

УДК 621.311

В.В.ЛИТВАК, Р.А.ВАЙНШТЕЙН, Ю.В.ХРУЩЕВ, В.И.ГОТМАН, В.Ф.ВАЖОВ, А.С.ГУСЕВ,
Б.В.ЛУКУТИН, А.М.КУПЦОВ

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И СИСТЕМ

Традиционные направления научных исследований старой энергетической школы под влиянием проблем энергетики, вызванных новыми экономическими отношениями в стране, приобретают новое звучание. На факультете автоматики и электроэнергетики ТПУ в настоящее время исследовательские работы проводятся по широкому кругу вопросов, актуальность которых подтверждается поддержкой промышленности, многочисленными выступлениями на конференциях, совещаниях, симпозиумах, включая международные. Представленный здесь обзор научно-исследовательских работ, проводимых учеными факультета в течение последних 4-6 лет, дает определенное понимание современных проблем энергетики, на решение которых направлены наши усилия.

Возобновление издания журнала «Известия Томского политехнического университета» заставляет еще раз взглянуть на состояние и развитие научных исследований. За сто лет существования университета в научной деятельности наблюдались периоды интенсивного роста объемов НИР и периоды стабильного течения работ. Как правило, эти циклы полностью совпадали по времени с соответствующими периодами развития народного хозяйства страны и Сибирского региона.

Бурное развитие научных исследований сопровождалось появлением новых научных школ, новых направлений в науке, появлением новых имен. Среди них нельзя не упомянуть имена известных ученых, составляющих славу научных школ Томского политехнического:

- Профессор **Александр Александрович Потенция** – заложил основы электротехнического образования и научных исследований систем переменного тока.

- Профессор **Василий Михайлович Хрущев** – разработал теоретические подходы анализа устойчивости электромеханических систем переменного тока.

- Профессор **Василий Кузьмич Щербаков** – разработал основы и практические методы расчета стационарных режимов сложных электрических систем и получил первое промышленное подтверждение работоспособности полуволновых электропередач большой пропускной способности.

- Профессор **Георгий Евгеньевич Пухов** – создатель научной школы математического моделирования, заложившей основы операционных методов анализа сложных нелинейных электрических цепей и систем.

- Профессор **Ростислав Александрович Воронов** – автор уникального метода анализа несинусоидальных и несимметричных режимов электрических цепей с нелинейными элементами.

- Профессор **Александр Акимович Воробьев** – выдающийся организатор высшего образования и науки в Сибири, сформировал широкое научное направление в электроэнергетике, электрофизике, ускорении заряженных частиц и геофизике.

- Профессор **Иван Дмитриевич Кутявин** – внес значительный вклад в исследования закономерностей поведения электрических токов и напряжений в предаварийных режимах в электрических системах и внедрил новую идеологию в технические средства защиты и автоматики.

Основанные ими научные школы, научные коллективы кафедр, их ученики и последователи продолжают на факультете автоматики и электроэнергетики исследования по направлению, название которого вынесено в заголовок.

Настоящая статья подготовлена на основе публикаций ученых факультета и отчетов по результатам НИР за последние 3 – 5 лет. По существу здесь представлен обзор наиболее существенных разработок за этот период и сделана попытка показать связь современных проблем электро-

- энергетики с традиционными подходами, сформированными предшественниками. Вместе с тем настоящая работа не претендует на полноту охвата всех научно-исследовательских работ, ведущихся на факультете.

1. Защита от замыканий на Землю в электроустановках 6 – 35 кВ

В результате многолетней работы коллектива сотрудников кафедры электрических станций (зав. кафедрой Р.А.Вайнштейн) созданы и широко используются на практике в течение многих лет устройства защиты от замыканий на землю в электроустановках с изолированной нейтралью и в электроустановках с компенсацией емкостного тока.

На основе результатов исследований, подтвержденных специальным осциллографированием в реальных электроустановках, авторы показали, что большинство (до 90%) всех однофазных замыканий являются дуговыми перемежающимися, в отличие от классического подхода, когда при разработке защиты исходят из того, что замыкания являются устойчивыми.

При перемежающихся замыканиях на землю имеют место следующие друг за другом процессы изменения заряда емкостей фаз при горении дуги и восстановления зарядов после обрыва дуги. Токи и напряжения при горении перемежающейся дуги зависят от большого числа взаимосвязанных случайных факторов: частоты и коэффициента затухания переходных емкостных токов, длительности горения дуги, пробивного напряжения, скорости стекания избыточных зарядов после обрыва дуги, длительности бестоковой паузы. В сети с компенсацией емкостного тока последний фактор связан со степенью расстройки дугогасящего реактора относительно резонанса.

При создании защиты отыскивался такой способ обработки токов нулевой последовательности, при котором сигнал на выходе измерительного органа был по возможности инвариантным по отношению к многообразию процессов при замыкании.

- Проведенные исследования позволили установить, что для решения данной задачи должен использоваться тот факт, что при перемежающихся дуговых замыканиях независимо от характера разрядных и дозарядных токов диапазон изменения зарядов фаз сети при повторяющихся зажиганиях и погасаниях дуги значительно меньше, чем диапазон изменения мгновенных значений токов. Учет этого обстоятельства и направлений токов показывает, что в тех случаях, когда в сети имеется общая для всех присоединений цепь, обеспечивающая достаточно быстрое стекание избыточных зарядов, на неповрежденном элементе изменение заряда за время между соседними моментами зажигания дуги близко к нулю, а на поврежденном приблизительно равно суммарному изменению заряда емкостей фаз всей сети. Данный факт в полной мере относится к сетям с компенсацией емкостного тока и к сетям, заземленным через резистор. В последнем случае обеспечивается практически полное стекание избыточных зарядов за время между двумя пробоями, если активная составляющая тока примерно равна емкостной. В сетях с изолированной нейтралью при выполнении защиты необходимо считаться с возможностью накопления избыточных зарядов от пробоя к пробую изоляции. Таким образом, теоретически защита должна реагировать на изменение заряда или, что одно и то же, на интеграл тока нулевой последовательности за время между двумя пробоями. Поскольку техническая реализация такой защиты довольно сложна, то точное интегрирование тока нулевой последовательности приближенно заменено фильтрацией в определенной области частот. В связи с этим были проведены исследования гармонического состава токов и напряжений нулевой последовательности при перемежающихся замыканиях. Это позволило установить, что защита в компенсированных сетях может быть выполнена на принципе измерения амплитуд гармоник тока нулевой последовательности в полосе частот до 30 Гц, а в сетях с изолированной нейтралью и нейтралью, заземленной через высокоомный резистор в полосе, – до 70 – 80 Гц.

