

На правах рукописи



Никоноров Андрей Николаевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СКВОЗНОЙ ТЕХНОЛОГИИ  
СОЗДАНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ АСУТП  
ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

Специальность 05.13.06 –

«Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами  
(промышленность)»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иваново 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (ИГЭУ), кафедра систем управления.

**Научный руководитель:**

Тверской Юрий Семенович, доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:**

Рубашкин Александр Самуилович, доктор технических наук,  
генеральный директор ЗАО «Тренажеры для электростанций»

Колганов Алексей Руфимович, доктор технических наук, профессор, заведующий  
кафедрой электропривода и автоматизации промышленных установок ИГЭУ

**Ведущая организация:**

Государственный научный центр Российской Федерации ОАО «НИИТеплоприбор»,  
г. Москва

Защита состоится 4 мая 2012 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета  
Д 212.064.02 при Ивановском государственном энергетическом университете по  
адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, корпус Б, ауд. Б-237

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГЭУ

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просим  
направлять по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

Тел.: (4932) 38-57-12, факс (4932) 38-57-01

E-mail: uch\_sovet@ispu.ru

Автореферат разослан 31 марта 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.064.02



Тютиков  
Владимир Валентинович

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы

Современное развитие отечественной энергетики характеризуется вводом в действие энергоблоков, оснащенных распределенными многофункциональными автоматизированными системами управления технологическими процессами (АСУТП) на базе программно-технических комплексов (ПТК) сетевой иерархической структуры. ПТК в этой структуре служит системообразующим компонентом, а АСУТП в целом формирует единую информационно-технологическую среду энергоблока.

Основная проблема обеспечения нормальной эксплуатации энергоблоков при этом связана, с одной стороны, с требованиями создания эффективной многофункциональной (высокого уровня автоматизации функций) АСУТП, с другой – с трудностями обеспечения гарантированного ввода в эксплуатацию сложных систем управления.

Это объясняется тем, что переход к распределенным АСУТП кардинально изменил технологию их создания. Одна из отличительных особенностей новой сквозной технологии – это создание прикладного программного обеспечения (ПО) на ранних стадиях проектирования. При этом возникают дополнительные проблемы, связанные с недостаточной отработанностью алгоритмов управления и необходимостью их доработки (отладки) на «живом» объекте. Задача усложняется большим информационным масштабом системы, а также действием случайных эксплуатационных возмущений, которые трудно учесть на этапе функционального проектирования.

Все это существенно повышает риски повреждения автоматизированного оборудования, увеличивает сроки его ввода и освоения, а отсутствие средств адекватной подготовки оперативного и ремонтного персонала для новых энергоблоков, актуализирует влияние «человеческого фактора» на эффективность управления.

Проблемам построения многофункциональных АСУТП, адекватной подготовки оперативного персонала посвящены многие работы Аракеляна Э.К., Биленко В.А., Давыдова Н.И., Дьякова А.Ф., Королькова Б.П., Магида С.И., Миронова В.Д., Прангвишвили И.В., Рубашкина А.С., Руцинского В.М., Серова Е.П., Стефани Е.П., Тверского Ю.С и др. В настоящее время интерес к проблеме построения многофункциональных АСУТП в аспекте адекватной подготовки оперативного персонала заметно возрастает, что связано с повышением требований к локальным системам управления и АСУТП в целом.

Обеспечить эффективное управление сложными объектами предлагается путем разработки специализированных многоцелевых программно-технических средств, что связано с необходимостью создания высокоточных всережимных динамических математических и имитационных моделей объекта управления и моделей случайных эксплуатационных возмущений, реализуемых в режиме реального времени. Это позволит осуществлять отработку сложных алгоритмов управления на ранних стадиях их проектирования.

Поэтому рассматриваемая задача разработки технической структуры «Полигона АСУТП электростанций», его математического и программного обеспечения, позволяющего осуществлять отработку сложных алгоритмов управления на ранних стадиях проектирования АСУТП, а также проводить обучение специалистов, подготовку (переподготовку) оперативного и ремонтного персонала, представляется актуальной.

**Работа выполнялась** на кафедре систем управления в соответствии с планами ИГЭУ при поддержке грантов Министерства образования и науки Российской Федерации и Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ):

- «Учебная лаборатория «Системы автоматического управления технологическими объектами». Проект № 2.1.1.(15.8).041.133 конкурса Министерства образования РФ по программе «Научное, научно-методическое, материально-техническое и информационное обеспечение системы образования», 2001 г.
- «Создание комплекса имитационных макромоделей пылесистем по схеме прямого вдувания котлов ТЭС для решения задач управления и диагностирования». Проект Т00-1.2-3174 конкурса Министерства образования РФ по фундаментальным исследованиям в области технических наук, 2001-2002 г.г.
- «Исследование способов реализации имитационных моделей непрерывных технологических объектов в составе АСУТП на базе ПТК сетевой организации». Проект Т02-03.2-2281 конкурса Министерства образования РФ по фундаментальным исследованиям в области технических наук, 2003-2004 г.г.
- «Развитие методов феноменологической термодинамики для построения высокоточных нелинейных динамических моделей технологических объектов управления с аккумуляцией топлива в каналах формирования потоков топливовоздушных смесей». Проект № 07-08-00360 конкурса РФФИ, 2007-2008 г.г.

**Целью работы** является повышение эффективности многофункциональных АСУТП электростанций на базе ПТК сетевой иерархической структуры путем совершенствования наукоемких элементов сквозной технологии проектирования систем управления.

Для достижения указанной цели необходимо было решить следующие задачи:

- 1) определить место наукоемких элементов в сквозной технологии создания и эксплуатации АСУТП энергоблоков;
- 2) разработать техническую структуру «Полигона АСУТП электростанций», его математическое и программное обеспечение;
- 3) разработать нелинейную динамическую математическую модель типового теплообменника как обобщенного структурного элемента теплоэнергетического оборудования;
- 4) разработать алгоритм расчета математической модели теплообменника, обеспечивающий ее устойчивость при функционировании в режиме реального времени ПТК;
- 5) исследовать методы генерации моделей случайных эксплуатационных возмущений в режиме реального времени;
- 6) разработать методику построения полигонных АСУТП, включающую разработку все режимных динамических математических и имитационных моделей технологического объекта управления и их интеграцию в структуру ПТК АСУТП с физическими и виртуальными контроллерами;
- 7) разработать методическое обеспечение и осуществить практическое использование «Полигона АСУТП электростанций» в учебном процессе как тренажерного комплекса.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач в работе использовались методы феноменологической термодинамики, теория автоматического управления, теория вероятностей и случайных функций, методы математического моделирования и вычислительного эксперимента.

## **Научная новизна**

Разработаны:

- 1) техническая структура многофункционального «Полигона АСУТП электростанций» как программно-технического средства для тестирования сложных алгоритмов управления, отличающаяся расширенными функциональными возможностями (защищена патентом РФ);
- 2) методика построения полигонных АСУТП электростанций, включающая создание всережимных математических и имитационных моделей сложных технологических объектов управления и их интеграцию в структуру ПТК с физическими и виртуальными контроллерами;
- 3) нелинейная динамическая математическая и имитационная модели типового теплообменника как обобщенного структурного элемента теплогидравлического объекта управления, отличающиеся всережимным состоянием теплоносителя (в трех состояниях: вода, пароводяная смесь, пар) в пределах одного элементарного участка;
- 4) алгоритмы генерации моделей случайных эксплуатационных возмущений в режиме реального времени ПТК (в виде канонического разложения В.С. Пугачева, рекуррентный и интерполяционный) и определена область их использования.

## **Практическая значимость результатов**

1. Техническая структура программно-технического средства доведена до уровня специализированного многоцелевого многофункционального тренажерного комплекса «Полигон АСУТП электростанций». Математическое и программное обеспечение Полигона позволило реализовать полноценно функционирующие в режиме реального времени АСУТП газомазутных энергоблоков 300 и 1200 МВт, пылеугольного барабанного котла ТПЕ-208 энергоблока 200 МВт и осуществить выполнение полного комплекса работ по проектированию, наладке и вводу в действие систем управления.

