci}^{(k)}$ $\Delta \theta_i = \theta_i^{(k)} - \theta_i^{(k-1)}$, $\Delta \delta_i = \delta_i^{(k)} - \delta_i^{(k-1)}$ вычисляются с использованием переменных $(k-1)$ итерации, эту операцию можно рассматривать как элемент метода секущих в конструируемом методе решения нелинейной системы:

$$X_i^{(k+1)} = \tilde{g}_i(X_i^{(k)}, \dots, X_m^{(k)}, X_1^{(k-1)}, \dots, X_m^{(k-1)}).$$

Для метода расчёта самоустанавливающегося режима, предусматривающего учёт противоаварийной автоматики, с целью обеспечения селективного (по времени) действия устройств ПА и возможного самоотключения нагрузки крайне важным является требование монотонного характера сходимости итерационного процесса.

На простейшем примере - работа синхронного генератора через реактивное сопротивление на шины $U = \text{const}$ исследованы качественные характеристики предложенного метода и показано, что он имеет в этом случае монотонную сходимость. Это качество метода создает и при расчёте сложной системы определенную основу для имитации в итерационном процессе правильной последовательности действий противоаварийной автоматики, а также постепенного отключения нагрузки при значительном снижении напряжения.

Алгоритм расчёта предусматривает также контроль ситуации, когда положительное приращение угла в i -м узле вызывает отрицательное приращение мощности генератора в этом узле. Если воз-

никает такая ситуация и затем подтверждается на следующих итерациях, то вводится ограничение механической мощности турбины в данном узле и в результате определяется режим, предельный по пропускной способности электрической сети.

Работы второго раздела [3, 14, 20, 26, 1, 17, 4, 18] посвящены вопросам формирования совокупной системы математических моделей элементов ЭЭС, модификации и алгоритмизации методов расчета переходных процессов ЭЭС.

Поскольку разрабатываемые программы имеют многофункциональное назначение, сформирована и реализована система моделей элементов ЭЭС различной сложности и точности. Для синхронных машин используются упрощенные уравнения Парка-Горева, пренебрегающие трансформаторной ЭДС. Предусматривается учет 2 или 3 демпферных контуров, а также простейшая модель $E = \text{CONST}$, учитывающая лишь динамику механического движения ротора. Форма записи уравнений обеспечивает вычисление параметров математической модели по экспериментально определенным данным.

Для описания АРВ генераторов, турбин, АРЧВ также предусматриваются простые модели - однозвенные и более сложные - двухзвенные. Для моделирования энергоблоков атомных электростанций при расчете длительных переходных процессов ЭЭС выбраны и модифицированы в сторону упрощения модели динамики теплофизических процессов, ориентированные на определение выходного параметра - давления пара перед турбиной и не учитывающие пространственного распределения динамических переменных.

Принятая модель ЭЭС для расчетов динамической устойчивости и ДШ предполагает, как обычно, пренебрежение быстропротекающими электромагнитными процессами в электрической сети и в цепях статоров синхронных машин. Такое допущение приводит к тому, что динамика энергетической системы описывается вырожденной системой -

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= F_1(x_1, x_2, t) \\ F_2(x_1, x_2) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (II)$$

АНС им. В. Стефановича
АН УРСР

где X_1 - вектор интегрируемых переменных, X_2 - вектор неинтегрируемых переменных. Соответственно, вектор-функция F_1 характеризует подсистему переменных, определяемых численным интегрированием дифференциальных уравнений, а F_2 описывает квазистационарный электрический режим ЭЭС в каждый момент времени t .

Эта особенность модели приводит при использовании явных методов численного интегрирования (метод последовательных интервалов, метод Рунге-Кутты и др.) к неодновременности решения дифференциальных и алгебраических уравнений. Исследование этой проблемы и за рубежом, и в СССР привело к выводу о целесообразности использования при расчёте динамической устойчивости неявных методов (методов прогноза и коррекции). Важно также, что неявные методы эффективны при интегрировании жестких систем дифференциальных уравнений, в решении которых имеются составляющие с сильно различающейся скоростью изменения. Такие системы возникают, когда в математическом описании объекта учитываются процессы различной физической природы и малоинерционные регуляторы. Это в полной мере относится к модели энергетической системы при расчёте ДПП.

В качестве базового метода численного интегрирования нами принят неявный метод Адамса второго порядка (называемый иногда среднеинтервальным методом), применяемый в программах расчёта динамической устойчивости. Этот метод для уравнения в форме Коши $y' = f(y, t)$ если обозначить $y_n = y(t_n)$, $f_n = f(y_n, t_n)$, имеет формулу прогноза по методу Эйлера:

$$y_{n+1}^{(0)} = y_n + h \cdot f_n,$$

в коррекции - по методу трапеции:

$$y_{n+1}^{(k)} = y_n + \frac{h}{2} (f_n + f_{n+1}^{(k-1)}).$$

Метод является самоначинаящим, т.е. не требует применения дополнительного стартового метода для расчёта предистории процесса, которая нужна в многошаговых методах, после разрывов правых частей дифференциальных уравнений. Такие разрывы вызываются внешними возмущениями в системе и управляющими воздействиями противоаварийной автоматики и значительное их количество в ходе расчёта характерно для данной задачи. Не требуется и создание и хранение в памяти ЭЕМ больших массивов информации о предистории процесса, как в многошаговых методах высокого по-

рядка.

Особенностью расчёта электромеханического переходного процесса ЭЭС является то, что его основу составляет механическое движение роторов синхронных машин под действием электромагнитного момента генератора и механического момента турбины, описываемое диф. уравнением второго порядка относительно угла ротора δ . Стандартные методы численного интегрирования требуют преобразования уравнений к нормальной форме (форме Коши), т.е. к системе уравнений, разрешенных относительно первых производных переменных. Это достигается введением промежуточной переменной - скольжения S . Учёт того обстоятельства, что фактически мы имеем дело со второй производной угла δ , позволяет модифицировать формулы прогноза и коррекции для переменных δ и S - основных переменных электромеханического переходного процесса.

Учитывая, что $d\delta/dt = S$, целесообразно использовать квадратичную формулу прогноза угла δ :

$$\delta_{n+1}^{(0)} = \delta_n + S_n \cdot h + S'_n \cdot h^2/2, \text{ где } S'_n = ds/dt. \quad (12)$$

Ценой хранения одного дополнительного массива - ускорения S'_{n-1} , интегрально отражающего влияние на механическое движение всех прочих переменных - можно ещё повысить порядок формул прогноза и коррекции. Предполагая линейную экстраполяцию ускорения, получаем формулы прогноза:

$$S_{n+1}^{(0)} = S_n + S'_n \cdot h_{n+1} + \frac{S'_n - S'_{n-1}}{h_n} \cdot \frac{h_{n+1}^2}{2}, \quad (13)$$

$$\delta_{n+1}^{(0)} = \delta_n + S_n \cdot h_{n+1} + S'_n \cdot \frac{h_{n+1}^2}{2} + \frac{S'_n - S'_{n-1}}{h_n} \cdot \frac{h_{n+1}^3}{6}. \quad (14)$$

При расчёте первого шага и шагов, следующих за воздействиями, которые приводят к разрывам правых частей, последнее слагаемое в (13) и (14) не используется.