При таком исполнении защиты для компенсированных сетей весьма наглядна спектральная трактовка и высокая селективность объясняется тем, что токи низкочастотных гармоник отвечают преимущественно в дугогасящий реактор, то есть текут по поврежденной линии и сильно ограничиваются низкими в этой области частот емкостными проводимостями неповрежденных линий. В связи с этим условия селективности тем лучше, чем ближе настройка дугогасящего реак-

тора к резонансной, так как при этом частота пробоев низка (несколько Гц) и весь спектр частот токов нулевой последовательности также смещается в область более низких частот. Таким образом, использование для работы защиты в компенсированных сетях токов низких частот не противоречит требованию поддержания точной настройки дугогасящего реактора.

При устойчивых замыканиях действие защиты в компенсированных сетях обеспечивается за счет искусственного наложения контрольного тока с частотой 25 Гц с помощью специального источника контрольного тока, а в сетях с изолированной или заземленной через резистор нейтралью за счет установившегося тока нулевой последовательности рабочей частоты.

Источник контрольного тока выполнен на базе электромагнитного параметрического делителя частоты и включается последовательно в цепь дугогасящих реакторов со стороны заземления. Схема и конструкция электромагнитного параметрического делителя частоты видоизменены так, что, во-первых, сохраняется его работоспособность при протекании по выходным обмоткам полного тока дугогасящих реакторов и, во-вторых, его включение практически не оказывает влияния на ток дугогасящих реакторов, как в установившемся так и в переходном режимах.

При создании источника контрольного тока разработаны оригинальные методы исследования нелинейных систем с периодически изменяющимися параметрами и методы расчета их конструктивных параметров.

На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований разработаны и успешно эксплуатируются следующие устройства:

- селективная сигнализация замыканий на землю в компенсированных сетях;
- защита от замыканий на землю в обмотке статора генераторов, работающих на сборные шины, с использованием типовых фазных трансформаторов тока;
- защита от замыканий на землю мощных гидрогенераторов;
- приборы для непрерывного контроля степени расстройки компенсации емкостных токов и автоматической настройки дугогасящих реакторов.

Названные устройства в течение многих лет успешно эксплуатируются на электростанциях Кузбасской энергосистемы, на Красноярской ГЭС и ряде электростанций в других энергосистемах.

2. Разработка алгоритмов и программ расчетов электрических режимов

Обширность и неравномерность территориального распределения энергоресурсов России и энергетически связанных с ней государств предопределяют остроту проблем обеспечения статической и динамической устойчивости электроэнергетических систем (ЭЭС) на обозримую перспективу.

В плане решения проблемы обеспечения статической устойчивости протяженных энергосистем, в частности, дальних электропередач с промежуточными системами на кафедре электрических систем и сетей был проведен широкий цикл работ. Объединяющей идеей этих работ было предложенное Р.И.Борисовым замещение сложных частей электроэнергетических систем (подсистем) эквивалентными станциями и статическими характеристиками.

Статические характеристики интегрированно отражают влияние всей совокупности факторов, действующих в составе подсистемы, позволяют проранжировать эти факторы по вкладу в характеристики и оценить их влияние на пропускную способность дальних электропередач. При этом решение сложной задачи анализа статической устойчивости протяженных энергосистем существенно упрощается вследствие ее разделения на две подзадачи: построение и анализ эквивалентных статических характеристик подсистем и анализ режимов электропередач с присоединениями, заданными статическими характеристиками.

В этих работах на основе эквивалентных характеристик рассмотрен и решен широкий круг режимных вопросов совместной работы дальних электропередач и промежуточных систем. Задача эквивалентного представления подсистем посредством эквивалентных режимных статических характеристик трансформировалась постепенно в более общую задачу оптимального режимного эквивалентирования, направленную на получение эквивалентов малой размерности звездчатого ти-

па. Работа в этом направлении, проводимая под руководством заведующего кафедрой доцента Ю.В. Хрущева, позволила создать экспериментальный программный комплекс для расчета эквивалентов и технически исполненные аналого-цифровые модельные элементы эквивалентных подсистем. Это привело к эффективному решению проблемы эквивалентного представления подсистем гибридного моделирующего комплекса Тюменской энергосистемы, выполненного силами кафедр электрических станций и электрических систем.

Основу аналитического направления работ, проводимых на кафедре электроэнергетических систем, составляют обоснование и конкретизация основных положений теории управления технологическими системами по программным траекториям движения для задачи построения устойчивых динамических переходов энергосистем. Практическое решение этой задачи в виде создания технических управляющих систем позволит эффективно использовать устройства плавного управления (статические тиристорные компенсаторы реактивной мощности, электромагнитные накопители электрической энергии и др.) для обеспечения динамической устойчивости энергосистем.

К настоящему времени решены методические вопросы формирования программных траекторий движения, построения управлений по этим движениям, задача оптимального выбора основных параметров управляющих устройств, используемых при управлении по программным траекториям движения, проведено цифровое моделирование траекторий и управлений, проведены работы по обоснованию технической и режимной совместимости некоторых управляющих устройств и мощных энергоблоков тепловых электростанций.

В ближайшее время предусматривается решение задачи управления динамическими переходами по программным траекториям движения энергосистем на гибридном моделирующем комплексе. Предварительные эксперименты по моделированию траекторий и управлений на гибридном моделирующем комплексе Тюменской энергосистемы показали целесообразность развития этого направления работ.

3. Повышение надежности электроснабжения нефтепромыслов

1980 г. является началом длительного научного сотрудничества коллектива кафедры электрических систем (под руководством В.И. Готмана) с энергетическими службами объединения «Томскнефть».

Энергетическое хозяйство «Томскнефть» обслуживалось тремя нефтегазодобывающими управлениями: Вахским, Васюганским и Стрежевским. Научно-практические задачи, поставленные предприятием, сформулированы как повышение надежности, экономичности и управляемости системы электроснабжения нефтепромыслов.

В 1980 г. в ведении НГДУ «Стрежовойэнергонефть» находились два месторождения нефти: Советско-Соснинское и Стрежевское. Советско-Соснинское месторождение являлось первым из освоенных в Томской области и одновременно наиболее мощным как по территории, так и по объему добычи нефти.

Система электроснабжения обслуживала более 1200 скважин. Ряд объективных причин: отсутствие опыта проектирования схем электроснабжения нефтепромыслов, параллельное ведение работ по разведке дебитных скважин и строительству линий электропередач 35/6 кВ – привел к тому, что сформировавшаяся схема электроснабжения была далека от оптимальной.

Наиболее существенные недостатки сводились к тому, что:

- значительное количество скважин, территориально тяготея к одним источникам питания (п/ст – 35/6 кВ), были запитаны от более удаленных источников;
- часть фидеров 6 кВ имели недопустимо большую длину, достигающую до 6 – 8 км;
- существенное неравномерное распределение скважин между фидерами, наличие одного выключателя на фидере.

