

ВВЕДЕНИЕ

Тема текущего номера вызвала живой интерес авторов — редакция получила вдвое больше статей, чем возможно опубликовать в одном выпуске журнала. На наш взгляд, это свидетельствует о резком росте интереса к имитационному моделированию (ИМ) как инструменту промышленной автоматизации и о существенном расширении сферы его применения.

Наряду с коренными для ИМ тематиками дискретно-событийного моделирования, систем массового обслуживания (авт. *Е.М. Раскин и др.*; *С.А. Власов и др.*) и проектирования систем управления (авт. *В.К. Грызов и В.Г. Корольков*) широко представлено применение ИМ как средства инжиниринга систем управления разнообразными ТП:

- индустрии строительных материалов (авт. *А.А. Сурниченко*);
- металлургии (авт. *Т.В. Пискажева; И.М. Ячиков и О.С. Логунова*);
- нефтепереработки (авт. *Е.В. Мануйлова и др.*);
- нефтедобычи (авт. *В.А. Ведерников и др.*);
- химической технологии (авт. *Т.Б. Чистякова и др., Т.Б. Чистякова и А.Н. Полосин*).

Ряд работ посвящен применению ИМ в системах поддержки принятия решений (авт. *Т.В. Пискажева; О.А. Николайчук и др.*). Весьма перспективным выглядит использование ИМ для настройки и проверки систем нечеткого управления (авт. *Б.С. Немцев и В.В. Кирик, И.А. Вялых и др.; Н.С. Благодарный и др.*). Последнюю работу отметим также как пример исследования актуальной и сложной темы обеспечения адекватности тренажерных моделей.

В этот номер вошли работы, пришедшие ранее других и оперативно прошедшие рецензирование и доработку. Редакция заверяет авторов, что все достойные статьи по ИМ найдут свое место на страницах ближайших номеров журнала. Благодарим всех авторов и ожидаем новые работы и предложения по расширению направлений применения ИМ в промышленной автоматизации.

Редакция выражает благодарность за помощь в подготовке номера Виктору Михайловичу Дозорцеву — д-ру техн. наук, проф., члену редакционной коллегии журнала "Автоматизация в промышленности".

Дискретно-событийное моделирование и системы массового обслуживания

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ ПАРОГЕНЕРАТОРА ЭНЕРГОБЛОКА АЭС

**Е.М. Раскин (ЗАО "Автоматика-Э"), Л.А. Денисова (ОмГТУ),
В.П. Синицын, Ю.В. Нестеров (ОАО "ВТИ")**

Представлена математическая модель системы питания парогенератора энергоблока АЭС с переменными значениями параметров передаточных функций, реализованная в среде событийного моделирования MATLAB/Simulink/Stateflow.

Ключевые слова: математическая модель питания парогенератора, событийное моделирование, передаточные функции с переменными параметрами, система регулирования.

Математическая модель питания парогенератора предназначена для проведения испытаний и настройки разработанного в ЗАО "Автоматика-Э" программно-технического комплекса (ПТК) для модернизации системы автоматического регулирования (САР) питания парогенераторов (ПГ) энергоблоков №№ 3 и 4 Кольской АЭС на базе цифровых локальных регуляторов ВЛР-2.1, созданных по заданию ОАО Концерн "Росэнергоатом".

ПТК САР ПГ реализует трехимпульсную систему регулирования, задачей которой является поддержание материального баланса между отводом пара и подачей питательной воды при заданном ее уровне в ПГ во всех режимах работы энергоблока. Регулируемым параметром является уровень воды в ПГ, управляющим воздействием — расход питательной воды, а возмущающим воздействием — расход пара турбиной, изменяющийся при изменении мощности турбины.

На уровень воды также оказывают влияние изменения мощности реактора, теплоподвода со стороны первого контура и другие факторы [1, 2].