Формула коррекций угла δ приобретает вид:

$$\delta_{n+1}^{(k)} = \delta_n + S_n \cdot h_{n+1} + S'_n \cdot \frac{h_{n+1}^2}{2} + (S_{n+1}^{(k-1)} - S'_n) \cdot \frac{h_{n+1}^2}{6}. \quad (15)$$

Повышенная точность прогноза согласно (12) или (14) соз-

дает возможность придать коррекциям угла характер контроля точности прогноза и в случаях, когда коррекции практически не уточняют прогноз, исключить после коррекций интегрируемых переменных расчёт неинтегрируемых переменных (решение подсистемы алгебраических уравнений, описывающей квазистационарный электрический режим при заданных значениях интегрируемых переменных), который составляет значительную часть общих вычислительных затрат на решение системы (II). В этом и заключается суть метода контролируемого пересчёта [4], который подтвердил свою эффективность, в особенности, при относительно низком быстродействии ЭМ.

Особенности структуры диф. уравнений, описывающих электромагнитные процессы в синхронной машине, а также их АРВ, позволяют применить численно-аналитическое решение как эффективный аппарат для интегрирования жесткой дифференциальной системы, в которой скорости различных процессов могут отличаться на 2 порядка и более.

Упрощенные уравнения Парка-Горева для синхронной машины, представленной двумя контурами- обмоткой возбуждения по продольной оси и эквивалентным демпферным контуром по поперечной оси - при наличии АРВ, описываемого апериодическим звеном, могут быть записаны в следующей форме:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_f}{dt} &= \frac{1}{T_{d0}' X_d' / X_d} \left[U_f \frac{X_d'}{X_d} + \left(1 - \frac{X_d'}{X_d}\right) U_q - \psi_f' \right] \\ \frac{d\psi_{1q}}{dt} &= \frac{1}{T_{1q\rho}' X_q' / X_q} \left[-U_d \left(1 - \frac{X_q'}{X_q}\right) - \psi_{1q} \right] \\ \frac{dU_f}{dt} &= \frac{1}{T_p} (U_p - U_f) \end{aligned} \right\} (I6)$$

(обозначения общепринятые).

Каждое уравнение системы (I6) может быть представлено в виде, допускающем приближенное аналитическое решение на шаге расчёта:

$$\frac{dy_{\text{вых}}}{dt} = \frac{1}{T} (y_{\text{вх}} - y_{\text{вых}}).$$

Если эти уравнения рассматривать независимо для каждой переменной, т.е. пренебречь их взаимными связями, то, предполагая

входную величину постоянной на шаге, можно записать формулу прогноза приращения переменной на шаге:

$$\Delta y_{\text{вых},n+1}^{(0)} = (y_{\text{вых},n} - y_{\text{вых},n}) \left(1 - e^{-\frac{h}{T}}\right) \quad (17)$$

При коррекциях используется среднее значение входной переменной на шаге:

$$\Delta y_{\text{вых},n+1}^{(k)} = \left(\frac{y_{\text{вых},n} + y_{\text{вых},n+1}^{(k-1)}}{2} - y_{\text{вых},n}\right) \left(1 - e^{-\frac{h}{T}}\right) \quad (18)$$

Эффективность метода демонстрируется таким примером: в схеме, где $T_{\text{гг}}$ генераторов были равны 0.03 - 0.08 с, $T_p = 0,1$ с при возмущении, вызывающем асинхронный ход, удовлетворительная точность расчёта получается при $h = 0.08$ с.

При использовании одночастотной модели аналогичный прием целесообразно использовать для простейшей модели АРЧВ, в которой постоянная серводвигателя T_S на порядок ниже характерного времени изменения частоты системы.

В системе (II) подсистема неинтегрируемых переменных при представлении нагрузки статическими характеристиками является системой нелинейных алгебраических уравнений, решение которой требует применения итерационных методов. Однако, СХН отражают величину нагрузки при медленных (теоретически - бесконечно медленных) изменениях режима и строго говоря неприменимы при расчёте переходного процесса. Практически в узлах системы, удаленных от места приложения возмущения и характеризующихся сравнительно небольшими колебаниями напряжения, и при относительно медленном изменении частоты можно использовать СХН, но в этом случае возможна фиксация проводимости нагрузки в расчёте квазистационарного режима на шаге переходного процесса с использованием прогнозируемого (экстраполированного) значения напряжения и частоты, что делает задачу расчёта режима линейной и допускает безитеративное её решение. С другой стороны, более адекватной моделью нагрузки является её представление динамическими характеристиками нагрузки, что означает интегрирование в узлах системы уравнений эквивалентного двигателя нагрузки. Для асинхронного двигателя его проводимость является функцией скольжения, т.е. интегрируемой переменной, и фиксирована, если скольжение задано, что приводит к линеаризации системы уравнений квазистационарного режима и делает возможным применение прямых, безитерационных методов расчёта.

Таким образом, учитывая, что генераторы при расчёте квази-стационарного режима представляются ЭДС, соответствующими электромагнитному состоянию синхронной машины в данный момент, система алгебраических уравнений в (II) записывается в следующем виде:

$$YU = GE \quad (19)$$

где Y - квадратная симметричная матрица проводимостей электрической сети, G - диагональная матрица проводимостей генераторов, за которыми прилагается ЭДС, U - вектор-столбец напряжений в узлах, E - вектор-столбец ЭДС генераторов.

Особенностью системы (19) является то, что матрица проводимостей сети очень разреженная, и алгоритмы численного решения обязательно должны учитывать это обстоятельство. Решение линейной системы (19) осуществляется методом упорядоченного исключения Гаусса. В качестве критерия упорядочения используется минимум элементов в строке на момент исключения.

При расчёте электромеханического переходного процесса ЭДС в принятой идеализации система (19) рассчитывается два раза - после прогноза и по окончании коррекций интегрируемых переменных - на каждом шаге численного интегрирования. При этом топология сети, определяющая порядок исключения переменных, остается неизменной. Это делает целесообразным выделение специального подготовительного этапа логического исключения, на котором определяется порядок исключения и формируются адресные массивы, которые затем многократно используются при фактическом исключении на исполнительном этапе прямого и обратного хода метода Гаусса.