Это приводило к тому, что при повреждении любого участка фидера 6 кВ отключался весь фидер и простаивали все скважины, запитанные от этого фидера. Отсутствие временной координации по запуску отдельных скважин не позволяло осуществить 100%-й автоматический пуск

двигателей при восстановлении питания на фидере. Как следствие этих причин – существенный недоотпуск нефти.

Задача по схемной реконструкции системы электроснабжения Советско-Соснинского месторождения была решена на базе статистического подхода с учетом вероятностной повреждаемости силовых элементов схемы и дебетности скважин. Проведена обработка обширного статистического материала за предшествующие 10 лет по повреждаемости линий 6, 35 кВ, выключателей, трансформаторов, разъединителей, дебетности скважин. Удельная повреждаемость основных элементов оказалась на 20 – 40% выше, чем в европейской части, а по линиям – более чем в 2 раза. Разработанный проект реконструкции схемы позволял существенно повысить ее надежность посредством перераспределения скважин между фидерами и установкой автоматических секционирующих и кольцующих выключателей.

Проблема обеспечения успешного автоматического пуска двигателей механизированной добычи нефти являлась актуальной для большинства месторождений «Томскнефти».

Для координации уставок очередности автоматического пуска электродвигателей разработан новый алгоритм и компьютерная программа. С целью проверки эффективности мероприятия по координации уставок был проведен натурный эксперимент на Нижневартовском месторождении, который полностью подтвердил результаты теоретических расчетов.

В последующем по результатам расчетов была осуществлена координация уставок автоматического пуска электродвигателей на Стрежевском, Советско-Соснинском, Малореченском и Вахском месторождениях.

Наряду с реализацией технологии автоматического пуска электродвигателей разработана компьютерная программа расчета режимов коротких замыканий в схемах электроснабжения и проект диспетчерского пункта для «Стрежовойнефти». Монтаж диспетчерского пункта велся в течение трех лет и на нем были представлены однолинейные принципиальные схемы электроснабжения Советско-Соснинского, Стрежевского, Малореченского, Нижневартовского и Оленьего месторождений. На пункте были смонтированы приборы телеизмерений частоты, напряжений и токовых нагрузок фидеров 35 кВ, питающихся от центральной подстанции «Соснинская». Наличие контролирующих приборов и наглядная информация о состоянии коммутационной аппаратуры существенно облегчили работу диспетчерского персонала, особенно при ведении оперативных подключений и передаче смен.

В предыдущий период основные усилия были направлены на внедрение компенсирующих устройств в схемах электроснабжения нефтепромыслов благодаря их высокой эффективности. Это позволило снизить существующие потери электроэнергии в распределительных сетях на 25 – 35%, снять «штрафные санкции» за потребление реактивной энергии.

Работа коллектива по внедрению компенсирующих устройств с целью снижения потерь осуществлялась и на предприятиях Томска. Ее логическим дополнением явилась разработка устройства по автоматическому регулированию мощности батарей статических конденсаторов, которое установлено на многих предприятиях Томской области и Кузбасса. Научные разработки коллектива кафедры электрических систем были одними из немногих, которые дали реальный экономический эффект благодаря своей практической направленности и завершенности.

Широкое внедрение персональных ЭВМ дало возможность развития нового направления – разработке программного обеспечения для решения прикладных инженерных задач и информационно-графических комплексов, как инструментария советчика диспетчера. Для разработки программного обеспечения были привлечены профессиональные программисты, что позволило подготовить и внедрить следующие программы: расчета режимов коротких замыканий, выбора уставок дифференциальной защиты трансформаторов, выбора сечения проводов в распределительных сетях по многокритериальным условиям, выбора вставок токовых защит в распределительных сетях 6 – 10 кВ. Разработан графический редактор, который благодаря «генератору» геометрических шаблонов позволяет отображать любые технологические схемы. На базе этого редактора была разработана программа расчета установившихся режимов энергосистем. Идеология графического редактора оказалась близка с имеющимися отечественными и зарубежными пакетами геоинфор-

мационных систем, уступая последним в возможности многослойного и растрового отображения, однако редактор имел и существенные преимущества в части как топологического, так и параметрического описания схем. Это побудило создать новую версию информационно-графического комплекса, соединяющего в себе достоинства обоих вышеупомянутых систем.

Томская областная программа энергосбережения

В числе первых в Российской Федерации Томская область в 1996 г. приступила к формированию региональной энергетической политики и региональной программы энергосбережения как главного элемента этой политики. Сотрудники факультета под руководством В.В.Литвака с самого начала приняли активное участие в разработке этих проблем. Концепция программы энергосбережения области базируется на идеях Федерального закона «Об энергосбережении» и федеральной программы и многолетнем местном опыте, научных разработках и большом творческом потенциале.

Объективным фактором, определяющим необходимость региональной энергетической политики, является федеративное устройство России, предполагающее разделение властных функций, прав собственности и ответственности за топливо и энергообеспечение регионов между федеральными органами и субъектами федерации. Процессы децентрализации управления народным хозяйством и расширения экономической самостоятельности территориально государственных образований с развитием реформ резко активизировались. В этих условиях региональная энергетическая политика призвана обеспечить реализацию на рыночных началах выбранной стратегии развития энергетики России и важнейшего ее направления – энергосбережения в интересах как государства в целом, так и его составных частей – субъектов федерации.

Глобальной целью разработки и реализации региональной программы энергосбережения является обеспечение социально-экономического развития региона в период до 2005 года за счет некоренного перевода региональной экономики на энергосберегающий путь. Этой глобальной задаче соответствуют цели в основных сферах деятельности региона:

В производственной сфере:

- снизить удельное потребление энергии на единицу выпускаемой продукции на предприятиях, в быту, сельском хозяйстве и т.д.;
- повысить энергетическую эффективность выпускаемой продукции;
- расширить производство и наполнить рынок техническими средствами измерений, учета и регулирования потребления энергоресурсов;
- ускорить разработку и организовать производство продукции, имеющей улучшенные энергетические характеристики;
- улучшить метрологический контроль, надзор и статистическое наблюдение за расходом энергоресурсов;
- повысить энергетический КПД действующих энергетических установок;
- снизить потери энергоносителей в инженерных сетях;
- повысить теплозащиту зданий, сооружений, сетей;
- повысить научно-технический потенциал региона;
- уменьшить энергетическую зависимость региона (для энергодефицитных регионов).

В экономической сфере:

- увеличить поступление финансовых средств в бюджет региона и бюджеты органов местного самоуправления за счет увеличения налогооблагаемой базы;
- повысить конкурентоспособность продукции за счет увеличения показателей энергоэффективности;
- повысить реальные доходы населения и прибыль предприятий за счет снижения платежей за энергию;
- снизить объемы финансовых ресурсов, уходящих из региона за ввозимые энергоресурсы;
- снизить дотационные выплаты из бюджета.

