

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ**

На правах рукописи

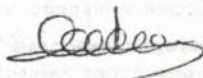
ЯНДУЛЬСКИЙ АЛЕКСАНДР СТАНИСЛАВОВИЧ

УДК 621.311:519.863/621.32

**УПРАВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СЕТЯМИ
НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ**

*Специальность 05.14.02 - Электрические станции, сети
и системы.*

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



К И Е В . - 1997



00751333 (M)

Дисертацією являється рукопис.

Робота виконана в Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут".

Офіційні опоненти : доктор технічних наук, професор Зорин Владлен Володимирович, Національний технічний університет України "КПІ", професор;

доктор технічних наук, професор Жуков Станіслав Федорович, Приазовський державний технічний університет, завідувач кафедри;

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Тисленко Віктор Васильович, Науково-інженерний центр "Електросеть", директор.

Ведущая организация : Інститут проблем моделювання в енергетиці НАН України, відділ технічної діагностики, м.Київ.

Захист проводиться "9 грудня" 1997 г в 14 годин на засіданні спеціалізованого вченого ради Д 01.98.04 при Інституті електродинаміки НАН України (252680, Київ-57, пр.Победи, 56).

С дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інституту електродинаміки НАН України.

Автореферат розісланий "5 грудня" 1997 г

Учений секретар спеціалізованого вченого ради

А.И.Титко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Структурная перестройка и переход промышленности Украины на современные условия хозяйствования должны привести к ускорению социально-экономического развития страны, значительному повышению эффективности производства. Одним из главных направлений научно-технических работ при решении этой задачи является создание соответствующих систем управления, комплексная автоматизация технологических процессов, особенно в ключевых отраслях народного хозяйства, таких как топливно-энергетический комплекс.

Процессы управления современными электроэнергетическими системами (ЭС) происходят на нескольких организационно-территориальных и временных уровнях, динамичны и сложны, а их автоматизация связана с решением серьезных теоретических и больших практических проблем. Несмотря на объективные трудности настоящего времени, продолжается создание автоматизированной системы управления электроэнергетикой страны, важнейшей составной частью которой является автоматизированная система диспетчерского управления. Создание теории, методов и средств оперативного и автоматического управления ЭС позволило достичь достаточно высокой эффективности технологических процессов на высших уровнях системы управления. Вместе с тем, эффективность функционирования распределительной электрической сети 0,4...110 кВ (РС) является относительно низкой, что снижает эффективность работы ЭС в целом.

К основным факторам, обусловившим существующее положение, можно отнести:

- ограниченные функциональные возможности применяемых в РС средств автоматизации управления, которые решали только определенные локальные задачи, не обеспечили создание системы управления с эффективным использованием аппаратуры и каналов передачи данных;
- методические и технические трудности создания необходимой информационной сети для системы управления РС;
- ограниченность капиталовложений в систему управления не позволила ликвидировать значительный дефицит средств автоматизации управления, особенно в наиболее дорогих элементах - каналах передачи данных;
- экстенсивный подход к использованию топливно-энергетических ресурсов не стимулировал развитие систем контроля, учета и управления электропотреблением.

Рыночные преобразования взаимоотношений между компаниями, произ-

ЛНБ Ш. 1997 г. 15.05.97
А.Н. Ур. 1997

водящими и распределяющими электрическую энергию, изменение структуры генерирующих мощностей, дефицит энергоресурсов и пр. выдвигают дополнительные требования к средствам управления РС в нормальном и, особенно, в нормально-дефицитном режимах.

Создание и существенное развитие теоретических основ управления ЭС, методов и средств управления РС, их практическое применение в электроэнергетике развитых стран нашло отражение в работах коллективов ИЭД НАН Украины, НДЦ Украины, НИИ Электроэнергетики, "Энергия", ГП "Укрэнергонадзика и измерение", ГП "Укрэнергоэффективность", ХП "Энерготехнологий и информатики", НТУУ "КПИ", Винницкого, Львовского, Харьковского и других государственных технических университетов, Энергосетьпроекта, Сельэнергопроекта, других организаций и учреждений нашей страны и ряда зарубежных фирм.

Вместе с тем изменение экономических отношений, необходимость повышения эффективности управления РС требуют их дальнейшего развития.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ состоит в развитии теории, разработке принципов и методов построения и создании средств, обеспечивающих повышение эффективности функционирования РС в нормальном и нормально-дефицитном режимах на основе автоматизации управления ими.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

- сформулировать методологические принципы построения средств управления РС, направленные на повышение эффективности технологических процессов, на решение задач управления в новых хозяйственных условиях;

- повысить эффективность управления нагрузкой РС в нормальном и нормально-дефицитном режимах путем постановки и решения задачи автоматического регулирования в рамках концепции функциональных систем управления;

- разработать математические модели, в целостном виде описывающие взаимосвязанные процессы в РС и системе управления ею с учетом действия локальных регуляторов;

- обосновать целесообразность и обеспечить возможность регулирования активной мощности потребителей путем изменения напряжения как средства улучшения регулирующих характеристик РС;

- предложить принципы построения информационно-управляющей системы (ИУС), учитывающие особенности решаемых задач, а также разработать структурно-алгоритмическое обеспечение и создать на основе современных технологий средства для их решения;

- выявить свойства распределительной сети 0,4...10 кВ как среды распространения информационных сигналов, а также разработать математическую модель и метод исследования процессов в распределительной сети при передаче сигналов в широком диапазоне частот;

- разработать эффективные методы передачи сигналов по РС 0,4...10 кВ;

- подтвердить эффективность полученных результатов и работоспособность разработанных средств исследованиями и испытаниями в лабораторных условиях и внедрением на реальных объектах.

АВТОР ЗАЩИЩАЕТ:

1. Новые подходы в концепции функциональных систем автоматического управления для решения задач управления нагрузкой РС в современных условиях хозяйствования.

2. Комплексную модель системы автоматического управления нагрузкой РС и результаты ее синтеза.

3. Целесообразность и возможность изменения напряжения как способ регулирования активной мощности потребителей РС в нормально-дефицитных режимах.

4. Методологические принципы построения и структурно-алгоритмическую организацию ИУС РС.

5. Методики выбора структуры и синтеза элементов информационной сети и системы автоматического управления нагрузкой (САУН).

6. Параметрический и комбинированный методы передачи информационных сигналов по РС 0,4...10 кВ.

7. Математическую модель и методику дискретного моделирования процесса распространения сигналов по РС в тональном диапазоне частот.

8. Вероятностные модели аддитивных и мультипликативных помех РС 0,4...10 кВ в тональном и подтональном диапазоне частот.

9. Методику устойчивой оценки режимных параметров РС при обработке данных в ИУС.

10. Техническое, алгоритмическое и программное обеспечение ИУС, основанное на использовании современных микропроцессорных средств и технологии передачи сигналов по РС 0,4...35 кВ.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ. Методологической основой исследований выступает математическое моделирование, системный подход и натурные эксперименты.

Синтез системы управления нагрузкой РС осуществлялся на основе современной теории автоматического управления ЭС на математических

моделях с учетом стохастического влияния внешней среды. Используя методы теории массового обслуживания выполнено исследование информационных потоков, процесса доставки сообщений в информационной сети, синтез которой осуществлен на основе имитационного моделирования. Исследование процесса распространения сигналов по РС производилось методом структурного моделирования с замещением объектов РС их моделями в исследуемом диапазоне частот. Статистические экспериментальные исследования помех проведены с использованием положений теории вероятностей и математической статистики. Разработка ИУС осуществлена на основе применения теории построения микропроцессорных систем управления с использованием современных методов повышения надежности и отказобустойчивости. Достоверность полученных результатов обеспечена корректным применением методов исследования, сопоставлением математических моделей с результатами экспериментальных исследований в реальных условиях, положительным опытно-промышленным внедрением.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА полученных результатов состоит в том, что проведенный комплекс исследований позволяет осуществить теоретическое обобщение и решение крупной научно-технической проблемы, имеющей важное народнохозяйственное значение и заключается в разработке методологии и создании средств автоматизированного и автоматического управления РС для повышения эффективности ее функционирования в нормальном и нормально-дефицитном режимах при переходе электроэнергетики на новые условия хозяйствования.

Новизну работы отражают следующие конкретные положения.

1. Постановка и решение задачи автоматического управления нагрузкой РС в нормальном и нормально-дефицитном режимах как дальнейшее развитие концепции функциональных систем управления с учетом специфики их функционирования в современных условиях.

2. Разработка математической модели и основанного на сочетании формальных и эвристических процедур метода выбора структуры и синтеза элементов САУН с экстремизацией основных характеристик и параметров объединяемых устройств или их частей при учете ограничений, связанных с особенностями РС и решаемых задач. Такой подход позволяет в целостном виде рассматривать процессы взаимодействия РС и систем управления и принимать обоснованные решения по обеспечению задач управления.