ПТК САР ПГ формирует управляющие воздействия на электроприводы основного и пускового регулирующих питательных клапанов (РПК), через которые осуществляется подача воды из напорного коллектора в парогенератор, обогреваемый теплоносителем первого контура энергоблока. К стабилизации уровня воды в ПГ предъявляются высокие требования. Для ПГ с ВВЭР-400 номинальный уровень воды $h_{зад} = 1900$ мм. Точность поддержания заданного уровня в стационарных режимах ± 50 мм. Допустимый динамический заброс при изменении нагрузки ± 75 мм. Повышение уровня воды от номинального не допускается из-за возможности заброса пара в турбину, снижение уровня — из-за предотвращения оголения поверхности нагрева.

Если у общества появляется техническая потребность, то она продвигает науку вперед больше, чем десяток университетов.

Ф. Энгельс

Система питания парогенератора является одним из важнейших элементов энергоблока АЭС с ВВЭР. Функционирование ПТК САР ПГ, обеспечивающего надежную и экономичную работу системы питания парогенераторов, влияет на показатели всего энергоблока. Поэтому важной задачей является тестирование прикладного ПО ПТК САР ПГ на соответствие техническим требованиям, а также оптимизация настройки каналов регулирования. Для решения этой задачи необходима адекватная математическая модель САР питания парогенератора.

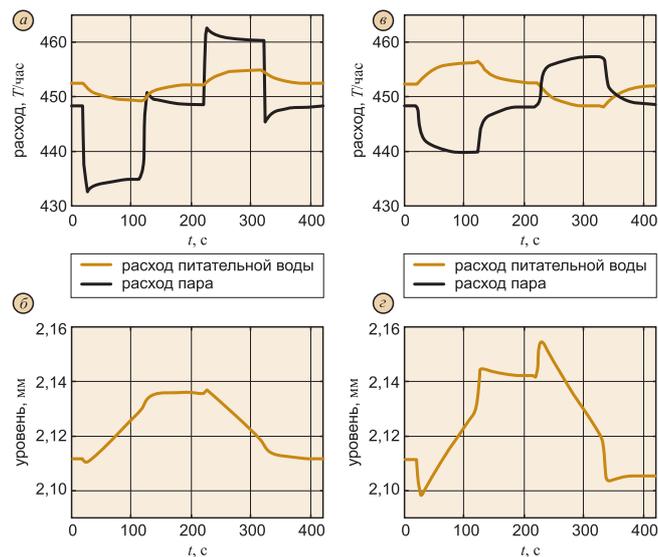


Рис. 1. Переходные характеристики парогенератора при возмущении перемещением:
а, б) РК СУЗ на 10 % в обе стороны; в, г) РК ВД на 5% в обе стороны