В социальной сфере:

- повысить уровень жизни населения за счет снижения затрат на все виды потребляемой продукции и, как следствие, расширения потребительской корзины, осуществить адресную поддержку малообеспеченных групп населения, улучшить условия труда;
- создать новые рабочие места и повысить уровень занятости населения, формировать сознание и энергосберегающее поведение населения;
- углублять подготовку и переподготовку персонала, обучение населения, в т.ч. и временно неработающих лиц.

В экологической сфере:

- сократить вредные выбросы в окружающую среду;
- привести качество воздуха, воды, почвы к экологическим стандартам;
- повысить эффективность использования недр.

В политической сфере:

- повысить энергетическую безопасность региона, снизить зависимость от объемов, сроков и качества поступающих в регион энергетических ресурсов;
- повысить стабильность политической ситуации в регионе;
- повысить удовлетворенность населения региона результатами деятельности органов управления;
- повысить престиж региона в органах государственной власти федерации.

Для контроля и оценки эффективности выполнения региональной программы используются специальные показатели (индикаторы):

- стоимость сэкономленных энергоресурсов (млн. руб.);
- экономия топливно-энергетических ресурсов (т.у.т.);
- снижение энергоемкости валового внутреннего продукта (ВВП) (%);
- экономия бюджетных средств за счет сокращения дотаций на оплату энергоресурсов (млн. руб.);
- повышение уровня газификации и электрификации быта (в дефицитных по газу и электроэнергии регионах) (%);
- сокращение потребления воды (млн. м³);
- уменьшение выбросов в атмосферу (тыс. т);
- величина предотвращенного ущерба от загрязнения окружающей среды (млн. руб.);
- удельное потребление энергоресурсов на единицу ВВП (по региону);
- удельное потребление электроэнергии на единицу ВВП;
- удельное потребление энергетических ресурсов на душу населения;
- удельное потребление тепловой энергии на душу населения в год;
- доля потребляемых энергоресурсов, получаемая из-за пределов региона, в т.ч. электроэнергия;
- фактические потери в инженерных сетях (электроэнергия, тепловая энергия, вода, нефтепродукты);
- количество видов продукции и услуг, сертифицированных по энергоэффективности;
- количество квадратных метров жилья, введенного в эксплуатацию в соответствии с новым СНИЛ;
- количество предприятий, прошедших энергетическое обследование;
- количество предприятий, получающих дотацию из бюджета, прошедших энергетическое обследование;
- доля отопительных систем, оснащенных приборами учета тепловой энергии;
- доля водопроводных систем, оснащенных приборами учета воды.

Для реализации сформулированных целей программы необходимо:

- разработать нормативно-правовую базу энергосбережения в регионе;
- сформировать экономические и финансовые механизмы энергосбережения;

- разработать систему стандартизации и сертификации энергосбережения на региональном уровне;
- создать органы управления разработкой и реализацией программы;
- разработать первоочередные высокоэффективные и быстрореализуемые мероприятия по программе;
- реорганизовать научно-техническую и производственную базу предприятий и организаций региона для разработки, производства и реализации энергосберегающей продукции, технологий и оборудования;
- сформировать общественное сознание по проблемам энергосбережения.

В программе энергосбережения выделены следующие разделы:

- *правовое и финансовое обеспечение программы.* Оно включает региональные законы «Об основах энергосбережения в регионе» и «Об обеспечении потребителей тепло- и электроэнергией в регионе», Положение о региональном рынке энергии, пакет постановлений администрации региона о финансовых и экономических механизмах программы, о метрологическом обеспечении сертификации и аттестации, о введении энергетических обследований и мониторинге инженерных сетей, зданий и конструкций, о тарифной политике и оснащении средствами учета, контроля и управления потреблением энергоресурсов, о подготовке, переподготовке и повышении квалификации кадров, о борьбе с расточительным использованием и хищениями энергоресурсов, об органах управления разработкой и реализацией программы и др.;

- *формирование общественного сознания по проблемам энергосбережения.* Здесь дается описание кампании в средствах массовой информации, которая должна постепенно, но достаточно быстро сформировать в сознании населения региона, рабочих и служащих, домохозяек и студентов, школьников и пенсионеров, руководителей промышленности и бизнесменов энергосберегающее поведение;

- *комплекс перспективных мероприятий.* В этом разделе дается краткая характеристика проектов по энергосбережению, предложенных предприятиями, научными учреждениями и авторскими коллективами. Мероприятия сгруппированы по виду энергоресурса: электроэнергия, тепловая энергия, газ, нефть и нефтепродукты, уголь и торф, строительство, вода, альтернативные источники энергии;

- *комплекс первоочередных мероприятий,* включающий быстро окупаемые и эффективные мероприятия, не требующие чрезмерных финансовых затрат. К их числу отнесены: энергетические обследования, внедрение средств и систем учета, контроля и регулирования использования энергоресурсов; мероприятия по формированию общественного сознания по проблемам энергосбережения и др.

В настоящее время в области сформирована региональная система управления реализацией и развитием программы, создается научно-техническая и производственная база предприятий и организаций, сориентированных на широкомасштабную разработку и внедрение энергосберегающей продукции, оборудования и технологий.

Для управления последующей разработкой и реализацией программы, которая должна постоянно корректироваться и совершенствоваться, созданы следующие органы управления:

- *Региональный центр управления энергосбережением: для координации действий в области энергосбережения.*

- *Совет по формированию и реализации программы,* который включает ведущих специалистов из разных отраслей региона и решает стратегические вопросы развития программы энергосбережения в регионе.

- *Научно-технический совет (НТС) Центра,* который выполняет следующее:

- определяет приоритеты конкретных научных исследований и внедрений по разделам региональной программы энергосбережения;
- утверждает результаты обследования предприятий, учреждений региона на предмет эффективности использования энергоресурсов;

- разрабатывает положения о конкурсе энергосберегающих проектов и технологий, о конкурсе среди изобретателей и рационализаторов, о конкурсе среди студентов и учащихся на лучшую работу в области энерго- и ресурсосбережения;
- проводит экспертизу проектов по энергосбережению;
- заслушивает информацию о выполненной работе и итогах по разделам программы энергосбережения;
- рекомендует новые методики и механизмы стимулирования инвестиций в развитие производства и технологий энерго- и ресурсосбережения;
- утверждает идеи и программы проведения конференций, семинаров, выставок и конкурсов по проблемам энерго- и ресурсосбережения в регионе.

- *Экспертные группы по видам деятельности*, которые занимаются разработкой технических заданий по проектам, проведением экспертиз, выполнением проектов по программе энергосбережения и корректировкой плана мероприятий по программе энергосбережения в регионе; осуществлением энергетических обследований.

- *Целевой внебюджетный фонд энергосбережения*, создаваемый для аккумуляции финансовых средств на специальном счете, открываемом департаментом финансов администрации региона в уполномоченном банке. Средства изъятию не подлежат и расходуются в соответствии с целевым назначением, определенным нормативными актами органов власти региона, по предложениям НТС Регионального центра управления энергосбережением.

