

## **УЧЕБНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ НА БАЗЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО АНАЛИЗАТОРА РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ АЭС С ВВЭР**

**С.Б. Выговский, С.А. Королев, Е.В.Чернов**

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

На кафедре «Автоматика» создана учебная лаборатория «Безопасность и управление ЯЭУ» для студентов и специалистов атомной отрасли в области контроля, управления, защиты и безопасной эксплуатации реакторных установок действующих, проектируемых и строящихся АЭС с ВВЭР. В основе лаборатории – компьютерный многофункциональный анализатор реакторной установки АЭС с ВВЭР, оснащенный моделирующим программным комплексом «ПРОСТОР». Подготовлены и внедрены в учебный процесс лабораторные практикумы по следующим тематическим направлениям:

- Физические и конструкционные особенности ЯЭУ с ВВЭР;
- Системы управления и защиты ЯЭУ с ВВЭР;
- Методология расчетов и измерений, производимых для инженерной поддержки эксплуатации ЯЭУ с реактором ВВЭР.

*Ключевые слова:* Компьютерный анализатор режимов, ядерная энергетическая установка, учебная лаборатория, безопасность и управление ЯЭУ

На современном этапе развития атомной энергетики все страны и компании, развивающие ядерные технологии и эксплуатирующие атомные станции, с возросшей ответственностью относятся к проблемам ядерного образования, сохранения, управления и развития ядерных знаний.

Активно создаются и совершенствуются образовательные программы университетов, обеспечивающих выпуск специалистов в области ядерных технологий и смежных инженерно-технических областях, программы профессиональной подготовки, переподготовки и повышения квалификации работников атомных станций и других предприятий и организаций атомной отрасли.

Образовательные программы все активнее опираются на современные информационные технологии и использование разнообразных технических средств обучения (ТСО). Происходит компьютеризация лабораторных практикумов – от обработки результатов работы до замены лабораторных установок компьютерными моделирующими программами.

Для образовательных программ университетов характерно стремление активно использовать специализированные лабораторные практикумы и компьютерные обучающие системы (курсы), которые уже давно используются в профессиональной подготовке персонала АЭС.

Системы профессиональной подготовки персонала атомных станций в обязательном порядке используют тренажерные системы различных классов: тренажеры базовых принципов, тренажеры отдельных технологических систем и элементов оборудования, полномасштабные тренажеры (ПМТ).

Тренажеры основаны на достаточно полной и точной модели физических и технологических процессов атомной станции и при этом предназначены для формирования практических навыков контроля и управления технологическим оборудованием энергоблока.

При этом современный уровень развития компьютерной техники, математических методов моделирования и средств создания программных моделей ядерных энергетических установок позволяет создавать компактные и относительно недорогие моделирующие вычислительные комплексы реального времени. Данные комплексы вполне доступны с точки зрения их использования не только в тренажерных системах, но и в специализированных учебных лабораториях, предназначенных для оснащения университетов и учебных центров АЭС.

В настоящей статье приведен один из примеров организации и использования такой специализированной учебной лаборатории в НИЯУ МИФИ. Данная лаборатория имеет название «Управление и безопасность АЭС» и создана на кафедре «Автоматика». Она функционирует уже два года, и на ее базе проводятся практические и лабораторные занятия по дисциплинам «Автоматизация физико-энергетических установок» и «Моделирование физических процессов в оборудовании АЭС» со студентами факультетов «А» и «Ф».