3. Обоснование технической целесообразности регулирования активной мощности потребителей путем изменения напряжения, что позволяет улучшить регулирующие характеристики РС в нормально-дефицитных режи-

мах.

4. Структурно-алгоритмическая организация ИУС РС, которая в отличие от традиционных, состоит в информационном объединении устройств локального управления на основе применения технологии передачи сигналов по РС с учетом особенностей решаемых задач.

5. Методика выбора структуры ИС и синтеза ее элементов, основанная на определении времени доставки сообщений путем имитационного моделирования, которая отличается универсальностью, простотой и позволяет определить требуемые характеристики ИС как звена системы управления при принятых принципах построения ИУС.

6. Методы передачи информационных сигналов по РС, отличающиеся от известных параметрическим уплотнением сети и комбинированным использованием существующего силового оборудования, что позволило улучшить условия передачи сигналов.

7. Выявление ранее неизвестных свойств распространения сигналов по электрической сети 0,4...10 кВ в подтональном и тональном диапазоне частот, таких как аддитивных и мультипликативных помех, что позволило определить необходимые условия и осуществить передачу сигналов по РС предложенными методами.

8. Математическая модель РС как среды распространения сигналов, которая в сочетании с методом структурного моделирования позволяет исследовать процесс распространения сигналов при различных методах присоединения аппаратуры к РС в широком диапазоне частот и выступает основой для проектирования каналов передачи информации.

9. Закономерности работы ИУС, установленные в ходе теоретических и экспериментальных исследований, испытаний в реальных условиях.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ научных положений, обоснованных в работе, определена их направленностью на повышение технико-экономических характеристик РС средствами автоматизированного и автоматического управления в новых экономических условиях.

Использование полученных результатов позволило: - осуществить переход к автоматическому управлению нагрузкой РС, что улучшило регулирующие характеристики РС как звена энергосистемы, создало условия для воплощения современных принципов экономических взаимоотношений предприятий электрических сетей, генерирующих компаний и потребителей; - осуществить направленный структурный и параметрический синтез САУН РС, систем других классов, что открыло новые методологические перспективы для разработчиков; - обеспечить выбор оптимальных структур ИУС с требуемыми параметрами; - осуществить параметрическое

и комбинированное присоединение к РС, что в сравнении с другими методами наилучшим образом обеспечило передачу информационных сигналов по электрической сети 0,4...10 кВ при незначительных затратах; - выполнять на основе предложенных методик анализ и проектирование ИУС для предприятий и районов электрических сетей.

Предложенные принципы построения ИУС, разработанное методическое, техническое и программное обеспечение способствовало снижению длительности перерывов электроснабжения потребителей, капитальных и эксплуатационных затрат, повышению качества и эффективности решения задач технологического управления РС Украины. Они могут быть использованы также при управлении территориально-распределенными объектами РС в других отраслях промышленности. Установленные закономерности передачи сигналов по РС и предложенная технология позволили также использовать РС 0,4...10 кВ для создания информационных сетей других организаций и ведомств.

СВЯЗЬ РАБОТЫ С НАУЧНЫМИ ПРОГРАММАМИ, ПЛАНАМИ, ТЕМАМИ. Работа выполнялась в соответствии с Республиканской целевой комплексной программой УССР "Энергокомплекс" (РН 01.13.Ц.03.05), Республиканским планом АН УССР (пункт 1.12.6.6), Координационным планом АН УССР по теме "Разработка теории и средств диспетчерского управления распределительными сетями сельскохозяйственного назначения и городскими распределительными сетями и подстанциями" (пункт 1.9.6.2.6.3), Комплексной программой АН УССР "Научные основы электроэнергетики", отраслевым планом НИР Минэнерго УССР (пр. N241 от 31.12.80, приложение 9, поз.35), плана НИР Минэнерго УССР на 1981...85 гг. (шифр ВИ-01.06.23/17244), планом НИР Минобороны СССР, в рамках проектов ГКНТ Украины (N 5.51, N 04.11) и программ НИР Минобразования Украины.

РЕАЛИЗАЦИЯ РАБОТЫ. Приведенные в диссертации результаты являются составной частью выполненных или выполняемых в Национальном техническом университете Украины "КПИ" работ при участии или под руководством автора. Внедрение результатов работы представлено следующим образом:

- в Киевских городских электрических сетях внедрены устройство передачи сигналов по РС 10 кВ, методики и результаты исследования информационных потоков, аддитивных и мультипликативных помех (1979 г);

- в Восточном ПЭС ПЭО "Харьковэнерго" внедрена система сбора и передачи диспетчерской информации по распределительным сетям 6...35 кВ (1981 г);

- в Войсковой части 443889 Р Минобороны СССР внедрены методика и результаты исследования помех РС (1983 г);

- в Васильковском РЭС Правобережного ПЭС ПЭО "Киевэнерго" внедрена трехуровневая микропроцессорная система диспетчерского управления районом сетей (1984 г);

- в ПЭО "Ленэнерго" передана техническая документация и внедрена в серийное производство система передачи диспетчерской информации типа КТРС, передана для использования методика расчета характеристик РС как среды передачи сигналов (1985 г);

- на Кременчугском нефтеперерабатывающем заводе внедрены микропроцессорная система сбора и передачи данных по энергопотреблению, релейной защиты, автоматики питающих подстанций и управлению энергообъектами предприятия, а также результаты исследования условий распространения сигналов по кабельной сети 0,4...6 кВ (1987 г);

- в ПЭО "Сахалинэнерго" внедрено техническое задание на разработку интегрированной ИУС ПЭС и ИУС участка РС Западного ПЭС на основе комплекса КТРС с организацией каналов по РС 0,4...6 кВ (1989 г);

- в АК "Росток" освоено серийное производство устройства управления многотарифными счетчиками и объектами 0,4 кВ на основе передачи сигналов по РС 0,4 кВ (1990 г);

- АК "Росток" переданы принципы построения, техническое задание, программное и техническое обеспечение интегрированной ИУС, разработанные по заданию Минэнерго Украины, для освоения серийного производства ИУС (1994 г).

В настоящее время внедрение результатов диссертационной работы осуществляется при выполнении работ по автоматизации управления электрическими сетями Минэнерго, в нефте- и газодобывающих компаниях Украины.

Основные положения и результаты научных исследований диссертационной работы используются в учебном процессе при чтении лекций по курсам "Средства диспетчерского и технологического управления энергосистем", "Релейная защита и автоматика энергосистем" и др., при организации лабораторных и практических работ, в ходе курсового и дипломного проектирования.

АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на 26 всесоюзных, республиканских, отраслевых и международных научно-технических конференциях, совещаниях и семинарах, в том числе на Всесоюзных научно-технических совещаниях "Передача информации по силовым электрическим сетям", "Передача ин-

формации в АСУ сельскими и городскими электрическими сетями", "Проблемы развития и опыт проектирования городских электрических сетей", (Киев, 1978, 1979, 1980 гг); VI Всесоюзной межвузовской конференции "Теория и методы расчета нелинейных цепей и систем" (Ташкент, 1982 г); Республиканском семинаре "Методы и средства автоматизации и релейной защиты энергосистем" (Киев, 1982 г); Всесоюзном семинаре-совещании "Информационные сети энергосистем (Киев, 1983 г); IV Республиканской научно-технической конференции "Современные проблемы энергетики" (Киев, 1985 г); Республиканской научно-технической конференции "Основные направления модернизации и реконструкции энергетического оборудования и объектов в условиях научно-технического прогресса" (Харьков, 1986 г); Республиканской конференции "Проблемы безопасного и надежного электроснабжения сельскохозяйственных и промышленных предприятий" (Севастополь, 1988 г); Республиканской научно-технической конференции "Устройства преобразования информации для контроля и управления в энергетике" (Харьков, 1982, 1992, 1996 гг); Международной научно-технической конференции "Математичне моделювання в електротехніці й електроенергетиці" (Львов, 1995); Республиканском семинаре "Создание информационных систем в энергетике Украины в условиях функционирования энергорынка" (Киев, 1996 г); на расширенном научно-техническом Совете Минэнерго Украины (Киев, 1996 г).

ПУБЛИКАЦИИ. По теме диссертации опубликована 41 работа, в том числе 24 статьи, 2 авторских свидетельства.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ. Работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложений.

Общий объем диссертации составляет 517 страниц, в том числе 75 иллюстраций, 15 таблиц, 5 приложений, список литературы (262 наименования), которые представлены на 231 странице.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обоснована актуальность проблемы, сформулированы цель и задачи исследований, отражены научная новизна и практическая ценность, положения, выносимые на защиту, приводятся сведения об апробации и публикации результатов исследований, их внедрении в народном хозяйстве, а также описана структура работы.