В настоящее время реализация программы энергосбережения достигла в области определенного уровня. Проведено обследование около 50 предприятий и организаций, в том числе федеральной, муниципальной и акционерной собственности. Подготовлено более 20 инвестиционных проектов и бизнес-планов. Эффект от реализации большинства энергосберегающих мероприятий превышает 4 рубля на рубль вложенный.

4. Исследование электроимпульсного разрушения твердых тел

В конце 50-х годов на кафедре техники высоких напряжений группой ученых под руководством профессора А.А.Воробьева было обнаружено, что при определенных условиях электрическая прочность жидких диэлектриков (даже технической воды) оказывается выше, чем электрическая прочность твердых диэлектриков. Это явление, названное электроимпульсным (ЭИ) способом разрушения, стало интенсивно изучаться и нашло практическое применение в дроблении, бурении, разрушении бетонных и железобетонных изделий и т.п. Данный способ разрушения оказался чрезвычайно эффективным, что предопределило создание на базе кафедры научно-исследовательского института высоких напряжений (НИИВН), в котором были разработаны и испытаны соответствующие установки. В последние годы интерес к данным разработкам значительно повысился, особенно за рубежом в таких странах, как Япония, Германия, Норвегия, Швеция, США и ряде других.

Отдавая должное достоинствам электроимпульсного способа разрушения, все пользователи единодушны в одном: в качестве рабочей жидкости должна использоваться вода или, в крайнем случае, растворы на ее основе. В связи с этим возникает ряд проблем, требующих более глубокого изучения, а также возможности их технического исполнения. К таким проблемам следует отнести следующие:

- уменьшение потерь энергии на токи растекания в воде;
- увеличение электрического сопротивления электродной системы;
- уменьшение волнового сопротивления источника импульсных напряжений и передающих линий;
- увеличение удельного сопротивления воды;
- создание изоляции для высоковольтных электроимпульсных устройств, имеющих большой срок службы ($> 10^7$ импульсов) и высокую надежность работы.

Перечисленные проблемы и являются сегодня предметом научно-исследовательских работ на кафедре техники и электрофизики высоких напряжений.

Здесь впервые предложено осуществлять пробой разрушаемого материала в воде не на фронте косоугольного импульса, как это традиционно выполнялось, а на его спадающей части. В результате удалось значительно снизить уровень рабочих перенапряжений, уменьшить потери энергии на токи растекания, повысить вероятность внедрения канала разряда в твердое тело. Снижение рабочего напряжения, в свою очередь, привело к снижению массогабаритных параметров источника импульсных напряжений. Пробой на спадающей части импульса существенно снизил требования, предъявляемые к форме импульса: к длительности фронта и его крутизне. Многочисленные испытания различных электродных систем показали, что можно получить приемлемый уровень снижения напряжения при разрушении (~15%), если соотношение сопротивления электродной системы к волновому сопротивлению источника импульсных напряжений составит ~4, а не 8 – 10, как ранее. В реальных конструкциях увеличение сопротивления электродных систем достигается уменьшением площади металлических поверхностей электродов и использованием специальных изоляционных устройств. Снижение сопротивления источника импульсных напряжений достигается специальной элементной базой и конструктивным исполнением. Конечно, все рассмотренные проблемы существенно упростятся, если повысить удельное сопротивление воды до уровня $> 10^4$ Ом·см. Реальное удельное сопротивление водопроводной воды ~ $4 \cdot 10^4$ Ом·см. Пробой твердых тел в воде на спадающей части импульса напряжения позволил реализовать межэлектродные промежутки с расстояниями 100 – 300 мм, что в 10 – 30 раз снизило энергозатраты и повысило производительность разрушения при вполне приемлемых амплитудах рабочего напряжения и энергии в разряде. Данные работы были выполнены по контрактам, заключенным между НИИВН и японскими фирмами Mitsui and Co. Ltd., Komatsu Ltd., ITAC Ltd.

Особую проблему составляет изоляция высоковольтных токоведущих элементов, находящихся в воде. Эта проблема не решается путем увеличения удельного сопротивления воды. Изоляция – важнейший элемент любого высоковольтного устройства. Она в первую очередь определяет срок службы и надежность работы. Отсутствие системного подхода при изучении причин отказов изоляции затрудняет как выбор необходимых изоляционных материалов, так и конструирование самого изоляционного элемента, что с особой остротой проявилось при создании электроимпульсных устройств. Проблема изоляции, особенно при работе в воде, разделяется на две части:

- 1) длительная электрическая прочность твердого изоляционного материала;
- 2) перекрытие по поверхности при длительном воздействии импульсного напряжения.

Длительное воздействие электрического поля на твердые диэлектрические материалы постепенно ухудшает их основные электрофизические характеристики. Происходит старение диэлектриков, завершающееся, в конечном счете, пробоем. Процесс старения сопровождается изменением целого ряда характеристик: ионизационными процессами в газовых включениях; накоплением и перераспределением объемных зарядов; зарождением, развитием и накоплением субмикро- и микротрещин; химическими превращениями; изменением электропроводности и др. Все перечисленные характеристики непрерывно изменяются. Все процессы, происходящие в диэлектрике, являются динамическими. Кроме этого, они носят локальный характер, изменяясь с изменением координаты точки наблюдения в объеме диэлектрика. Особый интерес представляют процессы, происходящие непосредственно перед пробоем, когда идет ускоренная деградация рабочего объема диэлектрика, особенно в зоне будущего канала пробоя. Наблюдение этих процессов позволяет, как предсказывать момент пробоя, так и выявить причины пробоя. Для этих целей создан высоковольтный испытательный комплекс, состоящий из высоковольтной импульсной установки (рабочее напряжение 0 – 200 кВ) с частотой следования импульсов 0 – 100 имп/с и программно-измерительного устройства на базе ЭВМ для длительных ($> 10^7$ импульсов) исследований различных твердых диэлектриков. Этот комплекс широко используется в учебных целях для НИРС, УИРС, практических занятий и выполнения дипломных работ студентами. На кафедре разработаны две компьютерные модели старения и пробоя твердых диэлектриков при длительном воздействии электрического поля. Модель старения разработана на базе математического аппарата теории теплового пробоя твердых диэлектриков Фока – Семенова. Предлагаемая модель содержит ряд важных особенностей старения реальных диэлектриков: накопление и перераспределение объем-

ных зарядов, изменение и перераспределение температур, стохастическое распределение неоднородностей в объеме диэлектрика, разогрев под действием локальных токов проводимости и ряд других. Данная компьютерная модель используется как для научных исследований, так и в учебном процессе. Вторая компьютерная модель разработана на базе математических представлений фрактальной геометрии и наглядно описывает процесс развития канала пробоя – дендритную стадию. В настоящее время на базе модели создана лабораторная установка по пробоем твердых диэлектриков.

