



# ИНФОРМАЦИОННО-ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ СРЕДА РАЗРАБОТКИ АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМИ ОБЪЕКТАМИ<sup>1</sup>

Ю.Л. Муромцев, И.В. Тюрин

*Тамбовский государственный технический университет*

Освещены проблемы оптимального управления энергоемкими аппаратами и основные пути их решения. Рассмотрена созданная инструментальная среда для решения комплекса задач оптимального управления промышленными объектами. Приведены примеры применения разработанных методов на производстве.

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальность задач ресурсосбережения определяется современными отечественными и международными требованиями к экономичности и экологичности промышленного оборудования. Требуется переход на новые, в том числе, интеллектуальные и энергосберегающие технологии, внедрение концепции «бережливого производства». Необходимость решения таких задач определяет, в частности, введенный 01.09.2000 г. ГОСТ Р 51380—99, регламентирующий нормативные значения показателей энергетической эффективности энергопотребляющей продукции производственно-технического назначения и бытового потребления на стадиях ее жизненного цикла.

В странах Европейского сообщества ведутся работы в рамках проекта «Энергетическая эффективность-XXI» (EE-21) Европейской экономической комиссии ООН под эгидой Комитета по устойчивой энергетике для решения проблем энергоэффективности. В условиях рыночной экономики материальные и невозобновляемые энергетические потоки на входе в социально-экономическую систему учитываются ценами, выражаю-

щими лишь затраты на извлечение природных богатств без учета реальной ценности добываемого и потребляемого ресурса. Цены произведенного товара не отражают в себе губительных последствий воздействия на экологическую систему энергетических затрат и потоков отходов в виде твердых, жидких и газообразных сред. Существует предел, выше которого нельзя использовать природные ресурсы при производстве продукции.

Для обеспечения выпуска отечественной промышленностью конкурентоспособных товаров необходимы комплексные исследования существующих технологических процессов, по результатам которых принимаются меры по реинжинирингу производства. Особое внимание при анализе промышленных ситуаций следует уделять в случае производства продукции, эффективно функционирующей в критических и опасных ситуациях.

## 1. ЗАДАЧИ И ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ

На мировом рынке используются десятки пакетов программ CAD, CAM, CAE (WinCC, Trace Mode, RSView и др.) автоматизированного проектирования алгоритмического обеспечения систем управления. Однако применение таких многофункциональных информационно-вычислительных сред не дает возможности визуализировать ход и результаты решения задач обеспечения энергоэффективности, что важно для проектировщи-

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект РФФИ № 07-08-12218-офи «Теоретические основы энергосберегающего управления динамическими многомерными объектами»).

ков оптимальных систем управления. Эти программные продукты не позволяют учитывать важные для практики ограничения на фазовые координаты, лимит энергии, запас ресурсов, скорость изменения управления и др. В них также не предусмотрено решение важных для проектировщика обратных задач проектирования систем, связанных с изменением исходных данных систем управления для обеспечения требуемого запаса устойчивости, поддержания значения функционала в заданных границах, оценки рисков при переходе на оптимальные режимы и т. п.

Опыт использования оптимального управления тепловыми аппаратами показал, что экономия энергозатрат для технологических печей составляет 15–17 %, для электрических нагревателей жидкости — до 20 %. Благодаря этому не только снижаются затраты электроэнергии, но и повышается долговечность оборудования [1].

К настоящему времени созданы программные модули для автоматизированного проектирования алгоритмического обеспечения микропроцессорных энергосберегающих устройств, действующие макеты самих устройств, выполняющих функции интеллектуальных бортовых контроллеров (Embedded System). Новый математический аппарат решения задач энергосберегающего управления при проектировании оптимальных систем управления технологическими объектами, а также его реализация дешевыми малогабаритными с широкими функциональными возможностями контроллерами нового поколения создают реальную основу для их широкого внедрения на технологических установках во всех энергоемких отраслях промышленности и транспорте.