В первой главе проведен анализ РС как объекта управления, определены топология РС, основные задачи и проблемы технологического управления в современных условиях хозяйствования, а также рассмотрены вопросы методологического характера, определяющие направленность работы в целом.

Для современных РС характерно значительное число взаимосвязанных элементов различных номинальных напряжений, уровневая, временная и режимная декомпозиция технологически единого процесса, сложность явлений и процессов как звеньев единой ЭС. От эффективного управления РС во многом зависят надежность и экономичность электроснабжения, а также качество электроэнергии. Показано, что РС обладает технологическими, оперативными и социально-экономическими особенностями, накладывающими определенные ограничения на систему управления (СУ).

Оценена эффективность решения технологических задач, определены структура и состояние информационного обеспечения СУ РС. Печальная статистика о надежности, высокий уровень потерь электроэнергии, повышенные эксплуатационные затраты, напряженные условия работы оперативного персонала в нормально-дефицитных режимах даже при неполном решении оперативных задач, установленные в результате проведенных исследований, свидетельствуют о низкой эффективности функционирования РС при существующей СУ, что снижает технико-экономические показатели работы ЭС в целом. Показано, что изменения характера взаимоотношений между электроэнергетическими компаниями, обусловленные рыночными преобразованиями в электроэнергетике Украины, и состава электрических станций выдвигают дополнительные требования к системе управления РС в нормальном и особенно в нормально-дефицитном режимах.

Многочисленными исследованиями достигнуто существенное развитие теоретических основ управления ЭС, методов и средств управления РС. Вместе с тем необходимость повышения эффективности технологических процессов в РС и изменения условий хозяйствования требуют дальнейшего совершенствования развития подходов к их реализации.

В работе определены методологические принципы построения средств управления РС и актуальные задачи исследований. Установлено, что для достижения поставленной цели на средства автоматизации управления РС в общем случае необходимо возложить регулярное решение более 140 функциональных задач, поддерживающих отдельные, но взаимосвязанные процессы. Анализ этих задач и методов их решения позволил сформулировать основные принципы построения СУ РС. Так показано, что переход к рыночным условиям хозяйствования изменяет понятие общесистемного полезного результата. В современных условиях ему можно дать следующее определение: запрограммированный полезный результат работы ЭС в нормальном режиме является суммой локальных целей и направлен в первую очередь на достижение локальных полезных результатов энергокомпаний

при выполнении общеизвестных требований параллельной работы. В аварийных режимах полезный результат отдельных компаний должен соответствовать системному полезному результату. Приняв кооперативный подход к регламентации взаимоотношений между структурными элементами ЭС на основе соответствующих контрактов, показано, что важнейшей функциональной задачей СУ РС является контроль и управление нагрузкой в процессе распределения. Необходимость создания функциональной системы для решения этой задачи обусловлена также тем, что с увеличением доли атомных станций снижаются регулирующие возможности ЭС Украины, что предъявляет к РС дополнительные требования по регулированию режимов.

На основе анализа полного перечня задач управления, подходов к их решению показано, что СУ РС должна рассматриваться как единая система, функциональным стержнем которой является автоматическое управление нагрузкой, а технической основой - информационно-управляющая система, учитывающая особенности РС и ориентированная на выполнение всего комплекса функциональных задач. Под "ИУС РС" будем понимать объединенную на основе концепции функциональных систем управления единой информационной сетью совокупность локальных устройств для адресного выполнения технологических задач системотехническим путем. Разнообразие функций, представленных в ИУС, и их интеграция в одной системе требуют сочетания общеизвестных и специализированных подходов к их решению. В диссертации определен состав функциональных устройств, сформулированы требования к ним, а также задачи исследования для их выполнения.

Во второй главе рассмотрены вопросы автоматического управления нагрузкой РС в нормальном и нормально-дефицитном режимах, выполнен структурный и параметрический синтез САУН.

В соответствии с принятым выше принципом взаимоотношений между энергокомпаниями цель управления нагрузкой РС состоит в соотношении мощности потребителей с притоком мощности в сеть, минимизируя при этом расходы на ее передачу и выполняя согласованные перетоки в смежные РС. При минимизации расходов, кроме традиционных задач (минимизация потерь и др.), должна предусматриваться минимизация расходов по контрактному критерию, под которым в первую очередь понимаем экономическое распределение мощности между потребителями в соответствии с условиями заключенных с ними контрактов.

Нагрузку РС можно представить

$$P_{0D}(t) = P_{SD}(t) + \Delta P_S(t) + \Delta P_{RD}(t) + \Delta P_{СК} \quad (1)$$

где $P_{SD}(t)$ - ожидаемая суточная заявленная нагрузка; $\Delta P_S(t)$ - отклонение суточной нагрузки от ожидаемой; $\Delta P_{RD}(t)$ - случайная флуктуация нагрузки с частотой изменения ниже некоторой спектральной частоты Ω_0 ; ΔP_{CK} - редко возникающие скачки. Три основные компоненты нагрузки $P_{SD}(t)$, $\Delta P_S(t)$ и $\Delta P_{RD}(t)$ дали основание для разделения процесса управления на три этапа с различными временными масштабами (см. табл.).

Таблица .

	Этап 1 24-часовой горизонт один раз в день	Этап 2 0,5...1 часовой горизонт один раз в 2...5мин	Этап 3 15...30 секундный горизонт один раз в 2...4сек
Задача 1 Оценка нагрузки PC	P_{SD} -прогноз нагрузки суточный	ΔP_S -отклонение остаток	ΔP_{RD} -случ.флуктуа- ции нагрузки
	Прогноз нагрузки	Авторегрессия	Двойной фильтр Калмана
Задача 2	Предраспределение P_{SD}	ΔP_S	ΔP_{RD}
	Экономическое распреде- ление	Пределы ограничений	Пределы ограничений приблизительные
	Пределы ограничений	Пределы ограничений приблизительные	Без ограничений по скорости
	Оптимальное управл. на двух уровнях	Оптимизация, развя- занная во времени	Оптимизация, развя- занная во времени
Задача 3	Номинальная траектория ПР	Минимизация t_1 $\int_{t_0}^{t_1} [\Delta P_p(t) - \Delta P(t)]^2 dt$ t_0	Минимизация t_1 $\int_{t_0}^{t_1} [\Delta P_p(t) - \Delta P(t)]^2 dt$ t_0
		Управле- ние пот- ребителя ми-регу- ляторами	Нелинейная модель
	-грубое регулиров. -изменение U -предприятие регул.	-грубое регулиров. -изменение U -предприятие регул.	-предприятия регул.

В системе управления нагрузкой PC в общем случае должны функционировать две подсистемы: экономического распределения, которая концентрируется на первой и второй составляющих $P_{0D}(t)$, и собственно автоматического управления, сосредоточенной на второй и третьей составляющих.

Основная задача автоматического управления нагрузкой PC представляет собой нелинейную стохастическую задачу оптимального управления в технических терминах теории систем управления. Существует

решение подобной задачи, которое однако требует длительных расчетов. Используя же особенности объекта, решение задачи разбито на три подзадачи (см. табл.), которые дают приемлемое решение при реально выполненном объеме вычислений. В работе рассмотрены особенности первых двух задач, которые влияют на построение СУ. Вместе с тем основное внимание сосредоточено на решении третьей задачи - управление потребителями-регуляторами (ПР). Показано, что при определении отклонений нагрузки следует использовать оценку фактического отклонения от заявленной нагрузки, а не классическое определение ошибки управления. При разработке динамической модели основные упрощения достигнуты тем, что рассматриваемая величина состоит из относительно медленно изменяющихся составляющих с частотой не выше Ω_0 . Для оценки отклонений нагрузки применен двойной фильтр Калмана, в то время как при наличии скачков предпочтительно использовать алгоритм, предложенный Фидлантом.

При управлении нагрузкой РС возникает необходимость, исходя из прогноза на заданный интервал времени, распределить величину отклонения мощности по имеющимся в распоряжении ПР так, чтобы достигалась максимальная прибыль:

$$\Pi(t) = \sum_{i=1}^N F_i \cdot P_i(t) - F \cdot P(t) - \Phi(t) \quad (2)$$

где F_i и F - цена электроэнергии (мощности) для i -го потребителя и РС; $P_i(t)$ и $P(t)$ - электроэнергия (мощность), потребляемая i -м потребителем и РС; $\Phi(t)$ - эксплуатационные затраты РС, обусловленные потерями электроэнергии, затратами на обслуживание и т.п.

