

На правах рукописи



Свечкарев Сергей Владимирович

**ВСЕРЕЖИМНЫЙ ДИСПЕТЧЕРСКИЙ ТРЕНАЖЕР РЕАЛЬНОГО
ВРЕМЕНИ ЭЭС**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические
системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2011

Работа выполнена в Национальном исследовательском Томском политехническом университете

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Гусев Александр Сергеевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор **Литвак Валерий Владимирович**

кандидат технических наук **Петров Александр Михайлович**

Ведущая организация: Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева
Сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится 19 октября 2011 г. в 15 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д212.269.10 при Национальном исследовательском Томском политехническом университете по адресу: 634050 г. Томск, пр. Ленина 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Автореферат разослан 7 сентября 2011 г.

Ученый секретарь

совета по защите докторских

и кандидатских диссертаций Д212.269.10

доктор технических наук, профессор



А.В. Кабышев

Общая характеристика диссертационной работы

Проблема и ее актуальность. Согласно статистике, причиной значительного числа тяжелых аварий и их развития в ЭЭС (по разным оценкам не менее 25%) служат неправильные и запоздалые действия диспетчерского персонала. Поэтому повышение качества его обучения и тренажа является исключительно важной задачей, уровень решения которой во многом определяет надежность и эффективность функционирования ЭЭС. Поскольку основным средством решения этой задачи являются диспетчерские тренажеры, то и уровень ее решения зависит от их эффективности. В связи с этим, разработке и совершенствованию тренажеров для диспетчерского персонала ЭЭС уделяется большое внимание, как в России, так и за рубежом. В их разработках принимают участие связанные с энергетикой крупные компании, университеты и известные ученые.

Опыт создания и использования разнообразных тренажеров в различных областях, в том числе в электроэнергетике, подтверждает понятное и очевидное главное требование к тренажерам – максимально возможное соответствие реальности, то есть как можно более полная адекватность используемого для тренировки объекта и условий работы с ним.

Ввиду недопустимости, за редкими исключениями, натурных экспериментов в ЭЭС и невозможности, из-за их чрезмерной сложности, полноценного физического моделирования, основным путем воспроизведения объекта тренировки – ЭЭС в диспетчерских тренажерах служит математическое моделирование, полноту, достоверность и оперативность которого определяют два очевидных фактора:

- 1) адекватность математических моделей всех значимых элементов, образующих совокупную модель ЭЭС;
- 2) способность средств решения совокупной математической модели ЭЭС обеспечивать его реализацию с необходимой точностью и оперативностью.

Стремление к максимально возможной реализации этих факторов составляет главную тенденцию в развитии и совершенствовании тренажеров диспетчерского персонала ЭЭС, включая последние современные разработки. Однако, адекватные всережимные математические модели ЭЭС, достаточно полно и достоверно описывающие в оборудовании и ЭЭС реальный непрерывный спектр процессов при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их работы, всегда

содержат очень жесткую (отношение наибольшей постоянной времени к наименьшей $> 10^3$), нелинейную систему дифференциальных уравнений чрезвычайно высокого (кратно превышающего 10^3) порядка. Адекватный учет функционирования релейной защиты и противоаварийной автоматики (РЗ и ПА) еще более усложняет эту модель. Согласно условиям применимости теории методов дискретизации для обыкновенных дифференциальных уравнений, подобные системы дифференциальных уравнений не могут быть удовлетворительно решены с помощью методов численного интегрирования, тем более на больших и неограниченных интервалах, в связи с их плохой обусловленностью на условиях применимости этих методов. Единственным способом улучшения этой обусловленности является снижение жесткости и дифференциального порядка путем декомпозиции и упрощения рассчитываемых математических моделей ЭЭС, а также ограничения интервала воспроизведения процессов.

Несмотря на используемые в существующих тренажерах указанные упрощения и ограничения, время расчета процессов оказывается, как правило, больше времени действия РЗ и ПА. Поэтому в существующих тренажерах функционирование средств РЗ и ПА либо не учитывается, либо учитывается весьма упрощенно.

Поскольку воспроизводимые в диспетчерских тренировках различного рода управления и разнообразные отображения схемно-режимных состояний и процессов непосредственно связаны с объектом моделирования – ЭЭС, то и их адекватность напрямую зависит от полноты, достоверности и временной реальности воспроизводимых процессов.

Таким образом, адекватность используемых тренажеров и их информационно-управляющих возможностей определяет эффективность формирования различных методических аспектов проведения тренировки, разработка которых выходит за рамки данной работы, так как является специализированной, сложной, самостоятельной задачей.

Из вышеизложенного следует, что несмотря на колоссальный прогресс ИТ-технологий, поставленная в диссертации задача создания адекватного всережимного диспетчерского тренажера реального времени ЭЭС (ВДТ РВ ЭЭС) остается весьма актуальной.

Цель работы. Создание ВДТ РВ ЭЭС, обеспечивающего достаточно полное и достоверное воспроизведение в реальном времени непрерывного спектра процессов в оборудовании и ЭЭС при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их работы с полноценным учетом функционирования средств РЗ и ПА. Созданный в научно-исследовательской лаборатории (НИЛ) «Моделирование ЭЭС» Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета всережимный моделирующий комплекс реального времени ЭЭС (ВМК РВ ЭЭС) является практически идеальной инструментальной и информационной основой для реализации поставленной цели.

При выполнении данной работы были поставлены и решены следующие конкретные задачи:

1. Анализ проблемы полноты, достоверности и оперативности воспроизведения режимов и процессов в современных диспетчерских тренажерах ЭЭС.
2. Обоснование и разработка концепции ВДТ РВ ЭЭС.
3. Разработка специализированного программного обеспечения ВДТ РВ ЭЭС.
4. Экспериментальное подтверждение концептуальных свойств и возможностей ВДТ РВ ЭЭС на основе практической реализации демонстрационного сценария противоаварийной тренировки диспетчерского персонала конкретной энергосистемы.

Методы исследования. В диссертации использованы методы исследования, основанные на анализе и сравнении свойств и возможностей эталонного диспетчерского тренажера ЭЭС и наиболее известных отечественных и зарубежных современных диспетчерских тренажеров, метод направленных графов и методики синтеза адекватных математических моделей РЗ и ПА, метод структурного анализа и объектно-ориентированного программирования.

Научная новизна:

1. Выявлена и обоснована проблема, принципиально препятствующая созданию адекватных тренажеров диспетчерского персонала ЭЭС реального времени, основанных на сугубо численном подходе к их реализации.
2. Сформулирована на основе комплексного подхода новая альтернативная концепция создания ВДТ РВ ЭЭС, обеспечивающего достаточно полное и достоверное воспроизведение в реальном времени непрерывного спектра режимов и процессов

в оборудовании и ЭЭС, с полноценным учетом функционирования средств РЗ и ПА, а также все необходимые для обучения и тренажа информационно-управляющие возможности.

3. Предложена и обоснована структура программных средств, позволяющая в полной мере реализовать положения сформулированной концепции.

Практическая ценность. Применение ВДТ РВ ЭЭС позволяет значительно повысить уровень и качество подготовки диспетчерского персонала ЭЭС, что в свою очередь создает связанные с этим условия для более надежного и эффективного функционирования ЭЭС.