2. Многофункциональная учебно-исследовательская лаборатория «Полигон АСУТП электростанций» служит экспериментальной базой для обучения студентов по направлению «Управление в технических системах» и специальности «Управление и информатика в технических системах», включая проведение лабораторных практикумов по курсам «Технические средства автоматизации и управления», «Программно-технические комплексы», «Локальные системы управления», «Информационное обеспечение систем управления», а также – для подготовки (переподготовки) персонала электростанций, наладочных и проектных организаций по освоению новой технологии создания и эксплуатации АСУТП на базе ПТК сетевой иерархической структуры.

3. Алгоритмы генерации моделей случайных возмущений реализованы в соответствующей подсистеме «Полигона АСУТП электростанций», что впервые позволило имитировать в тренажерном комплексе случайные эксплуатационные возмущения с заданными характеристиками.

## **Автор защищает:**

- методику построения полигонных АСУТП, включающую создание всережимных динамических математических и имитационных моделей сложного технологического объекта управления, которые интегрированы в структуру ПТК с физическими и виртуальными контроллерами;
- нелинейную математическую модель теплообменника как обобщенного структурного элемента сложных моделей теплоэнергетического оборудования, отличаю-

щуюся всережимным состоянием теплоносителя (в трех состояниях: вода, пароводяная смесь, пар) в пределах одного элементарного участка;

- алгоритмы генерации в среде реального времени контроллера ПТК случайных эксплуатационных возмущений.

Кроме того личное участие автора при разработке технической структуры «Полигона АСУТП электростанций», его математического, программного и методического обеспечения учебного процесса подготовки и переподготовки специалистов связано с реализацией подсистемы модели технологического объекта управления.

**Обоснованность и достоверность полученных результатов** подтверждается корректным применением методов феноменологической термодинамики, теории автоматического управления, теории вероятностей и случайных функций, методов математического моделирования и вычислительного эксперимента, а также успешным опытом использования «Полигона АСУТП электростанций» для решения комплекса научно-исследовательских задач, для обучения студентов, подготовки (переподготовки) специалистов по автоматизации и персонала тепловых электростанций.

#### **Соответствие диссертации формуле специальности**

В соответствии с формулой специальности 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами», объединяющей вопросы математического, информационного, алгоритмического и машинного обеспечения создания автоматизированных технологических процессов и производств и систем управления ими, включающей методологию исследования и проектирования, формализованное описание и алгоритмизацию, оптимизацию и имитационное моделирование функционирования систем, внедрение, сопровождение и эксплуатацию человеко-машинных систем, в диссертационном исследовании разработано математическое и программное обеспечение программно-технических средств поддержки новой сквозной технологии проектирования автоматизированных систем управления.

#### **Соответствие диссертации области исследования специальности**

Отраженные в диссертации научные положения соответствуют области исследования специальности 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами»: научные и технические исследования и разработки, модели и структурные решения человеко-машинных систем, предназначенных для автоматизации производства и интеллектуальной поддержки процессов управления и необходимой для этого обработки данных в организационно-технологических и распределенных системах управления в различных сферах технологического производства и других областях человеческой деятельности.

Пункту 5 «Теоретические основы, средства и методы промышленной технологии создания АСУТП, АСУП, АСТПП и др.» паспорта специальности соответствует рассмотренная автором техническая структура программно-технического средства поддержки сквозной технологии создания АСУТП тепловых электростанций.

Пункту 10 «Методы синтеза специального математического обеспечения, пакетов прикладных программ и типовых модулей функциональных и обеспечивающих подсистему АСУТП, АСУП, АСТПП и др.» паспорта специальности соответствует рассмотренная автором методика построения полигонных АСУТП, отличающихся использованием всережимной модели объекта управления, интегрированной в структуру ПТК с физическими и виртуальными контроллерами.

Пункту 13 «Теоретические основы и прикладные методы анализа и повышения эффективности, надежности и живучести АСУ на этапах их разработки, внедрения и эксплуатации» паспорта специальности соответствует рассмотренная автором задача совершенствования элементов сквозной технологии сложных многофункциональных АСУТП тепловых электростанций, направленная на повышение эффективности АСУТП.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных научно-технических конференциях «Состояние и перспективы развития электротехнологии» IX-XVI Бенардосовские чтения (Иваново, 1999-2011 г.), «Теория и практика имитационного моделирования и создания тренажеров» (Пенза, 2001 г.), «Повышение эффективности теплоэнергетического оборудования» (Иваново, 2002-2011 г.), «Управление и информационные технологии (УИТ)» (Санкт-Петербург, 2003-2008 г.), «Идентификация систем и задачи управления (SICPRO)» (Москва, 2004 г.), «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2005-2006 г.), а также на научных семинарах кафедры систем управления ИГЭУ.

Результаты работы внедрены в учебный процесс подготовки и переподготовки специалистов, что подтверждается соответствующими актами.

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 29 научных работ, в том числе 1 патент РФ, 3 статьи в журналах по списку ВАК, 25 статей в тематических сборниках и тезисах докладов.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 125 наименований, двух приложений. Диссертация содержит 168 страниц машинописного текста, 57 рисунков, 2 таблицы.

#### **Содержание работы**

**Во введении** обосновывается актуальность темы исследования. Сформулированы цель и задачи исследований. Приведены общие сведения о структуре работы.

**В первой главе** рассматриваются особенности и проблемы современных АСУТП тепловых электростанций и технология их создания.

Современные АСУТП относятся к классу сложных распределенных многофункциональных систем управления. Техническая структура реализуется средствами ПТК сетевой иерархической структуры. При этом сложность систем управления, в первую очередь, определяется спецификой теплоэнергетических объектов, которые характеризуются глубокой взаимозависимостью между отдельными агрегатами и многосвязностью технологических параметров, а также большим числом контролируемых и управляемых параметров. Высокая сложность современного технического и алгоритмического обеспечения АСУТП диктует повышенные требования к квалификации инжинирингового и эксплуатационного персонала.

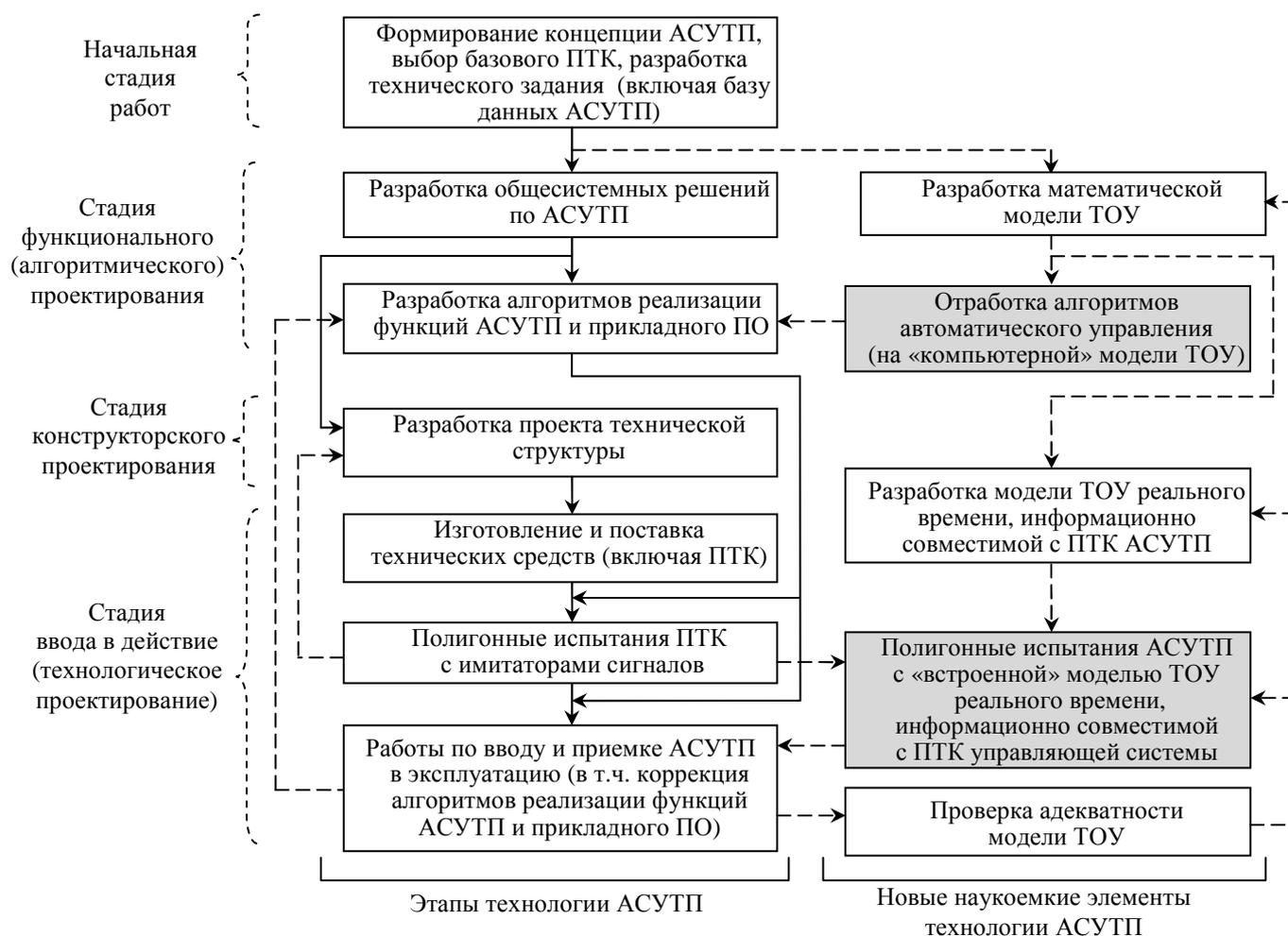
Технология создания многофункциональных АСУТП на базе ПТК представляет собой сквозную итерационную последовательность работ на стадиях формирования технического задания, функционального проектирования (общесистемные решения, синтез алгоритмов управления и разработка прикладного ПО системы), конструкторского проектирования (синтез технической структуры) и технологического проектирования (ввод в действие).