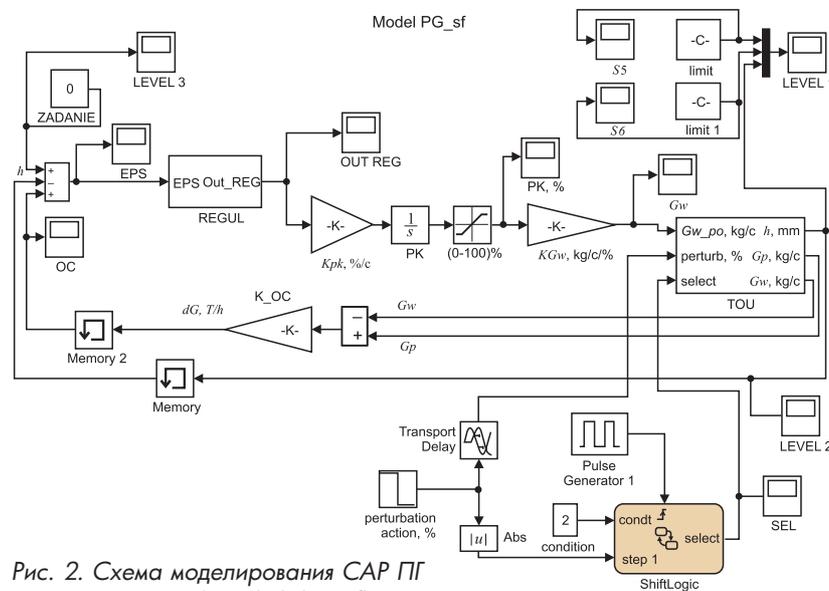


Рис. 2. Схема моделирования САР ПГ в среде MATLAB/Simulink/Stateflow

С целью представления модели парогенератора передаточными функциями каналов по регулирующему и возмущающим воздействиям в ОАО "Всероссийский теплотехнический научно-исследовательский институт" (ВТИ) были выполнены соответствующие расчеты. На нелинейной модели DINMODVTI энергоблока с реакторной установкой ВВЭР-440 и двумя турбоустановками, построенной в соответствии с данными, переданными Кольской АЭС, были получены динамические переходные характеристики (кривые разгона) по уровню в ПГ, которые затем были аппроксимированы для представления передаточными функциями.

На рис. 1 приведены некоторые результаты модельных исследований ВТИ: динамические характеристики парогенератора при возмущениях тепловой мощностью реактора (перемещением регулирующей группы стержней системы управления и защит реактора РК СУЗ) и регулирующими клапанами высокого давления турбин РК ВД. При действии этих возмущений проявляется характерное для парогенератора явление "набухания уровня", то есть изменение его в начальные моменты времени в сторону, не соответствующую знаку материального небаланса между расходами пара и воды, что само по себе неблагоприятно для регулирования уровня.

Кроме того, как видно из сравнения приведенных кривых, уменьшение расхода пара в одном случае приводит к уменьшению расхода питательной воды (рис. 1, а), а в другом, наоборот — сопровождается увеличением расхода питательной воды (рис. 1, в). Характер изменения уровня для этих возмущений также отличается.

Отсюда следует вывод: так как динамические свойства парогенератора при действии возмущающих факторов различной природы отличаются, то математическая модель питания ПГ не может быть представлена только лишь передаточными функциями с постоянными параметрами. В данной работе предлагается математическая модель САР питания парогенератора с переменными параметрами, реализованная в интерактивной среде для выполнения научных и инженерных расчетов MATLAB с входящими в его состав пакетами расширения Simulink и Stateflow [3].

В рамках стандартного набора MATLAB, включающего программу Simulink, строится модель САР ПГ, передаточные функции которой имеют постоянные параметры. С целью реализации передаточных функций объекта регулирования, параметры которых меняются в зависимости от режима работы, в Simulink-модель включаются Stateflow-диаграммы.

Пакет событийного моделирования Stateflow, основанный на теории конеч-

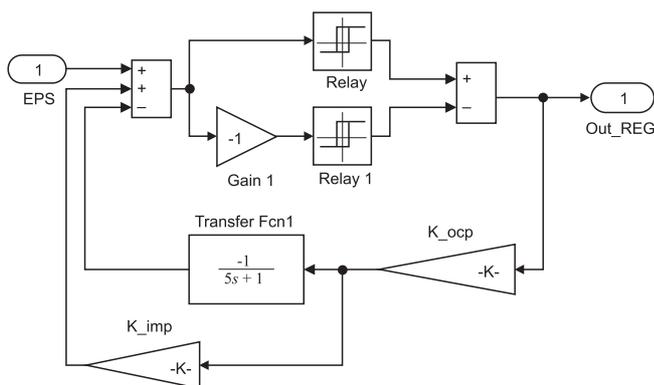


Рис. 3. Схема подсистемы REGUL – импульсного регулятора

ных автоматов, предоставляет инновационные возможности моделирования процессов, управляемых событиями, реализуя графические функции и операторы темпоральной логики. В модели САР питания парогенератора Stateflow-диаграммы позволяют моделировать не только передаточные функции с изменяемыми параметрами, но и логику переключений управляющей части моделируемой системы. В зависимости от режима работы САР ПГ, определяемого возмущениями на энергоблоке, с помощью диаграмм состояний и переходов Stateflow меняются параметры модели парогенератора.

На рис. 2 приведена модель САР ПГ, предназначенная для исследования системы регулирования при различных возмущающих воздействиях.