Учебная лаборатория «Управление и безопасность АЭС», оснащена комплексной моделью ЯЭУ, обладающей в сравнении с моделями для тренажерных систем и, в частности для ПМТ, следующими дополнительными возможностями:

- модель позволяет реализовать широкую вариативность учебных и практических задач: от расчета основных нейтронно-физических и теплофизических характеристик ЯЭУ и исследования алгоритмов управления до задач анализа тяжелых аварий, приводящих к расплавлению топлива в активной зоне;
- модель дополнена удобными для пользователя средствами проектирования сценариев учебных занятий и внешнего управления моделью для решения практических задач;

- модель базируется на библиотеке нейтронных сечений и тепло-гидравлических характеристик, насчитывающих до 75 различных конструкций ТВС реактора ВВЭР, позволяющих проводить изучение различных топливных загрузок;
- модель содержит средства воспроизведения режима выгорания топлива с его произвольной перегрузкой и задания произвольного графика тепловых нагрузок на активную зону в зависимости от времени выгорания;
- в модель включены средства поддержания критичности реактора как с помощью штатных средств на АЭС, так и с помощью автоматического борного регулятора (не штатное средство), работающего как в стационарных, так и в нестационарных режимах;
- модель обладает возможностью уплотнения времени в десятки тысяч раз, что позволяет обеспечить эффективность учебного и исследовательского процессов при воспроизведении инерционных процессов в оборудовании АЭС;
- модель позволяет проводить расчетный анализ технической безопасности оборудования ЯЭУ при задании специальных условий моделирования гидродинамики теплоносителя в ГЦК, приводящих к консервативной оценке уровня безопасности.

Функциональные возможности модели ЯЭУ позволяют на средствах учебной лаборатории «Управление и безопасность ЯЭУ» проводить:

- практические и лабораторные занятия студентов в рамках образовательных программ университетов в области физики ядерных реакторов, технологии и управления АЭС;
- научные исследования студентов, аспирантов и научных сотрудников университетов;
- занятия, направленные на освоение и контроль теоретических знаний персонала атомных станций в учебных центрах АЭС.

Кроме того, подобные лаборатории, оснащенные комплексной и высокоточной моделью ЯЭУ

(компьютерным анализатором ЯЭУ) могут эффективно использоваться для уточнения алгоритмов управления энергоблоком в тех режимах эксплуатации, для которых в настоящее время имеется дефицит эксплуатационного опыта и, соответственно, процедуры управления недостаточно регламентированы.

Учитывая доминирующую роль водо-водяных реакторов в современной атомной энергетике, в лаборатории используется компьютерная система, реализующая моделирование нейтронно-физических, тепло-гидравлических, электрических

процессов, алгоритмов систем контроля и управления, а также элементы человеко-машинного интерфейса оперативного персонала АЭС с ВВЭР-1000 (1200). Математическое и программное обеспечение лаборатории разработано сотрудниками кафедры «Автоматика». Оно базируется на программных комплексах, входящих в состав полномасштабных, компьютерных тренажеров и анализаторов режимов работы АЭС, внедренных на Калининской, Ростовской и на других АЭС с ВВЭР-1000 с целью инженерной поддержки эксплуатации и для проведения обучения оперативного персонала в учебно-тренировочных пунктах (УТП) АЭС.

Компьютерная система лаборатории включает многофункциональный анализатор режимов (МФА-РУ) реакторной установки ВВЭР и компоненты моделирующего обеспечения полномасштабных тренажеров (ПМТ) блоков № 2 и № 3 Калининской АЭС. Основу многофункционального анализатора режимов МФА-РУ составляет аттестованный ГАН РФ для расчетов ЯЭУ с ВВЭР-1000 программный комплекс «ПРОСТОР».

По точности расчета основных параметров реакторной установки ЯЭУ модель не уступают штатным программам расчетного сопровождения эксплуатации АЭС с реактором ВВЭР-1000. Комплексность и высокая адекватность используемых в лаборатории моделей физических процессов в оборудовании АЭС и алгоритмов систем управления и защиты ЯЭУ позволяют решать широкий спектр учебных и исследовательских задач, а также обеспечивают возможность их дальнейшего развития.