Эффект энергосбережения достигается благодаря:

- оптимальному ведению динамических режимов при всех состояниях функционирования объекта, т. е. в случае изменения его свойств или условий задачи оперативно (в реальном времени) находится новое ее решение и реализуются энергосберегающие управляющие воздействия для новой ситуации;

- применению оптимальной стратегии функционирования системы управления для каждой конкретной ситуации;

- замене обычных автоматических регуляторов интеллектуальными энергосберегающими, которые устраняют значительные отклонения регулируемой величины от заданного значения с минимумом затрат энергии (расхода топлива);

- сокращению на порядок временных затрат на проектирование систем автоматизации и внесению в них изменений при сопровождении в процессе эксплуатации;

- применению созданных интеллектуальных телекоммуникационных средств для выполнения работ по проектированию систем промышленной автоматизации в режимах удаленного доступа и группового ведения проекта;

- принятию оптимальных проектных и управленческих решений на всех этапах разработки и сопровождения при эксплуатации систем управления.

---

## 2. МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ СРЕДА

---

Основу информационно-инструментальной среды разработки алгоритмического обеспечения энергосберегающего управления составляет экспертная система энергосберегающего управления (ЭСЭУ) [2, 3]. В ней реализована методология построения гибридных экспертных систем, предназначенных для решения задач управления энергоемкими объектами (теплообменными аппаратами и установками, машинами с электродвигателями, транспортными средствами и др.).

В базе знаний экспертной системы, кроме теоретических методов оптимального энергосберегающего управления, используются знания экспертов. Предусматривается пополнение результатами реальной эксплуатации базы знаний системы. Большое значение при создании баз знаний придается развитию концепции наследования и формированию принципов комплексирования. Концепция наследования обеспечивает значительное ускорение процесса создания новых и совершенствование существующих фреймов базы знаний в направлениях расширения множества используемых моделей динамики; возможных ограничений на траектории фазовых координат и скорость изменения управлений; учета лимитов энергии, запаса топлива и др., возникающих при реальной эксплуатации систем; применения новых стратегий реализации энергосберегающего управления. Задачи комплексирования связаны с повышением точности или робастности систем ресурсосберегающего управления путем использования информации, полученной на основе аналитических методов оптимального управления, знаний экспертов и накопленных результатов реальной эксплуатации систем управления. Благодаря сформулированной концепции наследования и применению принципов комплексирования формируется единое информационно-вычислительное пространство для проектирования систем энергосберегающего управления (СЭУ).

В автоматизированном режиме с помощью ЭСЭУ решаются прямые и обратные задачи энергосберегающего управления. Это требует применения методов, которые на основе значительного



снижения размерности массивов переменных и параметров, участвующих в решении задач, позволяют визуализировать ход и полученные результаты для проектировщика систем управления.

Для решения прямых и обратных задач энергосберегающего управления, наряду с известными методами (принцип максимума Понтрягина, динамическое программирование, аналитическое конструирование оптимальных регуляторов, представление знаний фреймами в виде продукционных правил и др.), широко применяются новые методы и подходы. К ним относятся:

- полный анализ задачи оптимального управления на множестве состояний функционирования (комплексно учитываются возможные ограничения и условия при реальной эксплуатации); метод синтезирующих переменных (сокращается размерность массива исходных данных задачи управления);
- оперативное определение вида функции оптимального энергосберегающего управления и расчет ее параметров, траектории изменения фазовых координат, эффекта энергосбережения и оценку работоспособности алгоритма управления при изменении исходных данных;
- комбинированный метод синтеза оптимального управления объектами (для объектов, динамика которых описывается дифференциальными уравнениями с разрывной правой частью);
- концепция дестабилизационного управления объектами (учитывается изменение их возможной производительности);
- принципы наследования (при разработке новых фреймов базы знаний);
- принципы комплексирования (для совместного использования информации, получаемой методами оптимального управления, на основе знаний экспертов и анализа накопленных фактов).

Некоторые из упомянутых методов опубликованы в рецензируемых изданиях, отличающихся оригинальностью, их аналоги неизвестны [4—7].