К основным проблемам современной технологии АСУТП можно отнести недостаточную отработанность алгоритмов управления и неотлаженность системы в целом при вводе ее в действие, а также недостаточную квалификацию эксплуатационного персонала электростанций, осуществляющего освоение новых систем. Для

сложных нетиповых алгоритмов проблема их неотработанности стоит еще острее. Отладка новых алгоритмов на действующем оборудовании сопряжена с большими рисками, связанными с возможностью возникновения аварийных ситуаций из-за просчетов в разработке или реализации алгоритмов, что может в конечном итоге привести к выводу из строя дорогостоящего оборудования.

Решением отмеченных проблем является использование новых наукоемких элементов технологии многофункциональных АСУТП электростанций – специализированных программно-технических средств (полигонов АСУТП), позволяющих выполнять отработку сложных алгоритмов управления и подготовку (переподготовку) инженерингового и эксплуатационного персонала на ранних стадиях проектирования энергетического объекта и АСУТП. Показано, что при создании полигонов АСУТП целесообразно применять подход, когда сама система управления реализуется средствами ПТК и является максимально идентичной реальной АСУТП, а объект управления замещается адекватной имитационной моделью, работающей в режиме реального времени.

Определено место полигонов в сквозной технологии создания современных АСУТП (рис.1). Так, на этапе функционального проектирования полигоны АСУТП могут использоваться для отработки сложных алгоритмов автоматического управления, а на этапе технологического проектирования для комплексной отладки системы управления.

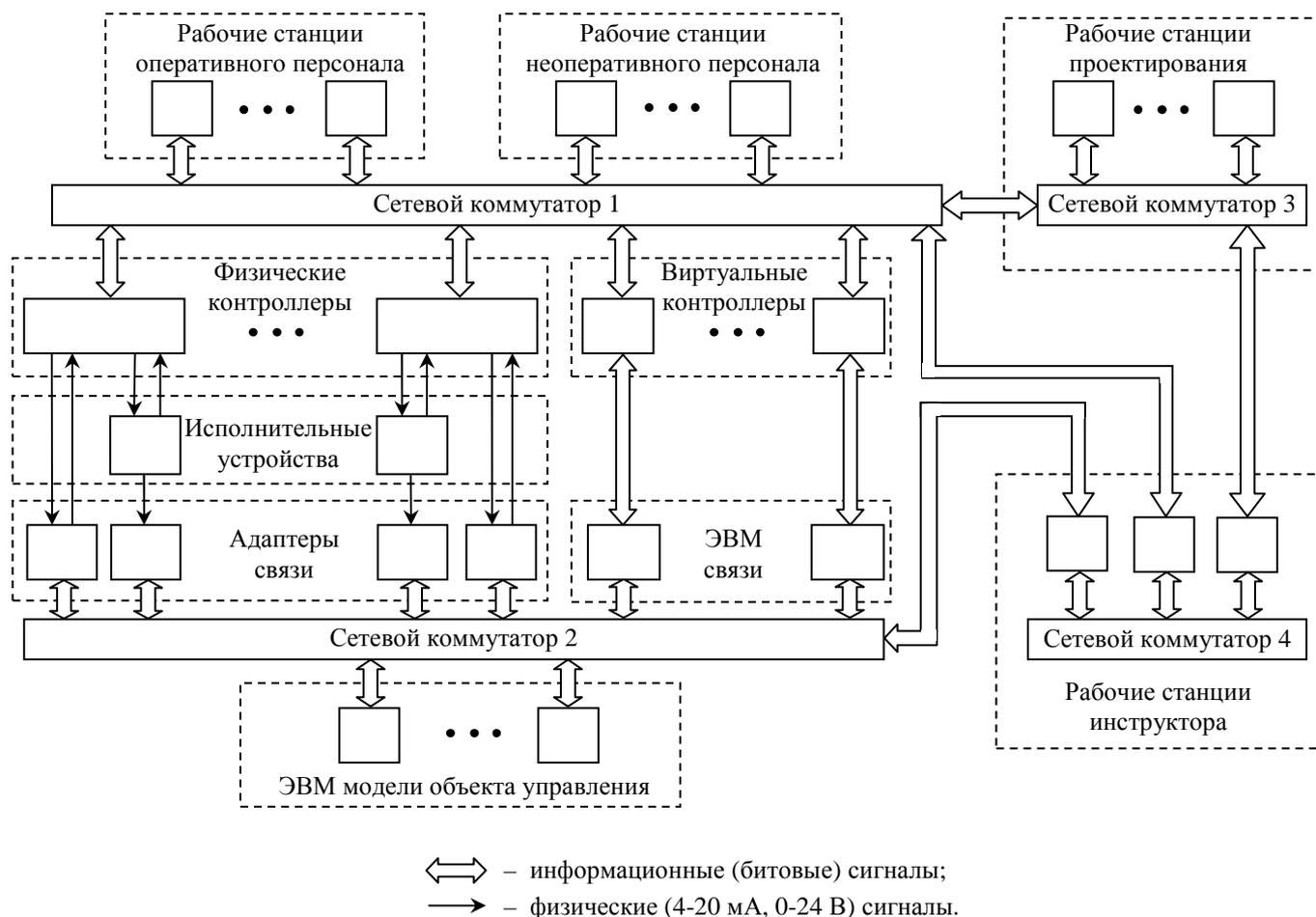


**Рис.1. Место новых наукоемких элементов в технологии АСУТП**  
(цветом выделено место полигонов АСУТП)

Для создания программно-технических средств, способных выполнять поставленные задачи, необходимо разработать их техническую структуру, а также соответствующее математическое, программное и методическое обеспечение.

**Во второй главе** рассматривается формирование технической структуры полигонов АСУТП электростанций, их математического обеспечения.

Разработана техническая структура полигона АСУТП электростанций (рис.2), которая включает в себя подсистему объекта, подсистему управления, подсистему проектирования и подсистему инструктора.



**Рис.2. Техническая структура полигона АСУТП электростанций**

В подсистему объекта входит адекватная модель технологического объекта управления, отличающаяся возможностью имитации случайных эксплуатационных возмущений, а также модели датчиков и исполнительных устройств. Причем для большего соответствия реальной АСУТП часть исполнительных устройств являются настоящими промышленными образцами.

В подсистеме управления средствами выбранного при проектировании АСУТП ПТК реализуются требуемые функции системы управления, а также воссоздаются точные копии рабочих мест оперативного и неоперативного персонала электростанций. При этом часть аппаратных средств ПТК заменяется их адекватной моделью (виртуальные контроллеры). Число физических (реальных) контроллеров определяется минимально необходимым количеством физических исполнительных устройств.