Формируемые на подготовительном этапе массивы обеспечивают плотное хранение информации о слабозаполненной матрице на всех этапах работы с ней и операции лишь с ненулевыми элементами. Указанные массивы строятся на основе последовательного и многократного применения адресных отображений искоемых величин и образуют взаимосвязанную совокупность подмассивов элементов каждой строки, с учётом их наращивания в процессе исключения. Подчеркнем, что эффективность алгоритма обеспечивается исключением на исполнительном этапе каких бы то ни было циклов просмотра и поиска необходимых величин за счёт прямого адрес-

ного обращения к ним.

Третий раздел, основанный на работах [7,8,19,22,33], посвящен вопросам анализа живучести энергообъединений. Опыт показывает, что с ростом энергосистем обостряется проблема тяжелых системных аварий с каскадным развитием, которое приводит к массовому нарушению питания потребителей, что и определяет живучесть энергетической системы. Актуальна эта проблема и для объединенной энергосистемы Украины, имеющей развитую сеть 750 кВ и значительное количество связей с ЭЭС России и стран Восточной Европы, по которым возможно распространение аварийных процессов.

Автор разделяет мнение, что живучесть систем энергетики является единичным свойством в рамках комплексного свойства "надежность". Живучесть энергосистем, как и их устойчивоспособность, должна определяться на множестве возмущений, но в отличие от последнего рассматриваются возмущения, имеющие экстремальный, каскадный характер. Каскадное развитие обобщается нами как характеристика трех типов аварийных процессов: 1) каскадные отключения элементов ЭЭС (линий, трансформаторов и т.п.), вызванные последовательно возникающей перегрузкой и превышением уставок других защит и автоматик; 2) каскадные отказы устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики, которые должны действовать для локализации первичного и вообще предшествующих отказов; 3) наложение внешних отказов в период, когда не устранены последствия предыдущих воздействий (это множественные отказы природного или преднамеренного происхождения). Первый тип развития имеет детерминированный характер (при заданном первичном воздействии), второй - вероятностный (он связан с вероятностью отказа устройств защиты и автоматики при требовании функционирования), третий тип имеет неопределенный характер развития. В реальных авариях указанные типы развития аварий могут комбинироваться.

В случае воздействий неопределенного типа в качестве меры живучести принимают наихудший случай функционирования. Математически это формулируется так: если $\Phi(E_i)$ - показатель качества (эффективности) функционирования системы при воздействии E_i , то показатель живучести системы $L(E)$ для множества возможных внешних воздействий E имеет вид:

$$L(E) = \min_{e_i \in E} \Phi(e_i) \quad (20)$$

Предельно допустимый уровень живучести связывает с требованием предотвращения аварий с катастрофическими последствиями экологического, экономического или социального характера, которые могут быть вызваны полным погашением энергосистемы или значительной её части.

Учитывая сложность физических процессов в ЭЭС и необходимость учёта дискретных устройств противоаварийного управления, существенных для развития аварий, эффективным средством анализа живучести энергообъединений является имитационное моделирование, понимаемое как специально организованные вычислительные эксперименты на ЭВМ с цифровой математической моделью, которая с необходимой для практических целей полнотой отражает свойства и особенности сложных энергообъединений в аспекте их живучести. Имитационное моделирование допускает задание возмущений и отказов любым способом: статистически, по заранее заданному сценарию или эргатически, с активным участием человека в процессе вычислительного эксперимента, а также комбинированием этих способов. В основе имитационной модели для анализа живучести ЭЭС – расчёты переходных режимов, включающие расчёт ДПП и самоустанавливающихся послеаварийных режимов. Большой объём вычислений в случае имитационного моделирования делает особенно актуальной задачу эффективного математического моделирования ЭЭС как сложного динамического объекта.

Особенности ЭЭС в переходных режимах делают целесообразным использование для этой цели описанной в первом разделе адаптивной модели динамики ЭЭС.

Таким образом, первым принципом методики анализа живучести энергообъединений является необходимость использования имитационного моделирования, обеспечивающего удовлетворительную точность представления динамики энергетических систем и возможность достаточно полного учёта отказов релейной защиты, противоаварийной автоматики и коммутационных аппаратов на основе расчётов переходных режимов ЭЭС.

В качестве второго принципа методики предложена ориента-

ция на эргатический сценарно-вероятностный подход к анализу живучести. Суть его заключается в том, что вид, место, величина и последовательность внешних возмущений и отказов элементов системы отчасти задаются заранее, отчасти - в ходе расчёта, на основании анализа технологом промежуточных результатов, а частота результирующих аварийных ситуаций определяется на основе частоты первичных возмущений и вероятностей вторичных отказов (возмущений). Таким образом, предложенный подход ориентирован на возмущения и отказы вероятностного характера и по существу является развитием методики анализа надёжности ЭЭС в части более полного учёта вторичных отказов и динамики взаимодействия элементов ЭЭС.

Оценка живучести ЭЭС осуществляется на заданном множестве возмущающих воздействий. Имея в виду, что основная цель анализа живучести - выявление случаев достижения системой некоторых предельных по уровню функционирования состояний, а с другой стороны целесообразно сократить объём выполняемых расчётов, в качестве начальных возмущений выбирают из полного множества всех возможных воздействий на систему лишь наиболее тяжёлые.

Анализ ретроспективной статистической информации о системных авариях в СССР показывает, что в наиболее масштабных системных авариях обязательно наличие, наложение 3-4 отказов из числа тех, которые можно назвать тяжёлыми (включая также фактор утяжеления исходного режима из-за пониженного запаса устойчивости или из-за внеплановых выходов в ремонт большого количества оборудования): первичное возмущение такого вида и величины, которое приводит к нарушению устойчивости или снижению частоты в отделившемся районе; отказ одной из основных защит; отказ одного из основных выключателей; отказ или отсутствие автоматики предотвращения нарушения устойчивости; отказ автоматики ликвидации асинхронного режима; отказ (недостаточность) автоматики частотной разгрузки; грубые ошибки оперативно-диспетчерского персонала, эквивалентные по своим последствиям выше перечисленным отказам.

С учётом сказанного, предложено сценарии для анализа живучести энергообъединений формировать с помощью тяжёлых отказов из списка, приведенного выше, используя в качестве норматива как наиболее достоверную статистическую информацию о каскад-

ных авариях - 3 последовательных отказа в цепочке. Место приложения и вид первичного возмущения (отказа), а также второго отказа задается технологом до выполнения расчёта, а третий отказ - как правило, на основании анализа ситуации после расчёта динамики при 2 отказах.