Обычные решения данной задачи не обеспечивают учет динамических ограничений регуляторов. Вместе с тем при учете данных о динамике регуляторов и об экономическом распределении нагрузки, результирующая задача оказывается сложной для решения в реальном времени. Учитывая это введены три этапа распределения нагрузки и рассмотрены пути их осуществления. На первом этапе обработка периодов неизменной нагрузки не вызывает затруднений. Вместе с тем, обеспечить прямое решение для быстроизменяющейся нагрузки при ограничениях достаточно сложно. В этом случае применен подход, основанный на том, что при решении первичной задачи определяется связанная с ограничениями функция - множитель $\mu(t)$, и новая задача образуется путем удаления некоторых ограничений и прибавления их к функции стоимости после умножения на соответствующие компоненты $\mu(t)$. При этом новая задача состоит в оптимизации Лагранжиана при оставшихся ограничениях. При-

меняя декомпозицию, задача первого этапа разделена на подзадачи, каждая из которых содержит только один ПР с Лагранжианом вида

$$\sum_{j=0}^k H(P_1(t_j), \mu(t_j)) = \sum_{j=0}^k \sum_{i \in I} F_1(P_1(t_j)) + \sum_{j=0}^k \mu(t_j) (P_1^1(t_j) - \sum_{j=0}^k P_1(t_j)) \quad (3)$$

В работе приведены доказательства и алгоритмы решения данной задачи. При решении подзадач не исключено, что несколько ограничений не будут удовлетворяться строго, что создает возможность построения нескольких траекторий перехода объекта к новому состоянию. В работе выполнено исследование, которое позволило предложить методику выбора оптимального варианта перехода.

На втором и третьем этапах важно не потерять преимуществ, которые получены на предыдущих этапах. Благодаря временной декомпозиции, задача в целом не требует полного повторного решения после выполненных изменений. Вместо этого, необходимо решать только часть задачи, на которую повлияли изменения.

На каждом этапе управления потребителями-регуляторами (см. табл.) делается попытка выполнения установленных кривых распределения мощности, т.е. определения множества управляющих воздействий U_1 для всех регуляторов таким образом, чтобы максимизировать

$\sum_{i=1}^k \int_{t_0}^{t_1} F_1(x_1 U_1) dt$ при заданных ограничениях. При фундаментальном решении даже на основе вычисления корректирующих членов, которые уточняют значения мощностей P_1 , объем вычислений велик, хотя и меньший, чем при прямом решении. Результаты моделирования показывают, что коррекции как правило достаточно малы. Поэтому использован другой подход к решению, который состоит в получении приблизительных коррекций после разделения мощности по регуляторам и проведении расчетов непосредственно на ПР с частичным решением для отдельных регуляторов на диспетчерском пункте (ДП) РС. Это позволило существенно снизить требования к объемам информации при приемлемом решении. Данное разделение получено путем введения равенства $P_{P_1}(t) = P_{SD_1}(t)$ как основополагающего условия в решении общей задачи и представлено как локальный эквивалент разложения по ε_1 для каждого i -го регулятора

$$\begin{aligned} X_1(t, \varepsilon) &= X_{10}(t) + \sum_{k=1}^k X_{1k}(t) \varepsilon_1^k \\ U_1(t, \varepsilon) &= U_{10}(t) + \sum_{k=1}^k U_{1k}(t) \varepsilon_1^k, \end{aligned} \quad (4)$$

Таким образом, управление регуляторами на первом этапе будет

осуществляться на основе нединамического решения фундаментальной части локальной задачи. Решение задачи на втором и третьем этапах представляет первое и второе уточнения для различных временных промежутков значений, полученных на первом этапе. Относительно малая амплитуда коррекции позволяет применять модель, линеаризованную в окрестности соответствующих решений.

На основе полученных результатов уточнена функция управления, определены особенности САУН, выполнено ее конструирование.

Для управление нагрузкой предложено использовать систему с централизованной двухуровневой структурой и автономным управлением, особенность которой состоит в выполнении контроля состояния режимных параметров РС. В основу системы положен принцип функционирования с неполной информацией об объекте управления при пассивном накоплении ее в процессе управления для нормального режима РС и активным накоплением для нормально-дефицитного режима. САУН представляет собой несвязанную многомерную систему, что позволяет рассматривать ее как совокупность одномерных, относящихся к классу цифровых систем автоматического управления. Для исследования САУН предложен метод выбора и синтеза структуры системы, основанный на сочетании формальных и эвристических процедур с экстремизацией основных характеристик и параметров объединяемых устройств или их частей при учете ограничений, связанных с особенностями РС и решаемых задач. Это позволило в целомном виде рассматривать процессы взаимодействия РС и системы управления и соответственно принимать обоснованные решения по обеспечению задач управления. Получены математические модели элементов САУН, выполнены исследования системы при пропорциональном и пропорционально-интегральном законах управления, которые позволили определить структуру и параметры ее элементов, требования к ним.

Управление нагрузкой в соответствии с предложенным подходом требует наличия соответствующих ПР. Известно использование предприятий-регуляторов, а также коммунально-бытовых, сельскохозяйственных и других потребителей путем их отключения и включения, как правило, с центров питания. Вместе с тем необходимо улучшение регулирующих свойств РС. Один из подходов к управлению нагрузкой, широко распространенных за рубежом, основан на изменении напряжения как способе воздействия на активную мощность потребителей. В третьей главе оценена эффективность данного подхода для нормального и нормально-дефицитного режимов ЭС Украины, определены требования и разработаны средства для его реализации.

Анализ результатов исследований, выполненных учеными в нашей стране и за рубежом, позволил оценить регулирующий эффект по напряжению и частоте нагрузок в единицы мегаватт и небольших групп однотипных потребителей в достаточно крупных узлах ЭС Украины. Для ряда бытовых потребителей с однородными и комбинированными нагрузками проведены статистические экспериментальные исследования. Установлено, что регулирующий эффект по напряжению достигает 2,4, при этом общей тенденции для суточной вариации статических характеристик не обнаружено. Регулирующий эффект по частоте можно принять равным 1,2. Показано, что снижение напряжения от U_n до $0,9U_n$ может привести к уменьшению мощности бытовых потребителей для ЭС Украины до 700 МВт, при этом предпочтительным является регулирование напряжения у потребителей.

Анализ методов и средств регулирования напряжения показывает, что для достижения поставленной цели целесообразно применение местных регуляторов на основе управляемых статических конденсаторов с комбинированным использованием местного и централизованного регулирования как составной части САУН. Однако существующие регуляторы не позволяют дистанционно изменять их уставки и не совместимы с современными ИУС. Используя современную микропроцессорную технологию, разработан регулятор мощности конденсаторных батарей, а также расширены функциональные возможности блока автоматического регулирования системы АРТ. Алгоритмы работы данных устройств приведены в диссертации.

Одна из наиболее сложных проблем, возникающих в настоящее время при достижении поставленной цели, в силу ряда причин является создание ИУС. Вследствие этого **четвертая глава** посвящена разработке принципов построения ИУС РС.

Известны средства, построение которых основано на создании узкоспециализированных устройств сбора и передачи информации, которые использовались в интересах только своей узкой подсистемы управления. Это привело к дублированию функций управления средствами различных СУ, усложнению взаимодействия между подсистемами, к увеличению потребности в дефицитных каналах передачи информации при неэффективном их использовании. Вместе с тем установлено, что построение информационной сети (ИС) как сети общего пользования неприемлемо из-за ограничений и особенностей, присущих РС. В ряде работ созданы научно-технические основы построения ИУС крупных энергообъектов и выполнено их практическое конструирование, показывающее достаточно высо-

кую эффективность решения подобных задач. Однако изменение условий хозяйствования, особенности РС как объекта управления требуют дальнейшего исследования проблемы и развития подходов к ее решению. Показано, что основой ИУС РС должна служить интегрированная ИС, предоставляющая среду для передачи информации различным подсистемам управления и удовлетворяющая требованиям решения их функциональных задач.

Выполнен анализ основных этапов построения ИС с учетом особенностей выполняемых функций, при этом синтез ИС осуществлен не по комплексному, а по частным критериям. Осуществлен выбор элементов ИС, определены возможные взаимосвязи между ее пунктами, представленные генетическими структурами. Показано, что при создании ИС с учетом ограничений РС важным является построение пунктов коммутации (ПК), их оптимальное размещение, разработка алгоритма функционирования, которые совместно обеспечат передачу информации с заданными временными и надежностными характеристиками. Для решения данной задачи предложена методика выбора структуры ИС ИУС РС, особенностью которой является анализ временных параметров. Показано, что известные методы расчета времени доставки сообщений в принятой постановке дают высокую погрешность, обусловленную отсутствием вероятностной основы анализа и сложностью учета изменений топологии ИС.