Реализация работы. Результаты разработки ВДТ РВ ЭЭС реализованы в ряде НИР при непосредственном участии автора диссертации, в частности:

1. В договорных НИР ТПУ с ОАО «Тюменьэнерго»: №№9-27/02, 9-28/02, 9-175/02, связанных с разработкой всережимного диспетчерского тренажера и советчика реального времени Тюменской энергосистемы.
2. В договорных НИР НИ ТПУ с ОАО «Томские Магистральные Сети»: №№7-69/07у, 7-215/07у, 7-140/08у, связанных с созданием и применением ВМК РВ ЕНЭС Томской области, на базе которого запланирована реализация разработанного в диссертации ВДТ РВ ЭЭС.
3. В НИР по государственному контракту № 217/2 от 07.06 2008г. «Разработка тренажёра для оперативного персонала электроэнергетических предприятий на основе гибридного моделирующего комплекса».
4. В НИР по государственному контракту 01.2.00 903303 «Разработка тренажеров для подготовки и переподготовки специалистов диспетчерского персонала электроэнергетических систем».

Кроме этого, результаты диссертационной работы использованы в работах, связанных с применением диспетчерского тренажера на базе разработанного ВМК РВ ЭЭС в объеме эквивалентной схемы ЕНЭС Томской области для учебных и научно-исследовательских целей Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Личный вклад автора. Разработка и практическая реализация ВМК РВ ЭЭС и ВДТ РВ ЭЭС осуществлялась при непосредственном участии автора в коллективе научно-исследовательской лаборатории «Моделирование ЭЭС» под руководством

Гусева А.С., д.т.н., проф. каф. «Электроэнергетические сети и системы» Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Основные результаты, выносимые на защиту:

1. Результаты анализа проблемы адекватности современных диспетчерских тренажеров и тенденций их развития.
2. Предложенная концепция ВДТ РВ ЭЭС.
3. Результаты разработки специализированного программного обеспечения ВДТ РВ ЭЭС.
4. Результаты практической реализации ВДТ РВ ЭЭС на примере демонстрационного сценария противоаварийной тренировки диспетчерского персонала энергосистемы.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях и семинарах:

1. The 2009 International Forum on Strategic Technologies “IFOST 2009” (Vietnam, HoChiMinh City, Vietnam University of Technology, 2009).
2. 9-th Korea-Russia International Symposium on Science and Technology “KORUS 2005” (Russia, Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University, 2005).
3. The 10-th IFAC/IFORS/IMACS/IFIP Symposium in Large Scale Systems: Theory and Applications (Japan, Osaka, Osaka International Convention Center, 2004).
4. 8-th Korea-Russia International Symposium on Science and Technology “KORUS 2004” (Russia, Tomsk, Tomsk Polytechnic University, 2004).
5. Международная научно-техническая конференция «Электроэнергия и будущее цивилизации» (ТПУ, г. Томск, 2004 г.).
6. Третья Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов» (АмГУ, г. Благовещенск, 2003 г.).

Публикации. По результатам исследований, связанных с тематикой диссертационной работы опубликовано 33 работы, в том числе: 9 статей в рецензируемых периодических изданиях по перечню ВАК и 1 патент РФ на изобретение.

Структура и объем диссертации. Объем представленного диссертационного материала составляет 232 страницы и включает в себя: оглавление, введение, четы-

ре главы, заключение, 7 приложений и библиографический список из 98 наименований. Основной материал диссертационной работы содержит 153 страницы и 90 рисунков.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность создания адекватного ВДТ РВ ЭЭС. Проведен краткий анализ мирового опыта, тенденций и сложности решения данной задачи сугубо численным путем. Обозначены эталонные свойства, возможности адекватного ВДТ РВ ЭЭС и пути их достижения, реализация которых является целью данной работы. Сформулирована научная новизна работы, приведены сведения о результатах практической реализации ВДТ РВ ЭЭС, а также апробации и публикации материалов диссертационной работы.

В первой главе «Исследование проблемы адекватности диспетчерских тренажеров ЭЭС» представлены результаты анализа свойств и возможностей наиболее известных современных тренажеров и перспектив их развития: отечественного режимного тренажера диспетчера ЭЭС «Финист» и зарубежного диспетчерского тренажера OTS (Operator Training Simulator).

Тренажеры «Финист» и OTS основаны практически на одних и тех же принципах и имеют, соответственно, схожие свойства, возможности и недостатки. Существенным недостатком этих тренажеров является расчет только симметричных режимов, тогда как подавляющее большинство аварий в ЭЭС и, соответственно, тренировок связаны с несимметричными. Другой значительный недостаток заключается в делении моделируемой схемы ЭЭС на «острова» и расчет переходных процессов отдельно для каждого из них, при котором, к тому же, используются весьма упрощенные математические модели элементов ЭЭС. Нерешенным также остается вопрос синхронизации расчетов процессов в ЭЭС и функционирования РЗ и ПА: расчет одного шага адекватной по объему реальной схемы ЭЭС занимает несколько секунд, тогда как время действия большинства средств РЗ и ПА существенно меньше. Стремление уменьшить время расчета шага приводит к неизбежному дальнейшему упрощению математических моделей ЭЭС. Что касается реального масштаба времени моделирования ЭЭС, который может быть реализован с помощью многопроцессорной ЭВМ, то при низкой достоверности воспроизведения процессов создание на этой основе тренажеров становится нецелесообразным.

В результате проведенных исследований установлено, что основной и принципиально неустранимой, в рамках сугубо численного подхода, причиной необходимости указанных упрощений и ограничений служат, определяемые теорией методов дискретизации для обыкновенных дифференциальных уравнений, условия применимости методов их численного интегрирования, на которых адекватные математические модели реальных ЭЭС оказываются очень плохо обусловленными и соответственно не могут быть удовлетворительно решены. Поэтому, несмотря на постоянно предпринимаемые в рамках данного подхода усилия, направленные на радикальное повышение достоверности и оперативности диспетчерских тренажеров ЭЭС, эта проблема по-прежнему остается нерешенной.

В работе предложен альтернативный комплексный подход к решению проблемы достоверности и оперативности диспетчерских тренажеров ЭЭС, основанный на использовании разработанной, в том числе для данной цели, специализированной многопроцессорной программно-технической системы гибридного типа – ВМК РВ ЭЭС. Исследования, испытания и опытная эксплуатация ВМК РВ ЭЭС полностью подтвердили наличие свойств и возможностей, обеспечивающих адекватное моделирование в реальном времени действительного непрерывного спектра нормальных и аномальных процессов в оборудовании и ЭЭС в целом, поэтому его использование создает практически идеальные условия для построения концепции и разработки ВДТ РВ ЭЭС.

Во второй главе «Концепция всережимного диспетчерского тренажера реального времени ЭЭС» сформулированы и обоснованы основные положения предложенной концепции, определяющие структуру, конкретный состав программного обеспечения и функциональную взаимосвязь программных средств.