Третий принцип методики связан со способом количественной оценки уровня живучести ЭЭС в условиях значительной неопределенности исходной информации - относительной продолжительности представительных режимов (Трех); вероятностных характеристик (частот) первичных и зависимых отказов (ω), величины удельного ущерба, используемых для расчёта математического ожидания ущерба при вероятностных оценках надёжности. В связи с этим оценка уровня живучести должна проводиться с позиций многокритериального анализа, предполагающего несводимость отдельных критериев формальным путем к одному критерию и преодолевающего эту принципиальную особенность задачи введением в процедуру решения лица, принимающего решение. Это тем более необходимо, что в условиях оценки живучести характерной является ситуация, когда результирующая величина (мат. ожидание ущерба) является произведением очень малой величины частоты некоторого события на очень большую величину ущерба, вызванного этим событием. Возможны также события (каскадные аварии), которые приводят к неприемлемому ущербу, с которым необходимо считаться даже для весьма редких событий. Поэтому предложено оценку уровня живучести производить по совокупности параметров Трех, ω , а также ΔP_H - величине аварийно отключаемой нагрузки. Предложено для количественной оценки живучести ЭЭС, определяемой на полном множестве возмущений и отказов, употреблять термин "уровень живучести", а для характеристики конкретной цепочечной аварии - "параметр живучести", что делает правомерным и словосочетание "нарушение живучести", характеризующее ситуацию достижения параметром живучести предельного значения. При заданном множестве внешних воздействий уровень живучести ^{изменяется при} изменении структуры ЭЭС и надёжности её элементов (включая и систему управления). А параметр живучести ЭЭС в конкретной ситуации зависит от места, вида и величины возмущения и состава отказов в цепочке развития аварии. Таким образом, соотношение терминов "уровень живучести" - "параметр живучести" подобно ^{со-}от-

ношению терминов "устойчивоспособность" - "динамическая устойчивость".

Для количественной характеристики и наглядного представления процесса изменения параметра живучести при определенном сценарии развития аварии предложены показатели живучести и записано обобщенное дискретное уравнение динамики функционирования ЭЭС при последовательных отказах. В качестве меры снижения уровня функционирования после i -го отказа ΔF_i принята величина нагрузки, отключаемой вследствие отказа, отнесенная к суммарной активной нагрузке системы в исходном режиме P_c . Предлагается ввести в рассмотрение понятие "тяжесть отказа" ΔH_i , измеряемую активной мощностью, протекающей по силовому элементу энергосистемы (генератору, трансформатору, линии, выключателю) перед его отказом, также отнесенной к P_c .

Принимая, в соответствии с сутью понятия живучести, характеризующего эскалацию аварийного процесса, в качестве меры неживучести разность между снижением уровня функционирования и тяжестью вызвавшего его независимого отказа, для i -го отказа в M -й комбинации отказов (т.е. для M -го сценария развития аварии), записывается уравнение динамики функционирования:

$$\Delta F_{i(m)} = \Delta H_{i(m)з} - \Delta R_{i(m)} + \Delta G_i, \quad i = 1, 2, \dots, \tau, \quad (21)$$

где i - номер отказа, τ - количество отказов в цепочке, $\Delta H_{i(m)з}$ - тяжесть независимого отказа, $\Delta R_{i(m)}$ - мобилизованный резерв, $\Delta G_{i(m)}$ - мера неживучести. Это уравнение обобщает следующие определения $\Delta G_{i(m)}$ и $\Delta R_{i(m)}$:

$$\Delta G_{i(m)} = \begin{cases} \Delta F_{i(m)} - \Delta H_{i(m)з}, & \text{если } \Delta F_{i(m)} > \Delta H_{i(m)} \\ \Delta H_{i(m)з}, & \text{если } \Delta F_{i(m)} \leq \Delta H_{i(m)} \end{cases} \quad (22)$$

$$\Delta R_{i(m)} = \begin{cases} \Delta H_{i(m)} - \Delta F_{i(m)}, & \text{если } \Delta F_{i(m)} < \Delta H_{i(m)} \\ 0, & \text{если } \Delta F_{i(m)} \geq \Delta H_{i(m)} \end{cases} \quad (23)$$

Здесь $\Delta H_{i(m)з}$ - тяжесть зависящего отказа. Принимается, что если i -й отказ является независимым, то $\Delta H_{i(m)} = \Delta H_{i(m)з}$ и $\Delta H_{i(m)з} = 0$; если i -й отказ является зависимым, то $\Delta H_{i(m)} = \Delta H_{i(m)з}$

и $\Delta H_{i(m)H3} = 0$. Если в режиме, возникшем в результате i -го отказа, перегрузка элементов ЭЭС или другие отклонения превышают допустимые, то $\Delta R_{i(m)} = 0$.

Обозначим величину параметра резервирования и параметра живучести для конкретной m -й цепочки, состоящей из τ последовательных воздействий и отказов, R_m и G_m , определив

$$R_m = 1 + \sum_{i=1}^{\tau} \Delta R_{i(m)} = G_0(m), \quad (24)$$

где $G_0(m)$ рассматривается как начальное значение параметра живучести, $\sum \Delta R_{i(m)}$ как запас живучести.

В результате получаем

$$G_m = \begin{cases} G_0(m) - \sum \Delta H_{i(m)} & \text{при } \Delta F_{i(m)} = 0, \\ 1 - \sum \Delta G_{i(m)} & \text{при } \Delta F_{i(m)} > 0. \end{cases} \quad (25)$$

Согласно (25) определяется параметр живучести ЭЭС при заданной цепочке отказов (в частности, при ретроспективном анализе). А уровень живучести, определяемый на заданном множестве возмущений и отказов при неопределенных множественных воздействиях характеризуется наибольшим возможным развитием аварий, т.е.

$$G(\tau) = \min \{ G_m \} \quad (26)$$

Наряду с G_m предложены производные показатели живучести для конкретного сценария развития аварии:

Коэффициент развития отказов $K_{po} = \sum \Delta H_{iH3} / \sum \Delta H_{iH3}$,

Коэффициент результирующего развития аварии

$$K_{pp} = \sum \Delta G_i / \sum \Delta H_{iH3}$$

коэффициент мобилизации резерва $K_p = \sum \Delta R_i / R_{расп}$, где $R_{расп}$ - располагаемый резерв.

Если $K_{pp} > K_{po}$, значит, имеется дополнительное скрытое развитие отказа (например, АЧР отключает больше нагрузки, чем возник дефицит). Если $K_{pp} < K_{po}$, значит, имеется дополнительная мобилизация резерва (например, за счёт допустимой перегрузки элементов).