Отличительные особенности разработанной ЭСЭУ состоят в уникальной базе знаний и оригинальном программном обеспечении, позволяющем оперативно переходить от исследования одной задачи оптимального энергосберегающего управления к другой при решении широкого круга задач анализа и синтеза оптимальных управляющих воздействий на множестве состояний функционирования энергоемких промышленных объектов. Созданная ЭСЭУ позволяет:

— решать задач анализа и синтеза оптимального управления объектами, динамические режимы которых описываются дифференциальными уравнениями не выше третьего порядка, при минимизируемых функционалах — затратах энергии, расхода топлива, времени управления и др., с учетом

выполнения интегральных ограничений на лимит энергии или запас топлива;

— определять вид и выполнять расчет параметров энергосберегающего управления, реализуемого программной или позиционной стратегиями;

— решать комплекс задач идентификации моделей динамики объектов управления, в том числе в виде дифференциальных уравнений с разрывной правой частью;

— разрабатывать программное обеспечение для микропроцессорных управляющих устройств;

— решать прямые и обратные задачи проектирования алгоритмического обеспечения систем оптимального энергосберегающего управления.

Система предоставляет:

— дистанционный доступ к интегрированной базе данных для группового ведения проектных работ в рамках виртуального предприятия;

— привлечение экспертов через Интернет;

— широкий набор методов ранжирования альтернативных вариантов, парных сравнений, оптимизации по Парето, Байеса — Лапласа, теории игр и др.;

— проведение эксперимента и предварительную обработку данных;

— определение закона распределения возмущающих воздействий;

— визуализацию процессов идентификации.

Оригинальный метод анализа и синтеза оптимального управления дает возможность отображать на экране дисплея обобщенный геометрический образ множества возможных решений для конкретных классов математических моделей и исходных данных. С фрагментом интерфейса модуля ЭСЭУ можно ознакомиться в Интернете по адресу <http://www.iptop.net/di> или <http://crems.jesby.tstu.ru/di>.

С помощью созданной ЭСЭУ разработано алгоритмическое и программное обеспечение СЭУ для установок термообработки магнитопроводов, смесительных машин по производству полимерных материалов, вулканизаторов, электрокамерных печей, многозонных электропечей, многосекционных сушилок вальце-ленточного типа и др.

### 3. ПРИМЕРЫ РЕАЛИЗАЦИИ СЭУ

На рис. 1 представлены два варианта технической реализации СЭУ для группы электрокамерных печей.

В системе предусмотрена регистрация температуры внутри камеры печи и снаружи, решение задач идентификации модели динамики и синтеза в реальном времени энергосберегающих управляющих воздействий. В структуру СЭУ входят Miniwebserver (MWS), промышленный контроллер, промышленный коммутатор Ethernet, терми-