Вторая часть изоляционной проблемы – перекрытие изоляционных конструкций по поверхности в воде при длительном воздействии импульсов высокого напряжения. Ее удалось решить для электроизоляционных жидкостей, но для воды удовлетворительного решения не было найдено. В связи с вновь возродившимся интересом к ЭИ-технологиям необходимость решения проблемы перекрытия твердой изоляции в воде приобрела большую актуальность. Была выработана новая концепция подбора материала твердых диэлектриков, способного противостоять быстрым перекрытиям. Полученные результаты позволяют оптимистически рассматривать перспективы. Появляется возможность создания изоляции работоспособной в среде технической воды.

В результате проведенных научных исследований и разработок за последние 5 лет были получены следующие результаты: запатентовано три изобретения в России, проводятся патентования в Японии, США, Швейцарии, написано шесть научно-технических отчетов, три из которых на английском языке по контракту с Японией.

5. Гибридный моделирующий комплекс ЭЭС

Современные ЭЭС являются сложными многопараметрическими динамическими системами, все элементы которых жестко взаимосвязаны между собой общими режимами работы, а также методами и средствами их реализации. Существующие тенденции развития ЭЭС ведут к их дальнейшему усложнению и насыщению средствами централизованной автоматики, что еще более усиливает жесткость взаимосвязей. Последнее практически исключает и без того проблематичную возможность декомпозиции собственно ЭЭС и процессов в них при расчете и анализе режимов. Результатом указанных обстоятельств является проблема достоверного и оперативного расчета спектра трехфазных процессов в сложных ЭЭС. Существующие средства расчета сложных ЭЭС, а это различные программы расчета режимов ЭЭС, не позволяют решить данную проблему. Причиной этого являются известные трудности численного решения нелинейных дифференциально-алгебраических систем уравнений большой размерности, которыми при указанных условиях описываются динамические режимы в сложных ЭЭС. Подобного рода численные расчеты оказываются возможными при введении ряда практически стандартных для всех программных средств ограничений и упрощений:

- отказ от трехфазных математических моделей всех элементов ЭЭС;
- отказ от динамических математических моделей сетевых элементов: линий электропередач, трансформаторов и др.;
- упрощение в различной мере математических моделей электрических машин, систем автоматического регулирования возбуждения и турбин;
- разделение единого непрерывного спектра процессов на квазиустановившиеся, быстрые и медленные электромеханические переходные процессы, электромагнитные переходные процессы;
- ограничение длительности воспроизводимых процессов.

В результате указанных допущений: значительно искажается воспроизведение электромагнитных переходных процессов, приближенно и в общем случае с неопределенной погрешностью на ограниченных временных интервалах рассчитываются электромеханические переходные процессы, грубо моделируются несимметричные режимы, в частности без учета гармонических составляющих параметров режимов, что приводит к значительным погрешностям расчета обобщенных и фазных величин. Между тем, согласно статистики, подавляющее большинство аварийных режимов ЭЭС оказываются несимметричными. Следует также отметить, что последствия искажения электромагнитных процессов заключаются не только в потере важной информации о значении

ях параметров режимов и характере их изменения в начальной стадии динамических переходов, но и во влиянии этого искажения на последующие электромеханические процессы, так как электромагнитные процессы, являясь начальной стадией переходных процессов, формируют начальные условия для последующих электромеханических процессов. При этом, несмотря на указанные существенные допущения и ограничения, остается низкой оперативность получения результатов моделирования. Между тем каждые из известных методов и средств моделирования ЭЭС – физические, математические аналоговые и цифровые – обладают отдельными уникальными свойствами, объединение которых образует эффективные комбинации для полноценного, достоверного и оперативного решения обозначенной проблемы. Поэтому предпринимавшиеся ранее и предпринимаемые в настоящее время в России и за рубежом попытки создания различного рода гибридных систем моделирования ЭЭС являются естественными и объективными. В частности, исследования и разработки в этой области наиболее интенсивно ведутся в Канаде и Японии:

- Installation of sustems analysis calculation center // Techno Jap. - 1992. - 25, сообщается, что компания Chubu electric Power Co. (третья по количеству производимой в стране электроэнергии) создала первый в Японии вычислительный центр для анализа режимов ЭЭС, состоящий из аналоговой модели и суперЭВМ VP-2400 компании Fujitsu. Аналоговая модель предназначена для анализа переходных процессов в ЭЭС в реальном времени.

- The first digital / analog hybrid power sustem simulator // Techno Jap. - 1995. - 28. - №2. - С.70, сообщается, что Токийская энергокомпания (первая по количеству производимой в стране электроэнергии) разработала новую цифро-аналоговую модель для исследования переходных процессов в ЭЭС. Новая модель имеет меньшие габариты по сравнению с применявшейся ранее аналоговой моделью и обладает более широкими возможностями.

- Моделирующее устройство для анализа электроэнергетических систем. Нодзири Косукэ, Такенака Киеси, Гото Масыо // Denki hyoron=Elec.Rev. - 1997. - 82. - №5. - С.67-71. - Яп., сообщается о создании новой модели крупномасштабной ЭЭС на базе аналоговой установки и микроЭВМ.

Однако получение практического результата сопряжено с решением сложной наукоемкой задачи, связанной с необходимостью разработки специализированных гибридных процессоров и специализированного программного обеспечения (СПО), а также наличием соответствующего уровня развития интегральной микроэлектронной элементной базы, который был достигнут лишь в течение последнего десятилетия.

Вышеизложенное кратко характеризует проблему моделирования сложных ЭЭС, ее современное состояние и актуальность. В связи с этим в научно-исследовательской лаборатории моделирования ЭЭС факультета автоматики и электроэнергетики под руководством доцента А.С.Гусева на протяжении последних десяти лет при поддержке и участии ОАО «Тюменьэнерго» ведется интенсивная НИОКР по разработке современной концепции гибридного моделирования ЭЭС и гибридного моделирующего комплекса (ГМК ЭЭС). В результате этой работы создан ГМК Тюменской энергосистемы (ГМК ТЭ), который после лабораторных и демонстрационных испытаний в апреле 1998г. установлен в опытную эксплуатацию ОАО «Тюменьэнерго». Моделируемая на ГМК ТЭ схема включает в себя неэквивалентированную сеть 500 кВ и взаимоиндуктирующую с ней сеть 220 и 110 кВ, а остальная схема ТЭ представлена 11 эквивалентными подсистемами, рассчитываемыми с помощью специально разработанного для этих целей программного комплекса «Старт». Концептуально ГМК ТЭ представляет собой параллельную, гибридную, многопроцессорную систему реального времени, состоящую из комплекса гибридных процессоров и информационно-управляющей системы (ИУС). В созданной модификации ГМК ЭЭС (ТЭ) ИУС включает в себя:

- центральный процессор (IBM PC);
- интерфейсно-адаптерную аппаратуру;
- специализированное программное обеспечение (СПО), основу которого составляют адаптируемая база данных и алгоритмический профессионально (электроэнергетически) ориентированный язык высокого уровня.