В работах четвертого раздела [28,32,33,34] обоснованы принципы построения и общая структура режимного тренажера диспетчеров энергосистем на основе ЭВМ. Готовность диспетчерского персонала к правильным и эффективным действиям в сложных

аварийных ситуациях является важным элементом обеспечения надежности и живучести энергообъединений. Редкость тяжелых аварий не позволяет диспетчеру получить необходимый для этого опыт в практике реального управления энергосистемой, что определяет актуальность разработки противоаварийных тренажеров. Прогресс вычислительной техники сделал возможным ориентацию в создании диспетчерских тренажеров на серийно выпускаемые ЭВМ. При создании средств для тренировки диспетчеров должны быть учтены особенности оперативной деятельности диспетчера, а также энергосистемы, как объекта управления. В деятельности диспетчера энергосистемы основными являются не моторные действия, а навыки оперативного мышления - оценка оперативной ситуации на основе электронной информации оперативно-информационного комплекса, показаний измерительных приборов диспетчерского пункта, сигнализации на диспетчерском щите и сообщений подчиненного персонала, затем принятие решения, актуализация (или построение) алгоритмов действий и их реализация. Таким образом, противоаварийный тренажер диспетчера энергосистемы - это прежде всего тренажер принятия решений. Во-вторых, управление объектом осуществляется путем отдачи распоряжений персоналу электростанций и подстанций, т.е. в вербальной форме. В-третьих, в аварийных режимах, вызванных внезапными большими воздействиями на энергосистему (отключение линии электропередачи, энергоблока, мощной нагрузки), динамика системы характеризуется наличием быстропротекающей, автоматически управляемой фазы процесса, которая не только протекает без вмешательства диспетчера, но нередко и воспринимается им лишь по своим последствиям.

Учитывая особенности задачи, предложено разделять этапы подготовки тренировки и собственно тренировки, поскольку требования к быстрдействию моделирующей системы на первом этапе не являются такими жесткими, как на втором этапе. Поэтому на этапе подготовки тренировки можно использовать наиболее полные и корректные модели ЭЭС, включая и противоаварийную автоматику. Здесь выполняется расчёт начальной, автоматически управляемой фазы процесса, а также расчёт последующих состояний системы, соответствующих ожидаемым наиболее оптималь-

ным действиям диспетчера по локализации аварии и восстановлению режима системы. Эти состояния запоминаются, и в том случае, когда в процессе тренировки диспетчер действует в соответствии с предположениями лица, готовившего тренировку, информация о них может быть немедленно выдана диспетчеру как материал для дальнейших действий. А для моделирования ЭЭС на этапе собственно тренировки в случае действий тренируемого диспетчера, отличающихся от намеченных при подготовке, но допустимых, используются расчёты самоустанавливающихся режимов с имитацией действия противоаварийной автоматики [33]. Эффективный метод решения и программная реализация обеспечивают необходимое для практики быстроедействие.

С этим связан второй принцип построения тренажера: выдача диспетчеру информации при тренировке не в темпе реального процесса (доли секунды, секунды), а в темпе управления (десятки секунд, минуты), т.е. представление непрерывного процесса в виде дискретной последовательности состояний ЭЭС, которыми являются послеаварийные режимы или (реже) квазиустановившиеся электрические режимы как временные фазы медленного переходного процесса, сопровождающегося изменением частоты системы.

Сказанным выше определяется третий принцип: использование в тренажере методов моделирования и расчёта на единой информационной и методической основе переходных режимов ЭЭС, включающих, наряду с процессами, определяющими динамическую устойчивость, длительные переходные и самоустанавливающиеся послеаварийные режимы. Фактически это то же программное обеспечение, которое используется в диспетчерских службах при планировании режимов и настройке противоаварийной автоматики. Этим обеспечивается интегрированность тренажера в систему автоматизированного диспетчерского управления энергосистемы или энергообъединения.

Четвертый принцип касается способа организации работы диспетчера на тренажере. Не прибегая к прямому воспроизведению в тренажере диспетчерского инеомощита, для приближения условий тренировки к реальной обстановке целесообразно сохранить для диспетчера реальный телефонный коммутатор, на приемном конце которого роль подчиненного персонала исполняет специальное лицо - оператор тренажера. Благодаря этому во время трениров-

ки, вызывающей у тренируемого большие профессиональные и психические напряжения, диспетчер освобождается от не свойственных его практической деятельности функций общения с ЭВМ, моделирующей энергосистему. Эти функции выполняет оператор тренажера, хорошо владеющий средствами ввода-вывода информации тренажера. Вместе с тем, язык общения с ЭВМ предусматривается предельно простой и естественный, с возможностью помощи-подсказки, что обеспечивает также режим самообучения диспетчера, без привлечения других лиц.

В работах пятого раздела [3,9,15,21,13,2,24,27,34] освещены вопросы программной реализации разработанных моделей элементов ЭЭС и методов расчёта динамической устойчивости, длительных переходных процессов и самоустанавливающихся послеаварийных режимов. Описанные выше модели и методы были реализованы в программах расчёта на ЭВМ III поколения: динамической устойчивости сложных ЭЭС - УД.Р - 2,3,4; переходного процесса в ЭЭС при внезапно возникшем небалансе мощности - ЧАСТОТА-2; объединенном комплексе УДАЧА-3; комплексах расчёта переходных и самоустанавливающихся режимов АВР-3,13,14. Различаясь функциональными возможностями, эти программы реализуют общий принцип формирования модели динамики системы для конкретного расчёта из широкого набора различных по сложности моделей синхронных машин, их систем автоматического регулирования возбуждения и скорости (частоты вращения), парогенераторов (котла или атомных реакторов), комплексной нагрузки в узлах электрической сети, а также устройств противоаварийной автоматики

Модель динамики ЭЭС формируется программой "Базис", входящей в состав комплексов, на основе задания на моделирование, записанного с помощью специализированного входного языка, приближенного к естественному. Информация о параметрах синхронных машин (которая, как и вся прочая, может храниться в базе информационно-вычислительной системы для решения электротехнических задач) привязана к узлам расчётной схемы ЭЭС; параметры АВР, АРС, парогенераторов, статических и динамических характеристик нагрузки, обозначаются цифровым шифром-номером типа характеристики; устройства противоаварийной автоматики, имеющие заданную пользователем логическую структуру, в соответствии с которой задаются численные значения парамет-

ров (уставок, выдержек времени и т.п.), имеют имя, привязывающее к определенной структуре, и номер набора параметров.

Формальное определение текста задания имеет вид:

<Модель системы> ::= <Набор предложений>

<Набор предложений> ::= <предложение - комментарий> |
<предложение - модель группы элементов системы>...

<Предложение - комментарий> ::= * <ТЕКСТ>

{ <Предложение - МОДЕЛЬ> ::= <тип модели> [(<шифр>)]
{ <Список узлов> } | { <номера автоматики> } } [<комментарий>]
<тип модели> ::= <модель СМ> | <автоматика> | <АРВ> |

<АРС> | <нагрузка> | <котлы>

<модель СМ> ::= Е = CONST † УПРОЦ † УПРОЦ 2ДК † ШИНЬЕМ

<автоматика> ::= АВТ

<АРВ> ::= СВ = CONST † СДЧ † НДИ † РВ † РВР

<АРС> ::= Р = CONST † АРС1 † ПТ2 † ГТ2

<нагрузка> ::= ZH = CONST † S = CONST † СХН † ДХН

<КОТЛЫ> ::= ВВЭР † РЕМК † ПК † БК

<ШИФР> ::= <ц.число> † <имя автоматики>

<список узлов> ::= <ц.число> † <ц.число - ц.число>

[<ц.число>] ...