Модель содержит следующие подсистемы:

-REGUL (рис. 3), представляющую собой модель импульсного регулятора, в схеме которого входящее в его состав трехпозиционное релейное звено с гистерезисом представлено двумя двухпозиционными реле для входных сигналов разной полярности; учтены местные обратные связи. Сигнал рассогласования на входе в регулятор формируется взвешенным суммированием сигналов заданного, текущего значений уровня, а также расходов пара и питательной воды;

-TOU моделирования технологического объекта управления – парогенератора.

Модель исполнительного механизма с регулирующим клапаном представлена интегрирующим звеном, звеном ограничения и усилительными звеньями, реализующими коэффициенты передачи в соответствии с пропускной способностью клапана.

Stateflow-диаграмма ShiftLogic осуществляет логику переключений режимов работы системы, представленную на рис. 4. Графическая диаграмма ShiftLogic содержит три состояния, переходы между которыми осуществляются в зависимости от режима работы, то есть действующих возмущений и модельного времени. Выходом диаграммы ShiftLogic является параметр select, от значения которого, в свою очередь, зависят параметры передаточных функций объекта управления. Состояние state1 активизируется по умолчанию, при этом выходная переменная select устанавливается равной исходному значению, соответствующему невозмущенному состоянию системы.

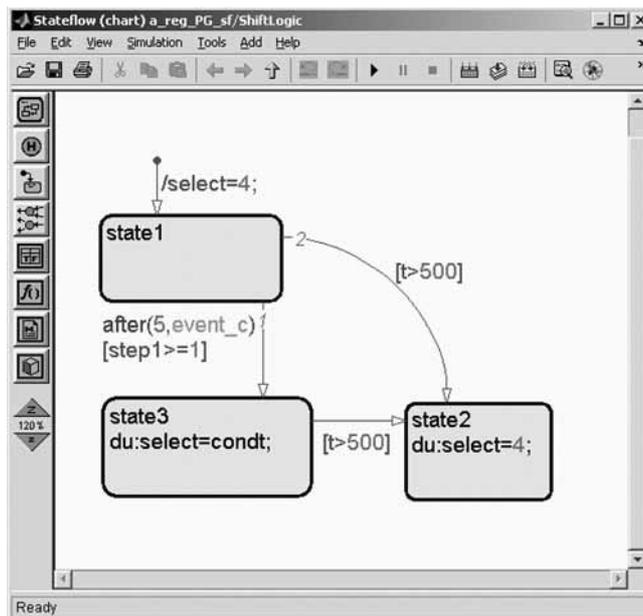


Рис. 4. Диаграмма ShiftLogic логики переключений режимов работы системы

Для перехода в состояние state3 используется функция AFTER темпоральной (временной) логики. Временной логический оператор after – двоичный оператор, операндами которого является число Stateflow-событий. Выражение "after(5,event_c)[step1>=1]" означает: "покинуть состояние state1, если на вход поступил единичный скачок, но не ранее, чем через 5 временных циклов (наступлений событий "event_c")". При этом осуществляется переход в состояние state3, и параметру select присваивается значение condct, заданное при запуске процесса моделирования.

События "event_c" задаются в модели Simulink-блоком Pulse Generator (генератор импульсов), переменная step1 принимает ненулевое значение при наличии возмущения, формируемого Simulink-блоком Perturbation Action. Переход в состояние state2 происходит через 500 с модельного времени, при этом восстанавливается исходное значение переменной select.

Рассмотрим подробнее подсистему TOU, предназначенную для моделирования собственно парогенератора. Подсистема TOU имеет три входа: расход питательной воды от регулирующего клапана, параметры Perturb – возмущение и select, определяющий режим работы системы. Выходными переменными являются уровень воды в ПГ, расходы пара и питательной воды с учетом их взаимного влияния.