Главной целью рассматриваемой концепции является создание диспетчерского тренажера ЭЭС, который обеспечивал бы достаточно полное и достоверное моделирование в реальном времени действительного непрерывного спектра нормальных и аномальных процессов в оборудовании и ЭЭС при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их работы с полноценным учетом функционирования средств РЗ и ПА. При этом тренажер должен обладать профессионально-ориентированными программными средствами высокого уровня, авто-

матизированными и автоматическими информационно-управляющими свойствами и возможностями необходимыми для:

- 1) создания, редактирования и выполнения в реальном времени всевозможных сценариев диспетчерских тренировок;
- 2) автоматизированного и автоматического управления в реальном времени параметрами и схемно-режимными состояниями оборудования и моделируемой ЭЭС в целом;
- 3) представления, функционального преобразования и отображения в реальном времени управлений, схемно-режимных состояний и процессов;
- 4) создания распределенных автоматизированных рабочих мест (АРМ) и их информационного взаимодействия;
- 5) взаимодействия в компьютерных сетях с оперативным измерительным комплексом (ОИК) ЭЭС для автоматизированного и автоматического установления и отслеживания исходных квазиустановившихся схемно-режимных состояний ЭЭС по нужным данным ОИК;
- 6) автоматического архивирования, текстового и графического оформления сценариев и их протоколирования.

Для достижения сформулированной цели необходимо реализовать с помощью программно-информационных технологий все вышеперечисленные информационно-управляющие характеристики, присущие эффективному адекватному диспетчерскому тренажеру ЭЭС, используя в полной мере свойства и возможности ВМК РВ ЭЭС, которые обеспечивают адекватное моделирование в реальном времени действительного непрерывного спектра режимов, процессов в оборудовании и ЭЭС в целом.

Суть и содержание рассмотренной концепции определяют представленную на рисунке 1 структуру ВДТ РВ ЭЭС, где: СГП – специализированные гибридные процессоры моделируемых элементов ЭЭС; АВС – функциональные трехфазные взаимосвязи; КТУ ЭЭС – коммутатор трехфазных узлов моделируемой ЭЭС; ЛКС – локальная компьютерная сеть ВМК РВ ЭЭС; АРМ_т и АРМ_и – автоматизированные рабочие места тренирующихся диспетчеров и инструктора (руководителя тренировки); ТДС – тренажерная диспетчерская связь; Сервер ОИК – сервер оперативного измерительного комплекса предприятия.

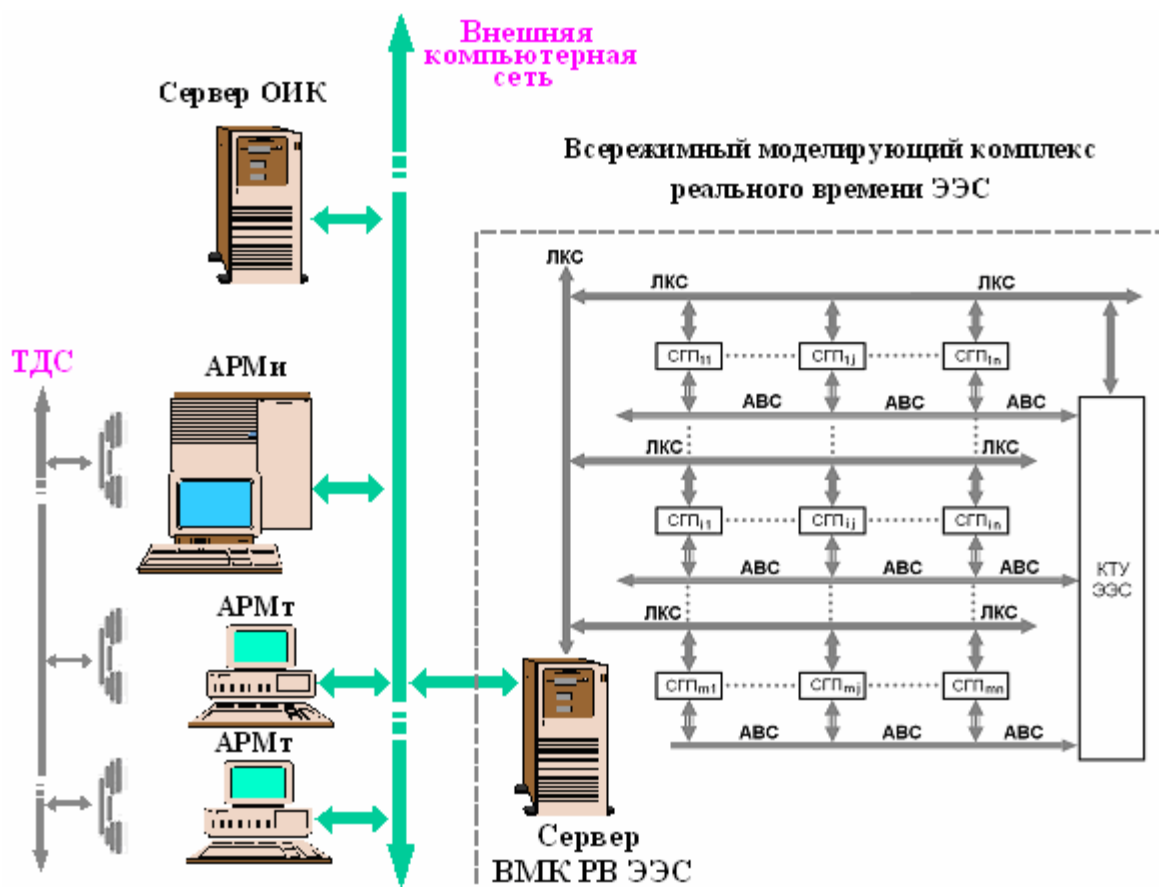


Рис. 1. Структурная схема ВДТ РВ ЭЭС

В третьей главе «Программное обеспечение всережимного диспетчерского тренажера реального времени ЭЭС» представлено обоснование, приведенной на рисунке 2, структуры ПО ВДТ РВ ЭЭС, рассмотрены свойства, возможности и взаимодействие его структурных составляющих, разработанных в соответствии с положениями рассмотренной концепции.

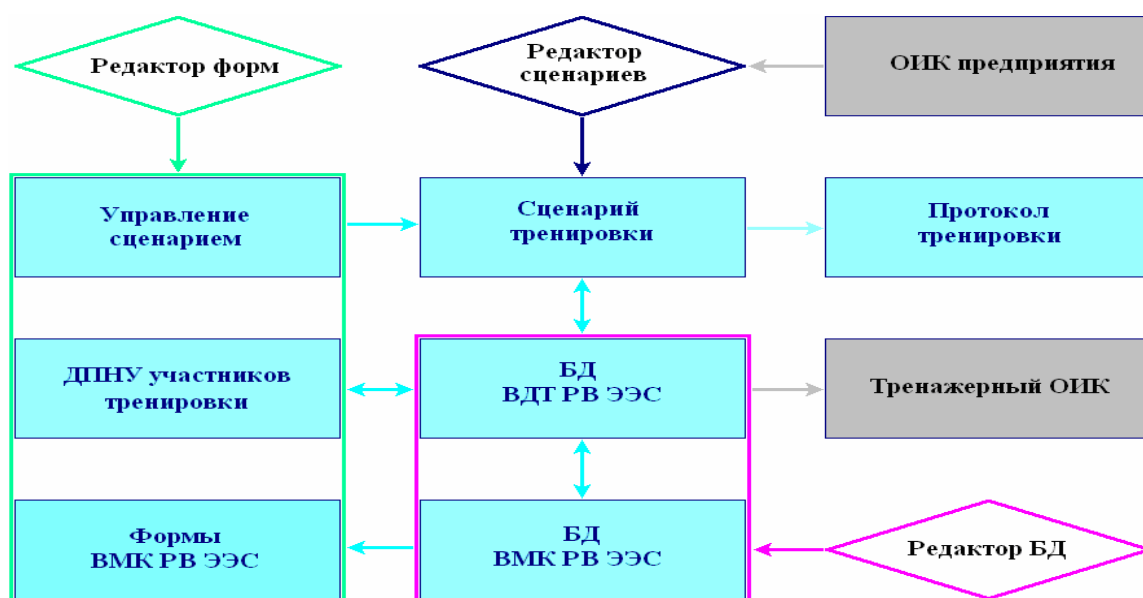


Рис. 2. Структурная схема ПО ВДТ РВ ЭЭС

Обобщенная специализированная база данных (БД) ВМК РВ ЭЭС и ВДТ РВ ЭЭС является ключевым элементом ПО, обеспечивающим: хранение данных; выполнение программных алгоритмов в реальном времени; организацию взаимодействия с СГП и средствами программного управления, визуализации, протоколирования, архивирования и т.д. Основу БД составляют объекты, которые подразделяются на сложные и простые. Сложные объекты состоят из простых, реализующих их методы (процедуры, функции) и свойства (константы, переменные). Объекты БД, в свою очередь, объединяются в группы, образующие иерархическую структуру. При создании алгоритмов в базе данных используются средства и возможности специализированного редактора БД и профессионально-ориентированного языка программирования высокого уровня. Для задания алгоритмов доступны также библиотечные процедуры и функции, предназначенные для работы с файлами, формами, математическими функциями, для организации программных диалогов и т.д.

Все объекты моделируемой схемы ЭЭС являются объектами БД ВМК РВ ЭЭС, которые объединяются в соответствующие группы, с изначально определенным типом используемых СГП: генераторы или энергоблоки, синхронные, асинхронные двигатели, трансформаторы, ЛЭП, обобщенные нагрузки и т.д. Функциональные свойства объектов БД ВМК РВ ЭЭС определяются характеристиками (методами и свойствами в терминах объектно-ориентированного программирования), необходимыми для управления параметрами и контроля значений режимных переменных.

Для формирования программного инструментария участников тренировок в БД ВДТ РВ ЭЭС создаются объекты, включающие в себя программные приборы наблюдения и управления, характерные для данного рабочего места и образующие «операционную зону» соответствующего участника. Группировка этих объектов осуществляется согласно иерархической структуре участников тренировки.

Адекватное моделирование в реальном времени функционирования РЗ и ПА, которое в отличие от других средств возможно в ВДТ РВ ЭЭС, предусматривает использование соответствующих математических моделей, описывающих процессы во всех значимых элементах этих устройств, а также в измерительных трансформаторах с возможным учетом кривых намагничивания. Например, расчет процессов производится согласно уравнений, для:

- измерительных трансформаторов тока (ИТТ) и напряжения (ИТН):

$$K_1 x_{BbIX}(t) + K_2 \frac{dx_{BbIX}(t)}{dt} - x_{BX}(t) = 0,$$

где: $x(t) = i(t)$ для ИТТ и $x(t) = u(t)$ – для ИТН, K_1, K_2 – коэффициенты, определяемые параметрами конкретных ИТТ и ИТН, в которых $Z\mu$ – сопротивление цепи намагничивания задается в реальном времени по кривым намагничивания в СГП;

- промежуточных трансформаторов тока (ПТТ) и напряжения (ПТН):

$$K_3 u_{BbIX}(t) + K_4 \frac{du_{BbIX}(t)}{dt} - y_{BX}(t) = 0,$$

где: $y_{BX}(t) = i_{BX}(t)$ для ПТТ и $y_{BX}(t) = u_{BX}(t)$ – для ПТН, K_3, K_4 – коэффициенты, характеризующие параметры конкретных ПТТ и ПТН;

- полосового фильтра входных цепей:

$$A_2 \frac{d^2 u_{BbIX}(t)}{dt^2} + A_1 \frac{du_{BbIX}(t)}{dt} + A_3 \frac{du_{BX}(t)}{dt^2} + A_4 u_{BbIX}(t) = 0,$$

где: $A_1 \dots A_4$, – коэффициенты, характеризующие параметры конкретных фильтров входных цепей.

На рисунке 3 приведен пример моделирования максимальной токовой защиты (МТЗ) в ВДТ РВ ЭЭС.

процедура	T1_Блок03.Максимальная_токовая_защита
аргументы	
Переменные: Z1, Z2;	// Определение локальных переменных
Z1 += C2 * УФ;	// Расчет Z1
Z2 += B1 * UBХ + B2 * УФ + Z1;	// Расчет Z2
УФ = -Z2 / A2;	// Расчет выходного сигнала фильтра
если (УФ > УОП1) UBХДА1 = 1;	// есть превышение уставки
иначе UBХДА1 = -1;	// нет превышения уставки
если (UBХДА1 == 1)	// есть сигнал срабатывания (UBХДА1 = 1)
{UBХДА2 += UBХДА1 * Тср * dt	// операция интегрирования
если (UBХДА2 > max) UBХДА2 = max;	// контроль ограничений
}	
иначе	// нет сигнала срабатывания (отпускание) (UBХДА1 = -1)
{UBХДА2 += UBХДА1 * Тот * dt	// операция интегрирования
если (UBХДА2 < min) UBХДА2 = min;	// контроль ограничений
}	
если (abs(UBХДА2) > abs(УОП2)) UBХ = 1;	// есть срабатывание реле
иначе UBХ = 0;	// нет срабатывания реле

Рис. 3. Программный модуль МТЗ БД ВДТ РВ ЭЭС

Для наблюдения и интерактивного управления параметрами и состояниями объектов ЭЭС служат программные средства – формы в виде различных динамических панелей наблюдения и управления (ДПНУ). На ДПНУ (рис. 4) располагаются программные приборы, которые динамически в реальном времени отражают состояния режимных переменных и позволяют интерактивно управлять коммутационными

элементами (в том числе пофазно), параметрами объектов моделируемой ЭЭС, а также программными алгоритмами, в частности, для осуществления переходов к другим ДПНУ.

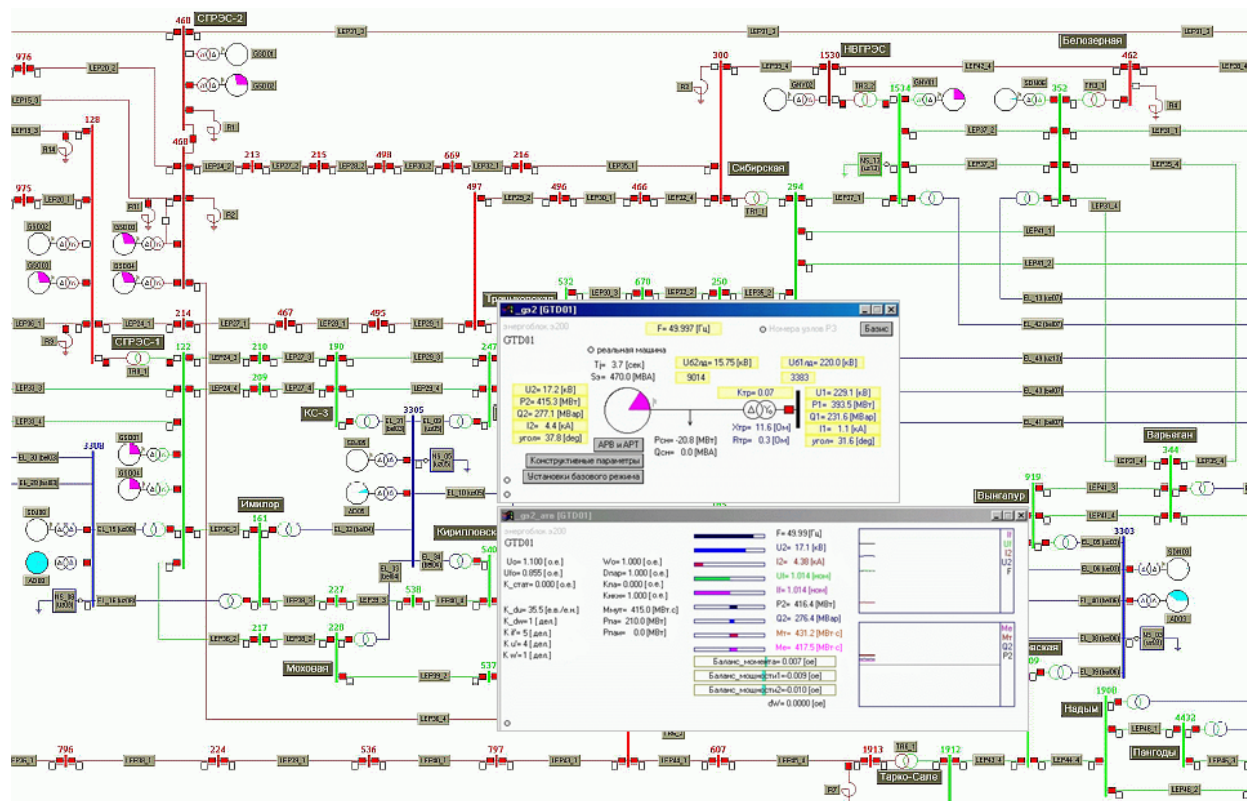


Рис. 4. Пример ДПНУ района ЭЭС

При создании и реализации сценариев используется пошаговый принцип, предусматривающий возможность контроля завершения каждого шага по условиям ограничения времени или выполнения участниками тренировки требуемого набора действий. Для формирования основанных на указанном принципе сценариев разработан соответствующий профессионально-ориентированный программный инструментарий – «Редактор сценариев», позволяющий с помощью понятной диспетчерскому персоналу терминологии задавать необходимые возмущения, действия, изменения параметров, их представлений и отображений на ДПНУ, а также, если нужно, требуемых условий завершения соответствующих шагов сценария. Исходное квазиустановившееся схемно-режимное состояние оборудования и ЭЭС в целом может задаваться в редакторе сценариев интерактивными изменениями конструктивных и настроечных параметров объектов БД, а также путем автоматического их установления и отслеживания по текущим и ретроспективным данным ОИК ЭЭС с использованием разработанных для этих целей программных алгоритмов и процедур.

Управление процессом выполнения тренировок в целом осуществляется посредством предусмотренной для этого специализированной ДПНУ «Панель управления сценарием» (рис. 5).

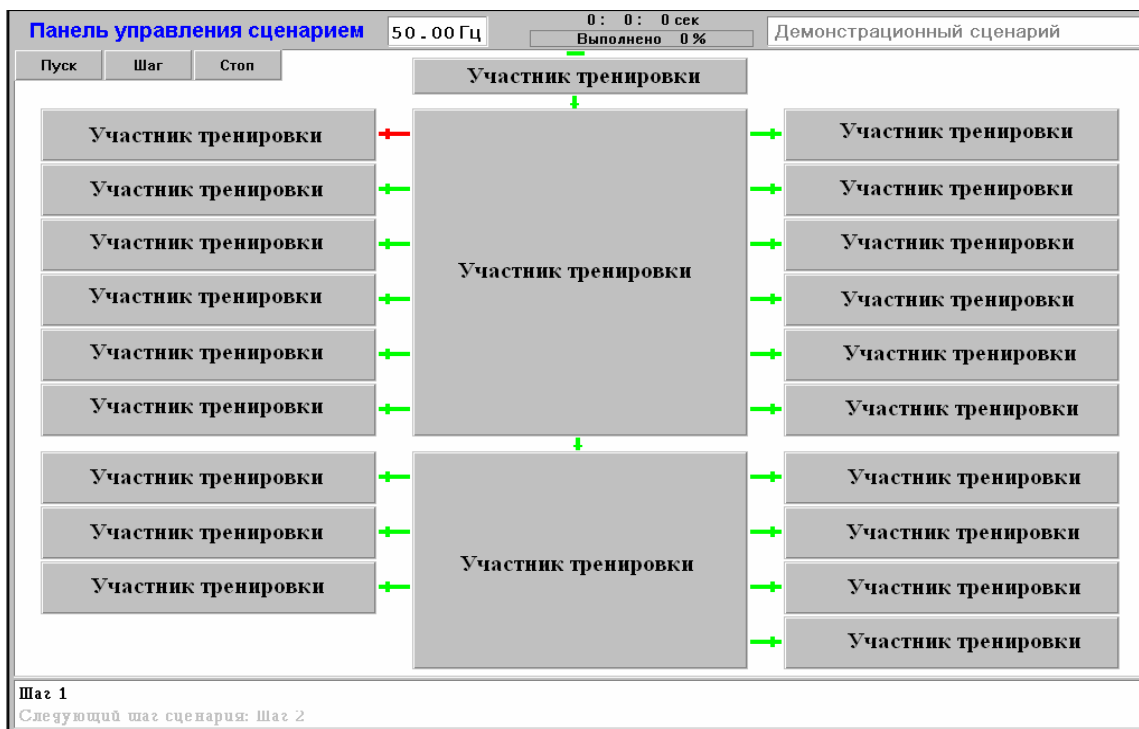


Рисунок 5. ДПНУ «Панель управления сценарием»

В четвертой главе «Реализация всережимного диспетчерского тренажера реального времени ЭЭС» на примере практического сценария одной из самых сложных тренировок диспетчерского персонала Тюменской энергосистемы (ТЭ) проиллюстрированы свойства и возможности разработанного ВДТ РВ ЭЭС. Демонстрационный сценарий состоит из 21 шага (рис. 6) и включает в себя задание аварийной ситуации, а также действия диспетчерского персонала по ее устранению.

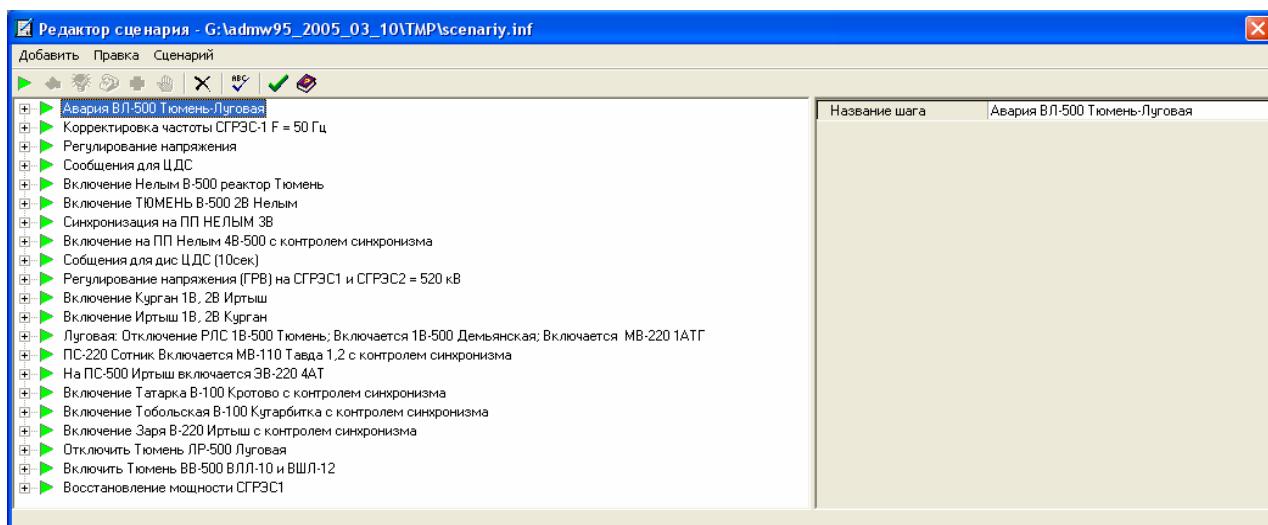


Рис. 6. Сценарий тренировки

Аварийная ситуация связана с однофазным устойчивым КЗ на ВЛ-500кВ Тюмень – Луговая (рис. 7), работой РЗ, ОАПВ, отказом в срабатывании автоматической разгрузки на Сургутской ГРЭС-2 (рис. 8), возникновением асинхронного режима и делением энергосистемы на части. При правильной настройке АРС и ее штатной работе возникновение асинхронного режима в энергосистеме не происходит (рис. 9).

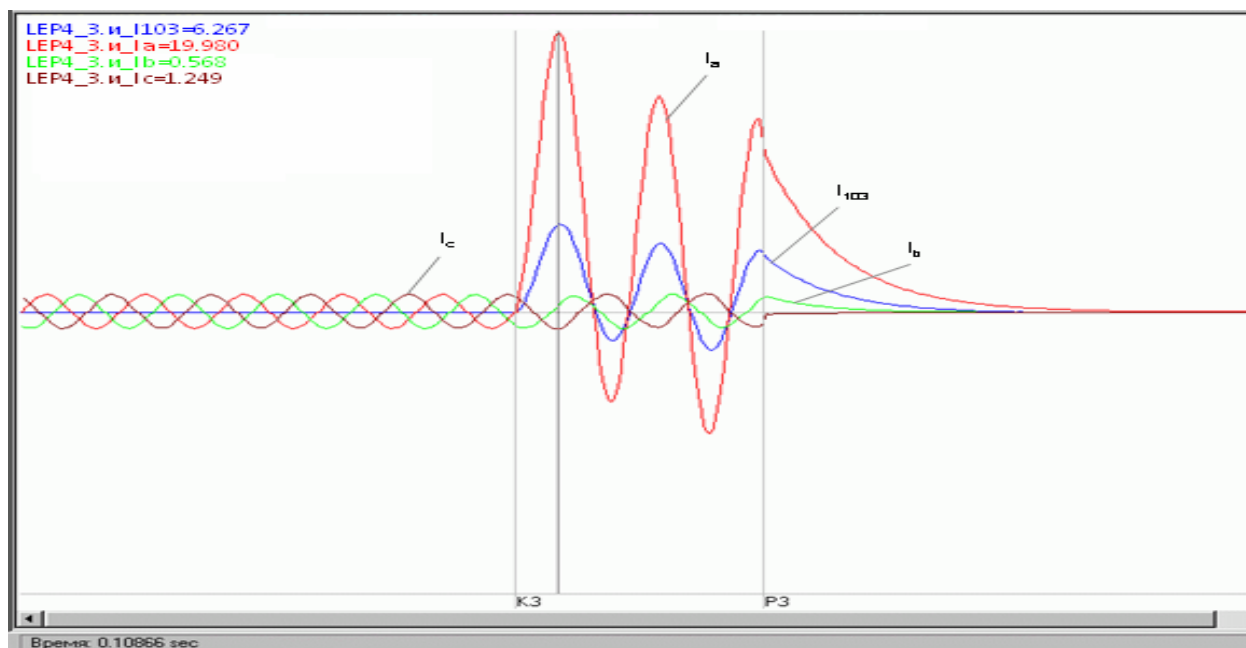


Рис. 7. Однофазное КЗ, где: LEP4_3 – ВЛ-500 Тюмень-Луговая

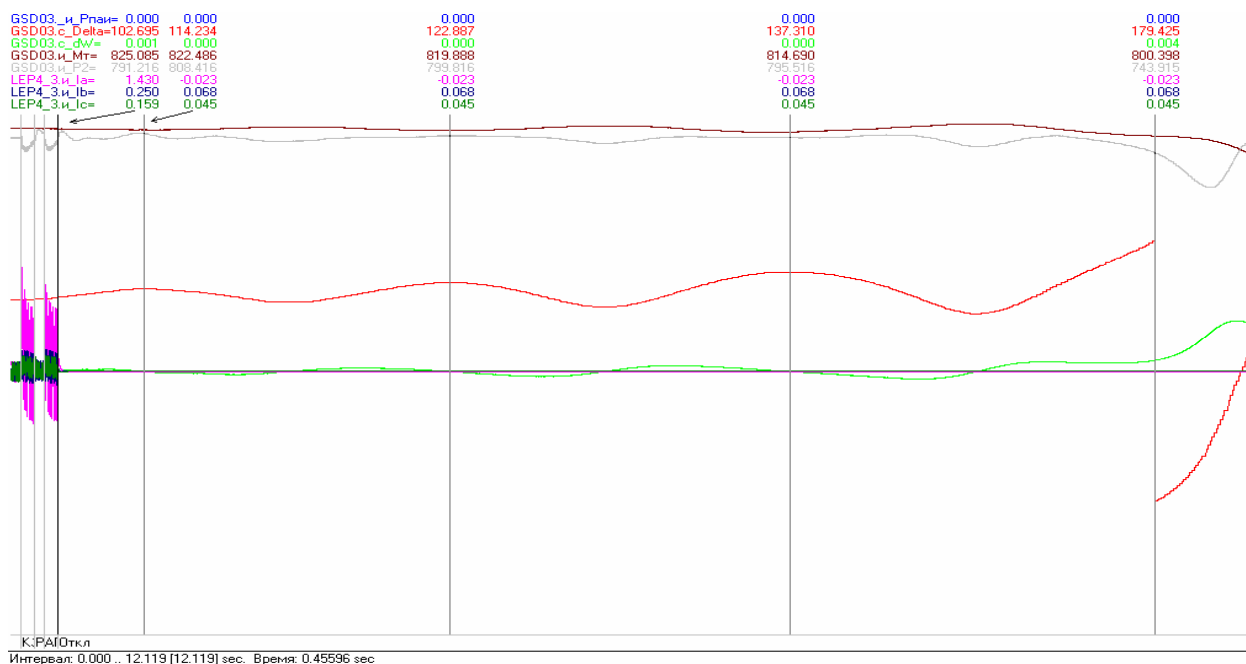


Рис. 8. Аварийный процесс без разгрузки СГРЭС-2 (энергоблок GSD03), где: и_Mт – момент турбины энергоблока, и_P2 – электромагнитная мощность генератора, с_dW – отклонение частоты GSD03, с_Delta – взаимный угол э.д.с. GSD03 и Рефтинской ГРЭС.

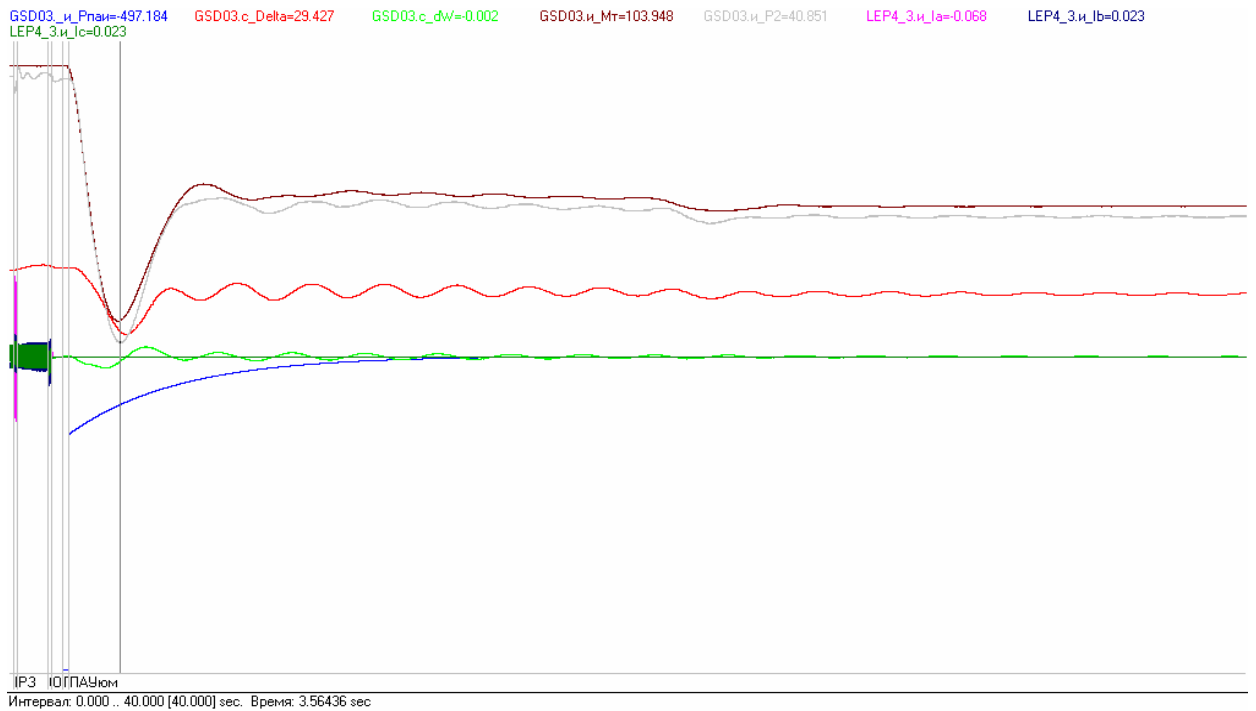


Рис. 9. Процессы, включающие КЗ, действия РЗ, ОАПВ и противоаварийную автоматическую импульсную и длительную разгрузку турбины

Выполнение сценарии в ВДТ РВ ТЭ начинается с автоматической установки исходного квазиустановившегося режима по данным текущих или ретроспективных значений телесигнализации и телеизмерений (ТС и ТИ) ОИК, процесс протекания которого отражается на ДПНУ осциллографов (рис. 10).



Рис. 10. ДПНУ осциллографов

Сложившееся схемно-режимное состояние ТЭ непрерывно и в реальном времени отражается на соответствующих ДПНУ всех участников тренировки. На рисунке 11 представлена ДПНУ «Диспетчер ЦДС».

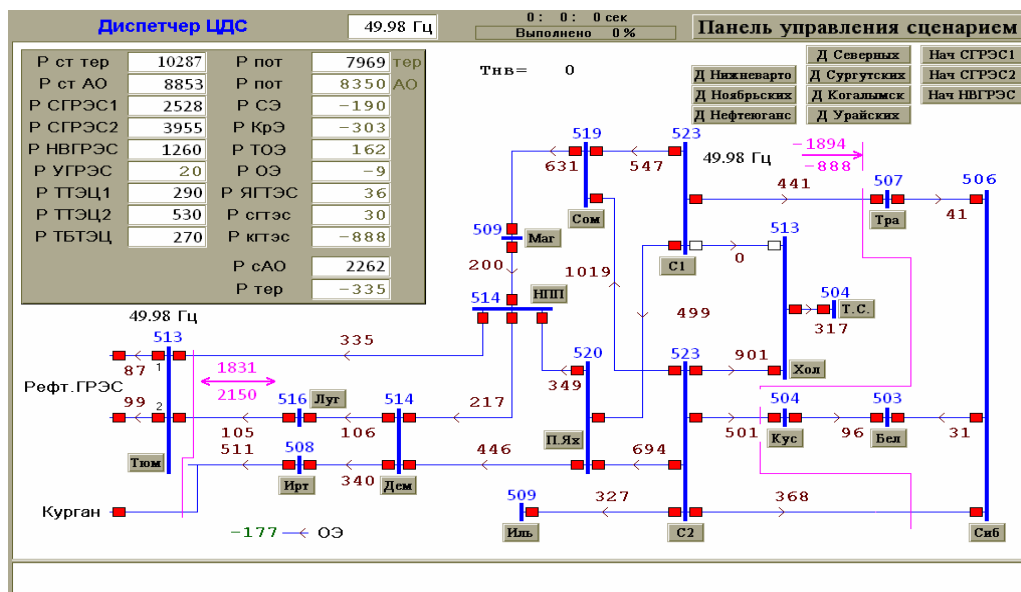


Рис. 11. ДПНУ Диспетчера ЦДС

Действия диспетчерского персонала в процессе выполнения демонстрационного сценария включают в себя корректировку частоты и напряжения в ТЭ, а также синхронизацию районов энергосистемы. На рисунке 12, в качестве примера, приведена ДПНУ дежурного инженера ПС-500 Нелым и программный прибор – синхронизатор, который позволяет в ручном или автоматическом режиме синхронизировать автономно работающие районы ТЭ.

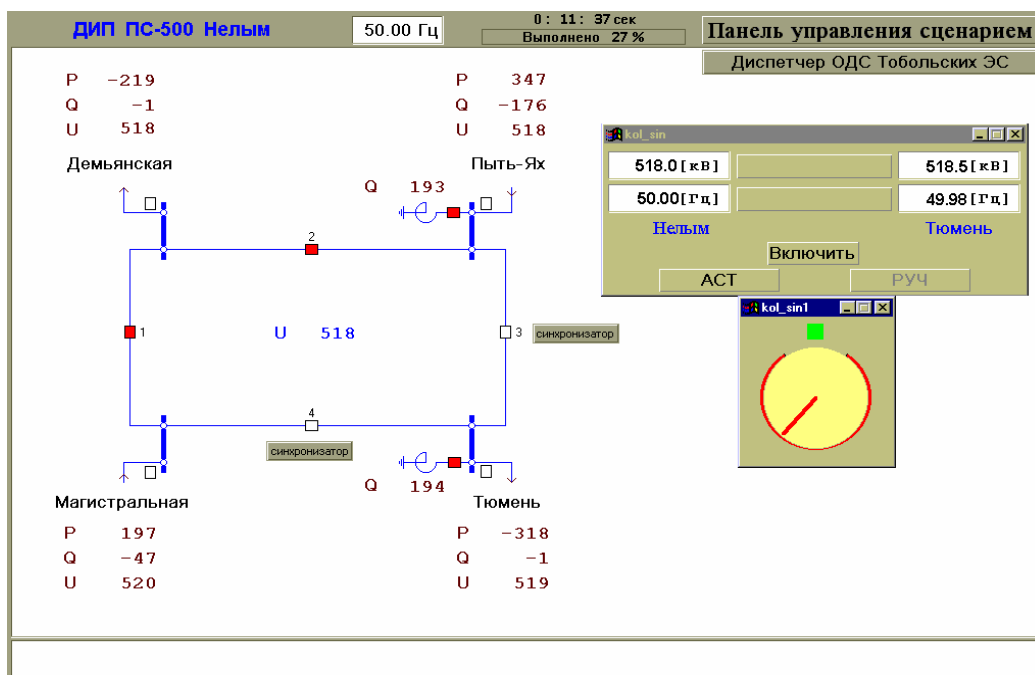


Рис. 12. ДПНУ «ДИП ПС-500 Нелым»

При выполнении сценария автоматически формируется отчет по тренировке, включающий в себя файл протокола и файл срезов режимных параметров.

В заключении сформулированы основные результаты выполненных исследований и разработок, позволившие достичь и практически подтвердить поставленную в диссертации цель:

1. Выявлены и обоснованы причины препятствующие созданию адекватных ВДТ РВ ЭЭС на основе сугубо численного подхода.
2. Сформулирована и обоснована концепция ВДТ РВ ЭЭС, позволяющая радикально повысить достоверность и оперативность диспетчерских тренажеров ЭЭС и обеспечивающая широкие и современные информационно-управляющие возможности, необходимые для разработки и осуществления различных методик и сценариев диспетчерских тренировок.
3. В соответствии с концепцией разработано ПО ВДТ РВ ЭЭС, позволяющее в полном объеме реализовать положения данной концепции.
4. Реализован практический сценарий сложной противоаварийной тренировки диспетчерского персонала, полностью подтверждающей все концептуальные свойства и возможности ВДТ РВ ЭЭС.

В приложениях представлены акты внедрения результатов диссертационной работы, примеры форм ВМК РВ ЭЭС и ДПНУ участников тренировки, описание высокоуровневого языка программирования, специализированного редактора БД, редактора форм и полный сценарий противоаварийной тренировки диспетчерского персонала Тюменской энергосистемы.

Наиболее значимый материал, связанный с выполнением диссертационной работы, отражен в следующих публикациях, расположенных в хронологическом порядке:

1. Гусев А.С., Свечкарев С.В., Плодистый И.Л. Гибридный моделирующий комплекс ЭЭС: результаты разработки, исследования и опытной эксплуатации // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: Сб. трудов третьей Всеросс. науч.-техн. конф. с международным участием в 2т. Благовещенск: изд-во АмГУ, 2003. Т.1, С.216-222.
2. Гусев А.С., Свечкарёв А.С., Плодистый И.Л. Всережимный тренажёр и советчик диспетчера реального времени на базе гибридного моделирующего

- комплекса ЭЭС (ГМК ЭЭС) и оперативно-информационного комплекса ЭЭС (ОИК ЭЭС) //Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: Труды третьей Всероссийской научно-технической конференции с международным участием - Благовещенск, 14-16 мая 2003. - Благовещенск, 2004 - т. 1. - с. 206-212.
3. Гусев А.С., Свечкарёв А.С., Плодистый И.Л. Гибридный моделирующий комплекс для наладки АСУТП энергоблоков и тренажёра персонала //Электроэнергия и будущее цивилизации: Материалы международной научно-технической конференции - Томск, 19-21 мая 2004. - Томск: Изд. ТГУ, 2004. - с. 327-329.
 4. Гусев А.С., Свечкарев С.В., Плодистый И.П. Основные аспекты проблемы моделирования электроэнергетических систем, перспективы и средства их решения //Известия Вузов. Электромеханика, 2006, - № 3. - с. 92-95.
 5. Хрущев Ю.В., Гусев А.С., Барская А.В., Бацева Н.Л., Мастерова О.А., Свечкарев С.В. Разработка тренажера для оперативного персонала электроэнергетических предприятий на основе гибридного моделирующего комплекса/ Том.политехн.ун-т.-Томск, 2009.-100с.:ил.-Библиогр.:12назв.-Рус.-Деп. в ВИНТИ № 565 - В2009 от 21.09.09.
 6. Хрущев Ю.В., Гусев А.С., Бацева Н.Л., Мастерова О.А., Свечкарев С.В., Плодистый И.Л. К построению учебно-тренажерной системы по релейной защите и автоматике объектов электроэнергетики //Известия Вузов. Электромеханика, 2009, - № 6. - с. 77-79.
 7. Гусев А.С., Хрущев Ю.В., Гурин С.В., Свечкарев С.В., Плодистый И.Л. Всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем //Электричество, 2009, - №12. – с. 7-9.
 8. Гусев А.С., Свечкарев С.В., Прутик А.Ф., Боровиков Ю.С. Всережимный диспетчерский тренажер реального времени электроэнергетических систем //Известия вузов. Проблемы энергетики, 2010, - № 3-4/I. - с. 140-146.

Кроме этого различные аспекты и фрагменты диссертационной работы отражены в других 25 публикациях.