<номера автоматики> ::= <ц.число> † [<ц.число>] ...

<имя автоматики> ::= <идентификатор> | ВСЕ

Использование этого языка позволяет в компактной, удобной и наглядной форме задавать модели различных элементов. Типы моделей могут задаваться в произвольном порядке - синтаксически это допустимо. С точки зрения семантики, новыми предложениями может осуществляться доопределение комплексной модели в узле. Новое предложение с моделью того же типа, что и в ранее описанной модели для этого же узла, подавляет его.

Программа "Базис", выполнив логическое исключение узлов для расчёта по Гауссу квазистационарного электрического режима на шаге переходного процесса, строит информационно-математическую модель, на основе которой осуществляется быстрый расчёт режима на шаге. В программах УДАР-2, АВР-3 предварительным исключением исходная схема сокращалась до 200 (максимум) активных узлов, учитываемых в явном виде при расчёте переходного процесса. В программах УДАР-3, ЧАСТОТА-2 и АВР-13 количество активных узлов было увеличено до 500. Комплексы УДАР-4

и АВР-14 не имеют программного ограничения количества узлов; максимальное количество узлов генерации - 200.

Комплекс УДАЧА-3, объединивший программы УДАР-3 и ЧАСТОТА-2 [9], был включен в состав разработанной в ИЭД АПУ информационно-вычислительной системы для решения электротехнических задач планирования режимов ИЭС "Энергосистема" [2,24]. Решение в ИЭС задач на единой информационной базе, с использованием специализированного входного языка высокого уровня, который управляет средствами укрупненного преобразования исходной информации и позволяет в пределах одного задания организовать любые цепи программы для выполнения многовариантных и многоэтапных расчётов [27], имело целью экономию труда инженерного персонала технологических служб энергосистем, сокращение времени, требуемого для получения решения.

Появление в СССР в последние годы персональных ЭВМ достаточно высокой производительности явилось одной из причин постепенного перехода к АСУ нового поколения [34]. Максимально используя опыт разработки программного обеспечения для ЭВМ III поколения, мы разработали [32,33] и внедрили первые версии программы для ПЭВМ: АВР-40 расчёта нормального и самоустанавливающегося послеаварийного режима; АВР-41 - расчёта послеаварийного режима с учётом действия противоаварийной автоматики (программа - прототип режимного тренажера диспетчера энергосистемы); АВР-50 - расчёта динамической устойчивости сложных ЭЭС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основе разработанной адаптивной модели динамики ЭЭС, модифицированных методов и эффективных алгоритмов решения на ЭВМ реализован единый подход к расчёту переходных процессов и послеаварийных самоустанавливающихся режимов ЭЭС и решена научная задача создания соответствующего математического, методического и программного обеспечения, имеющая важное народно-хозяйственное значение для повышения устойчивости и живучести энергообъединений.

При этом получены следующие основные результаты.

I. В качестве дальнейшего обобщения теории переходных

процессов ЭЭС разработан аппарат для расчёта в едином комплексе переходных режимов ЭЭС, объединяющих процессы взаимного движения синхронных машин, их общего движения при небалансе мощности и установление послеаварийного режима.

Адаптивная модель динамики ЭЭС в переходных режимах предусматривает выявление в ходе расчёта на ЭВМ существенных характеристик переходного процесса и автоматический переход от модели, учитывающей индивидуальное движение синхронных машин, к многочастотной или одночастной модели ЭЭС и обратно, а также использование простейшей модели динамики ЭЭС. Реализация такого подхода позволяет применять на каждой стадии переходного процесса или в каждом конкретном расчёте наиболее адекватную модель, за счёт чего существенно (на порядок) сокращается время расчёта и ограничивается вычислительная погрешность.

2. Предложена и реализована модель послеаварийного режима (МНР) ЭЭС как режима, самоустанавливающегося по частоте и напряжению с учётом статизма автоматических регуляторов частоты вращения и возбуждения генераторов, с учётом таких его особенностей как возможность деления системы на электрически не связанные подсистемы, а также самоотключений нагрузки при значительных и длительных снижениях напряжения.

Для решения соответствующей МНР системы нелинейных алгебраических уравнений с ограничениями сконструирован метод, представляющий модификацию метода простой итерации с элементами метода секущих. Основой метода является формирование и использование на каждой итерации для каждого генератора двухмашинной модели системы. Особенностью метода является возможность выявления необходимости и учёта в ходе расчёта ограничения выдачи мощности станций по пропускной способности электрической сети и получение на этой основе гарантированного решения при любых реальных возмущениях (воздействиях).

3. Сформирована система моделей элементов ЭЭС для анализа переходных режимов энергообъединений, которая в совокупности является жёсткой дифференциальной системой вырожденного типа. Для синхронных машин, их систем автоматического регулирования частоты вращения и возбуждения используется ряд моделей возрастающей сложности.

Разработан входной язык описания модели динамики энергосисте-

мы, обеспечивающий наглядную, удобную и компактную запись и возможность легко изменять полноту моделирования элементов ЭЭС.

4. В качестве основной модели нагрузки выбраны динамические характеристики, что позволяет, уточняя модель по сравнению со статическими характеристиками нагрузки, одновременно описывать квазистационарный режим ЭЭС на шаге переходного процесса системой линейных алгебраических уравнений.

Расчёт линейной системы осуществляется методом упорядоченного исключения Гаусса. Разработанный алгоритм расчёта реализует эффективную процедуру операций со слабозаполненными матрицами на основе многократного применения адресных отображений используемых величин.

5. Для решения системы дифференциальных уравнений переходного процесса ЭЭС выбран и модифицирован неявный метод Адамса второго порядка. Повышен порядок формул прогноза и коррекции угла ротора и скольжения синхронных машин. Это имеет особое значение для решения совместной системы, так как угол ЭДС является основной переменной электромеханического переходного процесса ЭЭС, которая связывает подсистему дифференциальных уравнений с подсистемой алгебраических уравнений электрической сети. Для отдельных уравнений, описывающих аperiodическое звено с малой постоянной времени - АРВ, поперечный демпферный контур, осуществляется численно-аналитическое решение, что позволяет эффективно интегрировать систему в целом.

6. Обоснованы принципы методики анализа живучести энергообъединений, предусматривающей:

1) необходимость использования имитационного моделирования, обеспечивающего удовлетворительную точность представления динамики энергосистем и системы противоаварийного управления на основе эффективных расчётов переходных режимов ЭЭС; 2) ориентацию на эргатический сценарно-вероятностный подход, существенным элементом которого является формирование сценариев как цепочек отказов заданной длины, состоящих из так называемых тяжелых отказов, с включением человека в процедуру генерации цепочек; 3) оценку уровня живучести с позиций многокритериального анализа, предполагающего в окончательном решении отдельный учёт ряда количественных показателей: относительной про-

должительности режима, частоты аварий, средневзвешенного ущерба, в особенности — неприемлемого.