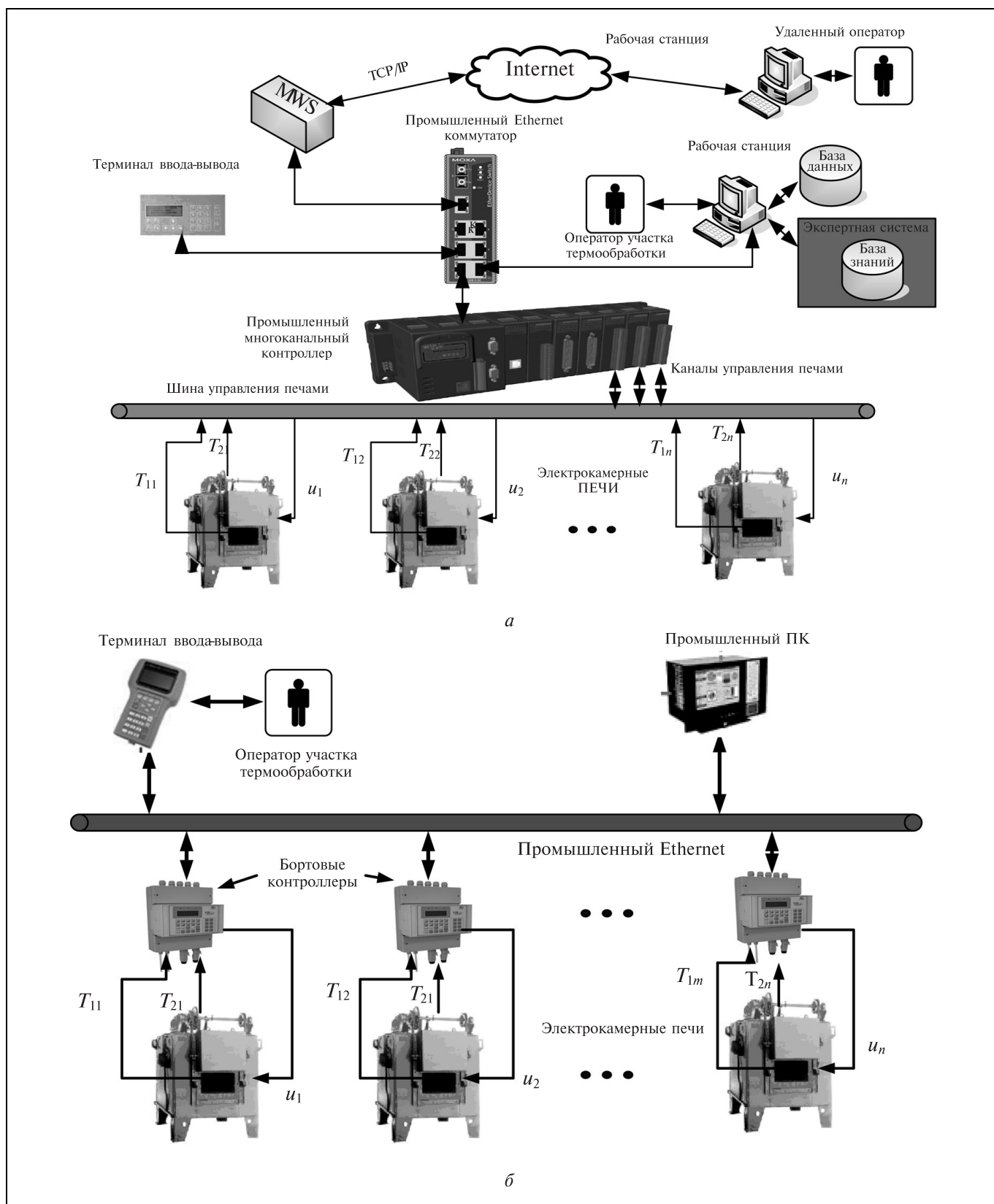


Рис. 1. Схема реализации СЭУ группой электрокамерных печей:

а — с многоканальным контроллером WINCON-8000; б — с бортовым контроллером NZ-6000;  $T_{11}, \dots, T_{1n}$  и  $T_{21}, \dots, T_{2n}$  — температуры внутри и снаружи камеры печи;  $u_1, \dots, u_n$  — управляющие воздействия