Подсистема проектирования содержит средства разработки прикладного и программного обеспечения подсистем объекта и управления. Рабочие станции являются копиями рабочих мест специалистов, выполняющих проектирование и наладку АСУТП.

Подсистема инструктора включает в себя средства, позволяющие осуществлять контроль за работой подсистем объекта и управления, а также вносить в них необ-

ходимые воздействия (изменять состояние технологического объекта управления, изменять параметры случайных процессов возмущений, изменять состояние элементов системы управления). Таким образом, подсистема инструктора позволяет задавать разный уровень сложности решаемых задач, что обеспечивает расширение категорий обучаемых специалистов и оценивать уровень их подготовки.

Рассмотрен пример реализации технической структуры многоцелевого многофункционального тренажерного комплекса «Полигон АСУТП электростанций» на базе ПТК «Квint», включающего в себя:

- информационно-вычислительный комплекс в составе компьютеров рабочих станций оперативного контура (операторские станции), рабочих станций неоперативного контура (архивная станция, станция анализа, инженерные станции и др.), рабочих станций проектирования, станции моделирования;
- управляющий комплекс ПТК «Квint» в составе промышленных контроллеров «Ремиконт», состоящих из комплекта базовых модулей и проектно-компонруемых модулей устройств связи с объектом;
- сетевой комплекс в составе системной и контроллерных сетей, в том числе, концентраторы, шлюзы и сетевые платы рабочих станций;
- полевое оборудование в виде типовых электрических исполнительных устройств, взаимодействующих с математическими моделями технологического оборудования.

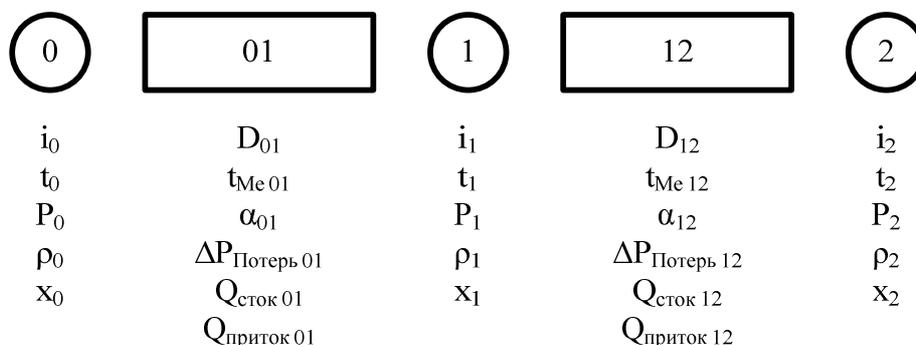
Техническая структура «Полигона АСУТП электростанций» позволяет применять его как для отладки алгоритмов и проверки правильности функционирования систем управления, решения научно-исследовательских задач, нацеленных на повышение эффективности АСУТП, так и для подготовки (переподготовки) специалистов, в том числе оперативного и неоперативного персонала электростанций, а также проектировщиков и наладчиков систем.

Указанные функциональные задачи предъявляют определенные требования к математическому и программному обеспечению полигонов АСУТП электростанций. В первую очередь это относится к математическим моделям технологического объекта управления, которые должны быть всережимными (описывать все возможные режимы функционирования реального объекта) и адекватными (обеспечивать удовлетворительное соответствие статических и динамических характеристик реальному объекту). При этом необходимо обоснованно выбрать приемлемую степень сложности модели, обеспечивающую, с одной стороны, достаточно высокую ее точность, а с другой стороны, возможность ее реализации имеющимися средствами для расчета в режиме реального времени.

**В третьей главе** рассматривается разработка нелинейной динамической математической и имитационной моделей типового теплообменника.

Построение адекватной математической модели технологического оборудования является весьма трудоемкой и нетривиальной задачей. Упрощение технологических процессов снижает практическую ценность результата. Переход от простых моделей к более сложным приводит к многопараметрическим моделям и сопряжен с целым рядом аналитических проблем, одна из которых связана с интегрированием систем «жестких» дифференциальных уравнений. Применение феноменологического подхода к описанию неравновесных процессов позволяет получить математические модели сложных технологических объектов управления с высокой точностью.

Обычно при моделировании теплообменник представляется как объект, распределенный по одной пространственной координате (длине). Вдоль этой координаты распространяется греющий тепловой поток, вдоль нее же изменяются температура металла труб и параметры состояния теплоносителя: теплосодержание, температура, плотность, давление. Точность расчёта распределённых по пространственной координате параметров определяется количеством участков, на которые разбивается теплообменник (рис.3). При этом в рамках одного отдельного участка корректно перейти к рассмотрению модели с сосредоточенными параметрами.



**Рис.3. Схема разбитого на 2 элементарных участка теплообменника**

0, 1, 2 – индексы точек, соответствующих началу и концу элементарного участка;  
 01, 12 – индексы элементарных участков;  $i$  – энтальпия;  $t$  – температура;  $p$  – давление;  
 $\rho$  – плотность;  $t_{Me}$  – температура металла;  $x$  – массовое паросодержание;  
 $D$  – массовый расход;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи между стенкой и теплоносителем;  
 $\Delta P_{потерь}$  – потери давления на элементарном участке;  $Q_{сток}$  – тепловой поток между металлом и теплоносителем;  $Q_{приток}$  – тепловой поток, подводимый к металлу

Основу математической модели теплообменника составляют уравнения законов сохранения массы, импульса и энергии, записанные для каждого элементарного участка:

$$0,5 \cdot (V_{01} + V_{12}) \frac{d\rho_1}{d\tau} = D_{01} - D_{12}; \quad (1)$$

$$\Delta p_{эл} = \Delta p_{тр} + \Sigma \Delta p_{м} + \Delta p_{уск} + \Delta p_{нив}, \quad (2)$$

$$V_{01} \cdot \rho_{01} \cdot \frac{di_1}{d\tau} = \alpha_{01} \cdot F_{вн\ 01} \cdot (t_{Me\ 01} - t_{01}) - D_{01} \cdot (i_1 - i_0); \quad (3)$$

где  $\Delta p_{эл}$  – полный перепад давления в элементе;  $\Delta p_{тр}$  – потеря давления от трения;  $\Sigma \Delta p_{м}$  – потеря давления в местных сопротивлениях;  $\Delta p_{уск}$  – потери давления от ускорения потока;  $\Delta p_{нив}$  – нивелирный перепад давления.

Очевидно, что чем больше количество участков, на которое разбивается теплообменник, тем выше точность получаемой модели. Однако при этом возрастает объем модели, что влечет за собой увеличение времени ее расчета. Поэтому количество элементарных участков теплообменника является существенным фактором для адекватности математической модели и ограничительным фактором для возможности расчета модели в режиме реального времени.

В общем случае теплоноситель в теплообменнике может находиться в однофазном (жидкость или пар) или двухфазном (пароводяная смесь) состояниях. Однако на протяжении всего теплообменника или отдельного элементарного участка он может менять своё состояние. При этом алгоритмы расчета коэффициента теплоотдачи и давлений для однофазного и двухфазного теплоносителей существенно отличаются.

Общепринятым подходом является разбиение многофазного теплообменника таким образом, чтобы в каждом элементарном участке теплоноситель находился в строго определенном состоянии. Однако такое разбиение не позволяет учитывать смещение точек вскипания и полного испарения, характерное для циркуляционных контуров барабанных котлов и испарительных участков прямоточных котлов.