На основе анализа статистики системных аварий в СССР предложен норматив для проверки живучести энергосистем — 3 тяжелых отказа в цепочке, включая утяжеление исходного режима — работу с пониженными запасами устойчивости.

7. Предложены показатели живучести ЭЭС, основанные на определении меры неживучести как разности величин снижения уровня функционирования и тяжести вызвавшего его независимого отказа. Как обобщение такого определения записано дискретное уравнение функционирования ЭЭС при отказах, которое позволяет наглядно представить динамику развития аварийного процесса при конкретной аварии.

8. Разработаны принципы построения режимного тренажера диспетчера энергосистемы (энергообъединений) на основе ЭЕМ. В программном обеспечении тренажера выделяется подсистема, используемая на этапе подготовки тренировки с применением достаточно полных моделей ЭЭС, и подсистема, которая используется на этапе собственно тренировки, где допустимо применение упрощенных моделей. Последнее позволяет при эффективной программной реализации обеспечить быстроедействие тренажера в темпе оперативного управления.

Используемый в тренажере метод расчёта самоуставляющегося режима ЭЭС с монотонным характером сходимости обеспечил возможность создания модификации программы, предусматривающей в ходе итерационного расчёта учёт противоаварийной автоматики, действующей по параметрам стационарного или квазистационарного электрического режима (перетоки мощности, напряжение, токи, частота).

9. Разработанные модели, методы и алгоритмы реализованы в комплексах программ для расчёта и анализа динамической устойчивости, переходных режимов и живучести сложных ЭЭС в составе программного обеспечения автоматизированных систем диспетчерского управления и систем автоматизации проектирования энергосистем. Программы внедрены в 6 Объединенных диспетчерских управлениях, 10 производственных энергетических объединениях, в институте "Энергосетьпроект" (г.Москва) и 2 его отделениях, Всесоюзном электротехническом институте.

Основные публикации по теме диссертации.

1. Авраменко В.Н. Вопросы повышения оперативности и точности анализа динамической устойчивости энергосистем. - Киев, 1976. - 46с. - (Препр. /АН УССР, Ин-т электродинамики, № 129).
2. Цукерник Л.В., Авраменко В.Н., Жаглин В.Ф. Разработка и внедрение математического обеспечения ЦЭМ для расчётов нормальных и аварийных режимов сложных энергосистем. - Киев, 1981. - 10с. - (Препр. /АН УССР, Ин-т электродинамики, № 248).
3. Авраменко В.Н., Оляничин В.А., Стогий В.С. Анализ электромеханических переходных процессов и работы противоаварийной автоматики ЭЭС с помощью программы Института электродинамики АН УССР (методические указания) - Киев: Наук. думка, 1982. - 60с.
4. Авраменко В.Н. Развитие метода расчёта электромеханических переходных процессов сложных энергосистем // Техн. электродинамика, - 1981, - № 2, - с. 87-92.
5. Авраменко В.Н. Моделирование на ЭЕМ электроэнергетической системы в переходных режимах. // Проблемы нелинейной электротехники: Тез. докл. II Всесоюз. н.-т. конф. - Киев: Наук. думка, 1984, - с. 5 - 7.
6. Щербина Ю.В., Авраменко В.Н., Лизалек Н.Н. Имитационное моделирование длительных переходных процессов в энергетических системах // Вычисл. средства имитационного моделирования больших систем энергетики: Сб. науч. тр. - Иркутск: СЭИ, 1986, - с. 143-152
7. Авраменко В.Н. Об анализе живучести энергосистем // Вопросы надежности при эксплуатации и управлении развитием энергосистем: Сб. науч. тр. - Л.: Энергосатомиздат, Ленингр. отд., 1986, - с. 59-67.
8. Авраменко В.Н. Принципы методики анализа живучести энергообъединений на основе расчётов переходных режимов ЭЭС // Надежность при управлении развитием и функционированием электроэнергетических систем: Сб. науч. тр. - Иркутск: СЭИ СО АН СССР, 1989, - с. 192-200.
9. Авраменко В.Н. Моделирование сложных электроэнергетических систем при расчётах на ЭЕМ динамической устойчивости и переходных режимов // Эксплуатация электроэнергетических систем и управление ими: Доклады от СССР (дополн.) на Международном семинаре по сравнению моделей планирования и эксплуатации эл. э.н. систем, группа тем № 3. - М.: Информэнерго, 1987, - с. 1-16.
10. Авраменко В.Н. Моделирование самоустанавливающегося режима электроэнергетической системы // Моделирование электроэнергетических систем: Тез. докл. IX Всесоюз. н.-т. конф. - Рига: Физико-энерг. ин-т, 1987, - с. 375-376.
11. Авраменко В.Н. Единый подход к моделированию длительных переходных процессов и послеаварийных режимов ЭЭС // Проблемы нелинейной электротехники: Тез. докл. III Всесоюз. н.-т. конф. ч. II Киев: ИЭД АН УССР, 1988, - с. 11-13.
12. Авраменко В.Н. Расчёт длительных переходных процессов в энергосистемах на основе математической модели системы переменного тока // Математическое моделирование в энергетике: тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф.: В 4ч. - Киев: Ин-т пробл. моделирования в энергетике АН УССР, 1990, - ч. I, с. 11-12.
13. Цукерник Л.В., Авраменко В.Н., Коробчук К.В., Крылов В.А. Математическое моделирование сложных электроэнергетических систем при расчётах на ЭЕМ устойчивости и токов коротких замыканий // Моделирование электроэнергетических систем:

Тез. докл. УП Всесоюз. н.-т. конф. -Таллинн: ТПИ, 1977. - с. 118-119.

14. Авраменко В.Н., Савченко Е.В., Стогний В.С. Система моделей АРВ и АРС для расчётов на ЦЭМ электромеханических переходных процессов энергосистем //Проблемы техн. электродинамики. - Киев, 1978. - Вып. 65. - с.

15. Авраменко В.Н., Коджа М.И., Стогний В.С., Янкима А.А. Реализация модульного принципа в программе анализа электромеханического переходного процесса УДАР-2 //Моделирование и автоматизация электроэнергетических систем: Сб. науч. тр. -Киев: Наук. думка, 1978, - с. 41-46

16. Авраменко В.Н., Олянишим В.А. Методика анализа длительных электромеханических переходных процессов энергосистемы при возмущениях, приводящих к большим изменениям частоты. //Применение вычислительной техники и автоматизации в электроэнергетических системах: Сб. науч. тр. -Киев: Наук. думка, 1980, -С. 3-14

17. Цукерник Л.В., Авраменко В.Н. Развитие методов машинного анализа динамической устойчивости энергосистем и переходных процессов при больших возмущениях //Проблемы нелинейной электротехники, - Киев: Наук. думка, 1981. - с. 12-14 (Тез. докл. Всесоюз. н.-т. конф. ч. I)

18. Авраменко В.Н., Олянишим В.А. Расчёт электромеханического переходного процесса в энергосистеме с использованием численно-аналитического метода. //Анализ нормальных и аварийных режимов электроэнергетических систем: Сб. науч. тр. -Киев: Наук. думка, 1982 - с. 40-44.