Каждый элемент ЭЭС, энергоблок, трансформатор, линия электропередачи, синхронный, асинхронный двигатель и др. моделируются с помощью специализированных цифро-аналого-

физических процессоров (СЦАФП). СЦАФП обеспечивают непрерывное методически точное решение в реальном времени полных нелинейных дифференциально-алгебраических систем уравнений соответствующих трехфазных элементов ЭЭС, а также преобразование нужных математических переменных в физические и полный спектр коммутаций на физическом уровне, охватывающий все симметричные и несимметричные режимы. Последнее позволяет формировать моделируемые схемы ЭЭС путем естественного соединения модельных элементов между собой, согласно топологии этих схем и с учетом фазировки. Аппаратная часть ГМК ТЭ выполнена полностью на современной интегральной микроэлектронной элементной базе. СПО предоставляет пользователю три возможных режима моделирования: интерактивный, пакетный и комбинированный, объединяющий в различном сочетании первые два режима, обеспечивающие широкие и удобные сервисные и функциональные возможности полностью автоматизированного управления ГМК ТЭ, наблюдения, обработки и представления результатов моделирования в виде различных диаграммных, цифровых, аналоговых приборов и осциллограмм, выводимых на экран монитора и печать.

ГМК ТЭ обеспечивает возможность непрерывного моделирования в реальном времени полного спектра трехфазных процессов ЭЭС: электромагнитных и электромеханических переходных процессов, квазиустановившихся процессов, охватывающих всевозможные симметричные и несимметричные режимы ЭЭС с учетом действия САР, устройств РЗА и ПА.

Установленный в опытную эксплуатацию в ОАО «Тюменьэнерго» ГМК ТЭ моделирует трехфазную схему ЭЭС, содержащую: 30 энергоблоков, блоков синхронных и асинхронных двигателей с соответствующими системами АРВ, АРТ, механического момента нагрузки двигателей; 198 элементов ЛЭП с учетом взаимоиндукции, 14 сетевых трансформаторов с РПН, 19 шунтирующих реакторов, 46 эквивалентных лучевых связей, 11 нагрузок, представляемых статическими характеристиками, 1326 высоковольтных выключателей и короткозамыкателей.

Основные научные результаты разработки ГМК ТЭ запатентованы и опубликованы в статьях и докладах конференций различных уровней.

Отмеченные уникальные свойства разработанного ГМК ЭЭС делают его значительно более совершенным инструментом моделирования режимов ЭЭС, особенно динамических и несимметричных, обладающим широкими реальными и потенциальными возможностями. Полный и обоснованный перечень задач, решаемых на ГМК ТЭ, является предметом дальнейших исследований. Поэтому в настоящее время можно указать лишь очевидную область его преимущественного использования, в которой следует выделить два уровня задач. К первому уровню относятся задачи, которые могут решаться на ГМК ЭЭС непосредственно, и их постановка не требует какой-либо доработки программной и аппаратной части ГМК, а заключается только в составлении нужных процедур моделирования на языке СПО:

- проверка и уточнение областей статической устойчивости режимов энергосистемы с целью оценки действительных коэффициентов запаса;
- проверка и уточнение условий сохранения динамической устойчивости режимов энергосистемы при симметричных и несимметричных возмущениях, особенно нештатных и оперативном управлении в условиях дефицита времени для принятия решения;
- проверка функционирования и уточнение настроечных параметров средств РЗА, ПА, систем автоматического регулирования возбуждения и турбины (АРВ и АРТ) с целью повышения эффективности их работы;
- достоверный и оперативный анализ штатной работы оперативного персонала, средств РЗА, ПА, систем АРВ и АРТ при разборе аварийных режимов энергосистемы;
- разработка методов локального и системного режимного противоаварийного управления, определения мест приложения и характера этих воздействий с целью:
 - наиболее эффективного использования существующих средств ПА и РЗА;
 - модернизации существующих средств ПА и РЗА;
 - выработки и формирования требований к вновь разрабатываемым средствам ПА, РЗА и общесистемного режимного регулирования.

Второй уровень составляют задачи, постановка которых на ГМК связана с необходимостью осуществления определенных методических, программных и аппаратных мероприятий:

- создание на базе ГМК ЭЭС всережимного, работающего в реальном времени советчика диспетчера;
- создание на базе ГМК ЭЭС автоматизированного рабочего места для настройки, тестирования и исследования реальных аналоговых и цифровых средств РЗА, ПА и АРВ;
- создание на базе ГМК ЭЭС многоцелевого, работающего в реальном времени, всережимного тренажера;
- получение и обработка неретроспективных статистик параметров рабочих режимов и переходных процессов энергосистемы для разработки и применения методик оценивания режимных состояний ЭЭС, эффективности работы РЗА и ПА, управления рабочими режимами и переходными процессами.

6. Машинно-вентильные источники электропитания малой мощности

Основным направлением исследований является создание машинно-вентильных систем, которые кроме своей основной задачи – генерирование электроэнергии – осуществляют функции стабилизации рабочего режима гидрогенераторов и системы электроснабжения в целом.

Подобные системы позволяют использовать дешевые и надежные нерегулируемые гидротурбины /или насосы в турбинном режиме/, что существенно улучшает технико-экономические показатели микрогидроэлектростанций.

Для достижения данной цели наиболее подходящим вариантом конструкции станции является гидроагрегат с автобалластной тиристорной системой стабилизации. Принцип автобалластной стабилизации величины и частоты выходного напряжения гидроагрегата заключается в регулировке его электрической мощности с помощью балластной нагрузки, включаемой на выход генератора параллельно основным нагрузкам системы. МикроЭЭС, реализующая этот принцип, конструктивно состоит из следующих основных элементов: гидротурбины с простейшими гидротехническими сооружениями типа деривационного канала, напорного трубопровода, задвижек и др., электромашинного генератора с системой самовозбуждения, автобалластной системы, включающей тиристорный регулятор мощности и балластной нагрузки, коммутационной, защитной и регулирующей аппаратуры.

Автобалластные системы стабилизации применимы для любого типа генератора и могут строиться на основе тиристорных коммутаторов или схем регуляторов с фазовым управлением.

Основная проблема, затрудняющая создание автобалластных микроЭЭС, состоит в оптимизации статических и динамических режимов работы гидроагрегата путем выбора схемных решений и параметров, стабилизирующих систем по каналам возбуждения генератора и регулирования балласта. Эффективным путем оптимизации является имитационное моделирование на ПЭВМ рабочих режимов микрогидроэлектростанции с учетом характеристик ее основных элементов гидротурбины, генераторы, полезной и вентильной балластной нагрузки, стабилизирующих систем.