Учебная лаборатория предназначена для обеспечения:

- образовательных программ высшего профессионального образования специалистов, бакалавров, магистров по направлениям подготовки и специальностям:
  - ядерная физика и технологии;
  - ядерные реакторы и материалы;
  - атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг;
  - электроника и автоматика физических установок;
  - ядерная энергетика и теплофизика.
- программ послевузовского образования (аспирантуры) по ряду специальностей, например: «Ядерные энергетические установки», «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами», «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления», «Теплофизика и теоретическая теплотехника»;
- программ повышения квалификации специалистов соответствующих специальностей;

- программ профессиональной подготовки работников отраслевых предприятий и организаций, области ответственности и деятельности которых связаны с проектированием, созданием и эксплуатацией технологического оборудования и систем управления ядерных энергетических установок.

В рамках данных направлений подготовки учебная лаборатория обеспечивает практические занятия по спектру дисциплин специальностей, связанных с физикой ядерных реакторов и ядерных энергетических установок, проектированием и эксплуатацией АЭС, управлением

ядерным реактором и ЯЭУ, системами управления и защиты ядерных реакторов, АСУТП АЭС, безопасностью эксплуатации ЯЭУ, моделированием процессов в оборудовании ЯЭУ.

Обобщенными целями обучения, реализуемого на базе лаборатории, являются:

- практическое освоение теоретических знаний по конструкции активной зоны и оборудованию ЯЭУ, назначению и составу технологических систем ЯЭУ, нейтронно-физическим и технологическим процессам в оборудовании ЯЭУ, эксплуатационным режимам и принципам безопасной эксплуатации ЯЭУ, назначению и структуре систем управления и защиты, принципам и алгоритмам управления ЯЭУ;
- приобретение практических навыков по управлению ЯЭУ с реактором ВВЭР-1000 (1200) в режимах нормальной эксплуатации и режимах с нарушениями нормальной эксплуатации, по подавлению ксеноновых колебаний локальной мощности в активной зоне реактора при их возникновении, по формированию различных топливных загрузок при реализации различных стратегий топливного цикла, по определению нейтронно-физических характеристик активной зоны;
- выполнение научно-исследовательской работы студентами и аспирантами, проведение курсового проектирования, выпуск квалификационных работ, магистерских диссертаций,
- приобретение теоретических знаний и практических навыков специалистами отрасли по управлению и эксплуатации ЯЭУ

Данные учебные цели достигаются посредством реализации практических задач при выполнении комплекса лабораторных работ в соответствии с предварительно разработанными сценариями их выполнения, или в виде индивидуальных заданий студентам на проведение курсового и дипломного проектирования с разработкой сценариев совместно с преподавателем.

В настоящее время в рамках учебной лаборатории реализованы лабораторные практикумы, охватывающие следующие учебные темы:

1. Изучение статических и динамических характеристик реактора как объекта управления. Управление мощностью реактора. Определение оптимальных параметров алгоритма регулирования мощности ЯЭУ в регуляторах, задействованных в этом управлении.

2. Изучение системы управления и защиты реактора (СУЗ), знакомство со структурой СУЗ ЯЭУ с ВВЭР-1000 (АРМ, РОМ, АЗ), алгоритмами работы СУЗ в различных режимах (режимы работы АРМ, ПЗ-3, ПЗ-4, АЗ-1, УРБ), включая аварийные ситуации.

3. Изучение эксплуатационных режимов с нарушениями условий нормальной эксплуатации и решение ряда эксплуатационных задач по управлению энергоблоком в нестандартных ситуациях с целью обеспечения локальных защит по распределению энерговыделения в активной зоне.

4. Изучение пусковых режимов реакторной установки. Приобретение базовых знаний по технологии пуска и решения ряда практических задач по пуску энергоблока после ликвидации последствий аварийной ситуации.

5. Изучение пространственной неустойчивости нейтронного поля в активной зоне реактора. Изучение причин возникновения аксиальных ксеноновых колебаний локальной мощности в активной зоне реакторов ВВЭР-1000 и механизмов их подавления на практике эксплуатации реакторов ВВЭР-1000. Решение задач по нахождению оптимального алгоритма подавления колебаний.