Для учета всех возможных состояний теплоносителя в пределах одного элементарного участка необходимо знать точки вскипания и полного испарения теплоносителя. Эти значения получаем при допущении о равномерности теплового потока по длине элементарного участка теплообменника, из чего следует, что энтальпия теплоносителя меняется по линейному закону. В линейном приближении точка вскипания и точка испарения могут быть определены по следующим формулам:

$$L_{вск} = L \cdot \frac{i'_{нас\ вх} - i_{вх}}{(i_{вых} - i_{вх}) - (i'_{нас\ вых} - i'_{нас\ вх})}, \quad (4)$$

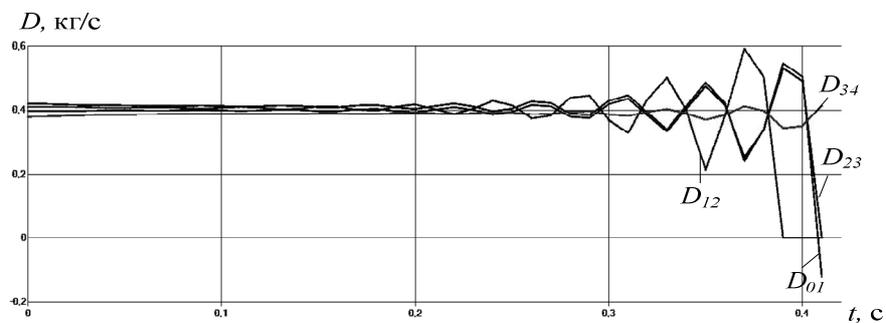
$$L_{исп} = L \cdot \frac{i''_{нас\ вх} - i_{вх}}{(i_{вых} - i_{вх}) - (i''_{нас\ вых} - i''_{нас\ вх})}, \quad (5)$$

где *вх*, *вых* – индексы параметров, соответствующие входу и выходу элементарного участка; *L* – длина теплообменник; *L<sub>вск</sub>* – координата точки вскипания; *L<sub>исп</sub>* – координата точки полного испарения; *i* – энтальпия теплоносителя; *i'<sub>нас</sub>* – энтальпия воды в состоянии насыщения; *i''<sub>нас</sub>* – энтальпия пара в состоянии насыщения.

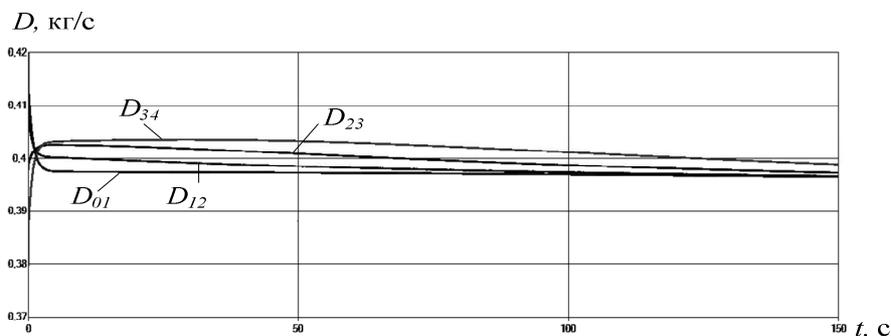
Одной из проблем, возникающих при реализации сложных нелинейных многопараметрических моделей, является наличие алгебраических петель, представляющих собой ситуацию, когда вычисление значений двух и более параметров взаимосвязано и не может быть выполнено напрямую за один шаг расчета. Для разрешения таких ситуаций используется итерационный метод расчета. В этом случае на каждом шаге моделирования расчет петли повторяется до тех пор, пока решение не сойдется к какому-то значению с указанной точностью, либо не будет достигнуто ограничение на количество итераций. В качестве первого приближения используется значение, полученное на предыдущем шаге расчета. При этом повышается точность и устойчивость решения, но также и повышаются затраты времени на вычисления.

Эффективность итерационной методики разрешения алгебраических петель была подтверждена в ходе экспериментальных исследований (рис.4). Теплообменник был разбит на 4 элементарных участка. При одинаковых параметрах модели и шаге интегрирования 0,01с были проведены два вычислительных эксперимента: при ограничении на максимум итераций во всех циклах равном 0 и 2. В первом случае (рис.4а) система уравнений потеряла устойчивость, во втором случае (рис.4б), даже при небольшом числе итераций, система осталась устойчивой.

Таким образом, разработана нелинейная динамическая модель теплообменника, отличающаяся всережимным состоянием теплоносителя в пределах одного элементарного участка, что позволяет учитывать смещение границ перехода фазовых состояний, а также позволяет более свободно подходить к разбиению теплообменника на элементарные участки, не обращая внимания на фазовые состояния теплоносителя. Для полученной математической модели разработан алгоритм расчета, обеспечивающий ее устойчивость и возможность функционирования в режиме реального времени.



а)



б)

**Рис.4. Экспериментальные исследования устойчивости модели**

Однако следует отметить, что в реальных условиях все технологические параметры подвержены действию случайных возмущений, связанных с изменением свойств топлива, особенностями гидродинамических режимов и другими эксплуатационными факторами. Поэтому для приближения получаемых в моделях сигналов к реальным следует разработать подсистему генерации случайных процессов возмущений.

**В четвертой главе** рассматриваются методы генерации моделей случайных эксплуатационных возмущений.

Поскольку в условиях полигонов АСУТП задача разработки подсистемы генерации случайных эксплуатационных возмущений решалась впервые, потребовалось провести исследование методов получения моделей случайных процессов, функционирующих в режиме реального времени.

Известен алгоритм генерации модели случайного процесса возмущений в виде канонического разложения В.С.Пугачева

$$\lambda(t) = \sum_{k=0}^N U_k \cdot \cos(\omega_k t) + V_k \cdot \sin(\omega_k t), \quad t \in [0, T], \quad (6)$$

где  $\lambda(t)$  – случайный процесс,  $U_k$  и  $V_k$  – случайные величины, получаемые с помощью генератора случайных чисел,  $N$  – число элементов ряда,  $T$  – длительность реализации случайного процесса.

Другой известный алгоритм – рекуррентный – позволяет моделировать нормальный случайный процесс с корреляционной функцией вида

$$K(\tau) = D_\lambda \cdot e^{-\frac{|\tau|}{T_\lambda}}, \quad (7)$$

используя следующее выражение:

$$\lambda[i] = \sqrt{D_\lambda(1-\rho^2)} \cdot \xi[i] + \rho \cdot \lambda[i-1], \quad \rho = e^{-\frac{\Delta t}{T_\lambda}}, \quad (8)$$

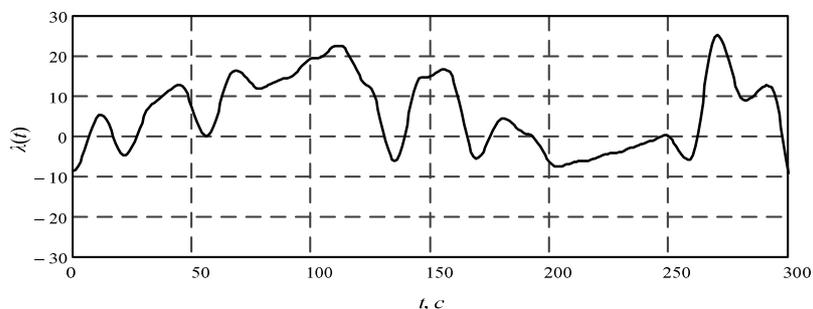
где  $\lambda[i]$  и  $\lambda[i-1]$  – значения случайного процесса на текущем и предыдущем шаге выполнения,  $D_\lambda$  – дисперсия случайного процесса,  $\xi[i]$  – ортонормированная последовательность независимых случайных величин,  $\Delta t$  – шаг моделирования.

С точки зрения применения для моделей реального времени, функционирующих в составе полигонов АСУТП, оба алгоритма имеют ряд недостатков. Так, алгоритм на основе канонического разложения Пугачева является достаточно ресурсоемким, причем затраты вычислительных ресурсов возрастают с увеличением длины реализации. Кроме того, в алгоритме отсутствует возможность изменения параметров получаемой модели случайного процесса в режиме реального времени, что является существенным ограничением на его использование в тренажерных комплексах. Основным недостатком рекуррентного алгоритма является зависимость точности результатов от шага моделирования, что затрудняет его применение в среде ПТК, где шаг квантования по времени не всегда является постоянным.