В выполненных исследованиях математическая модель ИС РС представлена в виде системы массового обслуживания с приоритетами и классифицирована как система с циклическим обслуживанием: модель с ликвидацией очереди, образованной к моменту начала обслуживания. Используя метод дополнительного события, для ИС с радиально-узловой структурой при заданных параметрах потоков сообщений определено среднее время задержки сообщения $M(\tau)$, поступающего на ПК от i -го источника

$$M(\tau_i) = \frac{1 + \lambda_1 [t_0 + \Delta t]}{\lambda_1} \cdot \frac{g_1^{(2)}(i, i)}{2 g_1(i)} + (t_0 + \Delta t) \quad (5)$$

где λ_1 - интенсивность потока сообщений от i -го источника, $g_1(i) = \lambda_1 U / (1 - \rho)$, $\rho = \sum_{i=1}^m \lambda_i b_i$, $U = \sum_{i=1}^m U_i$, U_i - начальный момент времени ориентации, $b_i = b = t_0 + \Delta t$ - время обслуживания, значения $g_1^{(2)}(i, i)$, находятся из системы уравнений, формируемой по графу ИС.

Получены выражения для определения $M(\tau_i)$, расчета $g_1^{(2)}(i, i)$ для симметричных и несимметричных ИС при отсутствии и наличии помех

в каналах передачи информации (КПИ) и различных алгоритмах работы. Предложена упрощенная методика расчета времени доставки для основных структур ИС. Вместе с тем определение времени доставки сообщений для ИС с другими типами структур вызвало существенные усложнения полученных зависимостей и потребовало дополнительных упрощений, снижающих достоверность полученных результатов. Это обусловило необходимость исследования процессов в ИС на основе имитационного моделирования.

Проведенные исследования позволили определить особенности процесса доставки сообщений при действии в КПИ помех импульсного вида. Установлено несовпадение медианы и момента первого порядка и многомодальность процесса. Наиболее близким распределением времени доставки оказалось бета-распределение. Показано, что наиболее медленное обслуживание происходит по алгоритму с циклическим опросом сети. Алгоритм "первый возник - первым обслужен" имеет наилучшие показатели. При исследовании влияния скорости передачи сообщений на процесс их доставки определены нижние пределы, нарушение которых порождает невозможность работы ИС с заданными параметрами. Определены оптимальные значения скорости передачи при принятых параметрах ИС.

На организацию обмена сообщений в ИС существенное влияние оказывают особенности информационных связей между объектами ИУС РС. Проведенное сопоставление различных методов позволило выбрать оптимальные принципы организации информационного обмена. Показана целесообразность построения ПК ИУС РС в режиме коммутации сообщений с ограниченным использованием коммутации каналов, применения детерминированной процедуры управления потоками сообщений и зонной нумерации.

Ключевым при создании ИУС является организация каналов передачи информации, основные принципы которой рассмотрены в пятой главе. Проведенный анализ показал, что в ИУС РС может быть применено несколько технологий передачи информации: в УКВ-среде, среде проводной сети (ТФ-каналы и т.п.) и на основе РС 0,4...110 кВ. Ввиду существенных технико-экономических преимуществ в качестве основы для передачи сообщений следует рассматривать распределительную электрическую сеть.

С целью обобщения результатов разработки и исследования методов и средств передачи сигналов по РС предложена их классификация, выполнен анализ и определены области возможного применения. Для повышения эффективности передачи сигналов показана целесообразность использования свойств, которыми обладает электрическая сеть при пере-

даче электроэнергии, а также комбинированного использования положительных свойств различных методов присоединения к РС. В соответствии с этим предложены параметрический метод передачи информационных сигналов, использующий реакцию электрической сети на изменение по определенному закону ее отдельной нагрузки, а также комбинированное использование методов, сочетающих присоединение к РС через измерительное и силовое оборудование. Анализ предложенных методов показал, что они позволяют осуществить передачу сигналов в широком диапазоне частот при ограниченном влиянии РС, ее режимов и обеспечивают при этом приемлемые технико-экономические показатели устройств. Поскольку свойства параметрической нагрузки отличаются от свойств бытовой, промышленной и других видов нагрузки, воздействие которых на РС достаточно изучено, то в ходе разработки предложенного метода проведено исследование реакции РС на воздействие параметрической нагрузки в частотной и временной областях. В результате определены спектральные характеристики сигналов в РС для различных наиболее просто технически реализуемых вариантов изменения параметрической нагрузки.

Для определения условий распространения сигналов в РС изучены свойства ее основных элементов в исследуемом диапазоне частот и построена модель процесса, представленная системой уравнений с переменными коэффициентами. Для решения системы применен метод цифрового структурного моделирования. Используя разработанную методику, оценены передаточные характеристики наиболее характерных участков РС. Установлено, что в диапазоне частот 5...500 Гц коэффициент передачи составляет -30...-34 дБ и практически не зависит от структуры исследуемых участков РС. При увеличении частоты коэффициент передачи, как правило, уменьшается и достигает -60...-70 дБ. На коэффициент передачи влияет изменение силовой нагрузки, причем степень влияния зависит от частоты передаваемых сигналов. Определено влияние и других элементов РС, а также ее режимов и способов присоединения. Вместе с тем случайные изменения топологии и параметров электрической сети, а также ее нагрузок вызывают изменения передаточных характеристик, что обуславливает снижение качества передачи сигналов, т.е. появление мультипликативных помех. Кроме того, существует специфические аддитивные помехи, обусловленные передачей по РС электрической энергии.

Теоретические и экспериментальные исследования аддитивных и мультипликативных помех РС различных классов напряжения и назначения проведены многими организациями и учреждениями нашей страны и рядом фирм России, Швейцарии, ФРГ, Франции, Англии. Вместе с тем помехи в РС

0,4...10 кВ при предложенном методе передачи сигналов не исследованы. Анализ общих методов исследования случайных процессов показал, что для изучения свойств помех при передаче сигналов по РС наиболее приемлемым является комбинированный метод, который включает обобщенную теоретическую оценку и статистическое исследование.

Проведенная теоретическая оценка позволила определить источники аддитивных помех, описать их структуру и характер в исследуемом диапазоне частот, а также факторы, влияющие на их свойства. Это позволило также определить требования к статистическим исследованиям. Статистические исследования осуществлены путем посекансного непрерывного и дискретного измерения и регистрации параметров помех и факторов, влияющих на их свойства, с последующей обработкой и анализом полученных данных.

Структурный анализ результатов статистических измерений показывает, что в рассматриваемом диапазоне частот можно выделить зоны (поддиапазоны) преимущественного действия помех импульсного, гармонического и флуктуационного вида. Сопоставление выборок реализаций помех показывает, что структура и характер помех сохраняется для различных участков сети. Вместе с этим величина помех для участков РС различна, что обуславливает необходимость их вероятностной оценки. Такая оценка выполнена на основе результатов статистического экспериментального исследования типовых участков РС в соответствии с положениями теории вероятностной и математической статистики.

В первом поддиапазоне (до 50 Гц) наблюдается преобладание помех импульсного вида, интенсивность которых для различных участков электрической сети различна, но длительность отличается не значительно. Определены функции распределения значений импульсных помех и интервалов между ними, установлена корреляционная связь между появлением импульсных помех и изменением тока РС.

Характерной особенностью помех второго поддиапазона (50...4000 Гц) является преобладание гармонических составляющих тока промышленной частоты, при этом в распределении амплитуд наблюдается общая тенденция их уменьшения с ростом порядка гармоник, хотя монотонный спад амплитуд отсутствует. Для вероятностной оценки свойств данных помех определены статистические функции по числовым характеристикам их реализаций. Установлено, что исследуемый процесс является стационарным и эргодичным в широком смысле, а распределение амплитудных значений помех можно принять нормальным. Зависимость гармонических помех от тока РС не обнаружена.

Для третьего поддиапазона (выше 4 кГц) характерна совокупность слабовыраженных гармонических составляющих и помех флукуационного вида, при этом величина гармонических составляющих с ростом частоты уменьшается, а флукуационной - увеличивается. Определен уровень помех и установлено, что его отклонение для различных выборок и участков (в пределах одного региона РС) несущественно. Зависимость значений помех от тока РС отсутствует.

Изучение свойств мультипликативных помех выполнено на основе экспериментального исследования передаточных характеристик (ПХ) и характеристик входного сопротивления (ХВС) типовых участков косвенным методом с последующей обработкой статистических данных. Установлено, что в диапазоне частот до 500 Гц среднеквадратичное отклонение коэффициента передачи не превышает 2 дБ. С увеличением частоты среднеквадратичное отклонение увеличивается и составляет 7...11 дБ. Среднеквадратичное отклонение входного сопротивления составляет 0,04...0,6 Ом. Показано, что относительное среднеквадратичное значение начального и центрального моментов первого и второго порядка для ПХ и ХВС не превышает 27% , при этом для различных выборок существенно отличие центральных моментов третьего и четвертого порядка. Автокорреляционные функции помех затухают в течении 1,6...2,3 часа. Полученные результаты позволили рассматривать мультипликативные помехи как стационарный и эргодичный процесс в широком смысле. Анализ изменения ПХ во времени показал наличие корреляционной зависимости между изменениями коэффициента передачи и тока промышленной частоты, потребляемого нагрузкой исследуемого участка, которой соответствует уравнение первого порядка.