19. Авраменко В.Н. Критерий оценки живучести энергосистемы //Исследование длительных переходных процессов энергосистем: Тез. докл. Всесоюз. н.-т. совещания - Новосибирск: СибНИИЭ, 1982, - с. 67-69.

20. Авраменко В.Н., Васецкий В.М., Олянишим В.А. Моделирование АЭС при расчётах электромеханических переходных процессов энергосистем //Моделирование электроэнергетических систем: Тез. докл. УП Всесоюз. н.-т. конф., ч. П. -Баку: АЗИНВТЕХИМ, 1982, - с. 236-237.

21. Авраменко В.Н., Олянишим В.А., Стогний В.С., Янкима А.А. Комплекс программ для анализа динамической устойчивости и переходных режимов энергосистем //Энергетика и электрификация, 1984, - № 4. - с. 46-48

22. Авраменко В.Н., Стогний В.С. Расчёт послеаварийного режима как элемент анализа живучести //Вопросы устойчивости и надёжности энергосистем СССР: Тез. докл. Всесоюз. н.-т. совещания (Ташкент, май 1984) - Д.: ИТОЭиЭП Центр. правд., 1984, - с. 74-75.

23. Авраменко В.Н., Лизалек Н.Н., Щербина Ю.В. Имитационные моделирование длительных переходных процессов в энергетических системах //Имитационный подход к исследованию систем энергетики: Тез. докл. УП Всесоюз. н.-т. семинара - Иркутск: СЭИ СО АН СССР, 1985, - с. 60-62.

24. Цукерник Л.В., Авраменко В.Н., Жарким В.Ф., Ярославцев А.А. Информационно-вычислительная система для планирования режимов электроэнергетических систем на ЕС ЭЕМ //Имитационный подход к исследованию систем энергетики: Тез. докл. УП Всесоюз. н.-т. семинара - Иркутск: СЭИ СО АН СССР, 1985 - с. 57-58

25. Авраменко В.Н., Олянишим В.А. Система моделей динамики электроэнергетической системы для анализа электромеханических переходных процессов //Применение вычислительной техники для комплексного анализа режимов электроэнергетических систем:

Сб. науч. тр. - Киев: Наук. думка, 1985 - с. 12-20

26. Авраменко В.Н. Адаптивная модель электроэнергетической системы в переходных режимах // Современ. проблемы энергетики: Тез. докл. IV респ. н.-т. конф. Секция эл. сетей и автоматизации энергосистем. Киев: ИЭД АН УССР, 1985 - с. 18-19

27. Цукерник Л.В., Авраменко В.Н., Кузьмин И.А., Колесников С.В. Автоматизация многовариантных и многоэтапных расчётов на ЭЭМ при анализе и оптимизации режимов энергосистем // Современные проблемы энергетики: Тез. докл. IV Респ. н.-т. конф. Секция эл. сетей и автоматиз. эл. систем Киев: ИЭД АН УССР, 1985, - с. 38-39

28. Авраменко В.Н., Самолюк В.Д., Сметана С.И., Твердыков ВВ. Автоматизированный режимный тренажер на основе ЭЭМ для диспетчерского персонала энергосистем // Электронное моделирование. - 1986. - № 5 - с. 63-66.

29. Авраменко В.Н., Моделирование переходных и послеаварийных режимов при краткосрочном планировании режимов ЭЭС // Автоматизированные системы диспетчерского управления в энергетике: Тез. докл. Всесоюз. н.-т. совещания - М.: Совтехэнерго, 1986. - с. 48-49

30. Авраменко В.Н., Ройтельман И.Г. Исследование модели электроэнергетической системы для расчёта длительных переходных процессов // Техн. электродинамика. - 1988. - № 1. - с. 75-78.

31. Авраменко В.Н., Бегус Н.Г., Прихно В.Л. Комплекс программ для проверки запасов устойчивости при краткосрочном планировании режимов ЭЭС // Тез. докл. к Всесоюз. н.-т. совещ. "Вопросы устойчивости и надежности энергосистем СССР" (Душанбе, июнь 1989г.) - Л. ВНТОЭиЭ, 1989 - с. 44-45.

32. Авраменко В.Н., Бегус Н.Г., Кравчук С.Г. Расчёт на ПЭМ послеаварийных режимов ЭЭС для тренировки диспетчеров энергосистемы // Микропроцессорные системы управления электроэнергетическими объектами: Матер. I Всесоюз. н.-т. конф., ч. I - Киев: ИЭД АН УССР, 1990, - с. 131-136.

33. Авраменко В.Н., Бегус Н.Г., Гуреева Т.М. Моделирование ЭЭС в режимном тренажере диспетчера энергосистемы на основе ПЭМ // Моделирование электроэнергетических систем: Тез. докл. X научн. конф. - Каунас: ИЭТЭ АН Литвы, 1991. - с. 180-182.

34. Авраменко В.Н., Крылов В.А., Прихно В.Л. О концепции автоматизированных систем диспетчерского управления ЭЭС нового поколения // Техн. электродинамика - 1992 - № 1 - с. 84-88.

35. Авраменко В.Н. Моделирование электроэнергетических систем в переходных режимах. - Киев, 1992 - 35с. - (Препр./АН Украины, Ин-т электродинамики, №) (в печати).

36. Авраменко В.Н. Вопросы анализа живучести энергообъединений - Киев, 1992 - 45с. (Препр./АН Украины Ин-т электродинамики, №) (в печати).

Личный вклад автора. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежат: мат. модели динамических элементов, численные методы и основные алгоритмы решения (3, 14, 15, 21); идея адаптивного моделирования переходных режимов (6, 23, 25); модель ЭЭС в переходном процессе (16, 30); выбор и модификация мат. модели АЭС (20, 25); принципы решения задач устойчивости и переходных процессов на единой базе данных (2, 24, 27); постановка задачи моделирования переходных процессов ЭЭС на ЭЭМ III поколения (13, 17); модель ЭЭС в тренажере диспетчера энергосистемы (28) основные принципы построения АСУ энергосистем нового поколения (34). Соискатель В.Н. Авраменко

В. Авраменко

76 26.198
Ав 26.198

Подписано к печати 05. XI. 1992 г. Формат 60x84/16
Бумага офсетная Усл.-печ. лист. 2,0 Уч.-изд. лист 2,0.
Тираж 120. Заказ 1187. Бесплатно

Полиграф. уч-к Института электродинамики АН Украины,
252057, Киев-57, проспект Победы, 56.