Значения параметров данной линейной модели ПГ получены на основе значений конструктивных и технологических параметров оборудования, а также путем аппроксимации динамических характеристик ПГ, рассчитанных по нелинейной модели энергоблока. Уровень воды в парогенераторе является интегралом от материального небаланса между расходами пара и питательной воды. При моделировании динамических свойств ПГ по уровню воды каждый из каналов воздействий описывается суммой интегрального и аperiodического

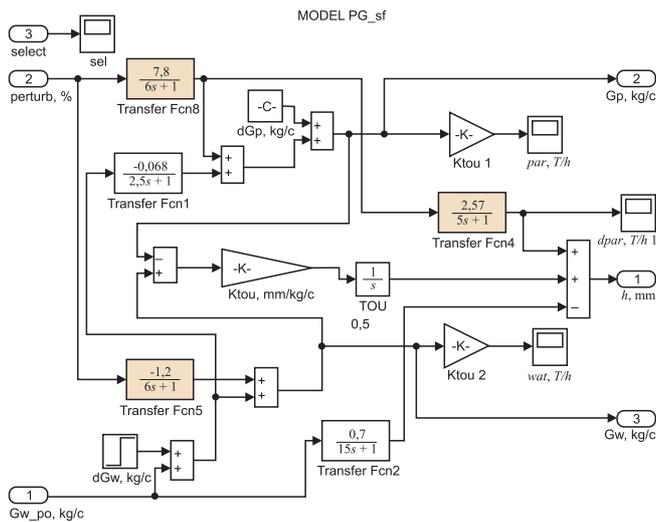


Рис. 5. Схема моделирования ПГ в среде MATLAB/Simulink при возмущении мощностью реактора

ческого звеньев, а интегрирующее звено является общим для обоих каналов [4]. Кроме того, в модели ПГ присутствуют апериодические звенья, необходимые для моделирования взаимного влияния возмущающих воздействий по расходам пара и воды.

На рис. 5 приведена модель парогенератора, предназначенная для исследования системы регулирования в режиме возмущения мощностью реактора. Цветом выделены Simulink-блоки, реализующие передаточные функции апериодических звеньев с изменяемыми параметрами.

Для моделирования передаточных функций с изменяемыми параметрами, зависящими от исследуемого режима, воспользуемся средствами Stateflow. В модели объекта управления заменены передаточные функции с переменными параметрами Stateflow-диаграммами. Модель ПГ принимает следующий вид (рис. 6).

Кадр работающей Stateflow-диаграммы Trf1, реализующей одну из передаточных функций апериодического

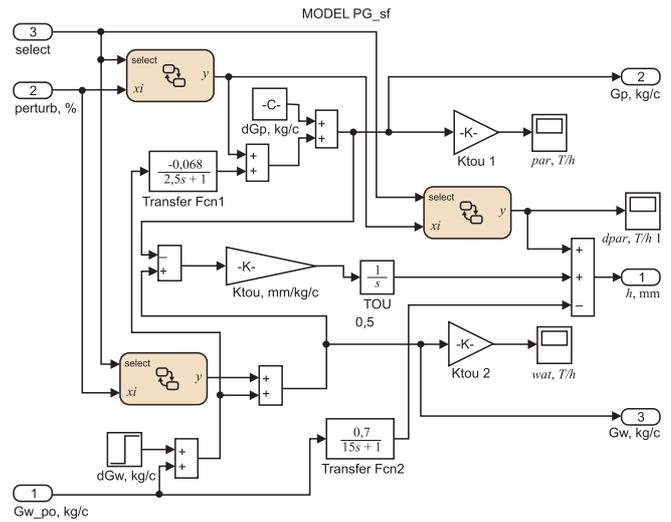


Рис. 6. Схема моделирования парогенератора в среде MATLAB/Simulink/Stateflow

ческого звена с переменными параметрами, приведен на рис. 7.

Stateflow-диаграмма Trf1 вызывается на каждом шаге моделирования. Графическая функция fl реализует передаточные функции апериодических звеньев с переменными параметрами. При реализации средствами MATLAB/Simulink передаточная функция апериодического звена

$$W(s) = \frac{k}{Ts + 1},$$

причем ее параметры: k – коэффициент передачи и T – динамическая постоянная звена могут быть заданы только своими численными значениями. Соответствующая дискретная модель, которая реализуется графической функцией fl, задается в виде аппроксимирующего разностного уравнения [5]

$$y_i = \frac{T}{T+h} y_{i-1} + \frac{kh}{T+h} x_i,$$

где h – такт дискретизации; $x_i, y_i (y_{i-1})$ – значения входного/выходного сигналов в текущем (предыдущем) такте. Моделирование системы производится с таким дискретизацией $h = 0,1$ с, так как с таким периодом дискретизации работают контуры регулирования тестируемого ПТК САР ПГ.

В начальный момент активно состояние ожидания waiting, которое является общим источником для состояний А – D. Переход из состояния waiting к одному из остальных четырех состояний происходит через подключаемое соединение (точку принятия решения).

В зависимости от значения переменной select выполняется переход в одно из состояний А – D, каждое из которых вызывает графическую функцию fl, имея свой набор фактических параметров – коэффициентов передачи и постоянных времени реализуемой передаточной функции. Графическая функция fl возвращает в качестве результата выходной сигнал пере-

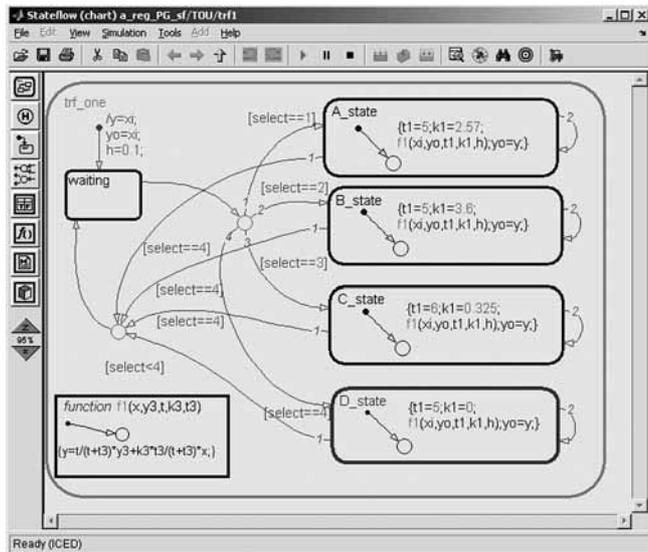


Рис. 7. Stateflow-диаграмма Trf1, реализующая передаточную функцию с переменными параметрами

даточной функции. Графическая функция используется с целью упрощения Stateflow-модели: вместо того, чтобы определять значение выходной переменной внутри каждого из состояний, оно определяется единожды в графической функции.

При завершении моделирования возмущенного состояния параметр select принимает соответствующее значение, и происходит возврат через подключаемое соединение в состояние ожидания waiting. Затем производится переход в состояние D, соответствующее режиму работы системы без возмущений (на работающей диаграмме состояние D активно — выделено цветом).

С помощью разработанной модели питания парогенератора выполнены настройка каналов регулирования ПТК САР ПГ и тестовые расчеты динамических характеристик в переходных режимах с глубокими изменениями нагрузки различной природы.

На рис. 8 приведены результаты расчета одного из возмущенных режимов работы парогенератора: при скачкообразном снижении расхода пара на 20 % от номинального значения (на 80 т/час) на 150-й секунде. Из графиков видно, что снижение расхода пара отрабатывается регулятором, управляющим подачей питательной воды в ПГ. Расход питательной воды приводится в соответствие с расходом пара, положение клапана в рабочем диапазоне меняется менее чем на 15%. Уровень в ПГ, понизившись при возмущении из-за влияния набухания не более чем на 75 мм, увеличивается в соответствии с разбалансом расходов воды и пара и далее поддерживается в зоне требуемой точности ± 50 мм.

В результате проведения динамических испытаний на разработанной модели питания парогенератора подтверждено, что ПТК САР ПГ обеспечивает поддержание параметров ПГ в пределах требований нормальной эксплуатации блока.

Таким образом, использование математической модели питания парогенератора с переменными па-

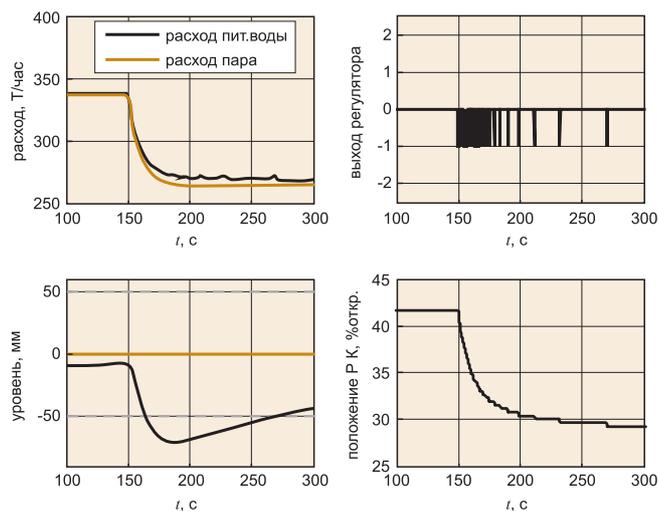


Рис. 8. Переходные характеристики САР ПГ при возмущении расходом пара, полученные в среде MATLAB/Simulink/Stateflow

раметрами, созданной на основе инструментария событийного моделирования, позволяет не только ясно и просто описать поведение сложного объекта управления, но и в короткие сроки провести испытание системы регулирования в различных режимах работы.

Список литературы

1. Иванов В.А. Регулирование энергоблоков. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1982.
2. Трофимов А.И., Егунов Н.Д., Слекенич Я.В. Принципы построения автоматических регуляторов теплоэнергетических процессов АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1999.
3. Дьяконов В.П. MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании. М.: Солон-Пресс. 2005.
4. Демченко В.А., Ложечников В.Ф. Разработка математической модели участка питания парогенератора энергоблока с ВВЭР // Тр. Одесского политехнического ун-та. Одесса. 1999. Вып. 2(8).
5. Изерман Р. Цифровые системы управления. М.: Мир. 1984.

Раскин Евгений Михайлович — канд. техн. наук, директор ЗАО "Автоматика-Э",
Денисова Людмила Альбертовна — канд. техн. наук, доцент кафедры "Автоматизированные системы обработки информации и управления" Омского государственного технического университета,

Синицын Вячеслав Павлович — заведующий лабораторией автоматизации оборудования,

Нестеров Юрий Викторович — канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник
ОАО "Всероссийский теплотехнический научно-исследовательский институт".

Контактные телефоны (381-2) 23-36-98, 23-23-43, (495) 675-40-83.

E-mail: raskinem@gmail.com ladenisova@mail333.com oao@vti.ru

Проект по автоматизации крупнейшего российского банка ОАО "Банк ВТБ" получил награду

Проект для ОАО "Банк ВТБ" в ММДЦ "Москва-Сити" по созданию инженерных систем на базе SCADA-системы Citect получил награду на конкурсе KNX Award — 2010. Внедрение АСУ микроклиматом и освещением в офисах банка ВТБ, занимающих 20 этажей комплекса "Федерация", было реализовано компанией ЭкоПрог.

Система управления освещением и микроклиматом на базе технологии KNX позволяет устанавливать и поддерживать необходимые параметры микроклимата в помещениях. Система допускает ручное и автоматическое управление осветитель-

ными приборами, климатическим оборудованием и шторами (жалюзи). На каждом этаже башни, в зависимости от назначения помещений и функций системы, предусмотрено 3...5 сегментов KNX. Надежность работы сегментов обеспечивается источниками бесперебойного электроснабжения.

В результате внедрения система помогла существенно снизить эксплуатационные расходы, улучшить контроль над средствами по обслуживанию здания, а также обеспечила комфорт, безопасность и эффективную работу всего инженерного оборудования.

[Http://www.ecoproг.ru](http://www.ecoproг.ru)