Сопоставление результатов экспериментального исследования ПХ и их расчета подтверждает в целом адекватность математического моделирования реальным условиям распространения сигналов по РС. Вместе с тем при увеличении частоты сигнала наблюдаются некоторые отличия расчетных и экспериментальных данных, обусловленные отклонениями истинных значений параметров эквивалентных схем от расчетных, а также неточностью определения нагрузки участка сети в момент измерения.

Установленные закономерности передачи сигналов , а также свойства РС как среды распространения сигналов положены в основу практической реализации предложенных методов.

В соответствии с принципами и результатами, предложенными и полученными выше, в шестой главе рассмотрена структурно-алгоритмическая организация ИУС РС, выполнено ее конструирование.

Предложена структура ИУС РС, определены функциональные задачи, решаемые основными и промежуточными ПК ИУС РС, сформулированы их особенности. Показано, что ПК находятся на стыке уровней иерархии, причем линия стыка может быть непоследовательной. Предложен ПК, состоящий из двух подуровней, каждый из которых сопрягается с доступным ему уровнем управления, при этом выполнена строгая унификация и стандартизация аппаратных и программных средств.

При построении интегрированных ИУС важным является обеспечение заданной надежности ее работы. Решение задачи создания отказоустойчивых ИУС РС требует системного подхода к исследованию их структурно-алгоритмической организации. Теория и практика создания подобных систем находится на стадии становления и быстрого развития и связаны с исследованием и разработкой таких вопросов, как осуществление контроля, локализации ошибок, диагностики, устранения неисправностей и восстановления вычислительного процесса на всех уровнях организации системы. В диссертации основное внимание уделено организации отказоустойчивых ИУС РС на основе применения известных методик исследования, разработки и проектирования средств повышения отказоустойчивости. Для оценки возможных вариантов организации ИУС при ее проектировании предложена классификация методов обеспечения отказоустойчивости по признакам, существенным для обеспечения отказоустойчивости с учетом избыточности системных ресурсов, рассмотрены особенности их применения для ИУС РС. Показано, что обеспечение отказоустойчивости следует искать в оптимальном сочетании этих методов с учетом назначения и возможностей структурно-алгоритмической организации ИУС. Осуществлен выбор таких методов для ИУС РС.

Важным является также обеспечение устойчивости оценки режимных параметров РС к аномальным значениям, возникающим при коммутационных операциях, перенапряжениях, нарушениях нормальных условий эксплуатации средств сбора и передачи информации. Аномальные значения обуславливают неоднородность исходных совокупностей, увеличивают погрешность измерений и тем самым снижают эффективность управления. Установлено, что уровень "засоренности" режимных параметров РС различный, при этом наибольшую "засоренность" ($d = 0,28 \dots 0,41$) имеют выборки для тока присоединений 0,4 кВ ТП и РП 6...10 кВ, в то время как для выборок напряжения РС 110 кВ уровень "засоренности" не превышает 0,05. Для моделирования неоднородных совокупностей применен известный подход представления их смесью распределений определенных типов. В работе проведен численный анализ устойчивых оценок, показана

целесообразность использования выборочной медианы в качестве устойчивой оценки. Для определения условий и оценки эффективности применения такого подхода для сглаживания режимных параметров выполнено исследование, которое показало, что для рассматриваемых выборок параметров РС наименьшая ошибка сглаживания имеет место при интервале сглаживания $g=3$. При дальнейшем росте интервала ошибка скользящей медианы возрастает, но остается меньше ошибки скользящей средней.

В соответствии с полученными в работе результатами разработана ИУС РС, представляющую иерархическую, территориально распределенную систему, охватывающую объекты 0,4 кВ, ТП, РП и подстанции 35...110 кВ. ИУС содержит устройства локального сбора, обработки информации и управления (ЛСУ) и информационную сеть (см.рис.).

ИС содержит три уровня (ИС 0,4, ИС ТП РП, ИС ПС), имеет древовидно-сетчатую структуру, причем многосвязность сети характерна для уровня ИС ПС. При построении ПК использован метод коммутации сообщений, при этом ПК является двухуровневым и содержит программируемый канальный адаптер (ПКА) и мультиплексор передачи данных (МПД). ПКА осуществляет управление потоками информации соответствующего уровня, а МПД - исполнение соответствующих команд. ИС построена как открытая система с различными приоритетами передачи. Используются параллельная передача и обработка информации, детерминированная процедура управления потоками, зона нумерация сообщений; сплошная нумерация ПК для всего района РС.

Устройства ЛСУ строятся как средства, которые функционально законченны и территориально рассредоточены по объектам РС, при этом число уровней иерархии не превышает двух. К основным ЛСУ можно отнести цифровые устройства РЗА, интеллектуальные счетчики электроэнергии и устройства диагностики силового оборудования. При внедрении ИУС использовались серийно выпускаемые устройства ЛСУ. Вместе с тем, на существующих объектах РС имеются, как правило, электромеханические устройства РЗА, устройства учета электроэнергии с ограниченными функциями и т.п. Поэтому для переходного этапа разработан контроллер объекта (КО), осуществляющий сбор, обработку, хранение информации о положении коммутационного оборудования, состоянии устройств РЗА, силового оборудования, аварийно-предупредительной сигнализации, информации о режимных параметрах технологического процесса, а также управление ими.

Для организации передачи сигналов ИУС предусмотрено устройство (УППС), преобразовывающее сигналы по стыку RS232 в сигнал по стыку

С1, а также обеспечивающее передачу сигналов по ТФ-каналам, УКВ-среде, РС 0,4...10 кВ, ВЧ-каналам 35...110 кВ. Организация каналов по РС 0,4...10 кВ осуществляется параметрическим и комбинированным методами путем использования силового и измерительного оборудования РС без ее обработки. Для отдельных участков РС применены конденсаторные устройства присоединения. Скорость передачи сигналов - до 1200 Бод. Вид модуляции - относительно-фазовая.

Работа ИУС осуществляется в нормальном, циркулярном режимах и режимах вызова и управления, учитывающих особенности системы управления РС. Для всех устройств ИУС обеспечен единый отсчет времени, одновременное измерение значений всех режимных и учетных параметров РС с возможным "срезом" по отдельным сообщениям и их группам для РС в целом и по отдельным ее объектам. Для управления объектами РС предусмотрен режим передачи сообщений коммутационным аппаратам и их группам, а также средствам регулирования отдельных параметров РС. Разработаны системные режимы на передачу блока информации из памяти, прием блока в память, режим углубленного тестирования, режим трансляции сообщений. Полное описание режимов и алгоритмов работы ИУС приведено в работе.

Структура информационных посылок зависит от режима работы ИУС, направления передачи, характера информации. При формировании информационной части посылки осуществляется сжатие информации известными методами. Длина посылок переменная, при этом информационная часть имеет длину до 254 байт.

Комплекс технических средств включает девять модулей. Модульность изготовления, открытость, универсальность позволяют гибко варьировать состав ИУС в зависимости от типа объекта, задач управления и наличия различных типов ЛСУ. При повышенном требовании к элементам ИУС использованы микроконтроллеры фирмы "Z WORD Eng". При разработке программного обеспечения использован модульный подход со структурным упорядочением алгоритмов. Операционная система - RMX-80. Для сохранения сообщений в МПД предусмотрены память с внешними источниками питания и флеш-память. Для обеспечения отказоустойчивости ИУС используются программные и аппаратные средства, разработанные в соответствии с результатами проведенных исследований.

Элементы ИУС и ИУС в целом внедрены на предприятиях и в серийное производство на заводах в Украине и в России.

Методологическое, алгоритмическое и техническое обеспечение системы управления РС, представленное в работе, разработано в соответс-

твии с Национальными целевыми программами, координационными планами НИР НАН Украины, планами ГКНТ, отраслевыми планами НИР Минэнерго Украины, договорами с предприятиями и учреждениями.

В приложениях содержатся результаты статистических исследований, доказательства отдельных теоретических положений, методики, алгоритмы и параметры решения ряда конкретных задач, а также документы, подтверждающие внедрение результатов диссертационной работы.

В В В О Д Ы

В диссертационной работе осуществлено развитие теории, разработка принципов и методов построения и создание средств управления, с помощью которых получено решение актуальной научно-технической проблемы - автоматизации управления распределительной сетью в нормальном и нормально-дефицитном режимах с целью повышения надежности, качества и эффективности технологических процессов в новых условиях хозяйствования. При этом получены следующие основные результаты.

1. На основе анализа структурных и режимных свойств РС, а также состояния информационного обеспечения и качества решения оперативных задач сформулированы с использованием системного подхода методологические принципы построения средств управления, обеспечивающих эффективное и комплексное решение функциональных задач в изменившихся условиях.

2. Сформулирован и решен комплекс задач регулирования нагрузки РС как дальнейшее развитие концепции автоматического управления режимами ЭС для современных условий: а) обоснован подход к оценке истинного отклонения нагрузки, при этом основные упрощения достигнуты учетом относительно медленного изменения составляющих исконой величины; б) решена задача оптимального распределения нагрузки между ПР по критерию максимальной прибыли РС на основе декомпозиционного подхода; в) определена траектория перехода ПР на рассматриваемом временном интервале с пошаговым удалением нарушения ограничений; г) управление ПР представлено как нединамическое решение фундаментальной части локальной задачи с последующим уточнением решения на других временных интервалах. Полученные результаты позволили определить особенности построения САУН и положены в основу ее структурно-алгоритмической организации.

3. В рамках дальнейшего развития теории и методов моделирования систем управления ЭС разработаны комплексная математическая модель и метод синтеза структур САУН с экстремализацией основных характерис-

тик и параметров объединяемых устройств при учете ограничений, связанных с особенностями РС и решаемых задач. Такой подход позволяет в целостном виде рассматривать процессы взаимодействия РС и системы управления, ее элементов, что повышает обоснованность принимаемых решений при проектировании САУН.

Решены задачи синтеза САУН, что позволило определить структуру системы и технические требования к ее элементам.

4. Обоснованы целесообразность и возможность регулирования активной мощности потребителей путем изменения напряжения РС, что позволило улучшить регулирующие характеристики РС, особенно в нормально-дефицитных режимах. Разработаны регулятор мощности конденсаторных батарей и блок автоматического регулирования системы АРТ, которые совместимы с ИУС.

5. Определены особенности и принципы построения ИУС РС. Показано, что основой ИУС должна служить интегрированная информационная сеть, использующая распределительную электрическую сеть как среду для передачи информации различным подсистемам локального управления. При организации обмена сообщениями целесообразно использовать режим коммутации сообщений с частичным применением коммутации каналов и детерминированную процедуру управления движением сообщений.

Предложена методика выбора структуры и синтеза ИУС, особенностью которой является определение временных параметров. Для анализа времени задержки сообщений аналитическим путем получены зависимости для ИС с радиально-узловой структурой, а также выполнено имитационное моделирование для других сетевых структур. Это позволило определить свойства процесса доставки сообщений и параметры ИС.

6. На основе проведенной классификации методов и средств передачи сигналов, а также анализа эксплуатационных и технических возможностей и особенностей РС, предложены и обоснованы параметрический метод передачи сигналов по РС, использующий реакцию РС на изменение по определенному закону заданного параметра нагрузки, а также комбинированное использование существующих методов, что позволило осуществить передачу сигналов при ограниченном влиянии РС с приемлемыми технико-экономическими показателями приемо-передающих устройств.

7. Разработана методика исследования процесса распространения сигналов по РС, основанная на анализе свойств элементов РС в исследуемом диапазоне частот и структурном дискретном моделировании. Разработана математическая модель РС как среды распространения информационных сигналов. Исследована реакция РС и условия распространения

сигналов в частотной и временной областях, что позволило определить закономерности распространения сигналов в трех поддиапазонах частот и выполнить практическое конструирование каналов передачи информации.

8. Разработана методика исследования аддитивных и мультипликативных помех РС, которая сочетает обобщенную теоретическую оценку и статистическое исследование. На основе проведенных исследований установлены: а) источники аддитивных помех, определена их структура и характер в исследуемом диапазоне частот; б) вероятностные модели аддитивных и мультипликативных помех; в) корреляционная зависимость от параметров РС. Полученные результаты положены в основу практической реализации предложенных методов передачи.

9. Научное обобщение проблемы, выполненное в работе, позволило разработать ИУС РС 0,4...110 кВ, содержащую устройства локального сбора информации и управления и иерархическую информационную сеть, особенностью которой является отказ от узкоспециализированных КПИ, ориентированных на решение отдельных задач управления. Ключевым при создании ИУС явилось использование РС как среды для передачи сигналов. Предложены и разработаны двухуровневые ПК ИС. Каждый из уровней ПК сопрягается с доступным уровнем управления, при этом соблюдается строгая унификация и стандартизация аппаратных и программных средств. Определены методы повышения отказоустойчивости и надежности ИУС. Показана целесообразность медианной оценки режимных параметров РС при обработке данных в ИУС, даны рекомендации ее применения.

Разработанные алгоритмические и программные решения обеспечили работу ИУС в нормальном, циркулярном режимах, режимах вызова и управления, учитывающих особенности решаемых задач.

10. Основные научные результаты диссертации, ее практические рекомендации, разработанные средства внедрены на ряде электроэнергетических объектов, а также активно используются в учебном процессе. Результаты диссертационной работы в целом позволяют обеспечить новое качество в решении проблемы построения средств автоматизации технологических процессов в РС, повышения эффективности управления ими в современных условиях.

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях.

1. Скрыль В.Ф., Яндульский А.С. Об особенностях формирования амплитудно-частотных характеристик систем передачи информации по высоковольтным линиям // Вестн. Киев. политехн. ин-та. Сер. Электроэнергетика. - 1978. - вып.15. - С.25-27.

2. Пискунов О.Г., Яндульский А.С. О характере помех в высокочастотном тракте, организованном по высоковольтным линиям // Вестн.Киев.политехн. ин-та. Сер.Электроэнергетика. - 1978. - Вып.15. - С.30-31.
3. Яндульский А.С. Об использовании емкостных устройств присоединения при передаче телемеханической информации по распределительной электрической сети 6-10 кВ // Вестн.Киев.политехн.ин-та. Сер.Электроэнергетика. - 1981. - вып.18. - С.49-51.
4. Яндульский А.С., Непорожний В.Ю., Тимченко Н.А. Об измерении входных параметров распределительной электрической сети для передачи телемеханической информации // Вестн.Киев.политехн.ин-та. -1981. - вып.18. - С.51-53.
5. Скрыль В.Ф., Яндульский А.С. Передача телемеханической информации в автоматизированной системе диспетчерского управления районом городской электрической сети // Вестн. Киев.политехн.ин-та Сер.Электроэнергетика. - 1982. - Вып.19. - С.68-71.
6. Яндульский А.С. Экспериментальное исследование помех в распределительной электрической сети 10 кВ при организации каналов связи с последовательным присоединением // Вестн.Киев.политехн.ин-та. Сер. Электроэнергетика. - 1982. - вып.19. - С.71-73.
7. Яндульский А.С. Дискретное математическое моделирование процесса распространения сигналов подтонального диапазонов частот по кабельной распределительной сети 10 кВ // Вестн.Киевск.политехн.ин-та. Сер.Электроэнергетика. - 1983. - Вып.20. - С.30-34.
8. Яндульский А.С., Пискунов О.Г. Испытание параметрического устройства передачи сигналов по кабельной распределительной сети 10 кВ // Энергетика и электрификация. Сер. Эксплуатация и ремонт электрических сетей. - 1983. - Вып.3. - С.44-46.
9. Скрыль В.Ф., Яндульский А.С. Информационный анализ диспетчерского управления городскими электрическими сетями // Энергетика и электрификация. Сер.Эксплуатация и ремонт электрических сетей. - 1984. - Вып.12-Б. - С.25-46.
10. Праховник А.В., Скрыль В.Ф., Яндульский А.С., Абрамов В.А., Холявенко В.Н. Развитие технических средств учета, контроля и управления электропотреблением // Энергетика и электрификация. - 1984. - N2. - С.5-8.
11. Велигоцкий Г.П., Кот А.Г., Хлыстов В.М., Яндульский А.С. Модуль приема команд телеуправления информационно-управляющей системы района электрической сети // Энергетика и электрификация. - 1993. -

№3. - С.13-18.

12. Кириленко А.В., Яндульский А.С. Интегрированные информационно-управляющие системы электрических сетей // Техническая электродинамика. - 1994. - №1. - С.68-76.

13. Яндульский А.С., Бульхинди Абдельуахаб. Минимизация среднего времени доставки сообщений на диспетчерский пункт электрической сети // Энергетика и электрификация. - 1994. - №5. - С.42-45.

14. Хлыстов В.М., Яндульский А.С. Оптимальный период телеизмерения потерь электроэнергии в электрических сетях // Техническая электродинамика. - 1995. - №1. - С.76-79.

15. Яндульский А.С., Головатюк Н.Ф., Хлыстов В.М., Кот А.Г., Велигоцкий Г.П. Регулирование мощности конденсаторных батарей // Энергетика и электрификация. - 1995. - №5. - С.36-39.

16. Кириленко А.В., Яндульский А.С. Интегрированная информационно-управляющая система распределительной электрической сети // Энергетика и электрификация - 1995. - №3. - С.46-47.

17. Кириленко А.В., Яндульский А.С. Повышение точности автоматического управления нагрузкой распределительной сети 6-10 кВ // Метрология и надежность. Том 1. - Созополь. 1996. - С.83-87.

18. Яндульский А.С., Головатюк Н.Ф., Хлыстов В.М. Вопросы регулирования напряжения в электрических сетях // Энергетика и электрификация. - 1996. - №4. - С.36-38.

19. Яндульский А.С. Устойчивое оценивание режимных параметров распределительной электрической сети // Техническая электродинамика. - 1997. - №2. - С.57-61.

20. Яндульский А.С. Управление распределительными электрическими сетями 0,4 - 110 кВ в условиях энергорынка // Энергетика и электрификация. - 1997. - №2. - С.36-38

21. Яндульский А.С. Моделирование процесса доставки сообщений в интегрированной сети передачи данных ИУС 0,4-110 кВ // Техническая электродинамика. - 1997. - №3. - С.72-76.

22. А.с. 3651880 СССР МКИ H02J 13/00. Устройство для автоматического управления электрической нагрузкой предприятия / Абрамов В.А., Праховник А.В., Калинин В.П., Скрыль В.Ф., Яндульский А.С. - опубл. 23.01.86 в Б.И. // Открытия. Изобретения. - 1986. - №3.

23. А.с. 94062730 Украина МКИ H02J 13/00. Устройство для телеуправления энергетическими объектами / Велигоцкий Г.П., Головатюк Н.Ф., Кот А.Г., Хлыстов В.М., Яндульский А.С. - опубл. 96 в БИ №1 // Промислова власність. - 1996. - №1.

24. Скрыль В.Ф., Яндульский А.С. Параметрическое уплотнение распределительной сети информационными сигналами. - Киев, 1982. - 12с. Деп. в УкрНИИТИ, 20.07.82, N3707 -Д82.

25. Скрыль В.Ф., Яндульский А.С. Исследования аддитивных помех распределительной кабельной сети 10 кВ в диапазоне 5-50 Гц при последовательном присоединении - Киев, 1982. - 11с. Деп. в УкрНИИТИ 20.07.82, N3708-Д82.

26. Хлыстов В.М., Яндульский А.С. Выбор зон оптимального соотношения периода контроля, скорости передачи, числа датчиков и достоверности результатов для системы управления потерями энергии в электрических сетях. - Киев, 1994. - 12с. Деп. в ГНТБ Украины 22.09.94. - N1891. - УК94.

27. Хлыстов В.М., Яндульский А.С., Головатюк Н.Ф. Статистическая оценка структуры информационной сети подсистемы управления потерями электроэнергии в электрических сетях 35 кВ. - Киев, 1996. - 14с. Деп. в ГНТБ Украины 12.06.96. - N1438 - УК 96.

28. Яндульский А.С., Головатюк Н.Ф., Хлыстов В.М., Кот А.Г. О потреблении активной мощности электроприемников при отклонениях напряжения. - Киев, 1996. - 15с. Деп. в ГНТБ Украины 12.06.96. - N1437. - УК96.

29. Скрыль В.Ф., Яндульский А.С. Переходные процессы в каналах передачи информации по распределительной электрической сети //Труды 1V Республиканской конференции "Современные проблемы энергетики". - К. - 1985. - С.45-47.

30. Яндульский А.С. Устройство передачи сигналов о состоянии электрооборудования по распределительной электрической сети 0,4...10 кВ // Труды Республиканской конференции "Основные направления модернизации и реконструкции энергетического оборудования и объектов в условиях научно-технического прогресса. - Харьков. - 1986. - С.134-135.

31. Яндульский А.С., Велигоцкий Г.П., Кот А.Г. Особенности построения интегрированной информационной сети района распределительной электрической сети// Труды 4-й Республиканской конференции "Устройства преобразования информации для контроля и управления в энергетике". - Харьков. - 1992. - С.26-27.

Личный вклад автора. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежат: - разработка методик исследования процесса распространения сигналов по РС [1,2,4,8,25,29]; - постановка задачи и анализ результатов исследования информационного обеспечения [9]; -

розробка теоретических и методологических основ ИУС [11,13,14,26,27]; - разработка методов передачи сигналов по РС [5,10,22,24]; - разработка общей структуры ИУС [12,16,22,23]; - постановка и анализ задачи регулирования активной мощности на основе изменения напряжения, алгоритмы работы устройств [15,18,28]; - решение задачи повышения точности управления нагрузкой [17].

Яндутьський О.С. Управління розподільними електричними мережами на основі інформаційно-управляючих систем. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.02 - електричні станції, мережі та системи. - Інститут електродинаміки НАН України, Київ, 1997.

Дисертацію присвячено роз'язанню важливої науково-технічної проблеми: створенню засобів управління, які забезпечують підвищення ефективності функціонування розподільних електричних мереж в сучасних умовах господарювання. В роботі розвинута концепція функціональних систем автоматичного управління розподільними мережами в нормальному та нормально-дефіцитному режимах, сформульовані методологічні принципи побудови системи управління. Показано, що функціональним стрижнем системи є автоматичне управління навантаженням, технічною основою - інтегрована інформаційно-управляюча система. Ключовим при створенні системи є використання розподільної електричної мережі як середовища для передачі інформаційних сигналів. Запропоновано моделі та методики для дослідження процесів в інформаційно-управляючій системі, методи передачі сигналів по розподільній мережі. Встановлені раніше невідомі закономірності розповсюдження сигналів по електричній мережі. Розроблено структурно-алгоритмічне і технічне забезпечення системи. Основні результати роботи впроваджено в ряді районів електричних мереж та промислових підприємствах, що дозволило підвищити ефективність управління ними.

Ключові слова: розподільна електрична мережа, автоматизація, інформаційно-управляюча система.

Яндутьський А.С. Управление распределительными электрическими сетями на основе информационно-управляющих систем. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.14.02 - электрические станции, сети и системы. - Институт электродинамике НАН Украины, Киев, 1997.

Диссертация посвящена решению важной научно-технической пробле-

мы: созданию средств управления, обеспечивающих повышение эффективности функционирования распределительной электрической сети в современных условиях хозяйствования. В работе развита концепция функциональных систем автоматического управления распределительной сети в нормальной и нормально-дефицитном режимах, сформулированы методологические принципы построения системы управления. Показано, что функциональным стержнем системы является автоматическое управление нагрузкой, а технической основой - интегрированная информационно-управляющая система. Ключевым при создании системы является использование распределительной электрической сети как среды для передачи информационных сигналов. Предложены модели и методика для исследования процессов в информационно-управляющей системе, методы передачи сигналов по распределительной сети. Выявлены ранее неизвестные закономерности распространения сигналов по электрической сети. Разработано структурно-алгоритмическое и техническое обеспечение системы. Основные результаты работы внедрены в ряде районов электрических сетей и промышленных предприятий, что позволило повысить эффективность управления ими.

Ключевые слова: распределительная электрическая сеть, автоматизация, информационно-управляющая система.

Yandulsky A.S. Control of Electrical Distribution Networks on the Basis of Information-Control Systems.-Manuskript.

Thesis for the doctor's degree in technology; speciality 05.14.02: Electric Stations, Networks and Systems.-Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 1997.

The thesis is dedicated to solution of the important scientific-technical problem: creation of control facilities providing the increase of efficiency of technological processes of electrical distribution network under present conditions of economic management. A conception of functional systems of automatic control of distribution network under normal and normal-deficit conditions has been developed in the work, methodological principles of the control system construction have been constructed. It is shown that automatic control of load is a functional pivot of the system while the integrated information-control system is its technological basis. The use of electrical distribution network as the medium for transmission of information signals is the key one

under the system creation. The models and procedure to study the processes in the information-control system, methods of signals transmission by the distribution network are suggested. The unknown regularities on signals distribution in the electrical networks have been discovered. The structure-algorithmic control and hardware of the system have been developed. The basic results of the work are widely introduced to the regions of electrical networks, industrial enterprises that allowed increasing the efficiency of their control.

Key words: electrical distribution network, automation, information-control system

Подписано к печати 30.10.97г. Формат 60x90/16
Бумага офсетная. Формат издания 145x215 мм.
Усл.-печ.лист 2,0. Уч.-изд.лист 2,0
Тираж 100 . Заказ 291 .

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

434170

AR 38747
AB 38.747