Для устранения отмеченных недостатков предложен интерполяционный алгоритм генерации моделей случайных эксплуатационных возмущений. В этом алгоритме генератором «белого шума» задаются только некоррелированные сечения случайного процесса, а значения между этими сечениями интерполируются синусоидой (рис.5). Расчет интерполяции производится по формуле

$$\lambda(t) = \frac{Rnd_1 - Rnd_0}{2 \cos(\omega \cdot \Delta T_{ex})} \cos[\omega \cdot (t + \Delta T_{ex})] + \frac{Rnd_1 + Rnd_0}{2}, \quad t \in [0, \tau_{кор}], \quad (9)$$

где  $Rnd_0$  и  $Rnd_1$  – предыдущее и следующее значения, полученные генератором случайных величин, между которым производится интерполяция;  $\Delta T_{ex}$  – смещение относительно экстремумов аппроксимирующей синусоиды.



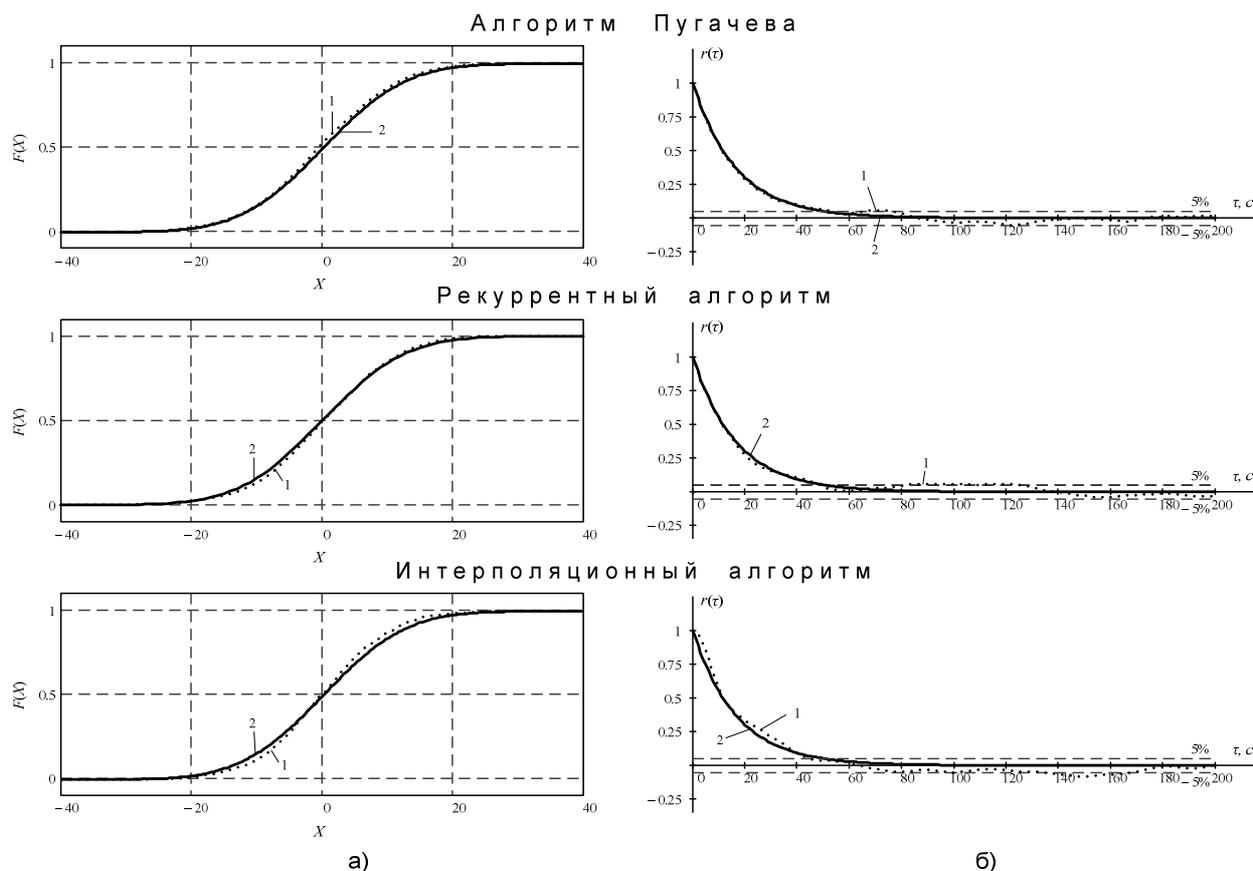
**Рис.5. Фрагмент реализации случайного процесса по интерполяционному алгоритму**

Физическая величина, подверженная влиянию значительного числа случайных помех, чаще всего подчиняется нормальному распределению, поэтому для имитации процессов внешних возмущений, действующих на технологический объект, целесообразно использовать случайные величины, распределенные по нормальному закону.

Все три рассмотренных алгоритма были проверены на соответствие заданному закону распределения (рис.6а) и заданной корреляционной функции (рис.6б). Как видно из графиков все алгоритмы генерируют случайные процессы достаточно близкие к нормальному закону распределения и заданному виду корреляционной функции.

Таким образом, наиболее предпочтительным для реализации в среде ПТК АСУТП представляется интерполяционный алгоритм генерации моделей случайных эксплуатационных возмущений. Он лишен основных недостатков двух других алгоритмов, а его чуть худшее соответствие заданным характеристикам не является кри-

тичным для рассматриваемой области применения. Использование алгоритма на основе канонического разложения Пугачева целесообразно только для стационарных режимов функционирования модели объекта управления.



**Рис.6. Проверка соответствия полученных по алгоритмам случайных процессов заданным характеристикам**  
 а) – функции закона распределения; б) – корреляционные функции  
 1 – оценочные функции; 2 – заданные функции

**В пятой главе** рассматривается методика построения полигонных АСУТП электростанций.

Техническая и функциональная структура «Полигона АСУТП электростанций», его математическое и программное обеспечение позволяют выполнять разработку полноценно функционирующих в режиме реального времени полигонных АСУТП.

Под полигонной АСУТП понимается система, которая отличается от основного (промышленного) прототипа меньшим информационным масштабом (объемом моделируемого технологического оборудования и исполнительных устройств) и ограничениями по режимам работы.

Методика построения полигонных АСУТП включает следующие основные этапы:

- 1) постановка задачи разработки полигонной АСУТП (определение цели и задач разработки; выделение технологических зон объекта управления; определение границ, в пределах которых модель будет имитировать управляемое оборудование и режимы его работы; формирование требований к задачам автоматического управления; выделение функциональных зон объекта автоматизации);
- 2) создание подсистемы модели (выполнение математического описания технологического оборудования на основе фундаментальных физических законов с учетом

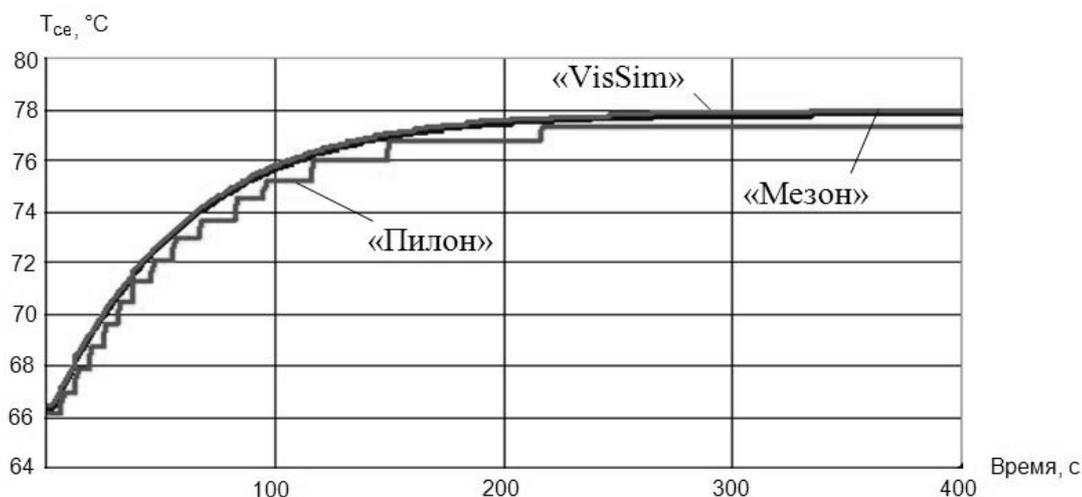
конструктивных особенностей и режимных параметров технологического объекта; тестирование и отладка модели на компьютере в системе имитационного моделирования; реализация модели в среде ПТК АСУТП);

- 3) создание подсистемы генерации случайных эксплуатационных возмущений (определение параметров моделей случайных возмущений, реализация алгоритма генерации моделей случайных возмущений);
- 4) создание управляющей подсистемы (разработка алгоритмов управления; проектирование алгоритмических схем программирования контроллеров; разработка прикладного ПО рабочих станций – базы данных, видеограмм и др.);
- 5) ввод в действие и испытания полигонной АСУТП (запуск модели объекта управления в режиме реального времени, загрузка технологических программ в реальные и виртуальные контроллеры; параметрическая оптимизация, отработка и проверка всех алгоритмов АСУТП с уровня рабочих станций; испытания системы).