Важным вопросом является обеспечение требуемой формы кривой выходного напряжения в условиях работы генератора на вентильную нагрузку соизмеримой мощности. С положением токов и напряжений генератора связан коэффициент использования мощности генератора.

Решению названных проблем посвящена одна докторская и три кандидатские диссертации. По теме опубликовано около 100 печатных работ.

7. Качество электротехнической подготовки как фактор надежности в электроэнергетике

Анализ функционирования энергетических систем показывает, что в значительной степени их надежность определяется «человеческим фактором». Под этим понимается степень соблюдения правил технической эксплуатации, правил техники безопасности, способность принимать правильные решения в нештатных ситуациях. Все это, в конечном счете, определяется электротехнической грамотностью персонала.

Первичную базовую электротехническую подготовку специалисты-электроэнергетики получают на кафедре теоретических основ электротехники (ТОЭ). Это одна из старейших кафедр Томского политехнического университета. Ее формирование начиналось в начале века (1902 г.), когда профессор А.А.Потебня приступил к чтению лекций по электротехнике и организовал электротехническую лабораторию.

Как структурное подразделение кафедры ТОЭ (тогда она называлась кафедрой электротехники) создана в 1923 г. Ее первым заведующим стал В. В. Ширков, крупный ученый, под руководством которого была построена первая российская радиостанция «Коминтерн».

История развития кафедры – это история развития электротехники и электротехнического образования. Разработки ученых – преподавателей кафедры, направленные на совершенствование производства, распределения и потребления электрической энергии не только служили целям производства, но и являлись основой для обучения специалистов электроэнергетиков. Так, например, работы профессора Р.А.Воронова по анализу аварийных режимов в трехфазных цепях привели к разработке цикла лабораторных работ по трехфазным цепям, что дало возможность инженерам в процессе обучения самим моделировать многие аварийные режимы. Работы проф. Г.Е.Пухова, посвященные разработке методов расчета сложных электрических цепей, позволили, с одной стороны, решать конкретные задачи анализа токораспределения в электрических системах, а с другой – обучать студентов новым современным методам расчета электрических цепей большой размерности.

Проведение работ по использованию высоких электрических полей в различных технологических процессах вызвало интерес к разработке недорогих источников высокого напряжения. Научные интересы кафедры ТОЭ связаны с проблемой создания эффективного высоковольтного электростатического генератора. Проработка теории электростатических машин завершилась защитой одной докторской (В.В.Пацевич) и нескольких кандидатских диссертаций. Работы по данной тематике явились основой для создания нового для кафедры учебного курса «Методы расчета электрических и магнитных полей» и лаборатории электрического моделирования.

В настоящее время научные разработки ученых кафедры служат целям производства, а апробированные в производстве решения становятся базой для дальнейшего совершенствования учебного процесса.

Бурное развитие вычислительной техники и ее внедрение в производственную сферу заставило существенно пересмотреть и технологию обучения студентов. Информатика стала одной из составных частей электротехники, и, как следствие, возможности в изучении электротехники существенно возросли. Стали возможными расчеты сложных электрических цепей, численное моделирование электромагнитных полей и режимов цепей, реализация компьютерных лабораторных работ, обучающих и контролирующих программ. Владение компьютером способствует повышению качества подготовки и облегчает адаптацию молодых специалистов на производстве в условиях современного прогресса.

В русле современных требований на кафедре под руководством А.М.Купцова ведется разработка автоматизированных учебных курсов (АУКов) по электротехнике на базе инструментальной оболочки ADONIS. В настоящее время созданы и используются в обучении студентов АУКи практически по всем изучаемым разделам ТОЭ. Накопленный опыт позволяет сделать вывод, что созданная система обучения в целом справляется с поставленной задачей, но всё же не лишена ряда недостатков. В частности, инструментальные и графические средства, предоставляемые системой ADONIS, во многом проигрывают в сравнении с современными зарубежными обучающими оболочками.

Проведенный анализ ряда современных программных средств (Visual C, Visual BASIC, Delphi и др.) с целью выбора оптимальной инструментальной оболочки, пригодной для создания обучающих систем, показал существенные преимущества специализированного средства создания электронных книг Toolbook фирмы Asymetrix. Toolbook, как и создаваемый посредством его продукт, работает под управлением современной операционной системы Windows и обладает обширным графическим инструментарием. Он оснащен современным языком программирования Open

Skript, предоставляющим широкие программные возможности, а также специальные средства навигации внутри электронной книги.

Выбор инструментальной оболочки позволил приступить к разработке более современного программного комплекса, реализующего практически все функции обучающей системы по курсам электротехники. Этот комплекс включает в себя следующие функциональные модули:

- справочник;
- учебник;
- экзаменатор;
- тренажёр;
- пакет математического обеспечения.

Справочник представляет собой программу, реализующую доступ пользователя к фрагментированному материалу по изучаемому курсу, элементы которого имеют логико-тематические гипертекстовые связи между собой. Эта программа информирует студента об объёме изучаемого материала и предоставляет свободу действий в выборе просматриваемого справочного материала.

Учебник – это программа, воспроизводящая материал изучаемого курса, объявленный в программе-справочнике и изложенный в логической последовательности, т.е. учебник «ведёт» обучение студента по заданной преподавателем траектории. В учебнике для контроля текущего усвоения изучаемого материала предусматривается ряд тестовых заданий, предлагаемых студенту после изучения логически законченного блока информации.

Задача экзаменатора – определение некоторой количественной меры усвоения всего изучаемого курса (разделов или фрагментов курса). Представленные здесь тестовые задания организованы таким образом, что охватывают все указанные разделы, позволяя судить об усвоении каждого из фрагментов курса.

Программа – тренажёр обладает всеми вышеперечисленными свойствами программы экзаменатора. Однако её основной задачей является выявление не усвоенных фрагментов курса или ошибочных представлений о них и своевременная подача корректирующей информации, объясняющей суть ошибки.

Пакет программ математического обеспечения предназначен для самостоятельной работы студентов при выполнении курсовых работ и расчетно-графических заданий. Математическая часть помещена в удобную интерфейсную оболочку, которая не требует навыков работы. Оболочка сформирована таким образом, что позволяет студенту рассчитать основную задачу по отдельным фрагментам, давая возможность детальной проработки материала.

Основные модули описанного программного комплекса уже готовы и используются для аудиторной и самостоятельной работы студентов, а также для подготовки и сдачи экзамена.

Результаты работы обнадеживают, у студентов вызван интерес к предмету, и, возможно, это приведет к ожидаемому эффекту повышения качества электротехнической подготовки специалистов, как следствие, к повышению надежности в электроэнергетике.