6. Изучение нейтронно-физических характеристик органов управления, особенностей их

7. измерения на АЭС с реактором ВВЭР-1000, сопоставление измеренных по БИК характеристик с расчетными данными. Исследование причин рассогласования измеренной эффективности групп ОР СУЗ с расчетной эффективностью и определение методов устранения этого рассогласования.

8. Изучение основных свойств самозащитенности активной зоны реактора ВВЭР-1000 (1200): температурного и плотностного коэффициентов реактивности. Определение основных параметров и факторов, определяющих величину данных коэффициентов реактивности.

9. Изучение явления повторной критичности в реакторах ВВЭР-1000 и причин его возникновения. Изучение мер по устранению явления повторной критичности в

проекте АЭС-2006. Расчет основных параметров, характеризующих явление повторной критичности и последствий данного явления в реакторах ВВЭР.

10. Изучение основных характеристик топливного цикла в реакторах ВВЭР-1000. Исследование зависимости этих характеристик от базового обогащения топлива подпитки по урану-235. Расчетное обоснование экономических показателей и показателей технической безопасности выбранного топливного цикла. Сопоставление показателей топливных циклов, реализованных с использованием различных схем перегрузок топлива.

11. Изучение явления кризиса теплоотдачи на поверхности ТВЭЛ в активной зоне реактора ВВЭР-1000 (1200). Изучение причин возникновения кризиса теплоотдачи и мер по уменьшению последствий данного явления на состояние основных защитных барьеров реактора. Моделирование и анализ ряда аварий, приводящих к данному явлению, включая аварию на АЭС «Three Mile Island» с расплавлением топлива в активной зоне.

Для каждого из выше указанных тематических направлений сформировано одно или несколько учебных занятий. Для проведения учебных занятий имеется лабораторный практикум с описанием учебных занятий и задач, входящих в состав каждого занятия, инструкций по проведению занятий и обработки результатов их выполнения.

Для практических занятий по каждой теме сформулированы:

- приобретаемые знания по предмету исследования,
- учебные цели,
- критерии достижения учебных целей,
- методики оценки содержания и проведения занятий и их модификаций.

#### **Оснащение лаборатории.**

В состав лаборатории входят программно - технический комплекс (ПТК), эксплуатационная документация, комплект методической документации.

Программно-технический комплекс лаборатории включает в себя:

- комплекс технических средств;
- стандартное ПО;
- специальное системное и прикладное ПО.

Специальное ПО составляют: программная модель ЯЭУ АЭС, система проектирования и сопровождения учебных задач (СПЗ), система поддержки программно-моделирующего комплекса (СПМК); архивы данных, протоколов, версий вариативных компонентов программного обеспечения, система защиты данных и ПО.

Программная модель ЯЭУ (моделирующее программное обеспечение - МПО) предназначена для воспроизведения физических процессов в ЯЭУ, технологических процессов для моделирующего комплекса (СПМК); архивы данных, протоколов, версий моделирующего комплекса (СПМК); архивы данных, протоколов, версий вариативных компонентов программного обеспечения, система защиты данных и ПО.

Программная модель ЯЭУ (моделирующее программное обеспечение - МПО) предназначена для воспроизведения физических процессов в ЯЭУ, технологических процессов для заданного спектра эксплуатационных режимов ЯЭУ, алгоритмов и средств контроля, управления и защиты ЯЭУ. Программная модель включает версии вариативных компонентов, соответствующих различным проектам РУ.

Информационно-управляющий интерфейс ПТК лаборатории обеспечивает предоставление требуемой информации и реализацию управляющих действий всех категорий пользователей ПТК лаборатории. Реализация этих функций выполняется средствами развитого графического интерфейса рабочих станций обучаемых и преподавателя.

На рис. 1 представлены основные интерфейсы преподавателя и обучаемого с компонентами программно-вычислительного комплекса учебной лаборатории, необходимые для выполнения и контроля учебного занятия.