Одним из главных вопросов при построении полигонных АСУТП является выбор средств разработки имитационных моделей объектов управления. Одним из вариантов является реализация моделей технологических объектов управления универсальными средствами моделирования, например, в среде имитационного моделирования VisSim. Этот вариант подразумевает функционирование в контуре АСУТП станции моделирования. Другим вариантом является реализация моделей технологических объектов управления стандартными средствами ПТК.

В последнее время имеет место тенденция разработки специализированных средств для реализации имитационных моделей объектов управления непосредственно в составе ПТК. Так, например, в составе отечественного ПТК «Квинт СИ» (ОАО «НИИТеплоприбор») появилась расчетная станция «Мезон», которая представляет собой среду имитационного моделирования с широким перечнем алгоблоков и встроенной библиотекой моделей элементов оборудования, а также с возможностью добавления новых алгоритмов, написанных на языке программирования C#.

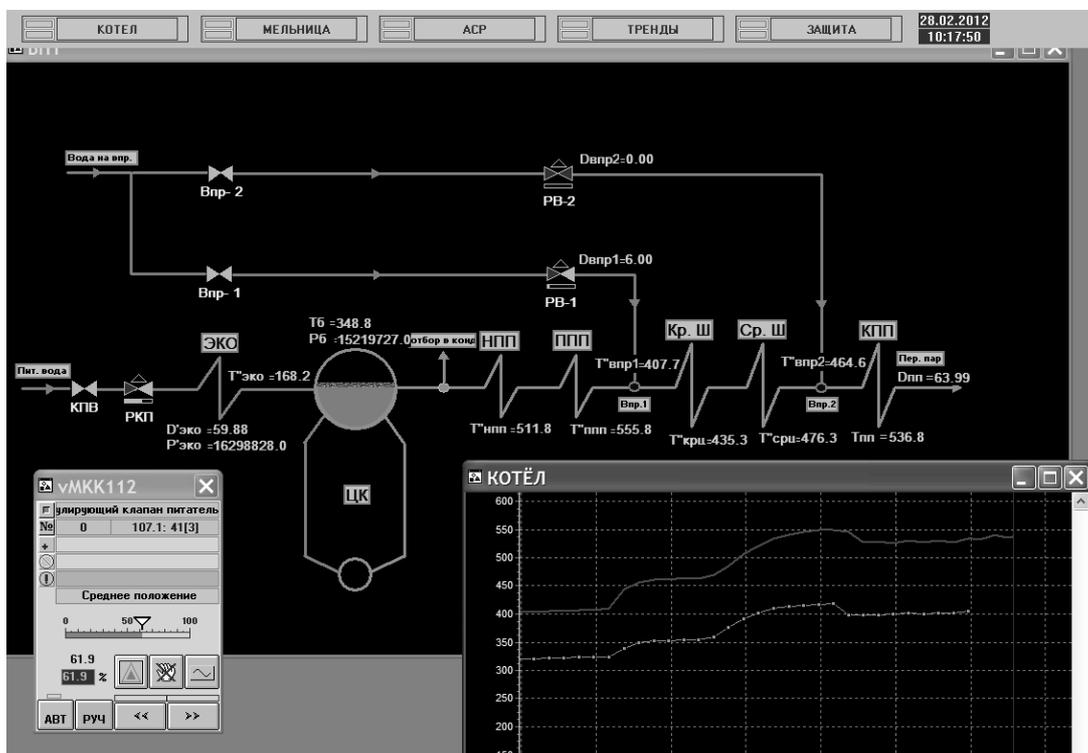
Выполнены экспериментальные исследования трёх вариантов реализации имитационной модели на примере пылесистемы прямого вдувания: в среде имитационного моделирования VisSim; в системе технологического программирования контроллеров «Пилон» ПТК «Квинт-5»; в расчётной станции «Мезон» ПТК «Квинт СИ» (рис.7).



**Рис.7. Динамическая характеристика температуры азросмеси за сепаратором при возмущении расходом первичного воздуха ( $\Delta G_{пв} = 1,8 \text{ м}^3/\text{с}$ )**

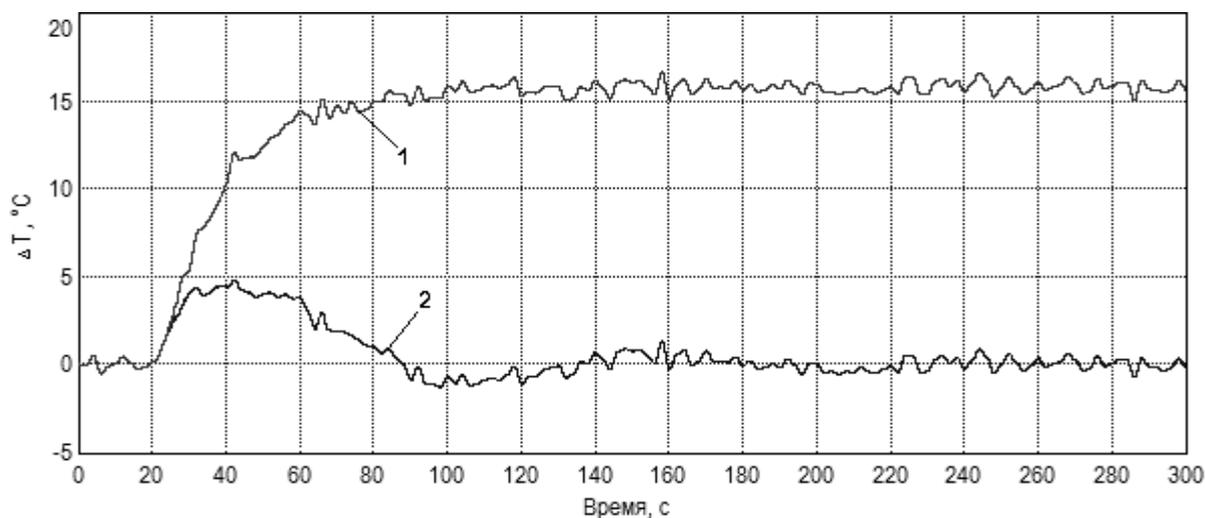
По полученным кривым видно, что точность модели, реализованной в расчетной станции «Мезон», значительно выше, чем у аналогичной модели, созданной в системе технологического программирования «Пилон» и практически не уступает такой же модели в системе имитационного моделирования «VisSim».

В результате разработан ряд полигонных АСУТП энергетических объектов (АСУТП газомазутных энергоблоков 300 и 1200 МВт, пылеугольного барабанного котла ТПЕ-208 энергоблока 200 МВт) на базе ПТК «Квинт» (рис.8).



**Рис.8. Мнемосхема водопарового тракта котла ТПЕ-208 энергоблока 200 МВт**

Испытания функционирования модели объекта управления при действии на него случайных возмущений проводились на полигонной АСУТП пылеугольного барабанного котла (рис.9).



**Рис.9. Иллюстрация процесса изменения температуры пара за котлом, искаженного случайными возмущениями**

1 – в разомкнутом контуре; 2 – в типовой одноконтурной схеме регулирования

Таким образом, техническая и функциональная структура «Полигона АСУТП электростанций», его математическое и программное обеспечение позволило разработать полноценно функционирующие в режиме реального времени полигонные АСУТП ряда энергоблоков.