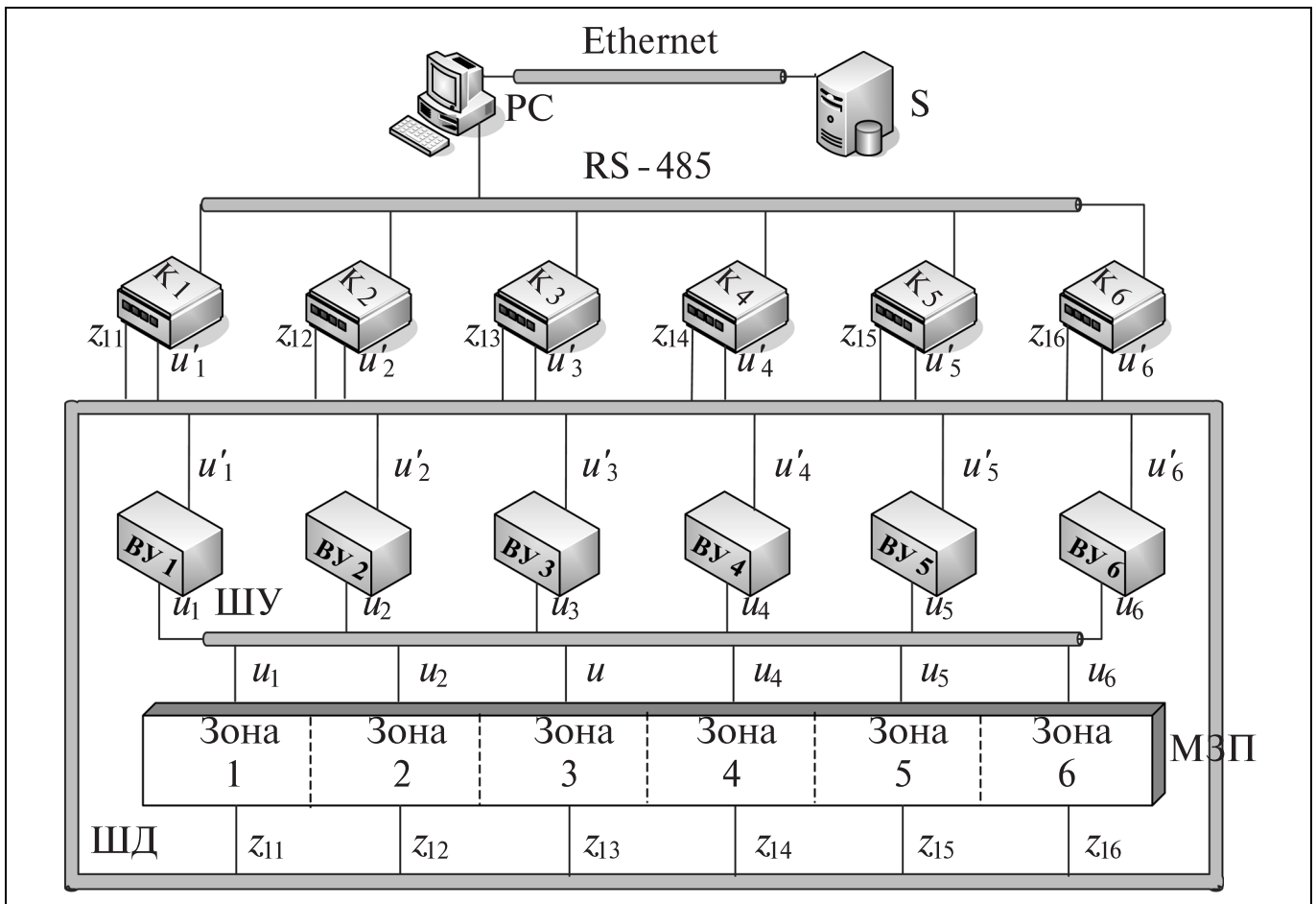


Рис. 2. Техническая реализация СЭУ многозонной печи

нал ввода-вывода, рабочая станция. Для управления печами применяется обобщенный алгоритм, в котором сочетаются методы синтезирующих переменных и нечеткой логики. Предусмотрен режим адаптации с автоматической коррекцией параметров модели и функций принадлежности нечетких множеств, которые по окончании режима адаптации записываются в память контроллера для последующего использования [8].

В качестве примера на рис. 2 приведена структура системы управления многозонными электрическими печами (МЗП).

Система управления печью имеет двухуровневую структуру [9]. На верхнем уровне располагаются управляющая ЭВМ PC и сервер S с базой знаний системы оптимального управления, взаимодействующие между собой в рамках сети Ethernet, а на нижнем — контроллеры K1 — K6 с локальными выходными устройствами BU1 — BU6 управления зонами печи.

Локальные системы управления реализованы на шести измерителях-регуляторах температуры OWEN TPM201. Связь контроллеров с ЭВМ осу-

ществляется с помощью двунаправленного интерфейса RS-485, в качестве программного обеспечения используется SCADA-система OWEN Process Manager. На входы контроллеров K1 — K6 по шине данных ШД передается информация о значениях фазовых координат  $z_{11}—z_{16}$  в зонах, а с выходов снимаются сигналы  $u'_1—u'_6$ , необходимые для работы выходных устройств BU1 — BU6. На дисплеях контроллеров отображается информация о значениях фазовых координат в зонах, задаваемые значения температурных режимов, параметры настроек регулирования и др. На выходах устройств управления УУ1 — УУ6 формируются управляющие воздействия  $u_1—u_6$ , которые по шине управления ШУ подаются на нагревательные элементы соответствующих зон печи.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования и результаты практической реализации СЭУ показывают, что рассмотренная многофункциональная информацион-



но-инструментальная среда, охватывающая все этапы проектирования СЭУ, позволяет:

- сократить сроки разработки СЭУ;
- обеспечить поддержку группового проектирования, в том числе в режиме удаленного доступа;
- использовать опыт предшествующих наработок (благодаря применению принципов наследования и постоянного пополнения базы знаний);
- снизить стоимость проектных работ.

Разработанные СЭУ внедрены на ряде промышленных предприятий г. Тамбова и области, результаты исследований используются в учебном процессе Тамбовского государственного технического университета.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Альтгаузен А.П.* Применение электронагрева и повышение его эффективности. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 128 с.
2. *Муромцев Д.Ю.* и др. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 950464 «Экспертная система "Энергосберегающее управление динамическими объектами" (EXPSYS)». Зарегистрировано РосАПО 19.12.95.
3. *Муромцев Ю.Л., Орлова Л.П., Капитонов И.Е.* Экспертная система «Энергосберегающее управление динамическими объектами» // Вестник ТГТУ. — 1995. — Т. 1, № 3 — 4. — С. 221—226.
4. *Муромцев Д.Ю., Муромцев Ю.Л., Орлова Л.П.* Синтез энергосберегающего управления многостадийными процессами комбинированным методом // Автоматика и телемеханика. — 2002. — № 3. — С. 169—178.
5. *Муромцев Д.Ю.* Методы и алгоритмы синтеза энергосберегающего управления технологическими объектами. — Тамбов; М.; СПб.; Баку; Вена: Нобелистика, 2005. — 202 с.
6. *Тюрин И.В.* Анализ и оперативный синтез энергосберегающего управления многозонными электрическими печами // Автоматизация в промышленности. — 2005. — № 3. — С. 12—14.
7. *Тюрин И.В., Яшин Е.Н.* Оптимальное управление температурным профилем сложных объектов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — 2006. — № 9. — С. 1—4.
8. *Белусов О.А.* Автоматизированная система энергосберегающего управления электрокамерными печами // Автоматизация в промышленности. — 2005. — № 5. — С. 32—34.
9. *Муромцев Д.Ю., Тюрин И.В.* Энергосберегающее управление сложными объектами // Промышленные АСУ и контроллеры. — 2005. — № 11. — С. 24—28.

☎ (4752) 63-94-17,  
e-mail: [crems@crems.jesby.tstu.ru](mailto:crems@crems.jesby.tstu.ru), [tyrinilja@crems.jesby.tstu.ru](mailto:tyrinilja@crems.jesby.tstu.ru)

Статья представлена к публикации членом редколлегии  
А.С. Манделем. □

## МЕРОПРИЯТИЯ IFAC — Международной федерации по автоматическому управлению

Мероприятие	Дата	Место проведения
IFAC SFI, SUT, ONR, MI Workshop Navigation, Guidance & Control of Underwater Vehicles (NGCUV2008)	April 08—10, 2008	Killaloe, Co Clare, IRELAND
INSTICC IFAC Conference Informatics inb control, Automation and Robotics — ICINCO 2008	May 11—15, 2008	Funchal, Madeira, PORTUGAL
IEEE IFAC Workshop Variable Structure Systems — VSS 2008	June 08—10, 2008	Antalya, TURKEY
AACC IFAC Conference American Control Conference ACC 2008 — in cooperation with IFAC	June 12—14, 2008	Seattle, USA
IFAC Congress World Congress	July 06—11, 2008	Seoul, KOREA
EWICS IFAC Conference Computer Safety, Reliability and Security — SAFECOMP 2008	September 22—24, 2008	Newcastle, UNITED KINGDOM
IFAC IFIP Workshop Intelligent Manufacturing Systems (9th) — IMS	October 09—10, 2008	Szczecin, POLAND
IFAC Çankaya University, Ankara, Workshop Fractional Differentiation and its Applications — FDA 08	November 05—07, 2008	Ankara, TURKEY
IFAC Symposium Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes — SAFEPROCESS	June 30—July 03, 2009	Barcelona, SPAIN
IFAC Symposium Identification and System Parameter Estimation — SYSID'09 (15th)	July 06—08, 2009	St. Malo, FRANCE
IFAC Symposium Advanced Control of Chemical Processes — ADCHEM	July 12—15, 2009	Istanbul, TURKEY
IFAC Symposium Robot Control, SYROCO 2009 — 9th	September 10—12, 2009	Gifu, JAPAN
IFAC Symposium Automation in Mining, Mineral and Metal Processing 13th	August 02—04, 2010	Cape Town, SOUTH AFRICA
IFAC Symposium Nonlinear Control Systems NOLCOS 2010	September 01—03, 2010	Bologna, ITALY

Дополнительную информацию см. на сайте <http://www.ifac-control.org/>