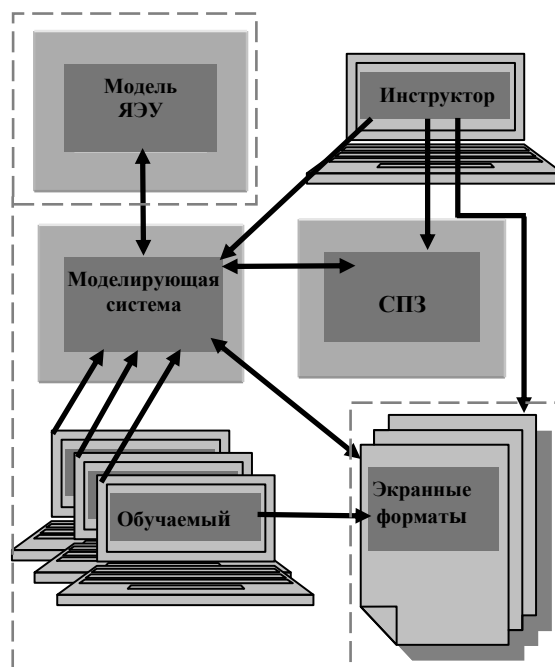


Рис. 1 Схема интерфейсов преподавателя и обучаемого с основными компонентами ПТК

Интерфейсы пользователей реализованы на принципах оконной технологии платформы MS Windows и иерархической вертикально-горизонтальной навигации для поиска и инициализации необходимых опций.

рис. 2 иллюстрирует процедуры подготовки задания, запуска сеанса моделирования, формирования протоколов выполнения задачи, обеспечения связи модели ЯЭУ с графическими форматами и базой переменных модели.

Система проектирования и сопровождения учебных задач предназначена для реализации следующих функций:

- задание (выбор) необходимой конфигурации МПО (версии модели ЯЭУ);
- задание (выбор) исходного состояния модели ЯЭУ;



- выбор и/или проектирование графических форматов информационно-управляющего интерфейса учебной задачи;
- разработка сценария учебной задачи;
- задание списка контролируемых параметров;
- задание списка протоколируемых параметров.

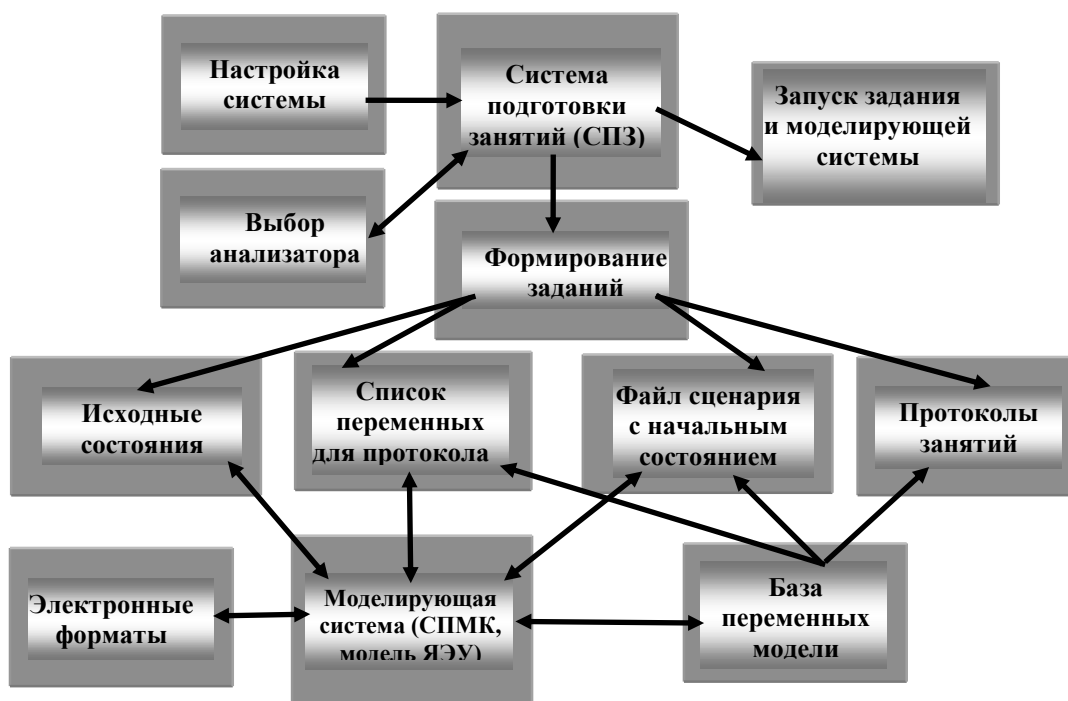


Рис. 2 Схема основных связей между компонентами учебной лаборатории.

Система поддержки программно-моделирующего комплекса (СПМК) реализована в среде программного комплекса ЭНИКАД и предназначена для реализации функций:

- программной платформы, интегрирующей процессы проектирования и функционирования модели ЯЭУ и других программных компонентов ПТК лаборатории;
- организации графического информационно-управляющего интерфейса;
- поддержки проектирования модели ЯЭУ.

Система архивирования обеспечивает защищенное и рабочее хранение: данных, составляющих исходные состояния модели ЯЭУ, описаний учебных задач, включая их начальные состояния и сценарии реализации, протоколов трендов параметров модели в результате выполненных ученых задач, отчетов по выполнению учебных задач.

Система защиты реализует функции управления доступом, защиту от несанкционированного копирования, сохранность критических данных и программного обеспечения.

Комплекс технических средств лаборатории включает в себя: двух мониторные рабочие

станции обучаемых, рабочую станцию преподавателя, принтер, мультимедиа проектор, экран, оборудование локальной вычислительной сети, средства защиты программного обеспечения от несанкционированного копирования. Рабочие станции реализованы на персональных компьютерах со стандартным программным обеспечением MS «WINDOWS». Общий вид учебной лаборатории представлен на рис. 3.



Рис. 3. Учебная лаборатория «Безопасность и управление АЭС».

В состав эксплуатационной документации входят техническое описание ПТК лаборатории и руководства пользователей: преподавателя-методиста и администратора системы.

Комплект учебно-методической документации включает методические указания по выполнению лабораторных работ, содержащие разделы: введение, цели лабораторного практикума, состав учебных задач, учебные цели

каждой отдельной задачи, формируемые компетенции, основные теоретические положения, варианты учебных заданий, инструкция по выполнению учебной задачи, обработке результатов и их оформлению, критерии успешности выполнения задачи, контрольные вопросы.

На рис. 4 приведен фрагмент теоретических положений лабораторного занятия по теме

$$\frac{\Delta\rho_{Xe}}{\Delta\rho_N + 2\Delta\rho_{12} + \Delta\rho_{lek}} > \frac{(\lambda_j + \lambda_{Xe})\Sigma_f}{\sigma_{Xe}N_0} + 1$$

Рис. 4 Условие возникновения ксеноновых колебаний в реакторе ВВЭР-1000

«Ксеноновые колебания локальной мощности в реакторах ВВЭР и способы их подавления».

На рис. 5 приведен фрагмент базового экранного формата для выполнения

занятия по данной теме и результаты работы студентов, полученные на одном из лабораторных занятий. На рис. 6 показан пример результата успешной работы студента по определению оптимальных параметров алгоритма подавления ксеноновых колебаний, а на рис. 7 - результат не очень удачного выбора параметров регулирования.



Рис. 5 Фрагмент базового формата для проведения занятия по теме «Ксеноновые колебания и алгоритмы их подавления»

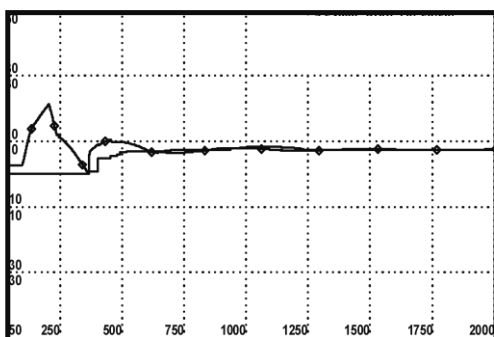


Рис. 6 Результат успешного выполнения лабораторного занятия по выбору оптимальных параметров подавления колебаний

(Чернов Е.В.).

2. Семинар МАГАТЭ «Применение компьютерных тренажеров АЭС для подготовки специалистов в высшей школе». Республика Беларусь, Минск, БГУ, май 2010г. Проведение показательных занятий с использованием компьютерной тренажерной обучающей системы КОС АЗ (рис. 8). Презентация МФА-РУ. (Выговский С.Б., Чернов Е.В.).

3. Техническое совещание МАГАТЭ «Содействие информационной доступности и

Использование учебных лабораторий, оснащенных комплексной моделью ЯЭУ, является эффективным средством решения задач сохранения и развития ядерных знаний, что является актуальной задачей международного ядерного сообщества. С этой целью МАГАТЭ регулярно проводит технические совещания и семинары, в том числе направленные на распространение имеющейся практики создания и использования подобных лабораторий.

На ряде таких совещаний и семинарах был представлен опыт НИЯУ МИФИ в данном направлении. Так, в период 2010 - 2011гг. опыт НИЯУ МИФИ был представлен на следующих технических совещаниях МАГАТЭ:

1. Техническое совещание МАГАТЭ на тему «Использование ядерных установок и тренажеров в качестве эффективных средств образовательных программ и сохранения знаний». Словения, Любляна, июнь 2010г. Презентация доклада «Возможности применения тренажера реакторного отделения ЯЭУ с ВВЭР-1000 для дистанционного обучения и сохранения знаний»

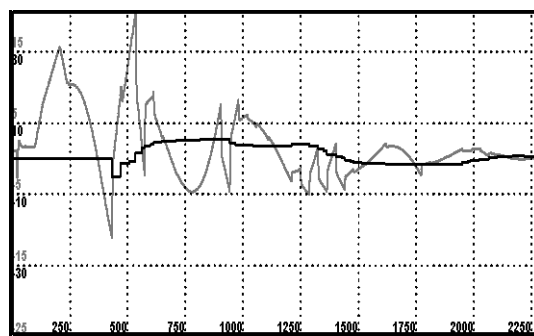


Рис. 7 Результат неудовлетворительного выполнения лабораторного занятия по выбору оптимальных параметров подавления колебаний



Рис. 8. Лабораторное занятие с преподавателями университетов Республики Беларусь.

технических требований для учебных лабораторий «Реакторная физика, управление и безопасная эксплуатация ЯЭУ» для инженерно-физических специальностей технических университетов» для Армении, Белоруссии, Украины. Вена, МАГАТЭ, апрель 2011г. Презентация специализированной лаборатории «Безопасность и управление АЭС». (Королев С.А., Выговский С.Б.).

Осенью 2010 г. в Белорусском Государственном Университете сотрудниками кафедры «Автоматика» (Выговский С.Б., Чернов Е.В.) был прочитан курс лекций и проведены лабораторные занятия (рис. 9) с использованием компьютерного анализатора режимов ЯЭУ ВВЭР-1000

использованию ядерных установок и соответствующих им тренажеров как эффективных инструментов для образования, проведения исследований и создания энергоблоков». Германия, Эссен, май 2011г. Участие в совещании. Презентация доклада «Применение тренажера реактора ВВЭР-1000 для обучения и исследовательской работы» (Чернов Е.В.).

4.Техническое совещание МАГАТЭ «Разработка



Рис. 9. БГУ. Лабораторное занятие по теме Повторная критичность в реакторах ВВЭР