**В заключении** приводятся основные научные результаты работы, оценивается их новизна и практическая значимость.

### **Выводы**

1. Показано, что местом новых наукоемких элементов (полигонов АСУТП электростанций) в сквозной технологии создания и эксплуатации АСУТП тепловых электростанций являются стадии проектирования алгоритмов и ввода АСУТП в действие.
2. Разработанная техническая структура «Полигона АСУТП электростанций» в совокупности с математическим, программным и методическим обеспечением позволяет использовать его как для отладки алгоритмов и проверки правильности функционирования систем управления, решения научно-исследовательских задач, нацеленных на повышение эффективности АСУТП, так и для подготовки (переподготовки) специалистов, в том числе оперативного персонала электростанций.
3. Разработанная нелинейная динамическая математическая модель типового теплообменника как обобщенного структурного элемента сложного объекта управления отличается всережимным состоянием теплоносителя (вода, пароводяная смесь, пар) в пределах одного элементарного участка.
4. Разработанный алгоритм расчета системы нелинейных дифференциальных уравнений математической модели теплообменника обеспечивает устойчивое функционирование модели в режиме реального времени ПТК.
5. Исследования методов генерации моделей приведенных случайных эксплуатационных возмущений показали, что в стационарном режиме оптимизации технологического процесса целесообразно использовать каноническую модель В.С. Пугачева, а для нестационарных режимов – разработанную интерполяционную модель возмущений.
6. Предложенная методика построения полигонных АСУТП отработана при создании автоматизированных систем управления газомазутными энергоблоками 300 и 1200 МВт и пылеугольным энергоблоком 200 МВт на базе ПТК «Квинт».
7. Разработанное методическое обеспечение многофункциональной учебно-исследовательской лаборатории «Полигон АСУТП электростанций» используется для обучения студентов по направлению «Управление в технических системах» а также – для подготовки (переподготовки) персонала электростанций, наладочных и проектных организаций по освоению новой технологии создания и эксплуатации АСУТП на базе ПТК сетевой иерархической структуры.

### **Основные публикации по работе**

#### *Патент РФ*

1. Устройство подготовки эксплуатационного персонала энергетического оборудования // Патент № 2282248 (Заявка №2005101012 от 18.01.2005) / Тверской Ю.С., Таламанов С.А., Голубев А.В., Никоноров А.Н., Харитонов И.Е. // Оpubл.20.08.2006. Бюл. № 23.

*Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК*

2. Имитационная модель пылесистем по схеме прямого вдувания паровых котлов (теоретические основы и технология реализации на полигоне АСУТП) / Тверской Ю.С., Таламанов С.А., Никоноров А.Н. и др. // Теплоэнергетика. – 2005. – №9. – С. 61-69.
3. Шишкин В.И., Никоноров А.Н. Разработка математической модели случайных процессов возмущений в теории финитного управления // Вестник ИГЭУ. Вып.4. – Иваново: Изд. ИГЭУ, 2005. – С. 174.
4. Тверской Ю.С., Голубев А.В., Никоноров А.Н. «Полигон АСУТП электростанций» – эффективное средство подготовки специалистов и тестирования сложных систем управления // Теплоэнергетика. – 2011. – №10. – С. 70-75.

*Основные публикации в других изданиях*

5. Таламанов С.А., Никоноров А.Н. Разработка на стенде ПТК «Квинт» имитационной модели технологического оборудования в составе демонстрационной версии системы автоматизации котлоагрегата ТГМП-114 энергоблока 300 МВт // Тез. докл. межд. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (IX Бенардосовские чтения). – Иваново, 1999. – С.80.
6. К освоению новой технологии построения АСУТП тепловых электростанций / Тверской Ю.С., Таламанов С.А., Никоноров А.Н. и др. // Новое в российской электроэнергетике. – 2001. – №8. – С. 18-25.
7. Полигон АСУТП на базе современных программно-технических комплексов / Тверской Ю.С., Таламанов С.А., Никоноров А.Н. и др. // Сб. матер. межд. науч.-практ. конф. «Теория и практика имитационного моделирования и создания тренажеров» / Пенз. гос. ун-т. – Пенза, 2001. – С. 51-54.
8. Имитационные модели технологического оборудования в составе полигонных версий АСУТП тепловых электростанций (опыт реализации и перспективы промышленного применения) / Тверской Ю.С., Таламанов С.А., Никоноров А.Н. и др. // Сб. матер. науч. конф. «Управление и информационные технологии» (УИТ-2003) в 2-х томах / С.-Пб. гос. электротехн. ун-т. – Санкт-Петербург, 2003. – Том 2. – С. 147-151.
9. Никоноров А.Н. О создании тренажеров АСУТП энергоблоков на базе программно-технических комплексов // Тез. докл. межд. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XI Бенардосовские чтения). – Иваново, 2003. – С. 111.
10. Тверской Ю.С., Таламанов С.А., Никоноров А.Н. Особенности реализации имитационных моделей непрерывных технологических объектов в составе АСУТП тепловых электростанций // Труды III межд. конф. «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO '04 / Институт проблем управления. – Москва, 2004. – С. 660-672.
11. Никоноров А.Н., Постников Д.В., Шишкин В.И. Особенности реализации моделей случайных процессов средствами программно-технических комплексов // Тез. докл. XI межд. научн.-техн. конф. студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика»; в 3-х т. – М.: МЭИ, 2005. – Т. 3. – С. 194-195.
12. Основные требования к многофункциональному тренажеру энергоблока ПГУ-325 / Ю.С. Тверской, С.А. Таламанов, А.В. Голубев, А.Н. Никоноров // в кн «Технология АСУТП электростанций» / Под ред. Ю.С. Тверского: Труды Междунар. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XII Бенардосовские чтения). – Иваново: Изд. ИГЭУ, 2005. – С. 86-93.
13. Тверской Ю.С., Таламанов С.А., Никоноров А.Н. Повышение квалификации и профессиональная подготовка специалистов энергопредприятий в области современных АСУТП // Технология АСУТП электростанций / Под ред. Ю.С. Тверского: Труды Междунар. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы

- развития электротехнологии» (XII Бенардосовские чтения). – Иваново: Изд. ИГЭУ, 2005. – С. 132-134.
14. Никоноров А.Н., Тверской Ю.С. О проблемах реализации имитационных моделей сложных технологических объектов в среде реального времени ПТК АСУТП электростанций / Доклады 5-й науч. конф. «Управление и информационные технологии» (УИТ-2008) в 2-х томах / СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – Санкт-Петербург, 2008. – в 2-х т. – Т.1. – С.202-206.
  15. Нелинейная динамическая модель пылесистем прямого вдувания котлов электростанций / Д.Ю.Тверской, В.В.Корольков, Е.Д.Маршалов, А.Н.Никоноров, Ю.С.Тверской // Доклады 5-й науч. конф. «Управление и информационные технологии» (УИТ-2008) в 2-х томах / СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – Санкт-Петербург, 2008. – в 2-х т. – Т.2. – С. 100-102.
  16. Никоноров А.Н., Пронин Д.А. Разработка тренажерного комплекса пылеугольного котла на базе ПТК «Квинт СИ» // Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XV Бенардосовские чтения). – Иваново: Изд. ИГЭУ, 2009. – С. 123-124.
  17. Никоноров А.Н. Особенности реализации нелинейных динамических моделей технологических объектов управления в составе полигонов АСУТП электростанций // Сб. науч. трудов Междунар. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVI Бенардосовские чтения). – Иваново: Изд. ИГЭУ, 2011. – в 4-х т. – Т.2. (Теплоэнергетика). – С. 275-278.
  18. Никоноров А.Н., Пронин Д.А. Исследование алгоритмов генерации случайных процессов возмущений, действующих на технологический объект управления // Сб. науч. трудов Междунар. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVI Бенардосовские чтения). – Иваново: Изд. ИГЭУ, 2011. – в 4-х т. – Т.2. (Теплоэнергетика) – С. 281-284.
  19. Tverskoy Yu. S., Golubev A. V., Nikonov A. N. The Proof Ground for Automated Process Control Systems of Power Stations: An Efficient Tool for Training Specialists and Testing Complex Control Systems // Thermal Engineering. – 2011. – №10. – P. 869-875.

**НИКОНОРОВ Андрей Николаевич**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СКВОЗНОЙ ТЕХНОЛОГИИ  
СОЗДАНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ АСУТП ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Подписано в печать 2012. Формат 60x84 1/16.

Печать плоская. Усл. печ. л. 1,16.

Тираж 100 экз. Заказ №

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический  
университет имени В.И. Ленина»

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34.

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ.