



ВЕСТНИК

ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО № 22 (198)
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА 2010

ISSN 1991-976X

СЕРИЯ

«КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ, РАДИОЭЛЕКТРОНИКА»

Выпуск 12

Учредитель – ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет».

Редакционная коллегия серии:

д.т.н., профессор **Шестаков А.Л.**
(*отв. редактор*);

д.т.н., профессор **Казаринов Л.С.**
(*зам. отв. редактора*);

д.т.н., профессор **Щипицын А.Г.**
(*зам. отв. редактора*);

д.ф.-м.н., профессор, чл.-кор. РАН
Ушаков В.Н.;

д.т.н., профессор **Войтович Н.И.**;

д.т.н., профессор **Карманов Ю.Т.**;

д.т.н., профессор **Логиновский О.В.**;

д.т.н., профессор **Лысов А.Н.**;

д.ф.-м.н., профессор **Танана В.П.**;

д.т.н., профессор **Тележкин В.Ф.**;

д.ф.-м.н., профессор **Ухоботов В.И.**;

к.т.н., доцент **Кафтанников И.Л.**;

Фокин Л.А. (*техн. редактор*)

Серия основана в 2001 году.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-26455
выдано 13 декабря 2006 г. Федеральной службой по
надзору за соблюдением законодательства в сфере
массовых коммуникаций и охране культурного на-
следия.

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы
данных ВИНТИ. Сведения о журнале ежегодно пуб-
ликуются в международной справочной системе по
периодическим и продолжающимся изданиям
«Ulrich's Periodicals Directory».

Решением Президиума Высшей аттестационной
комиссии Министерства образования и науки Рос-
сийской Федерации от 19 февраля 2010 г. № 6/6 жур-
нал включен в «Перечень ведущих рецензируемых
научных журналов и изданий, в которых должны
быть опубликованы основные научные результаты
диссертаций на соискание ученых степеней доктора и
кандидата наук».

Подписной индекс 29008 в объединенном катало-
ге «Пресса России».

Периодичность выхода – 2 номера в год.

СОДЕРЖАНИЕ

ШАРИПОВА Н.Н., ТРЕТЬЯКОВ В.Е., ЗАВАДСКАЯ Э.А. Аппаратно-программное моделирование встраиваемых систем	4
ДУТИКОВ Д.Н. Применение SOAP-сервисов для обеспечения взаимодействия внутри распределенной информационной системы и удаленного управления ресурсами	9
БУЦЫК С.В. Анализ уровня информатизации вузов культуры и искусств (за период 2007–2009 гг.)	15
КАДАЦКАЯ М.С. Кластерный метод формирования учебных модулей	18
КОЖИХОВА Н.А., ШИРЯЕВ В.И. Прогнозирование временного ряда с учетом хаотической компоненты	22
АХМАДИНУРОВ М.М. Оптимизация светофорного регулирования с помощью программы моделирования транспортных потоков	26
РУСИНОВ И.А. Оптимизация работы контейнерных терминалов	31
АРСЛАНОВ Д.М., КОЗЛОВ А.В. Применение модели месторождения на основе карт высот в задачах автоматизации горного производства	37
ПАНТИЛЕЕВ А.С. Постановка задачи оптимального захода на посадку беспилотного летательного аппарата с изменяемой в полете структурой	43
МАЗГАЛИН Д.В., ПОЧИНСКИЙ В.И. Метод определения азимута пуска и программы угла тангажа на атмосферном активном участке полета ракеты-носителя	47
СМИРНОВ Ю.С. Безредукторные мехатронные преобразователи	51
ЩИПИЦЫН А.Г., ПОПОВ А.Е. Алгоритм калибровки эталонных измерительных преобразователей давления	53
КАЗАРИНОВ Л.С., ШНАЙДЕР Д.А. Метод построения упреждающих оценок энергетической эффективности технологических процессов	57
ШНАЙДЕР Д.А., КРАХМАЛЕВ Е.И. Системы управления уличным освещением гибкой структуры	63
ВСТАВСКИЙ А.Ю., ВСТАВСКАЯ Е.В., КОНСТАНТИНОВ В.И., ХАТЕЕВА В.В. Улучшение характеристик электронного балласта для газоразрядных ламп с частотным управлением мощностью	66
ВАХРОМЕЕВ И.Е. Распределенная автоматизированная система оперативного управления сетью технологического пароснабжения	70
ВЕРНЕРГОЛЬД А.Р., КАЗАРИНОВ Л.С., КОЛЕСНИКОВА О.В. Энергоэффективное управление вельц-процессом	75
ПАНФЕРОВ С.В., ТЕЛЕГИН А.И., ПАНФЕРОВ В.И. Некоторые проблемы энергосбережения и автоматизации в системах теплоснабжения зданий	79

CONTENTS

SHARIPOVA N.N., TRETJAKOV V.E., ZAVADSKAJA E.A. Embedded system HW/SW-modeling	4
DUTIKOV D.N. SOAP-services using for distributed information system collaborating and resources remote management	9
BUTSYK S.V. The analysis of informatization level of high schools of culture and arts (during 2007–2009)	15
KADATSKAYA M.S. Cluster method of educational modules formation	18
KOZHIHOVA N.A., SHIRYAEV V.I. Time series forecasting using chaotic component	22
AHMADINUROV M.M. Optimization of traffic light control using the program of traffic flow modeling	26
RUSINOV I.A. Modelling of container terminals functioning	31
ARSLANOV D.M., KOZLOV A.V. Heightmap model for mineral resource industry automation issues	37
PANTILEEV A.S. Statement of the problem of optimum landing approach of the pilotless flying machine with structure changed in flight	43
MAZGALIN D.V., POCHINSKY V.I. The method of determining the azimuth of the start and the tangage angle program on the active site of atmospheric flight of rocket launcher	47
SMIRNOV Y.S. Direct-drive mechatronic transducers	51
SHCHIPITSYN A.G., POPOV A.E. Calibration algorithm for reference pressure transducer	53
KAZARINOV L.S., SHNAIDER D.A. Method of developing of look-ahead energy efficiency estimation of technological processes	57
SHNAYDER D.A., KRAKHMALYOV E.I. Street illumination control systems of flexible structure	63
VSTAVSKIY A.Y., VSTAVSKAYA E.V., KONSTANTINOV V.I., KHATEEVA V.V. Improvement of the electronic ballast characteristics for gas-discharge lamps with frequency power control	66
VAKHROMEYEV I.E. Distributed automated system for industrial steam supply network management	70
VERNERGOLD A.R., KAZARINOV L.S., KOLESNIKOVA O.V. Power efficient management of rotary processes	75
PANFEROV S.V., TELEGIN A.I., PANFEROV V.I. Some problems of energy saving and automation of buildings heat systems	79

АППАРАТНО-ПРОГРАММНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВСТРАИВАЕМЫХ СИСТЕМ

Н.Н. Шарипова, В.Е. Третьяков, Э.А. Завадская

EMBEDDED SYSTEM HW/SW-MODELING

N.N. Sharipova, V.E. Tretjakov, E.A. Zavadskaja

В статье обсуждается использование разработанного авторами VHDL-симулятора, предназначенного для HW/SW-проектирования встроенных систем. На простом примере проиллюстрированы возможности симулятора, методологические аспекты разработки VHDL-описаний поведенческих моделей аппаратуры, обсуждена концепция моделирования, приведены результаты верификации модели.

Ключевые слова: встроенная система, совместное аппаратно-программное проектирование, VHDL-симулятор, имитационное моделирование.

VHDL-simulator for embedded system HW/SW design is represented in this article. Hardware model definition methodology, modeling conceptions and verification process are discussed. The content is illustrated by simple example.

Keywords: embedded system, HW/SW-Codesign, VHDL-simulator, simulation.

Введение

Проектирование встроенных систем предполагает совместное HW/SW-проектирование аппаратных блоков встроенного процессора и управляющих алгоритмов специального программного обеспечения (СПО). Необходимым этапом проектирования является верификация поведенческих моделей блоков проектируемого аппаратно-программного комплекса. Для спецификации объектов проекта используется стандартизированный IEEE многоуровневый язык описания аппаратуры VHDL [1], а для моделирования используются разработанные на базе этого языка симуляторы.

Авторами данной статьи разработаны: компьютерная технология HW/SW-проектирования систем [2], работающих под управлением встроенных процессоров; методология описания на VHDL программных и аппаратных блоков встроенных систем и концепция совместного имитационного

моделирования [3]. Разработанная компьютерная технология предполагает: параллельное проектирование аппаратных компонентов и управляющих алгоритмов СПО; возможность стыковки аппаратных и программных блоков на разных (и довольно ранних) этапах проектирования; использование VHDL на всех этапах. Для поддержки этой технологии авторами разработан и реализован VHDL-симулятор [4]. Использование VHDL-симулятора позволяет обрабатывать управляющие алгоритмы СПО в «окружении» аппаратуры, представленной не только на уровне информационных связей, но если нужно, и поведенческих моделей. С другой стороны, проектируемые аппаратные блоки на любом этапе могут быть состыкованы с СПО в единую модель с целью контроля за удовлетворением совместных требований и ограничений.

Существующие в этой области инструментальные системы (такие как, Silicon, Vantage,

Шарипова Нелли Николаевна – старший научный сотрудник НИИ физики и прикладной математики Уральского государственного университета им. А.М. Горького, г. Екатеринбург; nelly.sharipova@usu.ru

Третьяков Владимир Евгеньевич – д-р техн. наук, профессор, чл.-кор. РАН, президент Уральского государственного университета им. А.М. Горького, г. Екатеринбург; Vladimir.Tretjakov@usu.ru

Завадская Эрнэ Абрамовна – старший научный сотрудник НИИ физики и прикладной математики Уральского государственного университета им. А.М. Горького, г. Екатеринбург; nelly.sharipova@usu.ru

Sharipova Nelly Nikolaevna – senior scientist of Institute of Physics and Applied Mathematics of Ural State University of A.M. Gorky, Ekaterinburg; nelly.sharipova@usu.ru

Tretjakov Vladimir Evgenjevich – PhD, professor, corresponding member of RAS, president of Ural State University of A.M. Gorky, Ekaterinburg; Vladimir.Tretjakov@usu.ru

Zavadskaja Erna Abramovna – senior scientist of Institute of Physics and Applied Mathematics of Ural State University of A.M. Gorky, Ekaterinburg; nelly.sharipova@usu.ru

Cadence и др.), разработанные крупными зарубежными фирмами (такими как, Mentor Graphics и др.), являются сложными в использовании, дорогостоящими и, в основном, ориентированы на проектирование аппаратуры. Аналогичные отечественные разработки отсутствуют.

Данная статья имеет своей целью ознакомить отечественных разработчиков с возможностями VHDL-симулятора и проиллюстрировать на простом примере его использование для верификации поведенческих моделей аппаратных блоков.

1. Общая характеристика VHDL-симулятора

В качестве языковой основы VHDL-симулятора выбрано подмножество VHDL, необходимое для описания поведенческих моделей аппаратуры уровня СБИС. Подмножество расширено структурированными типами данных и типами данных, необходимыми для представления управляющих алгоритмов СПО, соответствующими операциями и встроенными функциями.

В концепции совместного HW/SW-моделирования реализован принцип «событийного» моделирования. Имитационная модель в этой концепции представляется как совокупность взаимосвязанных и синхронизируемых во времени параллельных процессов. Каждый процесс в общем случае соответствует некоторому блоку моделируемой системы (как аппаратному, так и программному). Процесс может иметь список запуска, т. е. перечисление тех входных сигналов, при изменении значения которых он активизируется. Процесс без списка запуска считается активным с начала моделирования.

В определенный момент модельного времени каждый процесс может находиться в одном из трех состояний: в активной фазе; в состоянии ожидания некоторого события; в завершенном состоянии.

Функционирование модели протекает в дискретном модельном времени, которое имитирует реальное время как неубывающую последовательность отдельных моментов времени. При этом приращение времени на каждом шаге моделирования считается равным интервалу между двумя следующими друг за другом событиями. Под событием понимается одна из следующих ситуаций: сигнал из списка запуска некоторого процесса получил новое значение; выполнено заданное условие активизации какого-либо процесса; для некоторого процесса, находящегося в состоянии ожидания, истекла заданная временная пауза.

Процесс моделирования удобно разделять на циклы прогона модели. В одном цикле параллельно должны быть запущены на выполнение те процессы, для которых в течение предыдущего цикла произошло какое-либо из вышеуказанных событий. Цикл прогона считается завершенным, когда завершены все запущенные в начале цикла процессы.

Для реализации симулятора использована среда C++. Приведем структуру и краткую характеристику основных компонентов симулятора [4]:

- транслятор описаний компонентов модели с подмножества VHDL во внутреннее представление (объектный код модели). Объектный код модели представляет из себя совокупность файлов с текстами на языке C++, а также специальный файл с информацией о структуре модели. Транслятор осуществляет синтаксический и семантический анализ VHDL-текста, декомпозицию поведенческих архитектурных тел и генерацию объектного кода модели;

- компоновщик модели осуществляет: проверку корректности модели по структуре, входам-выходам и переменным связи; окончательную сборку (синтез) модели из заданных VHDL-описаний и типовых элементов, подключаемых из пакетов или библиотек; формирование файла для редактора связей системы C++, получение «.exe»-модуля для модели;

- интерпретатор предназначен для проведения верификации модели во время сеанса моделирования и реализует выполнение действий, заданных на входном языке или специальные отладочные действия;

- планировщик событий – управляющая программа симулятора, которая обеспечивает функционирование имитационной модели во время сеанса моделирования в соответствии с разработанной концепцией моделирования;

- монитор диалога поддерживает многооконный интерфейс с пользователем при проведении сеанса моделирования, обеспечивая следующие возможности: запуск и прекращение сеанса; контроль значений переменных и сигналов; изменение значений переменных и сигналов; контроль активизации процессов; подключение и отключение сигналов; различные остановы и возобновление выполнения; ведение протокола сеанса моделирования;

- блок визуализации результатов моделирования, обеспечивает: просмотр всех промежуточных и окончательных результатов и состояние модели в заданный момент времени; выдачу временных диаграмм указанных сигналов и трассировку процесса моделирования на заданном промежутке времени.

Заметим, что представление каждой модели в виде отдельного «.exe»-модуля, обеспечивает эффективное проведение моделирования и позволяет накапливать модели разрабатываемых устройств, что может значительно упростить проектирование, реализацию и тестирование сложных систем.

2. Пример использования VHDL-симулятора

Кратко рассмотрим методологию описания моделей, включающих аппаратные и программные блоки. При совместном проектировании аппаратные блоки могут быть описаны в виде: структурных

или поведенческих архитектурных тел, процессов, операторов назначения сигнала. Управляющие алгоритмы СПО представляются в виде: поведенческого архитектурного тела, процессов или обрабатывающих процедур. В интерфейс модели, кроме входных и выходных сигналов и параметров настройки, включаются также сигналы и переменные связи аппаратных и программных блоков.

В качестве иллюстрации приведем пример простой модели (устройства с обратной связью), включающей: описание на VHDL поведенческой модели, управляющую программу для верификации модели, результаты имитационного моделирования, полученные с помощью разработанного авторами VHDL-симулятора.

На рис. 1 изображена логическая схема устройства с обратной связью, включающая два типовых блока: схему «ИЛИ-НЕ» и элемент памяти (D-триггер).

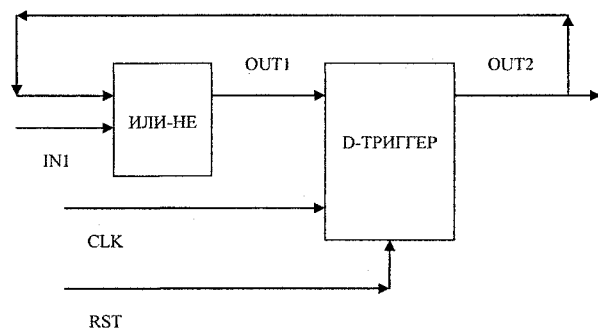


Рис. 1. Логическая схема устройства с обратной связью

Используются следующие обозначения:

IN1 – входной сигнал схемы;

CLK – входной тактирующий сигнал триггера;

OUT1 – выходной сигнал схемы и входной сигнал триггера;

OUT2 – выходной сигнал триггера и входной сигнал схемы;

RST – входной сигнал для сбрасывания триггера в ноль.

Выберем процессную форму поведенческой модели. Типовые блоки представлены следующим образом: оператор назначения сигнала с инерционной задержкой для схемы «ИЛИ-НЕ» и процесс со списком запуска для триггера. Оба блока будут смоделированы как параллельные процессы.

Текст VHDL-описания поведенческой модели для схемы с обратной связью.

--описание интерфейса

entity SCH is

generic (OUT1D: time = 2ns; -- задержка в распро-

OUT2D: time = 1ns; -- задержка в распростра-

RSD1: time = 1ns; -- периоды переключе-

RST

RSD2: time = 180ns;

CLKD: time = 3ns;

IN1D: time = 5ns);

Port (OUT2: inout bit;

OUT1: inout bit;

RST: in bit;

CLK: in bit = B'0';

IN1: in bit = B'0');

end SCH;

-- Поведенческое архитектурное тело

architecture TR of SCH is

Begin

-- оператор назначения сигнала для схемы

OUT1<= not (IN1 or OUT2) after OUT1D;

-- процесс для D-триггера

CG: process (CLK,RST,OUT1) is

begin

if RST = B'1' then

OUT2 <= B'0'after OUT2D;

else

if not CLK'STABLE(0) then

if CLK = B'1' then

OUT2 <= OUT1 after OUT2D;

end_if;

end_if;

end_if;

end_process CG;

end TR;

Тестовая программа для запуска и верификации модели:

architecture TEST of S is

signal RU: bit;

-- сигнал «кнопка-ПУСК»

begin

-- запуск модели

RU <= B'1';

RST <= B'1';

-- процесс для генерации входного сигнала RST

G1: process (RST) is

begin

if S <0 then RST <= B'1' after RSD2;

else RST <= B'0' after RSD1;

end_if;

S = 0 - S;

end_process G1;

-- процесс для генерации периодических переключений входного сигнала CLK

G2: process (RU,CLK) is

begin

CLK <= not CLK after CLKD;

end_process G2;

```
-- процесс для генерации периодических переключений входного сигнала IN1
G3: process (RU,IN1) is
begin
IN1 <= not IN1 after IN1D;
end_process G3;
end TEST;
```

Архитектурное тело TEST, предназначенное для верификации модели, состоит из трех параллельных процессов, с помощью которых генерируются переключения входных сигналов. Для начального запуска всей модели предназначен сигнал RU (кнопка «ПУСК»), оператор назначения которому интерпретируется, как процесс без списка запуска, и будет запущен в начальный момент времени.

В процессе верификации модели может быть произведен подбор параметров настройки (CLKD, IN1D, OUT1D, OUT2D) и выявлены соотношения задержек, при которых моделируется корректная работа схемы и некоторые неисправности. Мы ограничились случаем, когда сигнал RST, по которому осуществляется сброс триггера, подается один раз в начальный момент времени. Это позволило нагляднее проиллюстрировать подбор остальных параметров, влияющих на работу модели.

В результате процесса верификации установлено, что достаточным условием для моделирова-

ния обратной связи является следующее соотношение задержек:

$$IN1D > OUT1D > OUT2D.$$

Ниже представлены результаты моделирования в виде временных диаграмм симулятора с различными вариантами задержек.

Вариант 1 (наличие обратной связи):

$$CLKD = 4 \text{ ns}, IN1D = 3 \text{ ns}, OUT1D = 2 \text{ ns}, OUT2D = 1 \text{ ns} \text{ (рис. 2)}.$$

Из рис. 2 видно, что цикл прогона для варианта 1 составляет 24 ns.

Продолжительность цикла прогона можно скорректировать с помощью подбора периода переключения сигналов.

Например, для:

$$CLKD = 5 \text{ ns}, IN1D = 3 \text{ ns} \text{ – цикл прогона } 30 \text{ ns};$$

$$CLKD = 5 \text{ ns}, IN1D = 2 \text{ ns} \text{ – цикл прогона } 20 \text{ ns}.$$

Вариант 2: (моделирование неисправности схемы)

$$CLKD = 4 \text{ ns}, IN1D = 2 \text{ ns}, OUT1D = 2 \text{ ns}, OUT2D = 1 \text{ ns} \text{ (рис. 3)}.$$

Из диаграмм видно, что для данного соотношения задержек IN1D, OUT1D нарушается условие стабильности при передаче сигнала OUT1 и на триггер ничего не поступает. Таким образом, обратная связь не реализуется. Этот вариант можно рассматривать как моделирование неисправности схемы.

Результаты верификации свидетельствуют об адекватности рассмотренной модели процессу функционирования схемы с обратной связью.

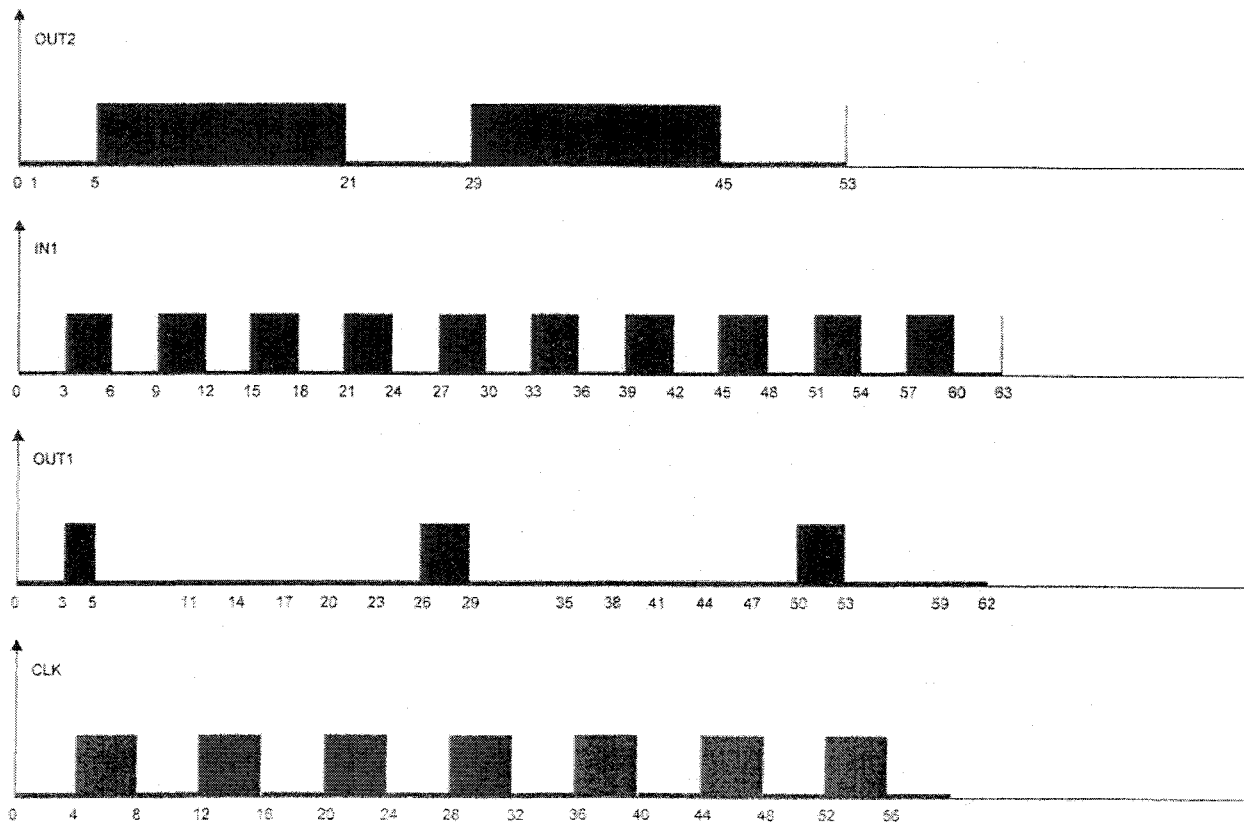


Рис. 2. Временные диаграммы для варианта 1

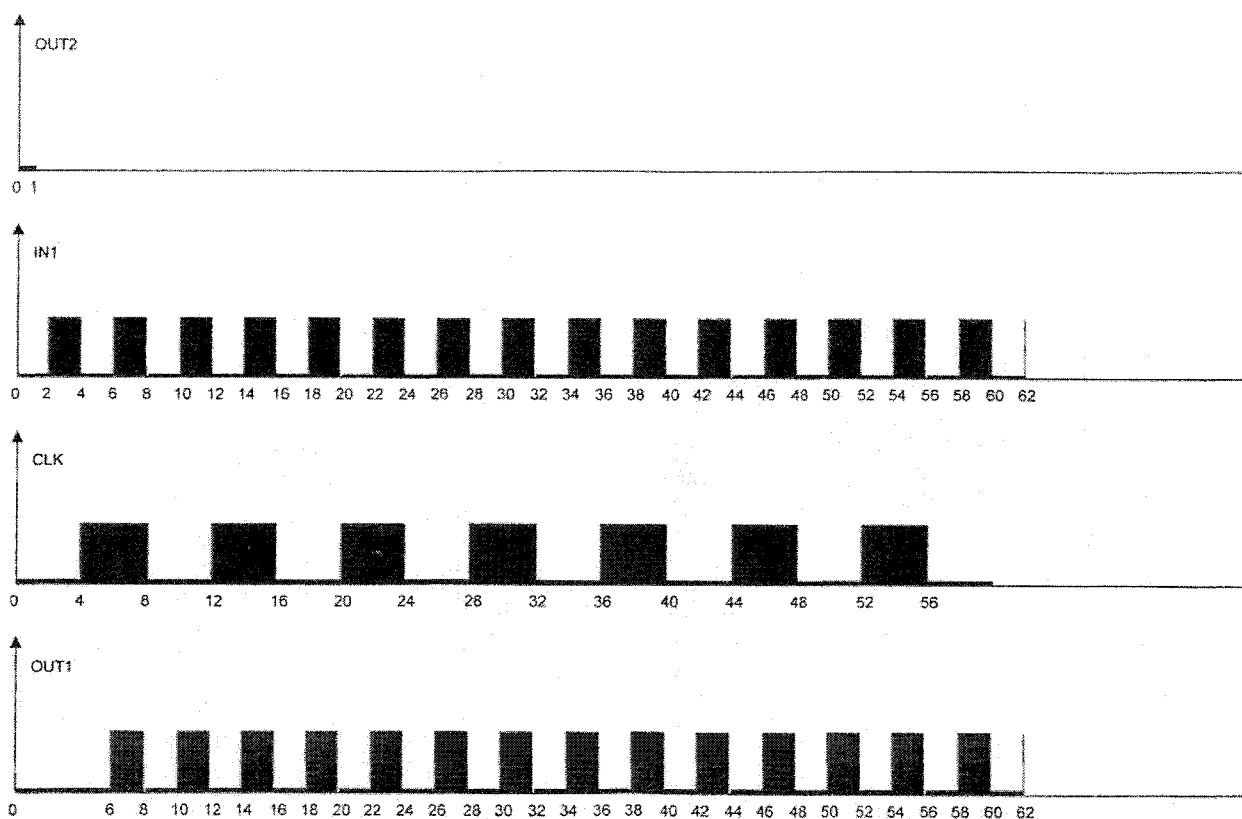


Рис. 3. Временные диаграммы для варианта 2

Заключение

В заключение отметим достоинства предлагаемого симулятора. Во-первых, он содержит минимальный, но достаточный и удобный набор инструментальных средств для большинства этапов HW/SW-проектирования; не требует специальной адаптации и настройки на конкретную область применения, прост в использовании; позволит повысить качество и надежность разрабатываемых изделий, снизить затраты на стендовые испытания и сократить сроки разработки. Во-вторых, это отечественная разработка и его стоимость значительно ниже, чем у известных систем крупных производителей.

Разработки встроенных систем на отечественной элементной базе в нашей стране проводились, в основном, в оборонной и авиакосмической промышленности, опто-электронном приборостроении, в производстве сложной медицинской и др. техники. С начала 90-х годов прошлого века появилась ориентация на использование зарубежных микропроцессоров с зарубежным математическим обеспечением. Этот подход оказался не эффективным и не обеспечивающим надежности разработок. Поэтому в последнее время обозначилось направление на поддержку отечественных разработок элементной и программной базы спецпроцессоров. В таких проектах предлагаемый симулятор может быть реально востребован.

Разработка первой версии VHDL-симулятора проводилась при поддержке РФФИ (2005–2006 годы), № проекта: 05-08-01273. В настоящее время проводится расширение симулятора возможностями объектно-ориентированного моделирования в рамках АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)» Минобрнауки и науки РФ, № проекта: 2.1.2/3675.

Литература

1. IEEE Standard VHDL Language Reference Manual / Std 1076-1993, revision of IEEE Std. 1076-1987. 1994.
2. Третьяков, В.Е. Проектирование аппаратно-программных комплексов с использованием VHDL-симулятора / В.Е. Третьяков, Н.Н. Шарипова, Э.А. Завадская // Изв. вузов. Приборостроение. – 2004. – Т. 47, № 2. – С. 27–30.
3. Шарипова, Н.Н. Моделирование аппаратно-программных комплексов на базе VHDL / Н.Н. Шарипова, В.Е. Третьяков, Э.А. Завадская // Автоматизация и современные технологии. – 2007. – № 6. – С. 22–27.
4. Третьяков, В.Е. VHDL-симулятор как средство верификации поведенческих моделей блоков встроенных систем / В.Е. Третьяков, Н.Н. Шарипова, Э.А. Завадская // Автоматизация и современные технологии. – 2002. – № 1. – С. 7–11.

Поступила в редакцию 18 февраля 2010 г.

ПРИМЕНЕНИЕ SOAP-СЕРВИСОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВНУТРИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ И УДАЛЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ

Д.Н. Дутиков

SOAP-SERVICES USING FOR DISTRIBUTED INFORMATION SYSTEM COLLABORATING AND RESOURCES REMOTE MANAGEMENT

D.N. Dutikov

В работе на примерах рассматриваются способы применения SOAP-сервисов в практике удаленного управления ресурсами интрасети, даются общие рекомендации по созданию элементов информационной системы, отвечающих за взаимодействие с устройствами. Приводится пример выбора архитектуры построения информационной системы и сравнительный анализ средств программирования применительно к задаче взаимодействия с устройствами.

Ключевые слова: протокол SOAP, удаленное взаимодействие, информационные системы, автоматизация сбора данных, распределенные системы.

In samples described SOAP-services using methods in an intranet remote resource management practice. Proposed common solutions for device interaction modules of information systems. Sample of common architecture selection to solving problem of device interaction in the web produced.

Keywords: SOAP protocol, collaboration and remote interaction, information systems, automation of data collection, distributed systems.

Введение

В ходе создания системы мониторинга данных геолого-минералогических исследований на Южном Урале (далее – информационная система) был решен ряд сложных задач. Одной из них была задача организации удаленного доступа к приборной исследовательской базе и автоматизация сбора данных.

С ростом числа элементов системы повышаются затраты на её поддержку. В случае необходимости поддерживать связь сразу с несколькими приборами, эти затраты могут превысить возможности информационного отдела в исследовательском институте. Чтобы не прийти к такой ситуации необходимо заранее проводить серьезное планирование системы в целом [1]. Центральное место в этом планировании занимает выбор платформы, языков программирования и технологий взаимодействия.

На сегодняшний день можно найти множество информации по планированию информационных систем [2–4] и даже по выбору языков программи-

рования [5]. Существует также опыт интеграции в общую систему промышленного оборудования и установок физического профиля [4, 6]. Однако в большинстве своем авторы затрагивают темы взаимодействия с устройством больше, чем протоколов взаимодействия внутри системы. Между тем, отмечается, что современная информационная система должна быть построена с использованием открытых стандартов и протоколов [2, 3, 7].

В данной работе предлагается один из возможных вариантов организации удаленного взаимодействия в рамках научно исследовательского института с использованием протокола SOAP.

1. Intranet/internet-технологии при построении информационной системы

Информационная система построена на базе web-технологий, обеспечивающих хорошее масштабирование, понятный и прозрачный процесс администрирования. Web-технологии также позволяют достаточно просто организовывать удаленный доступ к вычислительным ресурсам, вместе с

Дутиков Дмитрий Николаевич – ведущий программист отдела геоинформационных технологий Института минералогии УрО РАН; odoom@mineralogy.ru

Dutikov Dmitry Nikolaevich – leading software developer of Geoinformation Technologies Department of Institute of Mineralogy of The Ural Branch of RAS; odoom@mineralogy.ru

тем, они не требуют специфичного клиентского программного обеспечения, таким образом, достигается кроссплатформенность всей системы в целом. Доступ к такой системе возможен как по локальной вычислительной сети, так и через каналы Internet, что на сегодняшний день немаловажно.

Web-технологии появились достаточно давно, и на сегодняшний день существуют способы распределения процессов обработки пользовательских запросов на несколько серверов (web-фермы). В перспективе это обеспечивает организацию стабильной работы информационной системы при большом количестве одновременных запросов.

Несмотря на то, что построение информационной системы с использованием web-технологий во многих отношениях предстает перед нами в выгодном свете, вполне очевидны два главных недостатка такого подхода. Первым отметим вопрос безопасности. Действительно, вопрос безопасности волнует многих пользователей информационной системы, поскольку предполагается хранение в ней данных научных исследований, утрата которых или искажение недопустимы, так же, как и нежелательно преждевременное оглашение данных (по вполне понятным причинам) [9]. Вопросы безопасности достаточно сложны и требуют отдельного рассмотрения. Впрочем, заметим, что при разработке информационной системы мы учли основные способы «взлома» web-систем (такие как sql-инъекции, кроссдоменный скриптинг, подмена аутентификационного cookie).

Второй проблемой мы отметим возможности языков программирования и библиотек классов, используемых при создании web-систем. Информационная система спланирована не только как хранилище, банк данных, предоставляющий функции сбора данных, поиска и представления. Как было отмечено в начале, система должна также и сама, в автоматическом режиме, взаимодействовать с приборами. В необходимости такого взаимодействия и кроется проблема. В каждом случае, к каждому прибору необходим индивидуальный подход. Способы взаимодействия с прибором в большей степени относятся к разделу системного программирования, а не web-программирования. Гетерогенность системы, таким образом, повышается, увеличиваются затраты на её поддержку.

Приведем наше решение проблемы, сводящее к минимуму количество технологий, языков программирования и способов взаимодействий внутри информационной системы.

2. Организация удаленного взаимодействия

Наша информационная система, как и любая другая, располагается и работает на какой-то определенной серверной машине. Сложно себе представить, что вся приборная база будет каким-то образом подключена к этому компьютеру. Хотя существуют технологии удаленного доступа к аппаратным портам компьютера (например COM port

redirector), использование их возможно не во всех случаях. Например, программное обеспечение к какому-либо устройству может быть жестко привязано к конкретной машине и будет работать только на ней. Да и администрирование сервера со множеством различного программного обеспечения – задача сложная, могут так же возникать проблемы с безопасностью.

Наиболее правильным нам видится использование рабочих станций в том режиме, в котором они уже работают, и с такой конфигурацией, какая представляется производителям программного обеспечения наиболее правильной. Таким образом, возможно обеспечить бесперебойную работу программного обеспечения на местах.

Удаленное взаимодействие можно обеспечить при помощи внедрения в рабочую станцию агента информационной системы, отслеживающего состояние прибора и отсылающего сведения на центральный сервер. Такую схему можно реализовать несколькими более или менее стандартными средствами:

- при помощи технологий COM или CORBA, при этом на рабочей станции запускается объект, который в теории обладает доступом ко всем ресурсам компьютера;
- при помощи технологий .NET-remoting и WCF;
- при помощи клиентского сервиса, исполняемого на стороне рабочей станции и по определенному протоколу отсылающего данные на центральный сервер.

При выборе способа взаимодействия всегда необходимо учитывать, что архитектура системы может измениться, может возникнуть потребность в ее перестройке или объединении с другой системой. Интероперабельность должна достигаться в том числе и за счет использования стандартных и открытых протоколов [7]. Для обеспечения максимально легкого взаимодействия в разнородной среде был выбран протокол SOAP.

Протокол SOAP легко реализуем в различных системах, его поддерживают многие платформы программирования. Мы не будем приводить всех тонкостей протокола и детального его описания, они доступны во многих открытых источниках. Скажем лишь, что это протокол обмена структурированными сообщениями. Основная задача протокола – поддержка передачи данных со строгим описанием типов и сложной структурой, что позволяет на его основе организовывать удаленный вызов процедур. Протокол этот работает поверх протокола HTTP, поэтому возможно объединение в одну систему машин, находящихся в разных сегментах сети и за системой NAT. Использование HTTP в качестве базового протокола облегчает задачи обеспечения безопасности, поскольку нет необходимости держать на сервере открытыми какие-либо дополнительные порты.

Предлагается следующая общая технология организации взаимодействия с прибором.

1. На рабочих местах, под управлением которых находится прибор, устанавливается SOAP-сервер. Наиболее простой способ его организации – это IIS и ASP.NET (в операционной системе Windows) или Apache и любая технология, поддерживающая SOAP (Perl, PHP, Python, Mono и т. п.).

2. SOAP-сервис, посредством COM, TCP/IP, CLI, API или любой другой доступной технологии, получает данные и отправляет их на сервер.

3. На серверной стороне информационной системы так же существует SOAP-сервис, задача которого – принимать данные.

3. Возможности языков web-программирования и потребности информационной системы

Для сведения к минимуму разнородности системы необходимо, чтобы клиентская часть системы и серверная были созданы при помощи одинаковых технологий и языков программирования. Поэтому очень важен первоначальный выбор языка. Подробно свой выбор мы обосновывали в работе [8], теперь же приведем основания, связанные с необходимостью взаимодействия с приборной базой.

Нужно сразу сделать оговорку. Современные языки программирования высокого уровня, как правило, обладают схожими возможностями. Из различий, в первую очередь, видны синтаксические, строгость типизации; встречаются различия в применяемой парадигме программирования (языки ООП, функциональные языки, объектные языки). Однако, в конечном итоге, всякие различия между языками никак не отражаются на результате работы программиста.

Со специализированными языками программирования и языками среднего уровня дело обстоит сложнее, их выбору посвящают отдельные работы (см. [5]).

Правильней было бы сравнивать библиотеки классов (или аналогичные библиотеки, предоставляющие программисту необходимый набор функций), но сейчас они настолько тесно «срослись» с поддерживаемыми языками программирования, что едва ли возможно их упоминание по отдельности. Поэтому когда теперь мы пишем о «языках программирования», следует подразумевать так же и основной набор функций, употребляемый вместе с этим языком.

Из наиболее широко применяемых сегодня языков мы выделим PHP, Java, C# (ASP.NET). Все три языка являются языками высокого уровня, поддерживающими парадигму объектно-ориентированного программирования.

Язык PHP – интерпретируемый язык, с обширной библиотекой функций, в которой содержатся все функции, необходимые для работы web-программиста, начиная от операций с текстом и регулярными выражениями до работы с базами данных. Так же существуют дополнительные объектные структуры (frameworks), реализующие кар-

кас приложения, что сильно ускоряет разработку приложения.

Java и C# (си шарп) – это управляемые языки программирования. Оба поддерживаются обширнейшими библиотеками классов, в которых можно найти классы, что называется, «на все случаи жизни». Оба языка используются как для создания web-приложений, так и для создания настольных приложений. Существуют объектные структуры для этих языков и готовые решения.

Из всего многообразия возможностей выделим необходимые нам для взаимодействия с аппаратной базой. Обычно приборы поставляются с некоторым программным обеспечением. Подавляющее число программного обеспечения к приборам работает только в среде операционной системы Windows. Хорошо это или плохо – вопрос отдельный. Нас интересует только техническая сторона вопроса. А она такова, что в некоторых случаях у программного обеспечения (драйверы, настольные приложения для оператора) существует программный интерфейс (API). Программный интерфейс может заключаться в простых динамически загружаемых библиотеках (dll) или библиотеках, поддерживающих общую модель объектов (COM). Не исключаем также возможность существования статических библиотек под системы Unix/Linux. Менее удобным может оказаться наличие интерфейса командной строки (CLI – command line interface) – ряда утилит, работающих в рамках стандартных выводных и входных потоков (stdin, stdout, stderr потоки). Еще одной возможностью взаимодействия является взаимодействие по протоколу tcp/ip, когда само устройство или программное обеспечение к нему поддерживает соединение на определенном порту и принимает по нему команды. Еще одним очевидным способом взаимодействия является прямое взаимодействие с устройством через аппаратные порты.

Итак, нами было выделено несколько возможных способов взаимодействия с аппаратным обеспечением:

- прямое взаимодействие с устройством;
- взаимодействие через API в виде dll;
- через COM-объекты;
- по протоколу TCP/IP;
- посредством утилит командной строки (см. также [6]).

Теперь, зная необходимую нам функциональность, обратим внимание на перечисленные языки программирования.

При рассмотрении таблицы можно заключить, что наиболее популярный язык программирования для создания web-приложений – PHP наименее пригоден для реализации поставленной задачи. Несмотря на огромную функциональность, связанную с web-разработкой, этот язык не обладает набором функций системного программирования. Ограниченная поддержка COM еще сильнее усугубляет таковое положение.

Поддержка требуемой функциональности в языках web-программирования

Функция	Поддержка в PHP	Поддержка в C# (ASP.NET)	Поддержка в Java
Доступ к COM, LPT, USB портам	Нет	Параллельные порты – встроенная поддержка, последовательные и USB сторонними компонентами	Поддерживается
Раннее связывание DLL	Нет	Поддерживаются	Поддерживается
Позднее связывание DLL	Нет	Поддерживается через раннее связывание с WIN API (LoadLibrary, GetProcAddress, FreeLibrary)	Поддерживается
Взаимодействие с COM	Поддерживается ограничено. Объекты создаются только в рамках одного скрипта	Поддерживается	Поддерживается через JNI (вызов стандартных функций из библиотек COM) или JACOB (Java-COM bridge, использует JNI)
Поддержка tcp/ip sockets	Поддерживается	Поддерживается	Поддерживается
Управление дочерним процессом	Частичное	Поддерживается	Поддерживается
Управление стандартными потоками дочернего процесса	Нет	Поддерживается	Поддерживается
Кроссплатформенность	Полная	Частично, через Mono	Полная

Между конкурирующими платформами Java и .NET мы находим мало различий, как минимум вся необходимая функциональность в них так или иначе присутствует. Основным языком программирования был выбран C# и платформа ASP.NET. Выбор такой обусловлен необходимостью обеспечения преемственности с уже существующей, но устаревшей информационной системой в Институте минералогии УрО РАН (г. Миасс). Старая система была написана на ASP (Active Server Pages), в результате сложился и устоялся определенный состав серверного программного обеспечения, был сделан выбор определенной СУБД, произведено обучение и администрирующего персонала. Эти и некоторые другие причины [8] стали основанием сделанного выбора.

4. Ситуативный выбор средств взаимодействия с прибором

Несмотря на описанную нами общую структуру взаимодействия с прибором и последующей передачи данных в хранилище, конечный выбор структуры системы должен быть подвержен здравому смыслу. Основным направлением оптимизации системы должно быть сокращение числа промежуточных операций там, где это возможно.

Рассмотрим конкретный пример. Существует датчик температуры DS9097U, подключаемый к последовательному порту компьютера. Задача: обеспе-

чить автоматический сбор данных с этого датчика через каждые 5 минут. Данные должны быть записаны в отдельную таблицу общей базы данных.

По описанной выше логике, на рабочей станции, к которой подключен датчик, должна быть установлена клиентская система. В нашем случае – это IIS и web-сервис, опрашивающий последовательный порт для получения данных с датчика. Сервер через каждые пять минут должен вызывать метод сервиса для получения этих данных и записи в базу.

На практике оказывается, что датчик подключен к компьютеру, на котором располагается собственно СУБД, что дает возможность производить запись в базу, минуя всю схему с сервисами SOAP. Кроме того, для датчика написана консольная утилита, снимающая показания датчика и выводящая сообщение на стандартный выводной поток в удобном для человека виде. В таком случае для получения данных проще запускать эту утилиту, а ее вывод анализировать при помощи машины состояний или регулярных выражений.

Для решения поставленной задачи был выбран упрощенный путь. Создана консольная утилита на языке C#, которая запускает программу для получения показаний датчика и записывает полученные данные в базу. Запуск созданной консольной утилиты был назначен в системном планировщике заданий через каждые пять минут.

Таким образом, на плечи центральной информационной системы ложится лишь отображение данных, уже находящихся в таблице, в виде графиков. С результатами работы можно ознакомиться по адресу <http://monitoring.mineralogy.ru/temperature>.

Рассмотрим еще один пример. В локальной сети существует фильтрующий прокси-сервер под управлением операционной системы FreeBSD; задача сервиса – ограничивать входящий интернет-трафик по набору правил. Необходимо предоставить администратору удобный интерфейс для поиска некорректно работающих правил с функциями удаления и редактирования найденных правил.

Хотя этот пример не относится напрямую к системе взаимодействия с аппаратными средствами, подход к решению проблемы остается в точности таким же. На стороне фильтрующего прокси-сервера поднимается httpd-сервис Apache и система Mono. Под управлением Apache создается SOAP-сервис, реализующий функции поиска и редактирования правил, переконфигурации прокси-сервера. На стороне информационной системы создается модуль, предоставляющий интерфейс к SOAP-сервису и дополнительные функции, обеспечивающие удобство работы и контроль за правами доступа. Методы SOAP-сервиса вызываются с серверной стороны информационной системы.

Из примера видно, что несмотря на различия в операционных системах, информационная система по-прежнему подвержена общим стандартам взаимодействия и написана на одном языке программирования (C#). Однако заметим, что функции SOAP-сервиса можно вызывать напрямую со стороны этого сервиса и там же предоставлять интерфейс. Описанная схема создана для обеспечения безопасности, при таком подходе возможно ограничить доступ к самому сервису по единственному адресу.

В следующем примере рассмотрим ситуацию, когда полностью автоматическая работа системы невозможна или не нужна. Существует устройство для проведения рентгеноструктурного анализа образцов вещества. К устройству поставляется программное обеспечение. По описанному нами алгоритму возможно, конечно, создать автоматическую систему сбора, но для этого есть существенное препятствие. Анализ каждый раз проводится единично. Оператор должен загрузить в прибор заранее подготовленный препарат, нажать кнопку, провести оценку качества работы прибора. Только после этого возможно внесение данных в базу. В результате этого, вся описанная схема взаимодействия сразу теряет смысл. Впрочем, в некоторой степени автоматизировать работу оператора все же можно. Данные, выдаваемые программным обеспечением, записываются в файл. Вместо того чтобы вручную заносить все полученные данные, оператор может загрузить файл, а информационная система сама извлекает из него данные и записывает в базу.

Заключение

Итак, описанные нами возможности интеграции информационной системы путем унификации протоколов взаимодействия, использования открытых протоколов взаимодействия является перспективным направлением разработки в области обеспечения удаленного доступа к аппаратному обеспечению исследований и обеспечению автоматического и автоматизированного сбора информации.

Приведенные примеры показывают основные схемы построения системы автоматического сбора информации и управления ресурсами. В каждом отдельном случае, с каждым отдельным прибором проблема должна решаться индивидуально, однако следует помнить, что в конечном итоге доступ к прибору должен осуществляться по открытому протоколу.

В перспективе планируется использовать протокол SOAP и стандарт WSDL для организации удаленного взаимодействия с приборами, автоматической настройки передачи потокового видео получаемого с прибора.

Важно отметить, что сам по себе протокол SOAP является надстройкой над XML и HTTP, скорость обработки запросов по этому протоколу ниже, чем скорость обработки «чистых» HTTP запросов. Поэтому в системах, где время отклика является критической характеристикой, от идеи использовать данный протокол следует отказаться.

Литература

1. *Построение интегрированного информационного пространства предприятия / Е.Н. Ишметьев, Ю.Н. Волицуков, А.В. Романенко и др. // Управление информационной инфраструктурой современной организации на основе технологии открытых систем: сб. тр. IV междунар. науч.-практ. семинара. – Магнитогорск: МаГУ, 2006. – С. 54–59.*
2. *Вендров, А.М. CASE-технологии: современные методы и средства проектирования информационных систем. / А.М. Вендров – М.: Финансы и статистика, 1998. – 176 с.*
3. *Клецев, Н.Т. Практическое руководство по созданию и проектированию информационных систем / Н.Т. Клецев, А.А. Романов. – М.: Изд-во ООО «Научтехиздат», 2001. – 389 с.*
4. *Калинин, Э.О. Практические рекомендации по разработке и внедрению технологии распределенных систем на промышленном предприятии / Э.О. Калинин // Система обработки информации и управления: архитектура и программное обеспечение: сб. науч. тр. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 1998. – С. 14–19.*
5. *Сидельников, В.И. Методика выбора языка программирования для реализации программного продукта / В.И. Сидельников // Автоматизация и современные технологии. – 2007. – № 7. – С. 27–32.*
6. *Куликов, Г.Э. Автоматизированная система сбора и обработки данных для установок фи-*

зического профиля / Г.Э. Куликов // Информационные технологии. – 2008. – № 4. – С. 50–57.

7. Олейников, А.Я. Состояние и перспективы развития технологии открытых систем / А.Я. Олейников, Т.Д. Штробоква // Управление информационной инфраструктурой современной организации на основе технологии открытых систем: сб. тр. IV междунар. науч.-практ. семинара. – Магнитогорск: МаГУ, 2006. – С. 41–46.

8. Дутиков, Д.Н. Использование новейших технологий для хранения обработки и представления данных геолого-минералогических исследо-

ваний / Д.Н. Дутиков // Наука и технологии. Итоги диссертационных исследований. – М.: РАН, 2009. – Т. 2. – С. 17–29. – (Избранные труды Российской школы).

9. Гусев, М.О. Вопросы защиты информации в профиле академического института / М.О. Гусев, А.Я. Олейников // Управление информационной инфраструктурой современной организации на основе технологии открытых систем: сб. тр. IV междунар. науч.-практ. семинара. – Магнитогорск: МаГУ, 2006. – С. 74–81.

Поступила в редакцию 28 января 2010 г.

АНАЛИЗ УРОВНЯ ИНФОРМАТИЗАЦИИ ВУЗОВ КУЛЬТУРЫ И ИСКУССТВ (ЗА ПЕРИОД 2007–2009 гг.)

С.В. Буцык

THE ANALYSIS OF INFORMATIZATION LEVEL OF HIGH SCHOOLS OF CULTURE AND ARTS (DURING 2007–2009)

S.V. Butsyk

Статья посвящена актуальным вопросам информатизации учреждений высшего образования. Основываясь на результатах самообследования деятельности шести вузов сферы культуры и искусств за период с сентября 2007 г. по январь 2009 г., автором проведен сравнительный анализ уровня их информатизации, сделаны комплексные аналитические выводы, даны рекомендации научно-практического характера.

Информатика – Высшее образование – Культура и искусство

Ключевые слова: информатика, высшее образование, культура, искусство.

Article is devoted to pressing questions of informatization of institutions of higher education. Being based on results of self-inspection of activity of six high schools of culture and arts from September, 2007 till January, 2009, the author carries out the comparative analysis of their informatization level, complex analytical conclusions are drawn, recommendations of scientifically-practical character are made.

Information science – Higher Education – Culture and Art

Keywords: information science, higher education, culture, art.

Введение

Актуальность вопросов информатизации высших учебных заведений в последние годы в России очевидна, что выражается в большом количестве мероприятий, реализуемых в сфере ИКТ на федеральном уровне, устойчивом интересе к информатизации вузов в научных исследованиях, активной разработке и реализации концепций информатизации в рамках отдельных учебных заведений, регионов и страны в целом. В то же время слабая вовлеченность вузов культуры и искусств в мероприятия ИКТ на федеральном уровне, незначительное число концептуальных IT-проектов, разработанных образовательными учреждениями данной сферы, отсутствие реальных шагов по их реализации говорят о невысокой значимости проблем информатизации для научно-практической деятельности учреждений высшего образования в области культуры и искусств.

Так, в числе вузов-победителей конкурсного отбора вузов, внедряющих инновационные образовательные программы (в рамках приоритетного национального проекта «Образование») за 2006 и 2007 гг. нет ни одного вуза, находящегося в ведении Министерства культуры РФ; федеральная целе-

вая программы «Культура России (2006–2010 гг.)» не содержит мероприятий ИКТ, прямо связанных с деятельностью учреждений высшего образования; проекты концепций информатизации, разработанные в сфере культуры и искусств (1999 г. – МГУКИ, 2007 г. – симпозиум вузов культуры и искусств) не получили какого-либо практического продолжения.

1. Параметры анализа

Описанное противоречие послужило сигналом для проведения научно-практического исследования среди шести крупнейших вузов культуры и искусств, проводивших самообследование (перед комплексной оценкой учреждения) в период с сентября 2007 г. по январь 2009 г.: Санкт-Петербургский и Кемеровский университеты; Челябинская, Восточно-Сибирская, Алтайская и Самарская академии культуры и искусств [1]. К основным задачам работы нами были отнесены сбор, систематизация и анализ сведений в рамках следующих аспектов информатизации: компьютерная техника; сетевая инфраструктура; информационные технологии; структурно-кадровый потенциал. Источниковедческой базой исследования, во многом, стали

Буцык Сергей Владимирович – канд. пед. наук, доцент, проректор по учебной работе Челябинской государственной академии культуры и искусств; serg@chgaki.ru

Butsyk Sergey Vladimirovich – PhD, assistant professor, vice-rector of Chelyabinsk State Academy of Culture and Arts; serg@chgaki.ru

отчеты о результатах самообследования деятельности, опубликованные указанными вузами на их официальных Интернет-ресурсах.

Для проведения глубокого и всестороннего анализа большого объема фактического материала нами были выявлены и дополнены имеющиеся в теории и практике информатизации параметры сравнительного анализа для аспектов «компьютерной техники» и «сетевой инфраструктуры», а для «информационных технологий» и «структурно-кадрового потенциала» – разработаны, обоснованы и использованы авторские параметры сравнения вузов культуры и искусств.

2. Результаты исследования

Одним из значимых результатов исследования можно считать выход на оптимальные, по нашему мнению, показатели компьютерной техники для вуза культуры и искусств, среди которых, в первую очередь, выделим следующие *количественные характеристики*:

– число всех ПК вуза должно, на наш взгляд, находиться в примерном соотношении 1 к 6–7 студентам (приведенного контингента), при этом 1:7 можно считать достаточным показателем, а 1:6 – хорошим;

– 55–60 % всего компьютерного парка оптимально для использования в учебном процессе вуза культуры и искусств; при этом оставшаяся часть техники должна быть задействована в научно-исследовательской, концертно-творческой деятельности, в управлении вузом;

– как следствие, число ПК, используемых в учебном процессе, должно находиться в примерном соотношении 1 к 10–12 студентам, и показатель 1:12 можно считать достаточным, а 1:10 – хорошим.

Качественные характеристики компьютеров, на наш взгляд, для уровня 2009–2010 гг. должны соответствовать следующим показателям:

– не менее 90 % ПК вуза должны быть класса Pentium IV и выше; данный вывод основан на том, что указанный класс техники находится в массовой продаже уже более 7–8 лет (примерно с 2002 г.); более ранние классы морально устарели, производить их модернизацию экономически не выгодно;

– не менее 30 % ПК вуза должны иметь процессоры с 2 и более ядрами, поскольку в массовой продаже такая техника находится уже более 2–3 лет (примерно с 2007 г.), а все современное ПО (автоматизированные системы, графические редакторы, аудио-, видеопрограммы и т. п.) напрямую связано с уровнем процессора.

Приблизительно к таким оценкам нас приводят данные вузов культуры и искусств – объективно лучших по количественным (СГАКИ – 1:6; 58,7 %; 1:10,2 соответственно) и качественным (ЧГАКИ – 90 %; 36 % соответственно) показателям.

Кроме того, мы убеждены, что в вузе культуры и искусств *мультимедийная техника* должна занимать особое место, а ее использование в учеб-

ном, научном, творческом процессе – быть многообразным. Как следствие, данный показатель необходим в качестве обязательного при самооценке творческого вуза и должен учитывать не только проекторы компьютерных классов (указывается в ежегодном модуле сбора данных о вузе), но и проекторы, используемые в аудиторных, мобильных, сценических комплексах техники, а также жидкокристаллические, плазменные телевизоры (панели) большой диагонали, подключаемые к компьютерным системам.

Наше исследование показало, что сетевая инфраструктура большинства вузов культуры и искусств находится, скорее, на развивающейся стадии и недостаточно отвечает современному уровню развития коммуникаций. При этом, к сожалению, сосредоточившись на количественных показателях (скорость ЛВС, число компьютеров в ее составе и имеющих доступ к Интернету), фактически ни одним из учреждений в полной мере не описано качество сети. А оно может определяться, например, наличием сертификата соответствия кабельной системы стандартам ISO или ГОСТ, использованием активного оборудования ведущих производителей (Cisco, Allied Telesis, 3Com) и т. п.

Важно отметить, что высокое качество сети в комплексе с соответствующим современному уровню классом компьютерной техники – основа успешной работы крупных (ресурсоемких) сетевых систем. Особенно это касается разработок собственных программ (в том числе студенческих), степени оптимизации которых обычно уделяется мало внимания, и как следствие, фактор сети может оказаться критичным при переходе от локальной к сетевой многопользовательской версии.

Возможно, это является одной из причин недостаточного развития вузовских информационных технологий в направлении создания собственных автоматизированных систем, использующихся внутри сети. Интернет-технологии разрабатываются фактически всеми вузами, а автоматизированные системы применяются только в СПбГУКИ, где используется в основном сетевое оборудование только ведущих марок (Cisco и 3Com), и в ЧГАКИ, где имеются сертифицированная кабельная система (стандарт ISO) и коммутационное оборудование Allied Telesis.

Проводя сравнительный анализ информационных технологий, мы обозначили значительную роль IT-специалистов при выборе направлений развития автоматизированных систем вуза и эффективности их внедрения в учебно-организационный процесс. В этой связи наличие внутреннего кадрового потенциала IT-специалистов является важной задачей, влияющей не только на перспективное развитие вуза в информационной сфере, но и на жизнеспособность структур, поддерживающих его текущий уровень информатизации. Решением данной проблемы для вузов культуры и искусств, во многом, может стать наличие специаль-

ности 080801.65 «Прикладная информатика». При этом, взаимосвязь между обучением на заочном отделении и работой в IT-службе того же вуза, на наш взгляд, является оптимальной и учитывает экономические, организационные, учебно-практические задачи управления образовательным процессом. Важно отметить, что в пяти из шести исследованных вузов лицензирована и успешно развивается указанная специальность, при этом в трех из них контингент студентов превышает 300 человек. Кроме того, в Алтайской академии культуры и искусств на момент самооценки были подготовлены документы к лицензированию соответствующего направления 080800.62 и на сегодняшний день успешно проведены первые наборы будущих бакалавров.

3. Уровень информатизации вузов культуры и искусств

Подводя общие итоги исследования, мы посчитали корректным выделить лучшие вузы по отдельным аспектам проведенного исследования. Так, по *компьютерной технике* нами не выявлено очевидного лидера, поскольку ни один из исследованных вузов не имеет явного преимущества одновременно и по количественным, и по качественным характеристикам (по крайней мере, на момент самообследования). По уровню развития *сетевой инфраструктуры* определенно лучшим, по нашему мнению, является Челябинская академия, показавшая высокие оценки по всем использованным в сравнении показателям. Подтверждением такого вывода могут также служить и дополнительные качественные характеристики сети вуза – сертифицированная ISO кабельная система и использование оборудования ведущих производителей [2, 3]. Кроме того, отметим Кемеровский университет, способный, на наш взгляд, в среднесрочной перспективе увеличить потенциал, по крайней мере, в отношении скоростных характеристик ЛВС и доли компьютеров в ее составе. В аспекте *информационные технологии* считаем объективным присвоить первенство Санкт-Петербургскому и Челябинскому вузам культуры и искусств, имеющим собственные разработки автоматизированных систем, успешно внедренные в учебно-организационные процессы вузов. Следует отметить и Восточно-Сибирскую академию, использующую несколько крупных специализированных продуктов сторон-

них производителей. Лидером по *структурно-кадровому потенциалу* можно считать СПбГУКИ с учетом контингента информатиков и разнородности областей применения «Прикладной информатики». Кроме того, эта специальность достаточно развита еще в двух вузах – ВСГАКИ и КемГУКИ.

Заключение

Таким образом, к числу основных результатов проведенного научно-практического исследования можно отнести:

- оптимизированные количественные показатели и качественные характеристики обеспеченности учебного процесса компьютерной техникой;
- заключение о значимости мультимедийной техники для вузов данного профиля и важности отражения ее в обязательных показателях самооценки;
- рекомендации по построению информационной инфраструктуры образовательного учреждения, основанные на многолетнем опыте автора;
- практические предложения по укреплению кадрового потенциала IT-сферы вуза культуры и искусств.

На основе отобранных и разработанных параметров может быть проведен следующий сравнительный анализ уровня информатизации в вузах, которые будут в дальнейшем проходить подобное самообследование. При этом объектами исследования могут быть не только аналогичные вузы культуры и искусств, но и специализированные учреждения высшего образования Министерства культуры: музыкальные, театральные, художественные, хореографические и т. п.

Литература

1. Буцык, С.В. *Информатизация вузов культуры и искусств: анализ текущего состояния: моногр.* / С.В. Буцык. – Челябинск: ЧГАКИ, 2009. – 131 с.
2. Буцык, С.В. *Опыт комплексной информатизации вуза культуры и искусств в России* / С.В. Буцык // *Открытое образование*, 2008. – № 1. – С. 73–78.
3. Буцык, С.В. *Диссертации по информатизации вузов культуры: первые результаты* / С.В. Буцык // *Вестник Челяб. гос. акад. культуры и искусств*. – 2007. – № 2. – С. 47–48.

Поступила в редакцию 15 марта 2010 г.

КЛАСТЕРНЫЙ МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ УЧЕБНЫХ МОДУЛЕЙ

М.С. Кадацкая

CLUSTER METHOD OF EDUCATIONAL MODULES FORMATION

M.S. Kadatskaya

В статье рассматривается решение задачи формирования библиотеки модулей вуза. Предложенный алгоритм позволяет сформировать минимальное для конкретного вуза множество модулей, что позволит проектировать основные образовательные программы с минимальными трудозатратами и уменьшить для преподавателей трудоемкость формирования УМК.

Ключевые слова: базовый модуль, библиотека модулей, кластер, классификация.

The paper discusses the solutions for forming the module library of a higher educational institution (HEI). The algorithm proposed allows forming the minimal number of modules specifically for the given HEI. This allows designing the main study programs with minimal labor costs and decreasing labor intensity of the teaching staff for forming educational-methodological complexes.

Keywords: basic module, module library, cluster, classification.

Введение

В Федеральные государственные образовательные стандарты (ФГОС) третьего поколения входят дисциплины, которые характеризуются содержанием, трудоемкостью (количество зачетных единиц) и набором компетенций. ФГОС предоставляет вузам свободу при формировании образовательных программ, составление примерных образовательных программ производится разными УМО.

Это приводит к наличию в образовательных программах вуза значительного числа дисциплин, незначительно различающихся друг от друга либо значительно совпадающих.

При включении дисциплины в основную образовательную программу (ООП), а именно в учебный план необходимо рациональное распределение по семестрам и правильная последовательность изучения, т. е. происходит разбиение дисциплин на «базовые модули» и формируются учебные модули ООП.

В данной статье под базовым модулем понимается логически завершенная единица учебного материала, как совокупность содержательных, методических, организационных, в том числе контрольных, и технологических мероприятий, относящихся к одной дисциплине [1]. Базовый модуль может входить в состав нескольких учебных модулей ООП. Учебный модуль может состоять из одного или нескольких базовых модулей, один учебный

модуль может входить в разные ООП. Трудоемкость учебного модуля 2–7 зачетных единиц.

1. Описание модулей

Базовый модуль М имеет следующие атрибуты:

- шифр SN;
- название N;
- трудоемкость T;
- содержание S;
- уровень (базовый, повышенный, продвинутый, промежуточный) U;
- цели (компетенции) K;
- шифр порождающей дисциплины PN;
- образовательная программа.

Вводится промежуточное понятие обучающий модуль, которое появляется согласно одному из базовых требований теории обработки информации: информация, которая формируется в разное время и различными участниками процесса должна быть разделена.

Обучающий модуль:

- базовый модуль;
- входные требования (знания и компетенции на которых построен);
- тип (с привязкой к семестру, без привязки по семестру);
- карта содержания (модули предшествующие и следующие, желательный семестр);
- организационные требования;
- контрольные мероприятия.

Обучающий модуль типО:

- обучающий модуль;
- теоретическое / практическое обучение.

Обучающий модуль типТ:

- обучающий модуль;
- технологические требования;
- теоретическое / практическое / лабораторное

обучение.

Учебный модуль имеет следующие атрибуты:

- шифр;
- название;
- список обучающих модулей, входящих в него;
- тип (обязательный с привязкой к семестру,

обязательный без привязки по семестру);

- кафедра;
- преподаватель (гарант модуля);
- цели (компетенции);
- тип (базовый, профессионально-ориентированный...);
- результаты обучения и критерии оценки результатов.

Пример частичного описания базовых модулей $M_i(SH_i, N_i, S_i, T_i, U_i)$:

• $M1 = (1, \text{Аналитическая геометрия и линейная алгебра, Линейная алгебра с элементами аналитической геометрии, 2, 1})$;

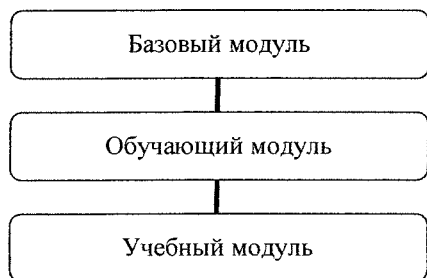
• $M2 = (2, \text{Математический анализ, \{пределы, дифференциальное и интегральное исчисление функций одной и нескольких переменных, числовые и функциональные ряды, гармонический анализ, кратные криволинейные и поверхностные интегралы, теория поля\}, 11, 1})$;

• $M3 = (3, \text{Аналитическая геометрия, Аналитическая геометрия, 1, 2})$;

• $M4 = (4, \text{Линейная алгебра, Линейная алгебра, 2, 2})$.

На более низких уровнях обучения несколько разделов более продвинутого уровня могут быть объединены в один базовый модуль, например модули разных уровней M_1, M_3, M_4 . Множество S формируется до начала разбиения множества D , например, на основании Требований к структуре циклов основных образовательных программ выделяется для базового уровня 10 значений для Математики, могут выделяться с помощью экспертных оценок.

Данные спецификации удобно вписываются во фреймовое представление, показанное на рисунке.



Иерархии фреймов

При наличии в вузе различных образовательных программ возникают следующие проблемы:

• появление модулей, незначительно отличающихся друг от друга (человеческий фактор при создании ФГОСов и ООП);

• требования унификации учебных планов при организации учебного процесса;

• использование модульной системы при обучении требует конкретного и ясного описания модуля для преподавателя, тьютора и студента;

• необходимо оптимизировать затраты учебно-методического и материально-технического обеспечения модулей.

Каждая дисциплина представляется в виде набора основных разделов, каждый из которых может быть представлен с одним из 3 уровней сложности. Таким образом, заданы возможные варианты преподавания основных разделов дисциплины (базовые модули) и в соответствие каждой образовательной программе ставится перечень тем с соответствующим уровнем представления материала.

Таким образом, сформировано множество базовых модулей. В общем случае сформированное множество является избыточным, так как часть базовых модулей может быть никогда не выбрано. Каждый базовый модуль характеризуется наличием входных требований, необходимых для изучения, уровнем, содержанием, общей трудоемкостью.

2. Алгоритм

Пусть нам задано некоторое множество $D = \{D_{ij}\}$, содержащее объекты «дисциплины ООП», где i – количество ООП вуза, а j – количество дисциплин в ООП _{j} вуза. Данное множество порождает множество M , содержащее объекты «базовые модули». Пусть через U обозначено множество учебных модулей. Множество M содержит примеры, относящиеся к разным классам U_i .

Каждое множество содержит модули, часть из них может совпадать полностью или частично в связи с общими требованиями государственного стандарта к отдельным ООП. При проектировании образовательных программ в вузе вместо дисциплин вводятся учебные модули, причем вместо совпадающих модулей вводится один. Будем считать, что совпадающих модулей нет, и обозначим сформированное множество как U' . Тогда мощность множества U' равна количеству модулей по всем образовательных программах вуза.

Вся дисциплина представляет последовательность из $n+1$ базовых модулей, где при изучении n базовых модулей изучаются общие разделы дисциплины и приобретаются все общенаучные компетенции (большинство общих компетенций ОК и ПК), а в ходе изучения базового модуля $n+1$ приобретаются такие компетенции, как:

• способность обосновывать правильность выбранной модели, сопоставляя результаты экспериментальных данных и полученных решений;

- готовность использовать математические методы обработки, анализа и синтеза результатов профессиональных исследований;

- способность демонстрировать базовые знания в области естественнонаучных дисциплин и готовность использовать основные законы в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования;

- готовность выявить естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, и способностью привлечь для их решения соответствующий физико-математический аппарат.

То есть $n+1$ базовый модуль является коррекционным для углубленного изучения разделов дисциплины, выбранных «заказчиком».

В случае если два модуля имеют большую степень схожести, то они могут быть скорректированы, т. е. все различия будут перенесены в коррекционные блоки (модули).

Для бакалавров выделены гуманитарные и социально-экономические дисциплины, математические и естественно-научные дисциплины и профессиональные дисциплины. Таким образом, множество всех модулей можно представить как

$$D = D^{OGC3} \cup D^{MEN} \cup D^{PD} \cup D^{FTD}$$

где D^{OGC3} – множество всех модулей блока ОГСЭ всех образовательных программ;

D^{MEN} – множество всех модулей блока ЕН всех образовательных программ;

D^{PD} – множество всех модулей блока ОПД всех образовательных программ;

D^{FTD} – множество всех модулей блока ФТД всех образовательных программ.

Множества модулей D^{OGC3} , D^{MEN} , D^{PD} , D^{FTD} содержат модули всех образовательных программ. Мощность множества определять как количество дисциплин в каждом блоке

$$P(D) = P(D^{OGC3}) + P(D^{MEN}) + P(D^{PD}) + P(D^{FTD}),$$

где $P(D^{OGC3})$, $P(D^{MEN})$, $P(D^{PD})$, $P(D^{FTD})$ – мощность множеств соответствующих блоков дисциплин.

Например, по блоку ОГСЭ единые требования федерального государственного образовательного стандарта ко всем инженерным направлениям (специальностям), в худшем случае общие в рамках направления, что позволит уменьшить количество модулей при исключении совпадающих модулей. Пусть k – число ООП вуза и будем считать, что направлений 11 , тогда при модульном построении программ

$$P(U^{OGC3}) = P(U^{OGC3})/k \cdot 11,$$

где множество U – множество учебных модулей из которого исключены совпадающие. Несколько меньше совпадение в блоке МЕН, еще меньше совпадений в блоке ПД.

Определим требования к нахождению

$$U_{\min} = \min U = \min (U^{OGC3} \cup U^{EN} \cup U^{OPD} \cup U^{CD} \cup U^{DC} \cup U^{FTD}).$$

Цель: проведение классификации U для построения минимального по размеру множества U_{\min} .

Критериями разбиения множества M служат атрибут «трудоемкость» T и принадлежность множеству S , где S – содержание существующих базовых модулей.

Атрибут $T \in [t_1, t_2]$, где t_1 – минимальная граница трудоемкости базового модуля, которая выбирается исходя из опыта методической работы вуза и требований к формированию базовых модулей, в данной работе $0,5$, t_2 – трудоемкость дисциплины либо максимальный размер учебного модуля – 7 , относительная погрешность разбиения в работе $0,5$.

Множество модулей не имеет «правильной» классификации до того, как будет принято решение о построении оптимальной системы ООП, поэтому не представляется возможности правильно построить обучение.

Ограничения при проведении классификации:

- классы характеризуются дискретными значениями;
- эталонных образцов до момента начала классификации нет;
- каждый узел может иметь произвольное количество потомков;
- наглядность результатов классификации обязательна для оценки экспертом;
- принадлежность к классу подтверждается при совпадении списка базовых модулей.

Поэтому, использовать стандартные алгоритмы не представляется возможным. Цель: сформировать множество учебных модулей для Гуманитарного, социального и экономического цикла (ГСЭ), Математического и естественно-научного цикла (МЕН), Профессионального цикла (П); минимизировать количество классов, содержащих менее 3 учебных модулей.

Введем определения.

Группа состояний объекта, образующих в пространстве описаний компактную в некотором смысле область, называется кластером [2]. Реализация метода кластеризации в интеллектуальной системе определяется взаимным пространственным расположением кластеров в пространстве. Если кластеры, соответствующие разным классам, разнесены достаточно далеко друг от друга, можно воспользоваться классификацией по какой-либо из метрик.

Тип программы (направление) будем считать кластером первого типа: педагогика, экономика и управление, культура и искусство, гуманитарные науки, естественные науки и математика, строительство и архитектура, машиностроение, компьютерные науки, приборостроение, связь и т. д. Данный тип является искусственным, но так как определен законодательно и принадлежность к нему определяет одинаковые компетенции по вышеописанным блокам, то это можно отнести к естественным законам на данном временном этапе

проектирования программ. Кластеры первого типа не пересекаются.

Тип дисциплины, кластер второго типа, кластеры не пересекаются, – обобщенный раздел для группировки дисциплин и разделов: например, тип 1: «Математика»: «Математика», «Линейная алгебра», «Алгебра и геометрия» и т. д., тип 2: «Физика»: «Физика», «Оптика», «Термодинамика» и т. д. Тип кластера также можно отнести к естественным.

Кластер третьего типа, по которому проводится классификация – учебный модуль. Имеет размер 3–7, величина кластера $1/e$, соответствует академической свободе вуза 20 %.

Хорошо известно, что для любого заданного разбиения объектов на группы и любого положительного числа $\epsilon > 0$ можно указать метрику такую, что расстояния между объектами из одной группы будут меньше ϵ , а между объектами из разных групп – больше $1/\epsilon$. Тогда любой разумный алгоритм кластеризации даст именно заданное разбиение [3].

Определение. Модули U_1 и U_2 принадлежат одному классу и равны $U_1 = U_2$, если $S_1 = S_2$, $T_1 = T_2$, $I_1 = I_2$.

При разбиении может быть создана особая ситуация:

Дисциплины различаются только одним базовым модулем U_j' , $i = 1 \dots n$. Данная ситуация разрешается двумя способами: разбиение принимается или в модуль заменяется $U_j' \leftarrow U_1' \cup U_2'$, где U_1' – минимальный по трудоемкости модуль, и U_2' – коррекционный модуль, который позволяет изучить раздел более углубленно, $S_1' \subset S_i$, $S_2' = S_i \cap S_1'$. Степень соответствия дисциплин не менее 80 %.

Введем обозначения.

Учебные модули U : $U_j = \{U_{ij}(S_{ij}, T_{ij}, I_{ij})\}$, где T_{ij} – трудоемкость, S_{ij} – содержание, I_{ij} – уровень.

$K_j(PP_j, PD_j, PM_j) = \{U_j\}$ – класс со свойствами «тип программы» и «тип дисциплины», «модуль», причем $\forall i, j K_j(PP_j, PD_j, PM_j) \neq K_i(PP_i, PD_i, PM_i)$, $PP_j \neq PP_i$, $PD_j \neq PD_i$, $PM_j \neq PM_i$, $PM_j = PM_i$, если $U_j = U_i$.

$P = (K_j(PP_j, PD_j, PM_j))$ – мощность класса.

$U_j \supseteq D_j$ – учебные модули дисциплины D_j .

Алгоритм формирования библиотеки модулей.

1. Вводим классы с признаками «тип программы», «тип дисциплины», «модуль» $U_j(PP_j, PD_j, PM_j)$.

2. Проводим классификацию учебных модулей.

3. Проводим унификацию и заменяем все учебные модули одного класса на модуль из этого класса с минимальным номером: $\forall i, j$ если $U_k(PP_k, PD_k, PM_k) \in K_j(PP_j, PD_j, PM_j)$ и $U_i(PP_i, PD_i, PM_i) \in K_j(PP_j, PD_j, PM_j)$ и $U_k(PP_k, PD_k, PM_k) = U_i(PP_i, PD_i, PM_i) \Rightarrow \forall i > k U_i = U_k$.

4. Определяем количество модулей каждого класса: $P = (K_j(PP_j, PD_j))$.

5. Находим классы $K' = K_j(PP_j, PD_j)$, $P = (K_j(PP_j, PD_j)) < 4$.

Проверяем на наличие ошибки 1 разбиения (80 % схожести для классов с одним типом программы и дисциплины), если она есть, проводим коррекцию модулей дисциплин и повторяем пп. 2–4 для скорректированных дисциплин; иначе классификация проведена успешно.

Заключение

Алгоритм рекомендуется использовать для базы учебных планов и модулей, что позволит частично автоматизировать процесс формирования новых учебных планов.

Предложенный алгоритм позволяет формализовать процесс формирования блоков учебных планов в соответствии с требованиями, заданными ФГОС. Ограничения, заданные в математической модели, не затрагивают показатели лицензии: лицензионную численность и количество реализуемых направлений. Так как приведенные алгоритмы не зависят от количества программ и укрупненных групп направлений (специальностей), реализуемых в вузе, их можно использовать без ограничений для формирования ООП в любом вузе.

Литература

1. Методические рекомендации по разработке проектов Федеральных государственных образовательных стандартов высшего профессионального образования. Проект. – М.: Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов; Президиум Координационного совета УМО и НМС высшей школы, 2007. – 30 с.
2. Классификация и кластер / под ред. Дж. Вэн Райзина; пер. с англ. П.П. Кольцова; под ред. Ю.И. Журавлева. – М.: Мир, 1980. – 388 с.
3. Орлов А.И. Нечисловая статистика. – М.: МЗ-Пресс, 2004. – <http://www.aup.ru/books/m162/>

Поступила в редакцию 6 апреля 2010 г.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВРЕМЕННОГО РЯДА С УЧЕТОМ ХАОТИЧЕСКОЙ КОМПОНЕНТЫ

Н.А. Кожихова, В.И. Ширяев

TIME SERIES FORECASTING USING CHAOTIC COMPONENT

N.A. Kozhikova, V.I. Shiryaev

Представлена модель хаотического ряда, основанная на разложении процесса по системе ортогональных функций. Приведен пример прогнозирования потребления электроэнергии с учетом хаотической компоненты.

Ключевые слова: прогнозирование, хаотический ряд, хаотический базис.

The model based on orthogonal function decomposition is submitted for chaotic time series. The example describes forecasting of electric power consumption series with the chaotic component.

Keywords: forecasting, chaotic series, chaotic basis.

Введение

Проблема моделирования и прогнозирования процессов, обладающих признаками детерминированного хаоса, весьма актуальна для многочисленных приложений [1, 2]. Особый интерес представляют подходы, позволяющие извлекать информацию из коротких временных рядов [3], так как существующие подходы к прогнозированию хаотических рядов (сингулярный спектральный анализ, нейронные сети, авторегрессионные модели) требовательны к длине ряда [4]. Работа продолжает исследования [5, 6].

1. Постановка задачи

Рассматривается процесс y_k , $k = 1, \dots, N$, обладающий признаками детерминированного хаоса:

$$y_k = x_k + \varepsilon_k, \quad k = 1, \dots, N, \quad (1)$$

где ε_k – нормально распределенные остатки с нулевым средним и неизвестной дисперсией. Критерии отнесения рядов к хаотическим [2, 5, 6]: антиперсистентность (показатель Херста $0 < H < 0,5$ или индекс фрактальности $0,5 < \mu < 1$), быстро спадающая автокорреляционная функция, спектр мощности, сосредоточенный в низкой полосе частот. Решение задачи прогнозирования предполагает нахождение оценок

$$y_{N+1} = x_{N+1}, \quad y_{N+2} = x_{N+2}, \dots \quad (2)$$

2. Разложение по хаотическому базису

Процесс y_k предлагается разложить по системе ортогональных функций [5]. Для x_k будем искать представление в виде линейной комбинации хаотических функций:

$$x_k = \sum_{i=1}^m \alpha_i x_{ik}, \quad k = \overline{1, N}, \quad (3)$$

где x_{ik} , $i = \overline{1, m}$, $k = 1, 2, \dots$ образуют систему базисных функций, заданных в моменты времени $k = 1, 2, \dots$; α_i – весовые коэффициенты (константы) $i = \overline{1, m}$.

Задача сводится к выбору системы ортогональных функций x_{ik} , $i = \overline{1, m}$:

$$\sum_{k=1}^N x_{cik} x_{cjk} = 0, \quad \forall i \neq j \quad (4)$$

и коэффициентов α_i , $i = \overline{1, m}$ по реализации y_k , $k = \overline{1, N}$. В качестве базисных могут выступать функции, порождающие известные нелинейные отображения. В частности, это [5, 6] треугольные отображения

$$x_{k+1} = \begin{cases} 2r x_k, & 0 \leq x_k \leq 1/2; \\ 2r(1-x_k), & 1/2 < x_k \leq 1; \end{cases} \quad 1/2 \leq r \leq 1, \quad k = \overline{1, N}, \quad (5)$$

логистические отображения

$$x_{k+1} = \lambda x_k (1 - x_k), \quad x_1 \in (0, 1), \quad \lambda \in (3, 6; 4), \quad k = \overline{1, N}, \quad (6)$$

Кожихова Наталия Андреевна – аспирант кафедры прикладной математики ЮУрГУ; nk0618@gmail.com

Ширяев Владимир Иванович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики ЮУрГУ; vis@prima.susu.ac.ru

Kozhikova Natalia Andreevna – postgraduate student of Applied Mathematics Department of SUSU; nk0618@gmail.com

Shiryaev Vladimir Ivanovich – PhD, professor, head of Applied Mathematics Department of SUSU; vis@prima.susu.ac.ru

функция Вейерштрасса

$$W(a, b, t) = \sum_{n=1}^{\infty} a^n \cos(b^n \pi t). \quad (7)$$

Набор таких функций с определенными параметрами может образовать базис [8]. Процедура разложения ряда по базису хаотических функций осуществляется на основе последовательного выделения хаотических компонент. Для нахождения параметров модели (3) были предложены два алгоритма. Первый алгоритм основан на определении постоянных параметров $\lambda_i, r_i, a_i, b_i, i = \overline{1, m}$ с помощью предварительно обученной на модельных данных трехслойной нейронной сети. Второй алгоритм заключается в определении параметров максимально коррелированных с рядом процессов из классов отображений, порожденных базисными функциями:

$$p_i = \arg \max_{p_i} c(y, x_i), \quad (8)$$

где p_i – параметры функции, порождающей отображение x_{ik} , c – корреляционная функция. После нахождения базиса определяются константы α_i :

$$[\alpha_1, \dots, \alpha_m] = \arg \min_{\alpha_i} \sum_{k=1}^N \left(x_k - \sum_{j=1}^m \alpha_j x_{jk} \right)^2. \quad (9)$$

Исследования на модельных данных показали, что второй подход работоспособен при большом уровне шума (предельное отношение сигнал / шум – 1 дБ).

3. Модельный пример

Рассмотренный подход применен к решению задачи прогнозирования модельного процесса $y_k, k = 1, \dots, 20$, порожденному суммой двух логистических отображений (с параметрами $x_{01} = 0,6$,

$\lambda_1 = 3,72, \alpha_1 = 0,65$ и $x_{02} = 0,23, \lambda_2 = 3,81, \alpha_2 = 0,3$) и аддитивным белым гауссовым шумом $\varepsilon_k \sim N(0, 0,1)$, отношение сигнал / шум составило 3 дБ. Для сравнения приведен результат, полученный с помощью модели ARFIMA [9]:

$$\psi(L)(1-L)^d x_k = \theta(L)\varepsilon_k, \quad d \in (0;1). \quad (10)$$

На рис. 1 приведены аппроксимация, прогноз ряда y_k и сравнение результатов, полученных с помощью модели (3) и модели (10).

Ошибка аппроксимации по модели ARFIMA составила 8,8 %, по модели (3) – 4,5 %. Ошибка прогнозирования на 10 шагов вперед составила для модели ARFIMA 16,38 %, для модели (3) – 5 %. При этом параметры логистических отображений найдены с погрешностью не более 1 %. Для сравнения, процедура, приведенная в [7], позволяет найти параметры логистических отображений при отношении сигнал/шум не менее 20 дБ.

4. Пример прогнозирования ряда потребления электроэнергии

Модель временного ряда потребления электроэнергии:

$$y_k = y_k^T + y_k^S + \xi_k, \quad k = \overline{1, N}, \quad (11)$$

где y_k^T – компонента тренда, y_k^S – сезонная компонента, ξ_k – остатки.

Подходы к прогнозированию компоненты тренда и сезонной компоненты рассмотрены в [8]. Остатки модели (11) рассматриваются как шум, случайные нормально распределенные величины $\xi_k \sim N(0, \sigma^2)$. Однако анализ остатков позволяет предположить, что ряд ξ_k является детерминированным хаосом. Индекс фрактальности для ряда ξ_k равен 0,67, что соответствует антиперси-



Рис. 1. Аппроксимация и прогноз модельного ряда

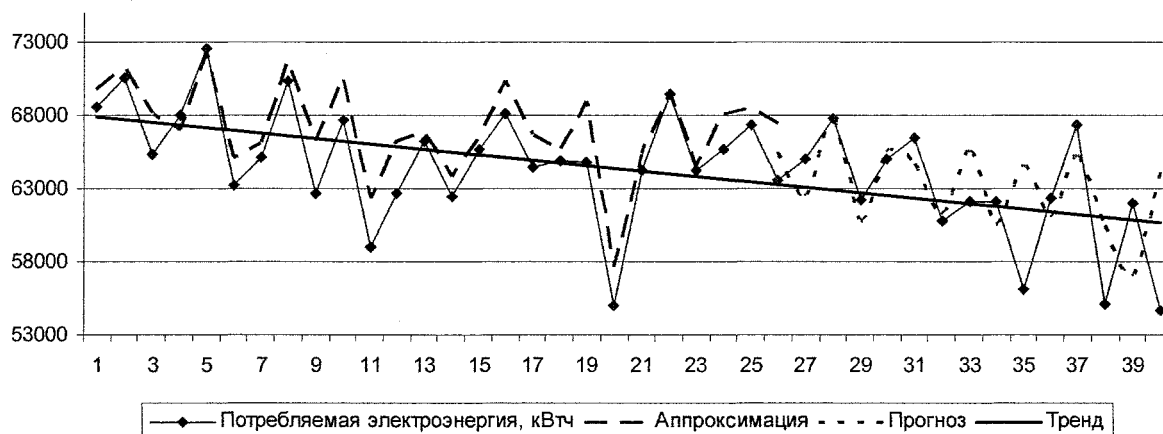


Рис. 2. Аппроксимация и прогноз ряда потребления электроэнергии

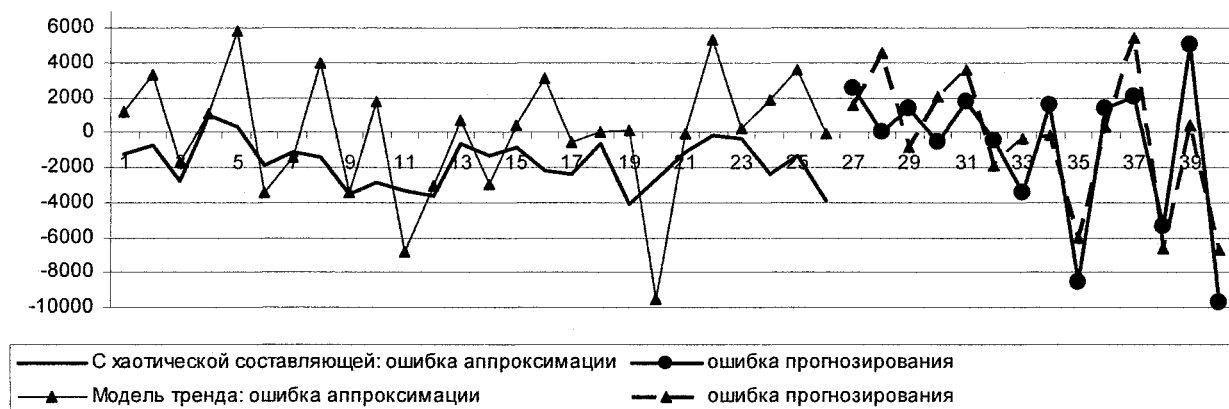


Рис. 3. Сравнение ошибок аппроксимации и прогнозирования

стентному процессу (индекс фрактальности для белого шума равен 0,5).

Для построения прогноза ряда ξ_k построена модель вида (3) с количеством слагаемых $m = 3$ для $k = 1, \dots, N$. Прогноз ряда ξ_k с допустимой ошибкой не более 5 % может быть получен на 5 шагов вперед. Прогноз ξ_k включается в модель (11) наряду с прогнозом y_k^T, y_k^S .

Включение в прогноз хаотической составляющей для данного ряда уменьшает среднюю ошибку прогноза на 5 шагов вперед с 16,5 % до 4,8 %, то есть в 4 раза. Результаты приведены на рис. 2, 3.

Заключение

Представленная процедура позволяет аппроксимировать хаотический временной ряд, разложив его на сумму антиперсистентных процессов. Важной особенностью решаемой задачи является малая длина выборки ($N < 25$). Полученные результаты могут найти применение для прогнозирования реальных хаотических процессов, повышения точности прогноза, а также в решениях задач фильтрации.

Литература

1. Статистические свойства динамического хаоса / В.С. Анищенко, Т.Е. Вадивасова, Г.А. Окрокверцхов, Г.И. Стрелкова // Успехи физических наук. – 2005. – Т. 175, № 2. – С.163–179.
2. Иванов, В.В. Прогнозирование детерминированных и хаотических временных процессов с помощью нестационарного сингулярно-спектрального анализа / В.В. Иванов, А.В. Крынев, Г.В. Лукин // Науч. сессия НИЯУ МИФИ-2006: сб. науч. тр. – М.: НИЯУ МИФИ, 2006. – С. 38–39.
3. Дубовиков, М.М. Размерность минимального покрытия и локальный анализ фрактальных временных рядов / М.М. Дубовиков, А.В. Крынев, Н.В. Старченко // Вестник РУДН. – 2004. – Т. 3, № 1. – С. 81–95.
4. Истомин, И.А. К проблеме обработки временных рядов: расширение возможностей метода локальной аппроксимации посредством сингулярного спектрального анализа / И.А. Истомин, О.Л. Котляров, А.Ю. Лоскутов // Теоретическая и математическая физика. – 2005. – Т. 142, № 1. – С. 148–159.
5. Кожихова, Н.А. Нейронные сети и задачи прогнозирования хаотических рядов / Н.А. Кожихова

хова, В.И. Ширяев // Науч. сессия НИЯУ МИФИ-2010 XII Всерос. науч.-тех. конф. «Нейроинформатика-2010»: сб. науч. тр. в 2 ч. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – Ч. 2. – С. 122–130.

6. Ширяев, В.И. Финансовые рынки: нейронные сети, хаос и нелинейная динамика / В.И. Ширяев. – М.: Либроком, 2009. – 230 с.

7. Разделение хаотических сигналов / Ю.В. Андреев, А.С. Дмитриев, Е.В. Ефремова, В.И. Пусто-

войт // Доклады РАН. – 2000. – Т. 372, № 1. – С. 36–39.

8. Granger, C. W. J. *Essays in econometrics: collected papers of Clive W. J. / C. W. J. Granger.* – In 2 vol. Vol. 1. *Spectral analysis, seasonality, nonlinearity, methodology, and forecasting.* – Cambridge: Cambridge University Press, 2001. – 523 p.

9. Galbraith John W., Zinde-Walsh Victoria. *Autoregression-Based Estimators for ARFIMA Models.* – Montréal: Février, 2001. – 44 p.

Поступила в редакцию 6 апреля 2010 г.

ОПТИМИЗАЦИЯ СВЕТОФОРНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ

М.М. Ахмадинуров

OPTIMIZATION OF TRAFFIC LIGHT CONTROL USING THE PROGRAM OF TRAFFIC FLOW MODELING

M.M. Ahmadinurov

Рассмотрен метод, позволяющий повысить пропускную способность перекрестков дорожной сети города за счет оптимальной настройки цикла светофора. Метод, нахождения оптимального цикла светофора, базируется на разработанной автором программе. С помощью программы моделируется движение автомобильного потока через один регулируемый перекресток и путем перебора определяются наилучшие параметры светофора. В программе применяется микроскопическое моделирование, входные потоки автотранспорта моделируются как простейшие; используется упрощенная модель движения умного водителя (The Intelligent Driver Model, IDM).

Ключевые слова: транспортный поток, управление транспортными потоками, транспортная сеть, перекресток, светофор, микромоделирование, дорожный затор, автомобильная пробка, программа моделирования транспортных потоков.

The research work is directed to the solving for optimum traffic light parameters under the given car flow intensity. The method of solving an optimal cycle of traffic lights, is based on the author's developed the compute program. The program uses a microscopic simulation, applying a simplified version of the Intelligent Driver Model (IDM). The flow of cars is distributed under the exponential law.

Keywords: traffic flow, control of traffic flows, transport network, intersection, traffic light, microscopic models, traffic jam, program of traffic flow modeling.

Введение

Стремительный рост автопарка негативно сказывается на пропускной способности дорожной сети городов. Необходимо предпринимать меры, нацеленные на решение проблемы дорожных заторов. Мероприятия могут иметь как административный характер, так и заключаться в строительстве новых и реконструкции существующих дорог. Компьютерное моделирование позволяет оценивать эффективность планируемых работ, а также выявлять потенциально проблемные участки для принятия оперативных мер по их устранению.

В зарубежных странах достигнуты значительные успехи в разработке и применении современных программных комплексов, помогающих эффективно управлять транспортной сетью города. Примерами таких программных продуктов явля-

ются VISSIM (PTV 2003), AIMSUN/2, Paramics, MITSIMLab, CORSIM (US-DoT 1995).

В России ведутся научно-исследовательские работы, направленные на изучение транспортных потоков и на разработку программного обеспечения. Транспортная лаборатория ИрГТУ является разработчиком программы оптимизации светофорного регулирования «Светофор». Специалистами Института Системного Анализа РАН была разработана программа «TransNet» – программа моделирования транспортных потоков в сети крупного города. Специалистами компаний Solaris Development и AGA Group, Inc. разработан программный комплекс «Артерия 3.0».

Автор данной работы подошел к решению задачи моделирования транспортных потоков с изучения природы входящего потока автомобилей

[5, 6, 7], а затем на основе полученных данных была разработана имитационная компьютерная модель (программа моделирования) [1, 2], которая позволяет задавать входящий поток, максимально приближенный к реальному потоку автомобилей. С помощью программы можно изменять входящий поток, и фиксировать, как меняются выходные параметры системы: среднее время ожидания в очереди, средняя длина очереди и т. д. Полученные данные способствуют нахождению оптимального режима работы светофора. В статье будут подробно описаны возможности программы, а также рассмотрен пример нахождения оптимального цикла светофора.

1. Постановка задачи

Рассмотрим перекресток с равным числом пересекающихся полос. С каждой стороны перекрестка, на определенном расстоянии от него, начинают движение автомобили с известными интенсивностями $\lambda'_1, \lambda'_2, \lambda'_3, \lambda'_4$. Причем, направления движения 1 и 3 являются перпендикулярными по отношению к направлениям 2 и 4.

Введем следующие обозначения: T – продолжительность цикла светофора, τ_1 – продолжительность красного сигнала для первого направления движения (λ'_1, λ'_3), τ_2 – продолжительность красного сигнала для противоположного направления движения (λ'_2, λ'_4). Продолжительность желтого сигнала τ_0 установим равной 3 секундам, согласно [6].

Таким образом, продолжительность цикла светофора равна

$$T = (\tau_1 + \tau_0) + (\tau_2 + \tau_0) = \tau_1 + \tau_2 + 2\tau_0.$$

Необходимо определить, как нужно настроить параметры светофора τ_1 и τ_2 , чтобы пропускная способность во всех четырех направлениях была оптимальной.

Цикл светофора настроен оптимально, если $T_{\text{простой}} \rightarrow \min$ и $Q_{\text{очередь}} \rightarrow \min$. Приняты следующие обозначения $T_{\text{простой}}$ – среднее время простаивания автомобилей, т. е. сколько времени в среднем автомобиль не движется (скорость равна нулю) на данном дорожном участке. Другими словами, это временные потери водителей, возникшие с момента начала движения автомобиля до полного пересечения перекрестка. $Q_{\text{очередь}}$ – средняя длина очереди автомобилей, т. е. среднее количество автомобилей, скапливающихся перед перекрестком на красный сигнал светофора.

2. Описание программы

Разработанная автором программа [1, 2] предназначена для выполнения имитационного моделирования движения автотранспорта. Программа создана в среде разработки Borland Delphi 7. Программа позволяет конструировать небольшую дорожную сеть (несколько кварталов) с регулируемы перекрестками и «прогонять» по ней авто-

мобили. В качестве входных параметров задаются местоположения генерации автомобилей, интенсивность автомобильных потоков, параметры светофоров. На выходе программа возвращает пропускную способность каждого дорожного участка, вероятность возникновения пробки на участке, среднюю длину очереди на участке и другие параметры.

3. Функциональные возможности программы

Ниже перечислены основные функциональные возможности программы:

- загрузка карты с изображением дорог и перекрестков через файл, подготовленный в графическом редакторе;

- задание входного потока автомобилей в любом месте карты (имитация мест рождения транспортного потока: магазины, места работы и учебы и т. д.);

- моделирование проезда автомобилей через регулируемый перекресток. На входе задаются: интенсивность движения, границы красного и зеленого сигналов светофора. Программа вычисляет все варианты сигналов светофора и для каждого варианта выполняет прогон автомобилей. Все выходные параметры (длина очереди, среднее время задержки и т. д.) фиксируются в таблице;

- получение объединенных результатов для перекрестка в целом. Если задать четыре интенсивности (как на перекрестке), то программа вычислит объединенные результаты (среднеарифметические значения параметров: пропускная способность, длина очереди, среднее время задержки);

- ускорение вычислений. Программа позволяет смоделировать десятичасовой прогон автомобилей за 30 секунд реального времени (вычисления проводились на процессоре Intel Core Duo 1,6 Ghz);

- нахождение оптимальных режимов светофорного регулирования для одного перекрестка. Можно указать ограничения на ряд выходных параметров, программа отобразит только те результаты, которые удовлетворяют заданным условиям;

- сохранение результатов вычислений в MS Excel;

- вставка результатов вычислений из MS Excel в программу моделирования.

4. Входной поток автомобилей

Входной поток автомобилей задается с помощью, так называемых, *генераторов* (имитация мест рождения транспортного потока). Можно создать любое количество генераторов, у каждого указываются параметры: место создания автомобилей (x, y), интенсивность (*авто/мин*), направление движения и максимальная скорость автомобилей (*км/ч*). После чего генератор с заданной интенсивностью создает автомобили в указанном месте.

Результаты, полученные в работе автора [5], свидетельствуют о том, что реальный поток авто-

мобилей имеет показательное или близкое к нему распределение. Поэтому в программе временные интервалы между созданием автомобилей генерируются случайным образом по показательному распределению, интенсивность потоков задается через параметр λ . Ниже подробно описано как в программе задается показательное распределение.

Функция показательного распределения имеет вид [7]

$$F(x) = \begin{cases} 0, & x < 0; \\ 1 - e^{-\lambda x}, & x \geq 0. \end{cases}$$

Рассмотрим случай $x \geq 0$ и обозначим $y = F(x) = 1 - e^{-\lambda x}$, из данной формулы найдем x , получим

$$x = -\frac{\ln(1-y)}{\lambda},$$

где y – случайная величина, равномерно распределенная на отрезке $[0, 1]$; x – случайная величина, имеющая показательное распределение с параметром λ .

Используя данную формулу, можно получать выборочную совокупность, имеющую показательное распределение. Значение параметра y генерируется с помощью датчика случайных чисел – функции Random, которая возвращает непрерывную случайную величину, равномерно распределенную на заданном отрезке. В нашем случае $y \in [0; 1]$.

С помощью параметра λ задается интенсивность потока автомобилей, единица измерения авто/с. Для удобства использования в интерфейсе программы интенсивность автомобильного потока задается в авто/мин.

5. Модель движения автомобилей

В программе используется микроскопическая модель [1, 2] движения автомобилей. За основу взята модель умного водителя (The Intelligent Driver Model, IDM) [3, 4], в которую внесены некоторые упрощения.

Уравнение движения состоит из двух частей:

$$\dot{v} = \dot{v}_{speed} + \dot{v}_{brake},$$

где \dot{v}_{speed} – функция ускорения, \dot{v}_{brake} – функция торможения.

Уравнение ускорения автомобиля задается в виде

$$\dot{v}_{speed}(v_\alpha) = a \left[1 - \left(\frac{v_\alpha}{v_0} \right)^4 \right],$$

где a – максимальное ускорение, v_α – текущая скорость, v_0 – желаемая скорость (скорость, с которой автомобиль перемещался бы в свободном потоке).

Уравнение торможения автомобиля задается в виде

$$\dot{v}_{brake}(s_\alpha, v_\alpha) = \begin{cases} -a \left(\frac{s_0 + v_\alpha T}{s_\alpha} \right)^2, & s_\alpha \in [1, 10]; \\ 0, & s_\alpha > 10, \end{cases}$$

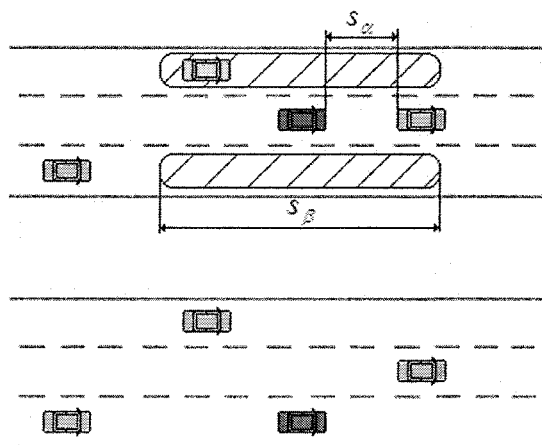
где s_α – дистанция до впереди едущего автомобиля (измеряется в метрах), s_0 – минимальное расстояние между автомобилями, которое сохраняется даже в пробке, T – желаемый временной интервал – время движения автомобиля со скоростью v_α до столкновения с впереди едущим автомобилем, v_α – текущая скорость.

Таким образом, автомобиль плавно набирает скорость от 0 до желаемой v_0 с вычисляемым ускорением \dot{v}_{speed} , которое зависит от скорости v_α в данный момент времени и от заданного максимального ускорения a . Снижение скорости в случае возникновения препятствия перед автомобилем осуществляется с помощью функции \dot{v}_{brake} , которая зависит от расстояния до препятствия s_α , скорости автомобиля v_α , от параметров T и s_0 .

Стохастичность моделирования достигается за счет того, что параметры, характеризующие индивидуальные особенности стиля вождения водителя, вычисляются отдельно для каждого автомобиля случайным образом в соответствии с равномерным распределением с разбросом 20%. В качестве исходных значений принимаются $T = 1,5$ с, $s_0 = 1,5$ м, $a = 2$ м/с².

6. Модель обгона

Каждый автомобиль при необходимости может менять полосу движения, при этом проверяется возможность безопасного осуществления перестроения. На рисунке изображена схема перестроения автомобиля.



Перестроение автомобиля в правый ряд

Как только расстояние s_α до впереди едущего автомобиля становится меньше допустимого,

предпринимается попытка сменить ряд. Сначала проверяется можно ли перестроиться в левый ряд, если нельзя (маневр приведет к резкому торможению других транспортных средств или к аварии), тогда проверяется возможность перестроиться в правый ряд. Параметр s_B означает дистанцию безопасности, которая проверяется перед осуществлением перестроения автомобилем. Также s_B отвечает за целесообразность перестроения в новый ряд, так как проверяется наличие в новом ряду места для движения вперед.

7. Метод нахождения оптимального цикла светофора

Перейдем к задаче определения оптимальных параметров светофора. Решать задачу будем с помощью описанной выше программы моделирования транспортных потоков, для этого нужно выполнить следующие действия.

1. Задать в программе входные параметры:

– габариты перекрестка, количество полос движения;

– интенсивности транспортных потоков $\lambda'_1, \lambda'_2, \lambda'_3, \lambda'_4$;

– минимальные и максимальные значения сигналов светофора и шаг изменения.

2. Запустить прогон автомобилей через перекресток. На этом шаге программа будет моделировать движение автомобилей через перекресток, изменяя при этом значения параметров светофора. В результате прогона будет выполнен перебор всех заданных значений сигналов светофора (см. 1-й шаг). Выходные параметры (пропускная способность перекрестка, среднее время жизни автомобиля, среднее время задержки автомобиля, длина очереди, общее количество автомобилей в системе в единицу времени) для каждого значения параметров светофора фиксируются в таблице.

3. Задать условия оптимальности. Чтобы найти оптимальные значения сигналов светофора τ_1 и τ_2 , нужно задать допустимые значения для параметров $T_{\text{простой}}$ и $Q_{\text{очередь}}$:

– $Q_{\text{очередь}}$, средняя по всем направлениям;

– $Q_{\text{очередь}}$, максимальная в одном из направлений;

– $T_{\text{простой}}$, среднее по всем направлениям;

– $T_{\text{простой}}$, максимальное в одном из направлений.

При этом программа произведет фильтрацию выходных параметров, полученных на шаге 2, и отобразит только те, результаты, которые удовлетворяют заданным условиям.

– Выбрать оптимальные значения параметров светофора. На данном шаге необходимо самостоятельно выбрать значения τ_1 и τ_2 из таблицы оп-

тимальных значений, предложенных программой на шаге 3.

Рассмотрим пример нахождения оптимального цикла светофора для заданных интенсивностей транспортных потоков. Пусть нам известны четыре интенсивности входных потоков (авто/мин): $\lambda'_1 = 10, \lambda'_2 = 12, \lambda'_3 = 8, \lambda'_4 = 15$. Упростим вычисления – из представленных четырех интенсивностей выберем две максимальные $\lambda_1 = \max\{\lambda'_1, \lambda'_3\} = 10$, $\lambda_2 = \max\{\lambda'_2, \lambda'_4\} = 15$. λ_1 и λ_2 являются интенсивностями конкурирующих (перпендикулярных) направлений движения.

С помощью программы найдем оптимальные значения параметров светофора: τ_1, τ_2 – продолжительность красного и зеленого сигналов. Для этого выполним описанные выше шаги.

1. Введем в программу входные параметры. Рассмотрим перекресток с равным числом пересекающихся полос, количество полос в каждом направлении равно двум. Тип перекрестка: простой – без левых поворотов и с двухфазным управлением. Определение такой разновидности перекрестка представлено в работе [8]. Расстояние от места генерации автомобилей до перекрестка будет равным 170 метрам. Максимальная скорость движения автомобилей равна 60 км/ч. Габариты автомобилей: длина 4 м, ширина 2 м. Зададим интервалы изменения длин фаз от 10 до 60 с, с шагом 5 с.

2. Запустим прогон автомобилей. Для каждого значения сигналов светофора программа будет моделировать движение автомобилей через перекресток в течение 10 часов. За счет ускорения десятичасовой прогон автомобилей выполняется за 30 секунд реального времени (зависит от процессора компьютера). После выполнения всех вычислений в результирующей таблице сохраняются выходные параметры для 121-го варианта настройки светофора.

3. Зададим условия оптимальности. После выполнения всех вычислений программа выдает диапазоны изменения выходных параметров, проанализировав которые можно задать ограничения или оптимальные значения для необходимых выходных параметров. Ниже в квадратных скобках указаны интервалы изменения параметров, полученные после прогона автомобилей. Задача исследователя указать значения из предлагаемых диапазонов. Например, укажем следующие значения:

– $Q_{\text{очередь}}$, средняя по всем направлениям = 7 авто/мин [от 5,99 до 33,61];

– $Q_{\text{очередь}}$, максимальная в одном из направлений = 10 авто/мин [от 6,13 до 63,90];

– $T_{\text{простой}}$, среднее по всем направлениям = 12 с [от 7,05 до 288,76];

– $T_{\text{простой}}$, максимальное в одном из направлений = 13 с [от 8,60 до 575,45].

4. После ввода параметров оптимизации, из 121-го варианта останется только 2. С учетом других выходных параметров (пропускная способность автомобилей в цикл, среднее количество автомобилей находящихся в системе) выбираем оптимальные параметры светофора: $\tau_1=30$ с, $\tau_2=25$ с (для направлений с интенсивностями λ'_1, λ'_3).

8. Практическое приложение результатов

Созданная имитационная компьютерная модель позволяет анализировать работу реального перекрестка при различных значениях входных параметров и находить оптимальный режим работы светофора.

Особенность программы заключается в том, что программа позволяет загружать перекресток любого размера и с любым количеством полос движения. В программе используется микроскопическая модель транспортного потока, что позволяет моделировать транспортные средства любых размеров (мотоциклы, легковые автомобили, автобусы и грузовые машины). Автомобили соблюдают безопасную дистанцию и способны при необходимости обгонять друг друга.

В программе вычисление изменения состояния системы выполняется с высокой точностью – 10 раз в секунду. В программе реализован механизм ускорения вычислений, который позволяет увеличить скорость моделирования движения автомобилей в 1000 раз. Полученные результаты можно скопировать в файл MS Excel и при необходимости вновь загрузить в программу для выполнения анализа.

Выводы

Цель данной работы была поставлена следующим образом: разработать метод нахождения оптимальных параметров светофора для заданных значений интенсивности входных потоков на перекрестке. В ходе выполнения работы была разработана программа моделирования транспортных потоков, которая позволяет задавать входные параметры (габариты перекрестка, число полос движения, интенсивности движения автомобилей) и получать все необходимые выходные параметры.

Также в программе можно задать параметры оптимизации, после чего программа выполнит отбор значений, соответствующих заданным параметрам. Все результаты можно скопировать в MS Excel, где построить необходимые графики, провести дальнейший анализ и выбрать оптимальный цикл светофора.

Следует отметить, что автомобили при пересечении перекрестка не совершали левый поворот, и на перекрестке не было пешеходов. Интенсивность потока подъезжающих автомобилей предполагалась распределенной по показательному закону. Перечисленные условия в значительной степени повлияли на полученные результаты.

Литература

1. Ахмадинуров, М.М. Обзор методов моделирования транспортных систем / М.М. Ахмадинуров // *Транспорт Урала*. – 2009. – № 3 (22). – С. 39–44.
2. Ахмадинуров, М.М. Метод оптимальной настройки параметров светофора / М.М. Ахмадинуров, Г.А. Тимофеева // *Молодые ученые – транспорту-2009: сб. науч. тр.: в 3 ч.* – Екатеринбург: Изд-во УРГУПС. – 2009. – Ч. 1. – С. 254–261.
3. Treiber, M. Congested Traffic States in Empirical Observations and Microscopic Simulations / M. Treiber, A. Hennecke, D. Helbing // *Physical Review*. – 2000. – E 62. – P. 1805–1824.
4. Kesting, A. Agents for Traffic Simulation / A. Kesting, M. Treiber, D. Helbing // *Multi-Agent Systems: Simulation and Applications*, 2008.
5. Ахмадинуров, М.М. Определение типа распределения входящего потока автомобилей / М.М. Ахмадинуров // *Информационно-математические технологии в экономике, технике и образовании*. – 2009. – Вып. 5. – С. 86–92.
6. Кременец, Ю.А. Технические средства организации дорожного движения: учеб. для вузов / Ю.А. Кременец, М.П. Печерский, М.Б. Афанасьев. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. – 279 с.
7. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман. – М.: Высш. шк., 1998. – 479 с.
8. Капитанов, В.Т. Управление транспортными потоками в городах / В.Т. Капитанов, Е.Б. Хилажев. – М.: Транспорт, 1985. – 94 с.

Поступила в редакцию 21 марта 2010 г.

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ КОНТЕЙНЕРНЫХ ТЕРМИНАЛОВ

И.А. Русинов

MODELLING OF CONTAINER TERMINALS FUNCTIONING

I.A. Rusinov

Рассматривается формализация процессов переработки грузов на контейнерном терминале в виде разомкнутой системы массового обслуживания. Определяются вероятностные модели процессов переработки грузов в динамических и стационарных режимах.

Ключевые слова: формализация, каналы переработки грузов, аппарат массового обслуживания, моделирование, оптимизация.

There are formalization of processes of cargo handling on the container terminal as open-loop systems of mass service is considered. Probabilistic models of processes of cargo handling in dynamic and stationary modes are defined.

Keywords: formalisation, cargo handling channels, the device of mass service, modelling, optimization.

Введение

Морские контейнерные перевозки являются наиболее удобным и экономичным способом транспортировки грузов. Основным транспортным узлом в морских контейнерных перевозках является контейнерный терминал морского порта. В контейнерном терминале осуществляется переработка грузов, их складирование и распределение, а также перевозка грузов автотранспортом к ближайшим отправителям и потребителям.

В настоящее время, когда возможности экстенсивного роста большинства портов за счет городских территорий исчерпаны, необходимо производить оптимизацию работы, стремясь сократить сроки и повысить объемы обработки морских судов. Формализация задач оптимизации связана со сложностью вычислительных моделей процессов.

Допустим, что оптимизация проводится по критерию максимизации коэффициента использования причального фронта, характеризующего количество контейнерных грузов, переработка которых за единицу времени приходится на единицу длины причальной линии. Однако, максимальный коэффициент причального фронта достигается только при условии непрерывной замены одного судна другим, т. е. при стремлении коэффициента загрузки причала к единице. Это приво-

дит к постоянной очереди судов, т. е. при увеличении времени ожидания (простоя) судов. В результате, значительно ухудшается качество услуг судоводным кампаниям и во многих случаях может в соответствии с условиями контрактов быть причиной для выставления санкций.

Наиболее корректно задача решается в тех случаях, когда прибыль терминала может быть выражена через коэффициент использования причалов и среднего времени пребывания судов в очереди. Для решения этой задачи необходимо разработать вычислительную модель процесса переработки контейнерных грузов, на основе которой могут быть определены аналитические выражения для указанных вероятностных показателей качества. Применение аппарата массового обслуживания позволяет описать процесс обработки судов в контейнерном терминале с помощью линейных дифференциальных уравнений и во многих случаях представить выражения для вероятностных показателей процессов в аналитической форме.

1. Моделирование процессов переработки контейнерных грузов

Для описания процессов обработки судов на грузовых причалах контейнерных терминалов необходимо пользоваться вероятностными моделя-

ми. Процессы, протекающие при обработке судов на грузовых причалах, состоят в том, что исследуемые системы обработки грузов в случайные моменты времени переходят из одного состояния в другое. Возможные состояния системы обработки грузов будут:

E_0 – ни один причал не занят;

E_1 – занят 1 причал;

E_i – занято ровно i причалов;

E_S – заняты все S причалов;

E_{S+1} – заняты все S причалов. В очереди находится 1 судно;

E_{S+d} – заняты все S причалов. В очереди находится d судов.

Классическая теория обслуживания предусматривает исследование многоканальной системы, причем число приборов S равно числу каналов. Каждый канал может обслуживаться одним прибором независимо от других каналов (СМО без взаимопомощи), кроме того, каналы могут обслуживать все свободные приборы или часть свободных приборов (СМО с полной или частичной взаимопомощью). Интенсивность потока обработки грузов каждого канала μ_0 . Вероятности переходов системы из состояния E_n в состояние E_{n-1} , т. е. вероятность обслуживания одной заявки зависит от числа работающих каналов обслуживания. Результирующая интенсивность обслуживания в n -м состоянии определяется на основе принципа линейной суперпозиции, т. е. равна суммарной интенсивности всех приборов обслуживания и кратна расчетной интенсивности одного прибора μ_0 . Таким образом, результирующая интенсивность обслуживания в этом случае не может превышать $S\mu_0$, т. е. $\mu_p \leq S\mu_0$, а интенсивность обслуживания одним прибором μ_0 не меняется в зависимости от состояния СМО. Кроме того, процесс обслуживания считается непрогнозируемым и неуправляемым, т. е. администратору СМО не известно число заявок, которые в ближайшее время поступят в систему, и он не может в зависимости от состояния СМО менять интенсивности приборов обслуживания.

В реальных условиях функционирования контейнерного терминала процессы переработки грузов не адекватны указанным допущениям. Поэтому в реальных условиях результирующая интенсивность обработки грузов, как правило, не бывает кратной средней интенсивности обработки μ_0 и в отдельных случаях может превышать величину $S\mu_0$. Следует учитывать возможность изменений интенсивности отдельных приборов обслуживания в зависимости от состояния СМО. Поэтому одним из научных результатов проведенного исследования является развитие классической теории массового обслуживания с учетом возможности изменения значения интенсивности обслуживания отдельными приборами в зависимости от состояния

СМО. При этом элементы матрицы интенсивности остаются постоянными величинами.

Рассмотрим контейнерный терминал, включающий S грузовых причалов (каналов), на вход которого поступает простейший поток судов (заявок) с интенсивностью λ . Результирующая интенсивность обработки грузов в состоянии $E_n = r_n \mu_0$, где r_n – коэффициент интенсивности обработки может быть как целым, так и дробным числом. Как правило, когда заняты все причалы, т. е. $n \geq S$ предполагается что $r_n = \text{const}$ (обычно $r_n = \text{max}$). Однако, в отдельных случаях, интенсивность обработки грузов меняется и при $n > S$. В этом случае определяется состояние S' , при достижении которого результирующая интенсивность обработки остается постоянной.

Обозначим вероятность нахождения системы в состоянии E_n в момент времени t через $P_n(t)$, тогда всем состояниям системы будет соответствовать стохастический вектор

$$\bar{P}^T(t) = [P_0(t), P_1(t), P_2(t), \dots], \quad 0 \leq P_n(t) \leq 1,$$

$$n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Если последовательность указанных состояний представляет собой Марковский процесс (цепь Маркова), то каждой паре состояний E_n и E_v можно поставить в соответствие вероятность P_{nv} того, что система находится в состоянии E_v в момент времени $t + dt$, при условии что в момент времени t она находилась в состоянии E_n . Тогда можно записать следующее уравнение в матричной форме

$$\bar{P}^T(t + dt) = \bar{P}^T(t)J(t), \quad (1)$$

где $J(t)$ – стохастическая матрица переходов.

Осуществив операцию транспонирования над левой и правой частями стохастической матрицы переходов, получим

$$\bar{P}(t + dt) = J^T(t) \bar{P}(t), \quad (2)$$

где $J^T(t)$ – матрица, транспонированная к матрице переходов $J(t)$; $\bar{P}(t)$ – вектор столбец вероятностей размерностей $n \times 1$.

Представим (2) в виде

$$\bar{P}(t + dt) = [J^T(t) - E_n] \bar{P}(t) + \bar{P}(t).$$

Перенеся $\bar{P}(t)$ в левую часть и разделив левую и правую части на dt , получим

$$\bar{P}'(t) = R\bar{P}(t), \quad (3)$$

где $R = \frac{1}{dt} [J^T(t) - E_n]$ – матрица, которая имеет вид:

$$\begin{bmatrix} E_0 & E_1 & E_2 & E_3 & \dots & E_{S-1} & E_S & E_{S+1} \\ -\lambda & \lambda & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \mu_0 & -(\lambda + r_1\mu_0) & \lambda & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_2\mu_0 & -(\lambda + r_2\mu_0) & \lambda & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -(\lambda + r_{S-1}\mu_0) & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & r_n\mu_S & -(\lambda + r_S\mu_0) & \lambda \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & r_S\mu_0 & -(\lambda + r_S\mu_0) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Учитывая уравнение (1), получим следующие дифференциальные уравнения, представленные в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} P'(t) \\ I_{1 \times 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \\ I_{1 \times (m+1)} \end{bmatrix}; \quad \bar{P}(t) = \begin{bmatrix} RP(t) \\ \sum_{n=0}^m P(t) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $I_{1 \times 1}$ и $I_{1 \times (m+1)}$ – единичные подматрицы соответствующих размерностей.

Первые $n+1$ дифференциальных уравнений системы обработки грузов можно также представить в виде

$$\begin{aligned} P'_0(t) &= -\lambda P_0(t) + r_1\mu_0 P_1(t); \\ P'_n(t) &= -\lambda P_{n-1}(t) + (\lambda + r_1\mu_0)P_n(t) + \\ &+ r_{n+1}\mu_0 P_{n+1}(t), \quad n = 1, 2, 3 \dots \end{aligned} \quad (6)$$

Будем считать, что процесс обработки грузов является марковским случайным эргодическим, то есть по истечению достаточно продолжительного промежутка времени (теоретически при $t \rightarrow \infty$ вероятности состояний систем обработки грузов практически не зависят от того, в каком состоянии систем находилась в начальный момент времени при $t = 0$ и не зависит от самого промежутка времени. Такое допущение возможно, так как все потоки событий, переводящие систему из одного состояния в другое являются простейшими, т. е. все элементы матрицы R являются постоянными величинами.

Для определения значений вероятностей отдельных состояний в стационарных режимах необходимо приравнять к нулю значения производных состояний, т. е. левых частей системы уравнений (6), а также перенести в каждом уравнении одно из слагаемых в левую часть. В результате получим:

$$\begin{aligned} r_1\mu_0 P_1 &= \lambda P_0; \\ r_2\mu_0 P_2 &= (\lambda + r_1\mu_0)P_1 - \lambda P_0; \\ r_3\mu_0 P_3 &= (\lambda + r_2\mu_0)P_2 - \lambda P_1; \\ &\vdots \\ r_n\mu_0 P_n &= (\lambda + r_{n-1}\mu_0)P_{n-1} - \lambda P_{n-1}. \end{aligned} \quad (7)$$

Введем обозначение $\psi = \frac{\lambda}{\mu_0}$ и назовем ее при-

веденной плотностью потока прихода судов. Тогда, решив систему уравнений (7), получим следующее

выражение соотношений между стационарными значениями вероятностей отдельных состояний:

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{1}{r_1} \psi P_0; \\ P_2 &= \frac{1}{r_2} \psi P_1 = \frac{1}{r_1 r_2} \psi^2 P_0; \\ P_3 &= \frac{1}{r_3} \psi P_2 = \frac{1}{r_2 r_3} \psi^3 P_0; \\ P_n &= \frac{1}{r_n} \psi P_{n-1} = \frac{1}{\prod_{i=1}^n r_i} \psi^n P_0. \end{aligned} \quad (8)$$

Используя выражение (1), получим нормировочное условие

$$P_0 \left[\sum_{n=0}^D \frac{1}{\prod_{i=0}^n r_i} \psi^n \right] = 1, \quad (9)$$

где r_0 берется равным 1.

Нормировочное условие можно записать следующим образом:

$$P_0 \left[\sum_{n=0}^{S-1} \frac{\psi^S}{\prod_{n=1}^S r_n} + \frac{\psi^S}{\prod_{n=1}^{S-1} r_n} \sum_{d=0}^{\infty} \left(\frac{\psi}{r_{\max}} \right)^d \right] = 1, \quad (10)$$

где $d = n - S$, d – число судов, находящихся в очереди.

Определим среднее число судов, находящихся в очереди:

$$\bar{d} = \sum_{n=S+1}^{\infty} (n-S) P_n = \sum_{d=1}^{\infty} d P_{S+d} = P_S \sum_{d=1}^{\infty} d \left(\frac{\psi}{r_{\max}} \right)^d, \quad (11)$$

$$\text{где } P_S = P_0 \frac{\psi^S}{\prod_{i=1}^S r_i}. \quad (12)$$

Известно, что

$$\sum_{d=1}^{\infty} d \left(\frac{\psi}{r_{\max}} \right)^d = \frac{\frac{\psi}{r_{\max}}}{\left(1 - \frac{\psi}{r_{\max}} \right)^2}. \quad (13)$$

Подставить (12) и (13) в (11), получим выражение для среднего числа судов, находящихся в очереди:

$$\bar{d} = P_0 \frac{\psi^S}{\prod_{i=1}^S r_i \left(1 - \frac{\psi}{r_{\max}}\right)^2} = P_0 \frac{\psi^{S+1}}{\prod_{i=1}^{S-1} r_i (r_{\max} - \psi)^2}. \quad (14)$$

Определим среднее число судов, находящихся в терминале:

$$\bar{n} = \sum_{n=0}^{\infty} n P_n = \sum_{n=0}^S n P_n + \sum_{n=S+1}^{\infty} n P_n. \quad (15)$$

Рассмотрим второе слагаемое:

$$\sum_{n=S+1}^{\infty} n P_n = \bar{d} + \sum_{n=S+1}^{\infty} S P_n = \bar{d} + S \left(1 - \sum_{n=0}^S P_n\right).$$

Тогда среднее общее число судов в терминале

$$\bar{n} = \bar{d} + S - \sum_{n=0}^S (S-n) \frac{\psi^n}{\prod_{n=1}^S r_n} P_0. \quad (16)$$

Следует отметить, что независимо от значения ψ и S среднее число в терминале равно сумме среднего числа обрабатываемых судов и среднего числа судов, находящихся в очереди, т. е.

$$\bar{n} = \bar{n}_{\text{обр}} + \bar{d}.$$

Соответственно, среднее число судов, находящихся в обработке:

$$\bar{n}_{\text{обр}} = S - \sum_{n=0}^S (S-n) \frac{\psi^n}{\prod_{n=1}^S r_n} P_0. \quad (17)$$

Среднее время ожидания судна в очереди и среднее общее время пребывания судна в терминале определяются с помощью формул Литтла:

$$\bar{T}_{\text{ож}} = \frac{\bar{d}}{\lambda} = \frac{P_0}{\lambda} \frac{\psi^{S+1}}{\prod_{i=1}^{S-1} r_i (r_{\max} - \psi)^2}. \quad (18)$$

Среднее общее время пребывания судна в терминале:

$$\begin{aligned} \bar{T}_{\Sigma} &= \frac{\bar{n}}{\lambda} = \frac{\bar{d}}{\lambda} + \frac{S}{\lambda} + \frac{1}{\lambda} \left[S - \sum_{n=0}^S (S-n) P_n \right] = \\ &= \bar{T}_{\text{ож}} + \frac{1}{\lambda} \left[S - \sum_{n=0}^S (S-n) P_n \right]. \end{aligned} \quad (19)$$

Соответственно среднее время обработки одного судна:

$$\bar{T}_{\text{обр}} = \frac{1}{\lambda} \left[S - \sum_{n=0}^S (S-n) P_n \right]. \quad (20)$$

Для удобства преобразований в дальнейшем будем пользоваться средним приведенным временем ожидания и пребывания в терминале:

$$\bar{\tau}_{\text{ож}} = \bar{T}_{\text{ож}} \mu = \frac{\bar{d}}{\psi} \quad \text{и} \quad \bar{\tau}_{\Sigma} = \bar{T}_{\Sigma} \mu = \frac{\bar{d}_{\Sigma}}{\psi}. \quad (21)$$

На основе приведенных аналитических выражений вероятностных показателей была произведена оптимизация процессов переработки контейнерных грузов в стационарных режимах.

2. Техничко-экономические критерии оптимальности

Наиболее наглядным и обоснованным критерием оптимальности, как указывалось выше, является экономический критерий, характеризующий максимальную прибыль. Рассмотрим условия, при которых размер прибыли указанного показателя можно выразить через технические показатели качества процесса. Предполагается, что доходы контейнерного терминала от обработки грузов пропорциональна суммарному потоку λ , а следовательно и приведенной плотности потока ψ . Рассмотрим выражения для экономических показателей процесса обработки груза. Доход терминала за единицу времени (сутки) в соответствии с условием пропорциональности будет определяться выражением

$$\mathcal{E}_0 = C_0 \lambda = C'_0 \psi, \quad (22)$$

где C_0 – коэффициент, характеризующий средний доход терминала от переработки контейнерных грузов одного судна; $C'_0 = C_0 \mu$ – приведенный коэффициент, характеризующий средний доход переработки грузов за единицу времени.

Затраты терминала на обработку грузов можно условно разделить на три составляющие.

Первая составляющая затрат, связана с приведенными потерями судоходной компании, связанными с простоем судов:

$$\mathcal{E}_1 = C_1 \bar{d} = C_1 \psi \bar{\tau}_{\text{ож}}, \quad (23)$$

где C_1 – приведенная стоимость простоя судна за единицу времени (сутки).

Если учитывать не только время простоя, но и общее время пребывания судна в терминале:

$$\mathcal{E}_{1\Sigma} = C_1 \psi (\bar{\tau}_{\Sigma} - \bar{\tau}_{\text{н.обр}}),$$

где $\bar{\tau}_{\text{н.обр}}$ – приведенное нормированное время.

Если считать, что нормированное время обработки судна $T_{\text{обр}} = 1/\mu$, то приведенное время обработки $\bar{\tau}_{\text{обр}} = 1$.

Тогда выражение (23) можно представить в виде

$$\mathcal{E}_1 = C_1 (d - \psi). \quad (24)$$

Можно легко показать, что при отсутствии взаимопомощи затраты, определяемые по выражениям (23) и (24), совпадают. При наличии взаимопомощи $\mathcal{E}_{1\Sigma}$ чуть меньше чем \mathcal{E}_1 , так как среднее приведенное время обработки меньше единицы. Однако ввиду того, что коэффициент загрузки причалов в оптимальном режиме достаточно высок, разницы между \mathcal{E}_1 и $\mathcal{E}_{1\Sigma}$ достаточно мала, и

процесс оптимизации по указанным критериям дает практически одинаковые результаты.

Вторая составляющая затрат представляет собой приведенные расходы на содержание коллектива людей и комплекса технических средств, обеспечивающих выполнение работ:

$$\mathcal{E}_2 = C_2\lambda + C'_2(1-\varphi)\mu SK_{\text{пр}}, \quad (25)$$

где C_2 – расходы на непосредственное выполнение работ по переработке одного судна; $K_{\text{пр}}$ – коэффициент простоя, характеризующий относительные затраты при простое коллектива людей и комплекса технических средств; $\varphi = \psi/S$ – коэффициент загрузки причалов.

Первое слагаемое соответствует расходам, возникающим при непосредственном производстве работ, а второе – расходам при простое оборудования.

Выражение (25) удобно представить в виде

$$\mathcal{E}_2 = C'_2\psi = C'_2\psi(1 - K_{\text{пр}}) + C'_2SK_{\text{пр}}, \quad (26)$$

где $C'_2 = C_2\mu$.

Третья составляющая затрат представляет собой приведенные затраты на сооружение и эксплуатацию причалов. Будем считать, что эти затраты пропорциональны числу причалов. Тогда

$$\mathcal{E}_3 = C_3S,$$

где C_3 – коэффициент, характеризующий приведенные затраты на содержание и эксплуатацию одного причала за единицу времени (сутки).

Соответственно суммарные приведенные затраты:

$$\mathcal{E}_2 = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3. \quad (27)$$

Если при определении первой составляющей затрат использовать выражение (23), то выражение

для прибыли терминала в единицу времени примет следующий вид:

$$\mathcal{E}_n = C'_0\psi S - C_1\psi S\tau_{\text{ож}} - C'_2\psi S(1 - K_{\text{пр}}) - C'_2SK_{\text{пр}} - C_3S = C''_0\psi S - C_1\psi S\tau_{\text{ож}} - C''_2S, \quad (28)$$

где $C''_0 = C'_0 - C'_2(K_{\text{пр}})$ и $C''_2 = C'_2K_{\text{пр}} - C'_3$.

На основе выражения для прибыли (28) могут быть сформулированы и решены различные задачи оптимизации процессов обработки на основе экономических критериев.

3. Оптимальное планирование работы терминала

Рассмотрим задачу оптимального планирования работы терминала при заданном числе причалов. Необходимо выбрать такую интенсивность потока прихода судов в порт (приведенную плотность потока), при которой величина прибыли в единицу времени (сутки) была бы максимальной. В основу оптимизации было положено выражение (28). Однако третье слагаемое в правой части (27) и часть второго слагаемого не зависят от приведенной плотности ψ , а остается постоянным. Поэтому при определении оптимального значения φ эти слагаемые могут быть отброшены. Кроме того, разделим оставшиеся слагаемые на величину C_1 и заменим ψ на φS . В результате получим:

$$\mathcal{E}'_n = \frac{C''_0}{C_1}\varphi S - d(\varphi, S); \quad (29)$$

$$C''_0 = C'_0 - C'_2(1 - K_{\text{пр}}).$$

Зависимости \mathcal{E}'_n от коэффициента загрузки φ при различных значениях C''_0/C_1 представляют собой унимодальные функции с сильным макси-

Таблица 1
Значения коэффициента загрузки без учета взаимопомощи

C''_0/C_1	S				
	3	4	5	6	7
0,5					0,6
0,6				0,6	0,61
0,7				0,6	0,62
0,8			0,6	0,62	0,64
0,9			0,6	0,63	0,65
1		0,6	0,61	0,64	0,66
2	0,62	0,66	0,68	0,7	0,72
3	0,66	0,7	0,72	0,74	0,75
4	0,69	0,73	0,75	0,76	0,78
5	0,72	0,75	0,77	0,78	0,79
6	0,73	0,76	0,78	0,79	0,8
7	0,75	0,77	0,79	0,8	0,81
8	0,76	0,78	0,8	0,81	0,82
9	0,77	0,79	0,81	0,82	0,83
10	0,78	0,8	0,81	0,83	0,83

Таблица 2
Значения коэффициента загрузки с учетом взаимопомощи

C''_0/C_1	S				
	3	4	5	6	7
0,5					0,65
0,6				0,65	0,66
0,7				0,65	0,67
0,8			0,65	0,67	0,69
0,9			0,65	0,68	0,7
1		0,65	0,66	0,69	0,71
2	0,67	0,71	0,73	0,75	0,77
3	0,71	0,75	0,77	0,79	0,8
4	0,74	0,78	0,8	0,81	0,83
5	0,77	0,8	0,82	0,83	0,84
6	0,78	0,81	0,83	0,84	0,85
7	0,8	0,82	0,84	0,85	0,86
8	0,81	0,83	0,85	0,86	0,87
9	0,82	0,84	0,86	0,87	0,88
10	0,83	0,85	0,86	0,88	0,88

мумом, который соответствует оптимальному значению φ . Рассмотрим оптимальные значения φ , для различных S , исходя из максимума прибыли, без учета и с учетом взаимопомощи (табл. 1, 2). Одномерная оптимизация осуществляется методом пропорционального поиска. Как видно из таблиц, результаты оптимизации незначительно отличаются друг от друга. Величина оптимального коэффициента загрузки причала в зависимости от соотношения C_0''/C_1 меняется в пределах от 0,65 до 0,88. В большинстве практических случаев C_0''/C_1 можно считать большим пяти. Тогда нижний предел оптимального значения φ становится равным 0,76.

Определение оптимальной программы терминала, то есть определение значения интенсивности прихода судов в порт, соответствующей максимуму прибыли, осуществляется в следующей последовательности.

Зная значения коэффициентов C_0 , C_1 и C_2 , а также интенсивности обработки грузов μ и коэффициент простоя K_φ вычисляется соотношение C_0''/C_1 .

На основе этого соотношения и известного числа причалов S определяется оптимальное значение коэффициента загрузки причалов φ . Далее легко определяется оптимальная приведенная плотность входного потока судов и его оптимальная интенсивность.

Аналогичным образом могут быть сформулированы и решены другие оптимизационные задачи, в основу которых положены технико-экономические критерии.

Выводы

Для описания процессов обработки судов на грузовых причалах контейнерных терминалов следует использовать вероятностные модели. Система обработки грузов представляет собой систему дис-

кретного типа с конечным множеством состояний. Переход системы из одного состояния в другое происходит в моменты, когда либо новое судно подходит к терминалу, либо освобождается один из причалов. Принятые допущения о пуассоновском потоке прихода судов и показательном распределении времени обработки контейнерных грузов, позволяют использовать для описания процессов в контейнерных терминалах аппарат массового обслуживания. Применение аппарата массового обслуживания позволяет описать процесс обработки судов в контейнерном терминале с помощью линейных дифференциальных уравнений и представить выражения для вероятностных показателей качества процессов в аналитической форме. Однако применение существующих моделей массового обслуживания для определения вероятностных характеристик процессов обработки судов не представляется целесообразным, так как указанные модели неадекватно описывают указанные процессы в реальных условиях функционирования. Поэтому основным научным результатом настоящей работы является развитие классической теории массового обслуживания с учетом специфики функционирования контейнерного терминала, т. е. с учетом возможности изменения значения интенсивности обслуживания отдельными приборами в зависимости от состояния СМО.

Литература

1. Гнеденко, Б.В. Введение в теорию массового обслуживания / Б.В. Гнеденко, И.Н. Коваленко. – М.: Наука, 1987. – 336 с.
2. Русинов, И.А. Обработка и хранение рефрижераторных грузов на специализированном терминале / И.А. Русинов. – СПб.: СПбИИ РАН, 2005. – 168 с.
3. Русинов, И.А. Формализация и оптимизация процессов переработки рефрижераторных грузов на специализированных терминалах / И.А. Русинов. – СПб.: Политехника, 2008. – 472 с.

Поступила в редакцию 21 февраля 2010 г.

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ КАРТ ВЫСОТ В ЗАДАЧАХ АВТОМАТИЗАЦИИ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Д.М. Арсланов, А.В. Козлов

HEIGHTMAP MODEL FOR MINERAL RESOURCE INDUSTRY AUTOMATION ISSUES

D.M. Arslanov, A.V. Kozlov

В статье рассматриваются современные проблемы компьютерного моделирования в задачах автоматизации горного производства. Для их решения предложена модель месторождения на основе карт высот. Модель предназначена для оперативной обработки данных при прогнозировании литологической ситуации, оптимальном планировании и диспетчеризации.

Ключевые слова: карта высот, горное производство, автоматизация, моделирование.

Modern computer modeling issues of mineral resource industry automation are discussed in a paper. Deposit heightmap model is suggested for its fixing. Purpose of the model is a real time data process for modeling of ore grade spatial variability, open pit mine planning and control.

Keywords: heightmap, mineral resource industry, automation, simulation.

Введение

Извлечение твердых полезных ископаемых из недр при помощи открытых горных выработок имеет не меньшее значение, чем добыча основных энергоносителей, и представляет собой сложный процесс с множеством влияющих факторов. Так как в большинстве случаев горной практики не может быть однозначного обоснования для принятия инженерных решений, главным методом решения производственных задач для горнодобывающих предприятий остается метод вариантов. При этом компьютерное моделирование позволяет резко увеличить и ускорить цикл получения и оценки вариантов решения. На основе предоставляемых возможностей по обработке данных цифровая модель месторождения полезных ископаемых выступает основой для разработки автоматизированных методов решения производственных задач, реализации и работы соответствующих информационных систем. Существенное повышение эффективности работы для современного предприятия невозможно без внедрения подобных систем на всех стадиях производственного процесса для целей его автоматизации. Основными задачами при автоматизации горного производства являются прогнозирование литологической ситуации

участка недр месторождения по данным геолого-разведочных, топографо-геодезических и маркшейдерских работ, оптимальное планирование открытых горных работ и диспетчеризация [1, 2].

На сегодняшний день блочная и каркасная модели месторождений являются основными для решения задач автоматизации горного производства [3]. На горном производстве растут требования к уровню автоматизации и оперативности в решении задач прогнозирования, планирования и диспетчеризации при помощи информационных систем. Каркасная и блочная модели не в полной мере удовлетворяют этим требованиям. Они несовместимы между собой из-за различия в форматах используемых структур данных, методах обработки и представления. Системы, построенные на их основе, независимо решают разные задачи, и их интеграция в рамках единого производственного процесса для работы с разделяемыми данными по достижению общей цели затруднена [2].

Одной из главных проблем на пути дальнейшего развития информационных систем к повышению уровня автоматизации производственных процессов горнодобывающих предприятий является отсутствие обобщенной цифровой модели месторождения, позволяющей оперативно решать

Арсланов Дмитрий Мерзагитович – аспирант ЮУрГУ; arslanstudio@hotmail.com

Козлов Артем Викторович – инженер НОЦ «Машиностроение и металлургия» ЮУрГУ; a_kozlov@bk.ru

Arslanov Dmitriy Merzagitovich – postgraduate student of SUSU; arslanstudio@hotmail.com

Kozlov Artem Victorovich – engineer of SEC «Mechanical engineering and metallurgy» of SUSU; a_kozlov@bk.ru

весь спектр необходимых задач. В качестве таковой в данной статье предлагается модель, основанная на картах высот. Карты высот эффективно применяются в смежных областях и показывают хорошие результаты [4]. Преимущество предлагаемой модели состоит в существенном сокращении объема и оптимальной структуре данных при обеспечении требуемого качества детализации, учете необходимых параметров и возможности применять развитые методы обработки и представления.

1. Моделирование месторождения

Месторождение полезных ископаемых рассматривается по некоторому действительному параметру, например, чистая прибыль от реализации полезного компонента, добытого в данной точке, как статическое пространственное скалярное поле [5]. Поскольку месторождение занимает ограниченный участок местности, рассмотрение ведется на конечной области определения в трехмерной прямоугольной системе координат. Начало системы координат выбирается как особая точка на месторождении, например, опорный геодезический пункт. Таким образом, скалярное поле записывается в виде функции $d(x, y, z)$, где $x \in (0; x_{\max})$, $y \in (0; y_{\max})$, $z \in (z_{\min}; z_{\max})$, $d \in (-\infty; +\infty)$.

На основе требуемой степени детализации для решения поставленной задачи для каждой из трех осей системы координат задаются длины единичных отрезков: x_0 , y_0 и z_0 соответственно. Целое число отрезков, укладываемых вдоль соответствующих осей, обозначается как $Q_x = x_{\max}/x_0$, $Q_y = y_{\max}/y_0$ и $Q_z = (z_{\max} - z_{\min})/z_0$. Значения скалярного поля начинают рассматриваться только в точках с координатами, кратными длинам единичных отрезков: $x = ix_0$, $y = jy_0$, $z = kz_0$, где $i = 1, 2, \dots, Q_x$, $j = 1, 2, \dots, Q_y$, $k = 1, 2, \dots, Q_z$,

$$d(x, y, z) = d(ix_0, jy_0, kz_0) = \mathbf{d}[i, j, k]. \quad (1)$$

Тем самым осуществляется дискретизация скалярного поля, что открывает возможности для машинного представления и обработки данных в виде матрицы (1). Отдельный пласт породы при моделировании литологической ситуации участка недр дискретным скалярным полем будет представлять собой связанную область равных значений.

2. Модель месторождения на основе карт высот

Путем вычисления дискретной свертки функции (1) с ядром фильтра специального вида $\mathbf{f}[l, m, n]$, могут быть детектированы поверхности $\mathbf{g}[i, j, k]$ равных значений скалярного поля, отделяющих одни области равных значений от других [6]. Фильтр $\mathbf{f}[l, m, n]$ также именуется маской, оператором дискретной свертки или апертурой. Размерность фильтра обозначается $Q_l \times Q_m \times Q_n$, определяются интервалы изменения значений его индексов: $l \in [-Q_l/2, Q_l/2]$, $m \in [-Q_m/2, Q_m/2]$, $n \in [-Q_n/2, Q_n/2]$.

В общем случае значения дискретной функции $\mathbf{f}[l, m, n]$, называемые коэффициентами фильтра, рассчитываются по выражению для закона распределения коэффициентов фильтра, который отражает зависимость значения коэффициента от его положения в фильтре. Данная зависимость определяется на основе требуемого результата работы фильтра. Однако для большинства задач представляется возможным выбрать готовые фильтры или зависимости для их расчетов [7].

С помощью соответствующего фильтра вычисляются поверхности литологических тел, например, рельеф и рудные тела:

$$\mathbf{g}[i, j, k] = \mathbf{d}[i, j, k] * \mathbf{f}[l, m, n]. \quad (2)$$

Здесь символом «*» обозначена дискретная свертка, вычисляемая по выражению:

– если $Q_l/2 < i < Q_x - Q_l/2$,
 $Q_m/2 < j < Q_y - Q_m/2$, $Q_n/2 < k < Q_z - Q_n/2$, тогда

$$\mathbf{d}[i, j, k] * \mathbf{f}[l, m, n] = \sum_{l=-\frac{Q_l}{2}}^{\frac{Q_l}{2}} \sum_{m=-\frac{Q_m}{2}}^{\frac{Q_m}{2}} \sum_{n=-\frac{Q_n}{2}}^{\frac{Q_n}{2}} (\mathbf{d}[i+l, j+m, k+n] \mathbf{f}[l, m, n]); \quad (3)$$

– во всех остальных случаях:

$$\mathbf{d}[i, j, k] * \mathbf{f}[l, m, n] = 0. \quad (4)$$

Для получения блочной модели месторождения литологические поверхности (2) записываются в трехмерную разреженную матрицу [8]:

$$\mathbf{V}_{Q_x \times Q_y \times Q_z} = \{\mathbf{g}[i, j, k]\}. \quad (5)$$

В зависимости от стоящихся задач, месторождение может моделироваться набором таких матриц [5].

Каркасная модель может быть формализована как кортеж τ упорядоченного множества \mathbf{v} вершин поверхности (2) и упорядоченного множества \mathbf{p} индексов вершин:

$$\tau = \{\mathbf{v}, \mathbf{p}\}. \quad (6)$$

\mathbf{v} определяется как подмножество малой размерности декартового произведения множеств $\mathbf{X} = \{i\}$, $\mathbf{Y} = \{j\}$ и $\mathbf{Z} = \{k\}$ области определения и области значения \mathbf{g} дискретной функции скалярного поля (1): $\mathbf{v} \subseteq \mathbf{g} \times \mathbf{X} \times \mathbf{Y} \times \mathbf{Z}$, $\mathbf{v} = \{\mathbf{g}[i, j, k], i, j, k\}$. В случае триангуляционного моделирования каркаса тел \mathbf{p} определится как $\mathbf{p} = \{v_1, v_2, v_3\}$, где v_1, v_2, v_3 – порядковые номера вершин $(\mathbf{g}[i, j, k], i, j, k)$ в составе \mathbf{v} . Данная тройка указывает, в каком порядке следует соединить вершины графа триангуляции τ для образования треугольной грани поверхности литологического тела [9].

Модель на основе карт высот использует для моделирования высоко детальных поверхностей (2) совокупность функций вида

$$k = s[i, j], \quad (7)$$

называемых карты высот и записываемых в матрице

$$\mathbf{H}_{Q_h \times 1} = \{s_h\}, \quad (8)$$

где Q_h – количество моделируемых литологических поверхностей, $h = 1, 2, \dots, Q_h$.

Для визуализации карты высот (7) используется триангуляционная каркасная модель регулярной сетчатой поверхности: $v \subseteq X \times Y \times Z$, $v = \{i, j, k\}$, $i = \{v_1, v_2, v_3\}$, $t = \{v, i\}$. (9)

С каждой поверхностью (7) из (8) сопоставляются дополнительные параметры количеством N для возможностей детального моделирования:

– максимально допустимые устойчивые углы наклона борта карьера $A_{Qh \times 1} = \{a_h\}$;

– минимально допустимые ширины площадок $W_{Qh \times 1} = \{w_h\}$;

– чистые прибыли реализации единицы объема пород $C_{Qh \times 1} = \{c_h\}$;

– и т. д., например, также требуется учитывать охранные зоны объектов, оптимизацию транспортных потоков для построения схемы вскрытия [3].

Таким образом, общую модель месторождения на основе карт высот с учетом (9) можно записать в виде

$$D_{1 \times N} = [H A W C \dots]. \quad (10)$$

3. Диспетчеризация горного производства

Оперативная задача диспетчеризации горного производства имеет большое значение для предприятия, так как позволяет существенно сократить затраты и повысить качество продукции, обеспечивая высокий экономический эффект. Например, это использование диспетчерских для мониторинга положения работы экскаваторов по построению открытых эксплуатационных горных выработок, контроля транспортировки продукции на склады в зависимости от содержания полезного компонента и пустой породы в отвалах. Успешное решение данной задачи напрямую зависит от объема передаваемых по каналам связи данных, производительности методов их обработки и визуализации.

На практике в подавляющем большинстве случаев, например, для пластовых месторождений угля, размерность и объем данных блочной модели (5) оказываются колоссальными из-за требований высокой степени детализации для обеспечения приемлемой точности моделирования [1]. В итоге обработка и визуализация данных блочной модели (5) сталкиваются с серьезными проблемами требования огромного числа вычислительных ресурсов [10]. Поэтому размерность и объемы данных блочной модели (5) стараются сделать как можно меньше, что неизбежно сказывается на качестве получаемых результатов.

Высокая производительность видеопроцессоров по сравнению с центральными процессорами наряду с возможностями их программирования для прикладных целей открыла возможности высокопроизводительной обработки и визуализации данных для широкого класса задач на компьютерах общего назначения. Поэтому определенные успехи в направлении визуализации и обработки блочных моделей месторождений (5) начали появляться сравнительно недавно [11].

По совокупности объем данных модели на основе карт высот (9) и (10) во много раз меньше, чем объем данных блочной (5) и каркасной модели (6) при больших возможностях качественной детализации. Например, отношение Q_z/Q_h может составлять свыше 500 для одной и той же модели.

Методы визуализации триангуляционной каркасной модели (6) развиваются уже долгое время. Аппаратная растеризация триангуляции (6) в линейно адресуемую видеопамять реализована во всех современных видеопроцессорах. При этом объем данных каркасной (6) значительно меньше объема данных блочной модели (5) для одного месторождения [9, 11].

В настоящее время каркасная модель (6) не может применяться для целей автоматизированного прогнозирования литологической ситуации на участке недр и оптимального планирования открытых горных работ в виду сложности формата данных и отсутствия соответствующих методов его обработки. В решении данных задач каркасная модель (6) служит в основном для визуализации соответствующей ей блочной модели (5). Поэтому для решения данных задач автоматизации горного производства необходимо совместно обрабатывать обе модели (5)–(6). Это не позволяет эффективно применять каркасную модель (6) в процессе автоматизации горного производства для оперативного решения задач.

Каркасная модель (6) служит также для моделирования рельефа по данным топографо-геодезических и маркшейдерских работ, подсчета объемов рудных тел и детального моделирования открытых эксплуатационных горных выработок, транспортных схем, инфраструктуры на месторождении, схем вскрытия и т. д. При этом применяется компьютерная реализация методов ручной геометризации недр, и алгоритмы автоматизированного решения отдельных этапов задач, например, трассировка топоосновы, фильтрация и нидлинг. Как показывает практика отечественных горнодобывающих компаний, работа с данными каркасной модели месторождения (6) требует большого объема квалифицированной ручной работы, автоматизированные операции в редких случаях обеспечивают приемлемый результат [1].

На рис. 1 для сравнения приведены виды моделей рудного тела: а – блочной (5), б – каркасной (6) и в – на основе карт высот (10).

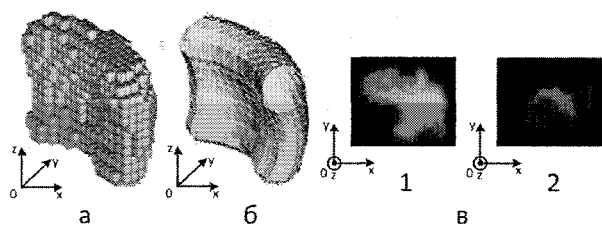


Рис. 1. Сравнение видов моделей рудного тела

4. Прогнозирование литологической ситуации участка недр

Значения функции (1) для любой из точек известны. В ходе геологоразведочных, топографо-геодезических и маркшейдерских работ становится известной лишь небольшая совокупность ее значений $d_0[i, j, k]$. Таким образом, для блочной модели (5) становится известной совокупность элементов $g_0[i, j, k]$, а для модели на основе карт высот (10) – совокупность точек $s_0[i, j]$ для каждой моделируемой литологической поверхности (7) из (8). При этом другие параметры моделей определены и неизменны во время моделирования.

Задача прогнозирования литологической ситуации участка недр месторождения сводится к нахождению по данным известным совокупностям неизвестных элементов матрицы (5) для блочной модели и матриц (7) из (8) для модели на основе карт высот (10). Для горнодобывающих предприятий требуется автоматизированное оперативное решение данной задачи в ходе производственного процесса.

Задача прогнозирования литологической ситуации участка недр для блочной модели (5) решается при помощи методов геостатистики, представляющие собой итеративные процедуры структурного анализа. Структурный анализ в геостатистике – очень мощный инструмент. Тем не менее, он достаточно сложный, затратный по времени, требует большой квалификации и ручной работы. Это затрудняет применение блочной модели для оперативного автоматического решения данной задачи на горном производстве [12].

Задача прогнозирования литологической ситуации участка недр для модели на основе карт высот (10) решается при помощи нахождения дискретной свертки двумерной матрицы $s_0[i, j]$ с ядром фильтра $\psi[l, m]$:

$$s[i, j] = s_0[i, j] * \psi[l, m] = \sum_{l=-\frac{Q_l}{2}}^{\frac{Q_l}{2}} \sum_{m=-\frac{Q_m}{2}}^{\frac{Q_m}{2}} (s_0[i+l, j+m] \psi[l, m]). \quad (11)$$

Данная операция потребуется для всей совокупности литологических поверхностей (8). Тем самым будет восстановлена полная подробная литологическая ситуация участка недр.

При этом благодаря оптимальному представлению данных открываются возможности применения более эффективных методов по сравнению с геостатистическими, преимущественно основанных на интеллектуальных вычислениях, для оперативного решения производственных задач в системах автоматизации горного производства. Например, применение для прогнозирования литологической ситуации участка недр распознавания образов при помощи искусственных нейронных сетей. Данные методы являются хорошо проработанными в смежных областях [9].

5. Оптимальное планирование открытых горных работ

Важной задачей, которая решается на горном производстве, является задача оптимального планирования горных работ. Для текущего периода отработки месторождения, заданного планом развития горных работ, требуется найти экономически наиболее выгодный карьер с учетом действующих ограничений: технологических, экономических, требований безопасности и т. д. Задача формулируется как оптимизационная задача математического программирования. Для горнодобывающих предприятий требуется автоматизированное оперативное решение данной задачи в ходе производственного процесса [13].

Вводится функция автоматического синтеза открытой эксплуатационной горной выработки участка месторождения, определяемого координатами (x, y, z) :

$$p[i, j, k] = p(x, y, z), \quad (12)$$

элементы

$$p[i, j, k] = \begin{cases} 1, & \text{если блок внутри выработки,} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Из-за ограничений по объему вычислительных ресурсов блочная модель (5) оказывается способной работать только с оценочными контурами открытых эксплуатационных горных выработок, которые строятся на данной модели при помощи функции (12) на основе простейшего паттерна (как правило, конуса) [14]. Модель на основе карт высот (10) при помощи функции (12) позволяет детально промоделировать открытую эксплуатационную горную выработку с учетом всех необходимых параметров, а не просто построить ее оценку. На рис. 2 для сравнения приведены профили выработки, синтезируемой функцией (12) на блочной модели (5), изображенной пунктиром, и для модели на основе карт высот (10), изображенной сплошной жирной линией. Поверхности литологических тел изображены на рис. 2 сплошными тонкими горизонтальными кривыми линиями. Как видно из рис. 2 точность моделирования выработки (12), учитывающей необходимые параметры благодаря возможностям модели на основе карт высот, значительно выше, чем при моделировании выработки (12) у блочной модели (5).

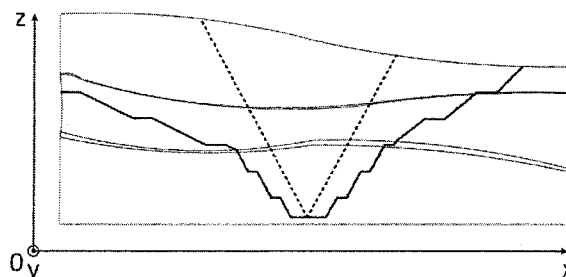


Рис. 2. Сравнение открытых эксплуатационных горных выработок для блочной модели и для модели на основе карт высот

Модель выработки (12) в виде карты высот синтезируется и обрабатывается быстрее за счет меньшей размерности, что позволяет применять ее для оперативного решения производственных задач. При этом добыча в модели карт высот ведется только с поверхностей литологических тел, и приращение полезного компонента будет достигнуто при добыче с нижних поверхностей тел балансовых запасов.

Вводится дополнительная функция добычи литологического тела, которая делает поверхность выработки (12) действительной между верхней и нижней поверхностями для данного добываемого тела. Это необходимо для корректного подсчета объемов добычи:

$$m_{Q_x \times Q_y} = m(z, p) = \begin{cases} s_{z-1}[i, j], & \text{если } p[i, j] > s_{z-1}[i, j], \\ p[i, j], & \text{если } s_z[i, j] \leq p[i, j] \leq s_{z-1}[i, j], \\ s_z[i, j], & \text{если } p[i, j] > s_z[i, j]. \end{cases} \quad (13)$$

С учетом моделирования скалярным полем (1) чистой прибыли от реализации полезного компонента в блоках $[i, j, k]$ становится возможным определить экономическую эффективность данной выработки:

$$e_{xyz} = e(x, y, z) = \sum_{h=2}^{Q_h} \left(x_0 y_0 c_h \sum_{i=1}^{Q_x} \sum_{j=1}^{Q_y} (s_h[i, j] - m_y(z, p(x, y, z))) \right). \quad (14)$$

Выполняется расчет матрицы прибыли добычи каждого блока модели месторождения оценочными выработками:

$E_{Q_x \times Q_y \times Q_h} = \{e(i, j, h)\}$,
формируется вектор-строка из ее элементов $K_{J \times Q_x \times Q_y \times Q_h} = \{k_q\}$, в итоге записывается целевая функция работы горнодобывающего предприятия:

$$J = \sum_{q=1}^{Q_x \times Q_y \times Q_h} (k_q x_q), \quad (15)$$

где $x_{Q_x \times Q_y \times Q_h \times 1} = \{x_q\}$ – вектор-столбец неизвестных, элементы которого

$$x[q] = \begin{cases} 1, & \text{если блок добывается,} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Ограничения для целевой функции (15) специфичны для каждой конкретной задачи [13, 14]. Постановку задачи оптимального планирования горных работ можно записать в виде

$$J \xrightarrow{x} \max. \quad (16)$$

Из-за высокой ресурсоемкости прямое применение методов математического программирования для решения аналогичных (16) задач для блочной модели (5) оказывается невозможным [13, 14]. Поэтому для поиска неизвестных x , обеспечивающих максимум целевой функции (15) для блочной модели, в основном применяются алгоритмы эвристического поиска, методы теории графов, а также модифицированные методы матема-

тического программирования [3, 13]. Например, алгоритм плавающего конуса [14], алгоритм Лерча–Гроссмана [15], метод отсечения ветвей [13]. Однако данные методы не всегда позволяют найти оптимальное решение и не применимы для некоторых типов месторождений [3]. Для крупных месторождений расчеты занимают значительное время, как правило, несопоставимое с требуемым сроком получения результата, поскольку сами методы и их реализации не ориентированы на использование высокопроизводительных параллельных вычислений [13].

Для решения задачи (19) для модели на основе карт высот (10) можно предпринимать попытки непосредственного применения классических методов оптимизации с использованием высокопроизводительных вычислений. Также можно модифицировать существующие методы для блочной модели. В частности, алгоритм Лерча–Гроссмана в этом случае покажет лучшие результаты, по сравнению с использованием на блочной модели [15].

Заключение

Преодоление низкоэффективного совместного использования блочной и каркасной модели месторождений возможно за счет использования модели месторождения на основе карт высот. Модель на основе карт высот демонстрирует улучшенные возможности оперативного моделирования литологической ситуации, оптимального планирования открытых горных работ и диспетчеризации в задачах автоматизации горного производства. Использование данной обобщенной модели открывает возможности построения распределенной корпоративной информационной системы, составляющей ИТ-инфраструктуру горнодобывающего предприятия.

Литература

1. Залит, А.В. Опыт использования GEMS / А.В. Залит // II Конференция пользователей системы диспетчеризации ГТК «КАРЬЕР» и горно-геологической системы GEMS, 23–26 октября 2006.
2. Лабутин, С.А. SAP xMII – Решение для мониторинга производства, взгляд со стороны ERP / С.А. Лабутин // II Конференция пользователей системы диспетчеризации ГТК «КАРЬЕР» и горно-геологической системы GEMS, 23–26 октября 2006.
3. Howard, L. SME mining engineering handbook: in 2 vol. / L. Howard. – New York: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 1992. – Vol. 1–2.
4. Gallup, D. A Heightmap Model for Efficient 3D Reconstruction from Street-Level Video / D. Gallup, J.-M. Frahm. – North Carolina: University of North Carolina Department of Computer Science, 2010.
5. Мартыанова, А.В. Математические методы моделирования в геологии: учеб. пособие / А.В. Мартыанова. – Астрахань: Астраханский го-

сударственный технический университет, 2008. – 191 с.

6. Грузман, И.С. Цифровая обработка изображений в информационных системах: учеб. пособие / И.С. Грузман. – Новосибирск: НГТУ, 2002. – 168 с.

7. Семенов, С. Исследование неадаптивных операторов дискретной свертки для обработки изображений / С. Семенов // Журнал радиоэлектроники. – 2007. – № 9.

8. Тьюарсон, Р. Разряженные матрицы / Р. Тьюарсон. – М.: Мир, 1977. – 171 с.

9. Скворцов, А.В. Триангуляция Делоне и ее применение / А.В. Скворцов. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2002. – 128 с.

10. Ягель, Р. Рендеринг объемов в реальном времени / Р. Ягель. – Огайо: Кафедра информатики университета штата Огайо, 1996.

11. GigaVoxels: Ray-Guided Streaming for Effi-

cient and Detailed Voxel Rendering / C. Crassin, F. Neyret, S. Lefebvre, E. Eisemann // ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games (I3D), feb. 2009.

12. Dendy, B. Neural Network Modelling Of Ore Grade Spatial Variability / B. Dendy. – Nottingham: University of Nottingham, 2004.

13. Cacetta, L. Optimization Techniques For Open PitMine Scheduling / L. Cacetta. – Curtin: School of Mathematics and Statistics Curtin University of Technology, 2003.

14. Ду, Ч. Ю. Моделирование и комплексная оптимизация в планировании и управлении открытыми горными работами: учеб. пособие / Ч. Ю. Ду. – М.: Московский горный институт, 1993. – 71 с.

15. Lerchs, H. Optimum design of open pit mines / H. Lerchs. – Ottawa: Canad. Institute of Mining Bull, 1965.

Поступила в редакцию 8 апреля 2010 г.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО ЗАХОДА НА ПОСАДКУ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ИЗМЕНЯЕМОЙ В ПОЛЕТЕ СТРУКТУРОЙ

А.С. Пантилеев

STATEMENT OF THE PROBLEM OF OPTIMUM LANDING APPROACH OF THE PILOTLESS FLYING MACHINE WITH STRUCTURE CHANGED IN FLIGHT

A.S. Pantileev

Балансирное управление совместно с классическими аэродинамическими органами управления позволит существенно сократить дистанцию посадки. Выводятся уравнения движения с учетом подвижного груза и без него, для беспилотного летательного аппарата с изменяемой в полете структурой.

Ключевые слова: дифференциальные уравнения движения, изменяемая структура, беспилотный летательный аппарат.

Management of position of the centre of gravity together with classical aerodynamic controls will allow to reduce a landing distance essentially. The equations of movement taking into account mobile cargo and without it, for unmanned aerial vehicle with structure changed in flight are deduced.

Keywords: differential equations of movement, changeable structure, unmanned aerial vehicle.

Введение

Математическое моделирование беспилотного летательного аппарата (БПЛА) с изменяемой в полете структурой, позволит на ранних этапах проектирования провести оценку динамики сложной системы. Для этого предлагается провести моделирование движения БПЛА с изменяемой в полете структурой используя дифференциальные уравнения движения летательного аппарата как абсолютно твердого тела [1]. Основное отличие исследуемых уравнений заключается в том, что в них момент инерции не является константой, а зависит от времени.

1. Математическая постановка задачи

Закон изменения момента инерции принимается на основании предложенной в работе [2] схемы изменения структуры (рис. 1).

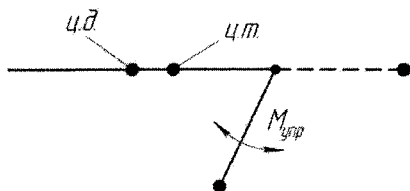


Рис. 1. Схема изменения момента инерции: ц.д. – центр давления, ц.т. – центр тяжести платформы

Представим момент инерции БПЛА с изменяемой в полете структурой следующим выражением, а также его производной

$$I_z = J_z + m_{\text{тр}} b^2 + m_{\text{тр}} l^2 \left(\frac{2b}{l} (\sin \varphi + \cos \varphi) + 2 \sin \varphi \cos \varphi \right), \quad (1)$$

$$\dot{I}_z = 2m_{\text{тр}} l^2 \left(\frac{b}{l} (\cos \varphi - \sin \varphi) + (\cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi) \right). \quad (2)$$

С учетом уравнения существования летательного аппарата $m = m_{\text{пл}} + m_{\text{тр}}$ и соотношения масс груза и платформы $k_m = m_{\text{пл}}/m_{\text{тр}}$, собственного момента инерции платформы представленного соотношением $J_z = m_{\text{пл}} \rho_{\text{пл}}^2$. Здесь и далее $\rho_{\text{пл}}$ – радиус инерции платформы.

С учетом принятых выражений (1) и (2) примут следующий вид:

$$I_z = m \frac{1}{k_m + 1} \left(k_m \rho_{\text{пл}}^2 + b^2 + l^2 \left(\frac{2b}{l} (\sin \varphi + \cos \varphi) + 2 \sin \varphi \cos \varphi \right) \right), \quad (3)$$

$$\dot{i}_z = m \frac{l^2}{k_m + 1} \left(\frac{2b}{l} (\cos \varphi - \sin \varphi) + 2(\cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi) \right). \quad (4)$$

Смещение центра тяжести относительно центра масс вдоль осей с учетом принятых выше обозначений:

$$X_{цм} = \frac{b + l \cos \varphi}{k_m + 1} = \frac{b}{k_m + 1} + \frac{l}{k_m + 1} \cos \varphi, \quad (5)$$

$$Y_{цм} = \frac{l}{k_m + 1} \sin \varphi.$$

Дифференциальное уравнение углового движения

$$\frac{d\omega_z}{dt} = \frac{\dot{i}_z}{I_z} \omega_z + C_{m_z} q \frac{Sb_A}{I_z} - C_{y_q} \frac{Sb_Y}{I_z},$$

перепишем его с учетом полученных выражений

$$\frac{d\omega_z}{dt} = \frac{l^2 \left(\frac{2b}{l} (\cos \varphi - \sin \varphi) + 2(\cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi) \right)}{k_m \rho_{цм}^2 + b^2 + l^2 \left(\frac{2b}{l} (\sin \varphi + \cos \varphi) + 2 \sin \varphi \cos \varphi \right)} \omega_z + \frac{(k_m + 1) \left(C_{m_z} b_A - C_y \left(b_{constY} + \frac{b}{k_m + 1} + \frac{l}{k_m + 1} \cos \varphi \right) \right)}{p \left(k_m \rho_{цм}^2 + b^2 + l^2 \left(\frac{2b}{l} (\sin \varphi + \cos \varphi) + 2 \sin \varphi \cos \varphi \right) \right)}, \quad (6)$$

где $p = \frac{G}{S} = \frac{mg}{S}$ – удельная нагрузка на крыло,

H/m^2 ; $b_Y = b_{constY} + b_{const_b} + b_{per_l}$ – расстояние от центра масс БПЛА до его центра давления, соответственно постоянная часть, обусловленная взаимным расположением центра тяжести платформы и центра давления, постоянная часть, обусловленная величиной смещения шарнира груза и переменная часть, обусловленная величиной выноса положения груза относительно шарнира и его углового положения.

Дифференциальные уравнения поступательного движения центра масс БПЛА с учетом удельной нагрузки на крыло

$$\frac{dV_x}{dt} = g \left(u - \frac{C_x q}{p} - \sin \theta \right) + \omega_z V_y, \quad (7)$$

$$\frac{dV_y}{dt} = g \left(\frac{C_y q}{p} - \cos \theta \right) - \omega_z V_x, \quad (8)$$

где $u = P/G = P/mg$ – тяговооруженность.

Итоговая система дифференциальных уравнений движения БПЛА с изменяемой в полете структурой с учетом (6), (7) и (8) должна быть дополнена соотношениями

$$\frac{dH}{dt} = V_x \sin \theta + V_y \cos \theta,$$

$$\frac{dL}{dt} = V_x \cos \theta + V_y \sin \theta, \quad \frac{d\theta}{dt} = \omega_z. \quad (9)$$

Модели аэродинамических коэффициентов, скоростной напор и угол атаки на основании работы [3], а также безразмерные геометрические параметры представим следующим образом

$$C_x = C_{x0} + \frac{C_y - C_{y0}^2}{\pi \lambda} + C_x^{\delta e} \cdot \delta_e, \quad (10)$$

$$C_y = C_{y0} + C_y^\alpha \cdot \alpha + C_y^{\delta e} \cdot \delta_e, \quad (11)$$

$$C_{m_z} = C_{m_z0} + C_{m_z}^\alpha \cdot \alpha + C_{m_z}^{\delta e} \cdot \delta_e, \quad (12)$$

$$q = \frac{\rho V^2}{2} = \frac{\rho (V_x^2 + V_y^2)}{2}, \quad (13)$$

$$\alpha = \arctan \frac{V_y}{V_x} = \arcsin \frac{\sqrt{V_x^2 + V_y^2}}{V_y}, \quad (14)$$

$$\bar{b} = \frac{b}{l}, \quad \bar{b}_A = \frac{b_A}{l}, \quad \bar{b}_{constY} = \frac{b_{constY}}{l},$$

$$\bar{\rho}_{цм} = \frac{\rho_{цм}}{l}, \quad \bar{b}_{constYl} = \frac{b_{constY}}{b_A}, \quad \bar{\rho}_{цм} = \frac{\rho_{цм}}{b_A}. \quad (15)$$

Учтем в (6), (7), (8) и (9) изменения расстояния между центром давления и центром масс, описанное ранее выражениями (5), а также принятые обозначения (10), (11), (12), (13) и (14). Представим полученную систему дифференциальных уравнений в безразмерном виде относительно перегрузки

$$\frac{1}{g} \frac{dV_x}{dt} = u - \frac{q}{p} \left(C_{x0} + \frac{C_{y0} (1 - C_{y0}) + C_y^\alpha \alpha + C_y^{\delta e} \delta_e}{\pi \lambda} + C_x^{\delta e} \delta_e \right) - \sin \theta + \frac{\omega_z V_y}{g},$$

$$\frac{1}{g} \frac{dV_y}{dt} = \frac{q}{p} \left(C_{y0} + C_y^\alpha \alpha + C_y^{\delta e} \delta_e \right) - \cos \theta - \frac{\omega_z V_x}{g}, \quad (16)$$

$$\frac{l}{g} \frac{d\omega_z}{dt} = \frac{q}{p} \left(\frac{(C_{m_z0} + C_{m_z}^\alpha \alpha + C_{m_z}^{\delta e} \delta_e) \bar{b}_A (k_m + 1)}{k_m \bar{\rho}_{цм}^2 + \bar{b}^2 + 2(\bar{b} (\sin \varphi + \cos \varphi) + \sin \varphi \cos \varphi)} \right) - \frac{(C_{y0} + C_y^\alpha \alpha + C_y^{\delta e} \delta_e) (\bar{b}_{constY} (k_m + 1) + \bar{b} + \cos \varphi)}{k_m \bar{\rho}_{цм}^2 + \bar{b}^2 + 2(\bar{b} (\sin \varphi + \cos \varphi) + \sin \varphi \cos \varphi)},$$

$$\frac{dH}{dt} = V_x \sin \theta + V_y \cos \theta, \quad \frac{dL}{dt} = V_x \cos \theta + V_y \sin \theta, \quad \frac{d\theta}{dt} = \omega_z.$$

Предположим, что движение осуществляется таким образом, что угол атаки остается постоянным и в пределах допустимых (летных значений) или незначительно меняется, тогда без ущерба для достоверности описанного процесса, можно исключить слагаемые в моделях аэродинамики. Также предположим, что скорость движения по глиссаде остается постоянной, тогда скоростной напор можно принять величиной постоянной. Пренебрегая также величинами второго порядка малости, получим на основе (16) следующую систему:

$$\begin{aligned} \frac{1}{g} \frac{dV_x}{dt} &= u - \frac{q}{p} \left(C_{x0} + \frac{C_{y0} + C_y^{\delta e} \delta_e}{\pi \lambda} + C_x^{\delta e} \delta_e \right) - \\ & - \sin \theta + \frac{\omega_z V_y}{g}, \\ \frac{1}{g} \frac{dV_y}{dt} &= \frac{q}{p} (C_{y0} + C_y^{\delta e} \delta_e) - \cos \theta - \frac{\omega_z V_x}{g}, \\ \frac{1}{g} \frac{d\omega_z}{dt} &= \frac{q}{p} \bar{b}_A (k_m + 1) \times \\ & \times \frac{(C_{mz0} + C_{mz}^{\delta e} \delta_e) - (C_{y0} + C_y^{\delta e} \delta_e) \left(\frac{\bar{b}_{constY}}{\bar{b}_A} + \frac{\bar{b} + \cos \varphi}{\bar{b}_A (k_m + 1)} \right)}{k_m \bar{\rho}_{\text{ув}}^2 + \bar{b}^2 + 2(\bar{b}(\sin \varphi + \cos \varphi) + \sin \varphi \cos \varphi)}, \end{aligned} \quad (17)$$

$$\frac{dH}{dt} = V_x \sin \theta + V_y \cos \theta,$$

$$\frac{dL}{dt} = V_x \cos \theta + V_y \sin \theta, \quad \frac{d\theta}{dt} = \omega_z.$$

Система (17) без учета подвижного груза примет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{1}{g} \frac{dV_x}{dt} &= u - \frac{q}{p} \left(C_{x0} + \frac{C_{y0}}{\pi \lambda} \right) - \frac{q}{p} \left(\frac{C_y^{\delta e}}{\pi \lambda} + C_x^{\delta e} \right) \delta_e - \\ & - \sin \theta + \frac{\omega_z V_y}{g}, \\ \frac{1}{g} \frac{dV_y}{dt} &= \frac{q}{p} C_{y0} + \frac{q}{p} C_y^{\delta e} \delta_e - \cos \theta - \frac{\omega_z V_x}{g}, \\ \frac{b_A}{g} \frac{d\omega_z}{dt} &= \frac{q}{p} \frac{1}{\bar{\rho}_{\text{нл}}^2} (C_{mz0} - \bar{b}_{constY1} C_{y0}) + \\ & + \frac{q}{p} \frac{1}{\bar{\rho}_{\text{нл}}^2} (C_{mz}^{\delta e} - \bar{b}_{constY1} C_y^{\delta e}) \delta_e, \\ \frac{dH}{dt} &= V_x \sin \theta + V_y \cos \theta, \\ \frac{dL}{dt} &= V_x \cos \theta + V_y \sin \theta, \quad \frac{d\theta}{dt} = \omega_z. \end{aligned} \quad (18)$$

2. Схема посадки

Из горизонтального полета, обозначенного на схеме (рис. 2.) точками 1–2, происходит переход в снижение. Так же как и в классическом варианте, как уже было сказано выше, во время горизонтального полета самолет переводится в посадочную конфигурацию, если это необходимо выпускаются закрылки, подбирается необходимая для посадки тяга двигателя. Следующий этап представляет собой криволинейное движение по дуге окружности 2–3 с радиусом А–2 для входа в глиссаду 3–4. Её угол должен быть как можно больше, потому что именно на этом этапе есть возможность существенно сократить дистанцию посадки. По существу этот этап представляет собой пикирование. Выход из пикирования происходит также по дуге окружности 4–5–6 с радиусом В–5. Затем незначительный прямолинейный участок 6–7 и вновь движение по дуге окружности 7–8–9. Если

следовать предложенной схеме, то в районе точки 9 горизонтальная скорость будет незначительной и участок 9–10 может представлять собой практически вертикальную прямую.

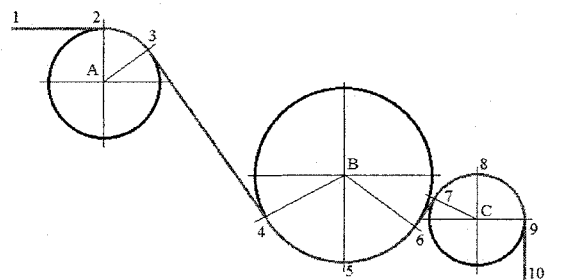


Рис. 2. Схема полета на заключительном этапе посадки

Если умозрительно предположить подобный маневр, то он может быть выполнен следующим образом. Этап полета 2–3–4–5 выполняется при включенном двигателе, осуществлять управление на этом этапе возможно с помощью аэродинамических органов управления (руля высоты, закрылков и элеронов). После прохождения точки 5 движение самолет переходит в набор высоты, при этом вертикальная скорость возрастает от нуля до некоторой величины. Если использовать при наборе высоты только накопленную ранее кинетическую энергию будет проходить интенсивное снижение вертикальной и горизонтальной скорости, этот момент соответствует точке 8. Угол тангажа при этом будет примерно соответствовать углу набора высоты. В виду падения скорости возможен срыв потока на крыле, аэродинамические органы управления в это время не эффективны, но возможно еще использование балансирующего способа управления. На заключительном этапе посадки необходимо обеспечить приземление БПЛА с нулевым углом атаки, это возможно путем перемещения центра тяжести.

Как уже было сказано ранее основным ресурсом для снижения дистанции посадки является этап 3–4. Чем круче будет пикирование, тем меньше пройденная дистанция. Однако пикирование должно выполняться таким образом, чтобы было возможно выйти из него с последующим набором высоты. Необходимо помнить, что при этом возможна просадка, которая возрастает со скоростью пикирования и как следствие его крутизной. Этап полета 5–6 представлен дугой окружности равной дуге окружности 4–5. Это предположение не совсем верно, так как возможны режимы полета, при котором радиус набора высоты будет меньше, чем радиус выхода из пике. Таким образом, на этом этапе полета возможно сокращение дистанции посадки. Радиус дуги окружности дуги 7–8–9 в пределе может быть равным нулю. При этом переход от положительного угла тангажа, соответствующего набору высоты, к нулевому углу тангажа пол-

ностью осуществляется с помощью балансирующего управления, ввиду того, что скорость полета близка к нулевой и аэродинамические органы управления не работают.

Заключение

В том случае, если в результате работы будет продемонстрировано, что возможно снижение аппарата с высоты 30 м на дистанции меньше 200 метров, то можно будет сделать вывод о том, что, во-первых, возможно выполнять снижение по глиссаде угол которой больше 4° , а во-вторых, использование балансирующего управления на всех этапах снижения, а особенно в заключительном – позволит еще больше сократить дистанцию посадки.

Целесообразно использовать балансирующее управление в момент движения около точки 2. При этом если уменьшить статическую устойчивость аппарата, будет возможен более интенсивный разворот, в пределе радиус разворота может быть равен нулю. В процессе пикирования статическую устойчивость желательно не уменьшать, ввиду того, что как было показано в работе Остославского, усложнится вывод самолета из пикирования.

Ввиду того, что предложена траектория снижения, в качестве критерия оптимизации управления необходимо ввести отклонение действительной траектории от заданной. Итоговый функционал примет вид

$$J = \frac{1}{2} \left(\lambda_1 L(T)^2 + \lambda_2 V_x(T)^2 + \lambda_3 V_y(T)^2 + \lambda_4 a_y(T)^2 \right) + \frac{1}{2} \int_0^T \left\{ \lambda_5 (H_0 f_H(t) - H(t))^2 + \lambda_6 (f_L(t) - L(t))^2 + \lambda_7 (\delta_e)^2 + \lambda_8 (\varphi)^2 \right\} dt.$$

Литература

1. Бюшгенс, Г.С. Динамика самолета. Пространственное движение / Г.С. Бюшгенс, Р.В. Студнев. – М.: Машиностроение, 1983. – 320 с.
2. Пантилеев, А.С. Задачи исследования динамики движения БПЛА с изменяемой в полете структурой / А.С. Пантилеев // Динамика машин и рабочих процессов: сб. докл. Всерос. науч.-техн. конф., 8–10 декабря 2009 г. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – С. 138–140.
3. AEROSIM BLOCKSET. Version 1.01. User's Guide. – <http://www.u-dynamics.com>

Поступила в редакцию 26 мая 2010 г.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЗИМУТА ПУСКА И ПРОГРАММЫ УГЛА ТАНГАЖА НА АТМОСФЕРНОМ АКТИВНОМ УЧАСТКЕ ПОЛЕТА РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ

Д.В. Мазгалин, В.И. Починский

THE METHOD OF DETERMINING THE AZIMUTH OF THE START AND THE TANGAGE ANGLE PROGRAM ON THE ACTIVE SITE OF ATMOSPHERIC FLIGHT OF ROCKET LAUNCHER

D.V. Mazgalin, V.I. Pochinsky

Перспективным направлением повышения готовности ракеты-носителя к запуску является учет при построении программной траектории выведения значений меридианальной и зональной составляющих ветра, полученных по результатам метеозондирования атмосферы. Алгоритмы построения программной траектории должны обеспечивать устойчивый ее расчет в условиях ограниченного времени подготовки полетного задания в наземной системе управления на стартовом комплексе непосредственно перед стартом с выполнением жестких требований по точности и ограничений на программу движения со стороны системы стабилизации. Проведено исследование решения задачи определения параметров управления традиционными методами Ньютона первого и второго порядка. Разработан алгоритм определения параметров управления с учетом особенностей расчета прогнозируемых отклонений. Численные эксперименты на траекториях запуска ракеты-носителя РН 14А14 показали хорошую работу алгоритма.

Ключевые слова: оптимальное управление, ракета-носитель, активный участок.

A promising direction of preparedness rocket launch is the account of the construction program trajectory breeding values of the meridian and zonal wind component, obtained as a result of atmosphere meteozounding. The algorithms for constructing program should provide a stable trajectory of its calculations in the limited time available for the flying mission in the ground control system at launch complex just before the start of implementation of stringent requirements on accuracy and movement restrictions on the program from the stabilization system. A study for solving the problem of determining the parameters of traditional management methods of Newton first and second order. An algorithm for determining the control parameters allowing for the calculation of projected variances. Numerical experiments on the trajectory of a launch rocket 14A14 have shown a good performance of the algorithm.

Keywords: optimal control, rocket launch, the active site.

Введение

Актуальность работы заключается в необходимости повышения готовности ракеты-носителя к запуску, а также в учёте при построении программной траектории выведения значений меридианальной и зональной составляющих ветра, полученных по результатам метеозондирования атмосферы. При этом алгоритмы построения программной траектории должны обеспечивать устойчивый ее расчет в условиях ограниченного времени подготовки полетного задания в наземной

системе управления на стартовом комплексе непосредственно перед стартом.

1. Постановка задач

В рамках актуальности работы поставлены задачи: 1) выполнить математическое описание определения параметров управления традиционными методами Ньютона первого и второго порядка; 2) разработать алгоритм определения параметров управления с учетом особенностей расчета прогнозируемых отклонений.

Мазгалин Дмитрий Вениаминович – аспирант института математики и механики УрО РАН, г. Екатеринбург; dmazgalin@rambler.ru

Починский Вениамин Иванович – ведущий разработчик ФГУП НПОА, г. Екатеринбург; avt@npoa.ru

Mazgalin Dmitry Veniaminovich – postgraduate student of Institute of Mathematics and Mechanics of The Ural Branch of RAS, Ekaterinburg; dmazgalin@rambler.ru

Pochinsky Veniamin Ivanovich – senior researcher of Federal State Unitary Enterprise NPOA, Ekaterinburg; avt@npoa.ru

2. Математическое описание определения параметров управления

Одной из задач, решаемых баллистическим навигационным обеспечением запуска ракеты-носителя (РН) с космическим аппаратом (КА), является построение программной траектории выведения на заданную орбиту. Движение РН определяется заданием ориентации вектора тяги (оси РН) через угловые программы по углам тангажа и рыскания. По сложившейся практике [1, 2] на атмосферном участке полета после прохождения кратковременного вертикального участка программа по углу тангажа задается в виде

$$\begin{cases} \vartheta_{pr}(t) = \theta(t) + \alpha(t); \\ \alpha(t) = \bar{\alpha} \exp(\bar{a}(t - t_1))(1 - \exp(\bar{a}(t - t_1))), \end{cases} \quad (1)$$

где $\theta(t)$ – угол тангажа вектора поточной скорости центра масс; $\alpha(t)$ – угол атаки; t_1 – момент окончания участка вертикального полета; $\bar{\alpha}$ – амплитуда угла атаки; \bar{a} – коэффициент развертки программы угла атаки по времени, $\bar{a} < 0$.

Программа по углу рыскания $\psi_{pr}(t)$ задается соотношением $\psi_{pr}(t) = 0$.

Плоскость полета РН определяется заданием азимута пуска (P_0).

При разработке системы управления РН Союз-2 для обеспечения условий управляемости и стабилизируемости при запусках с большими аэродинамическими обтекателями при реально действующих ветрах, учете паспортных параметров РН, определяемых на стартовом комплексе, были выдвинуты дополнительные требования:

а) должен быть предусмотрен вариант построения программной траектории в наземной аппаратуре системы управления (НАСУ) с учетом данных по измеренным значениям меридианальной и зональной составляющих ветра, полученных по результатам метеозондирования атмосферы за 5–7 часов до запуска РН;

б) на атмосферном участке полета первой ступени, начиная с высоты $h = 3,5$ км (достижения числа Маха величины $\approx 0,7$) до окончания работы двигательной установки первой ступени в момент t_2 (достижения высоты ≈ 45 км), программные значения углов атаки $\alpha(t)$ и скольжения ($\beta(t)$) не должны превышать 10 угловых минут, то есть практически быть нулевыми;

в) величины прогнозируемых отклонений точки падения корпуса первой ступени от центра разрешенного района падения по дальности (L) и направлению (B) не должны превышать заданных величин.

Наличие ограничения по величине угла скольжения видоизменило на РН Союз-2 задание программы по углу рыскания на участке полета первой ступени. Значение $\psi_{pr}(t)$ полагается равным нулю от момента пуска ($t_{\text{кп}}$) до момента достижения высоты $h = 3,5$ км. На последующем интервале полета значение $\psi_{pr}(t)$ полагается равным углу

рыскания вектора поточной скорости ($\psi_{pr}(t) = \sigma(t)$). Сопряжение программ $\psi_{pr}(t) = 0$ и $\psi_{pr}(t) = \sigma(t)$ проводится по линейной зависимости с учетом ограничения по величине угловой скорости.

Значение коэффициента \bar{a} выбирается из условия обеспечения на момент достижения высоты в 3,5 км значения $|\alpha(t)| \leq 10$ угловых минут и $\dot{\alpha}(t) < 0$. Проведенные исследования показали, что для РН типа Союз-2 значение параметра \bar{a} может быть выбрано единым для всех условий пуска и равным $-0,2$.

Параметрами управления, с помощью которых можно обеспечивать нулевые значения прогнозируемых отклонений L и B на момент окончания работы ДУ первой ступени остаются $\bar{\alpha}$ и P_0 .

Значения отклонений по дальности и направлению при заданных значениях ($\bar{\alpha}, P_0$) могут быть получены посредством интегрирования уравнений движения РН на активном участке полета первой ступени и уравнений движения корпуса первой ступени на пассивном участке после отделения ее от РН. Таким образом, зависимости $L = L(\bar{\alpha}, P_0)$, $B = B(\bar{\alpha}, P_0)$ являются сложными функциями, заданными через решения систем нелинейных дифференциальных уравнений.

На первом этапе разработки СУ РН Союз-2 для определения значения параметров $\bar{\alpha}, P_0$ применялся метод баллистической пристрелки с использованием метода Ньютона для решения системы нелинейных уравнений:

$$\begin{cases} L(\bar{\alpha}, P_0) = 0; \\ B(\bar{\alpha}, P_0) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Известно [3], что метод Ньютона позволяет найти решение системы нелинейных уравнений при выполнении условий:

- существования и единственности решения в области поиска;
- равномерной ограниченности первых производных и ограниченности нормы отображения $(L, B) \rightarrow (\bar{\alpha}, P_0)$ в области поиска.

Неопределенность в действующих возмущениях и временные ограничения на время построения программной траектории в НАСУ на стартовом комплексе не позволяют заранее выбрать начальные условия по $(\bar{\alpha}, P_0)$, обеспечивающие быструю сходимость.

При некоторых сочетаниях возмущений требования не выполняются, и может иметь место расходимость метода Ньютона при решении системы (2). Такие случаи были обнаружены при проведении тестирования и отработки метода построения программной траектории на моделирующих позициях.

В связи с этим были проведены исследования, направленные на построение метода нахождения $(\bar{\alpha}, P_0)$, при котором в случае существования решения системы (2), получались бы искомые параметры, а в случае его отсутствия получались бы

значения $\bar{\alpha}$, P_0 , дающие наименьшее отклонение модуля радиуса отклонения точки падения корпуса первой ступени от центра разрешенного района, то есть обеспечивалось

$$\min_{\bar{\alpha}, P_0} \rho(\bar{\alpha}, P_0), \quad (3)$$

где $\rho(\bar{\alpha}, P_0) = \sqrt{(L(\bar{\alpha}, P_0))^2 + (B(\bar{\alpha}, P_0))^2}$.

Первый этап исследований проводился применительно к запуску КА «Согот» на замкнутую эллиптическую полярную орбиту с углом наклона $i_{nak} = 98,3$ град.

Были рассмотрены следующие варианты алгоритма поиска $(\bar{\alpha}, P_0)$.

Вариант 1. Поиск $(\bar{\alpha}, P_0)$ методом наискорейшего спуска по градиенту функции $\rho(\bar{\alpha}, P_0)$ с организацией минимизации целевой функции вдоль градиентного направления методом квадратичной аппроксимации (метод ДСК [4]).

В качестве начального приближения точки $(\bar{\alpha}, P_0)$ брались значения, полученные в предположении номинальных условий пуска и отсутствия вращения Земли. Численное моделирование показало очень медленную сходимость метода. Число необходимых итераций превысило 300, что является недопустимым в виду имеющихся ограничений по времени расчета.

Для выяснения причин низкой скорости сходимости была построена поверхность $\rho = \rho(\bar{\alpha}, P_0)$. Выяснилось, что зависимость $\rho = \rho(\bar{\alpha}, P_0)$ представляет собой узкий желоб вдоль оси $\bar{\alpha}$, что и объясняет низкую скорость сходимости.

Вариант 2. Метод минимизации с использованием вторых производных (метод Ньютона второго порядка [4]).

По проведенным расчетам при тех же начальных условиях, что и для метода градиентного спуска (вариант 1), процесс поиска разошелся. Причина состояла в том, что матрица, обратная матрице Гессе целевой функции, не оказалась положительно определенной.

В связи с неудовлетворительными результатами по определению $\bar{\alpha}$, P_0 с использованием традиционных общих методов поиска экстремума, была проведена разработка метода, учитывающего специфические свойства функций $L = L(\bar{\alpha}, P_0)$, $B = B(\bar{\alpha}, P_0)$.

Вариант 3. Метод определения параметров управления $(\bar{\alpha}, P_0)$ с учетом свойств функций $L(\bar{\alpha}, P_0)$, $B(\bar{\alpha}, P_0)$ [5].

Уравнение $B(\bar{\alpha}, P_0) = 0$ при фиксированном $\bar{\alpha} \neq 0$ всегда имеет решение по P_0 . В простейшем случае, когда вращение Земли и ветер отсутствуют, искомое решение P_0 равно пеленгу геодезической линии P_{geod} из точки старта на точку центра района падения. Именно поэтому P_{geod} берется, обычно, в качестве начального приближения в итерационных процессах.

Функции $L = L(\bar{\alpha}, P_0)$, $B = B(\bar{\alpha}, P_0)$ являются

непрерывными, допускающими разложение в ряд Тэйлора по приращениям $\Delta\alpha$, ΔP , где $\Delta\alpha$ – приращение $\bar{\alpha}$ и ΔP – приращение к P_0 .

Производная $\partial B/\partial P_0$ имеет порядок $R_3 \sin(\sigma_3)$, где σ_3 – угловая дальность от точки старта до точки падения, R_3 – радиус Земли. То есть величина $\partial B/\partial P_0$ существенно отличается от нулевого значения. Функция $B = B(\bar{\alpha}, P_0)$ хорошо аппроксимируется линейной зависимостью. Отсюда, для определения поправки ΔP , обнуляющей величину $B(\bar{\alpha} + \Delta\alpha, P_0 + \Delta P)$, можно использовать линейное приближение

$$\Delta P = (-1) \left(B(\bar{\alpha}, P_0) + \frac{\partial B}{\partial \alpha} \Delta\alpha \right) / \frac{\partial B}{\partial P_0}. \quad (4)$$

Проведем разложение в ряд Тейлора функции $L = L(\bar{\alpha}, P_0)$, подставим в него вместо ΔP соотношение (4) и учтем в членах второго порядка главный член $\frac{1}{2} \frac{\partial^2 L}{\partial \alpha^2}$.

В результате получим

$$L(\bar{\alpha} + \Delta\alpha, P_0 + \Delta P) \approx L_{ob}(\bar{\alpha}, P_0) + \left(\frac{\partial L}{\partial \alpha} \right)_{ob} \Delta\alpha + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 L}{\partial \alpha^2} (\Delta\alpha)^2, \quad (5)$$

где использованы обозначения

$$L_{ob} = L(\bar{\alpha}, P_0) - \frac{\partial L}{\partial P_0} \left(B(\bar{\alpha}, P_0) / \frac{\partial B}{\partial P_0} \right);$$

$$\left(\frac{\partial L}{\partial \alpha} \right)_{ob} = \frac{\partial L}{\partial \alpha} - \frac{\partial L}{\partial P_0} \frac{\partial B}{\partial \alpha} / \frac{\partial B}{\partial P_0}.$$

Определим значение $\Delta\alpha_{gr}$ из условия, что определяющий основной член второго порядка по $(\Delta\alpha)^2$ меньше, чем допустимая погрешность ε_1 определения отклонения по дальности, то есть

$$\Delta\alpha_{gr} = \sqrt{2\varepsilon_1 / \left| \frac{\partial^2 L}{\partial \alpha^2} \right|}. \quad (6)$$

Тогда имеем в линейном плане:

$$L(\bar{\alpha} + \Delta\alpha, P_0 + \Delta P) \approx L_{ob} + \left(\frac{\partial L}{\partial \alpha} \right)_{ob} \Delta\alpha. \quad (7)$$

Найдем приращение $\Delta\alpha$ из условия

$$\min_{|\Delta\alpha| \leq \Delta\alpha_{gr}} \left| L_{ob} + \left(\frac{\partial L}{\partial \alpha} \right)_{ob} \Delta\alpha \right|.$$

2. Алгоритм определения параметров управления

На основании приведенных рассуждений итерационный алгоритм определения параметров $(\bar{\alpha}, P_0)$ описывается следующими шагами.

Шаг 1. На начало i -го шага считаются определенными значения:

1. $(\bar{\alpha}(i), P_0(i))$ – i -е приближение к искомым параметрам.

2. Значения целевой функции $L(\bar{\alpha}(i), P_0(i))$, $B(\bar{\alpha}(i), P_0(i))$ и их производные первого и второго порядка, найденные численным методом.

Шаг 2. По второй производной вычисляется значение допуска на возможное приращение $\bar{\alpha}$ на i -м шаге

$$\Delta\alpha_{gr}(i) = \sqrt{2\varepsilon_1 / \left| \frac{\partial^2 L}{\partial \bar{\alpha}^2} \right|}$$

Шаг 3. Вычисляется максимально возможное уменьшение целевой функции $|L(\bar{\alpha}(i), P_0(i))|$ на i -м шаге по линейному приближению с учетом ограничения по приращению $\bar{\alpha}$:

$$L_y = \left(\frac{\partial L}{\partial \bar{\alpha}} \right)_{ob} \cdot \Delta\alpha_{gr}$$

и обобщенное отклонение

$$L_{ob} = \bar{L}(\bar{\alpha}(i), P_0(i)) - \frac{\partial L}{\partial P_0} \cdot \left(B(\bar{\alpha}(i), P_0(i)) / \frac{\partial B}{\partial P_0} \right)$$

Шаг 4. Осуществляется проверка выполнения условий:

4.1. $|L(\bar{\alpha}(i), P_0(i))| < \varepsilon_2$ и $|B(\bar{\alpha}(i), P_0(i))| < \varepsilon_2$, где ε_2 допуск на точность приведения в заданный район.

4.2. $L_y < \varepsilon_2$ и $|B(\bar{\alpha}(i), P_0(i))| < \varepsilon_2$.

4.3. $N > N_{ob}$, где N – число проведенных итераций, N_{ob} – максимально допустимое число итераций.

Если хотя бы одно из условий 4.1–4.3 выполнено, то фиксируется окончание поиска.

Шаг 5. Если ни одно из условий 4.1–4.3 не выполнено, то проводим вычисление корректирующих поправок для искомых параметров.

1. Если $L_y > \varepsilon_2$ и $|L_{ob}| > L_y$, то берем $\Delta\alpha(i+1) = -\Delta\alpha_{gr} \text{sign}(L_{ob})$.

2. Если $L_y > \varepsilon_2$ и $|L_{ob}| \leq L_y$, то берем $\Delta\alpha(i+1) > -L_{ob} / \frac{\partial L_{ob}}{\partial \bar{\alpha}}$.

3. Если $L_y \leq \varepsilon_2$ и $L_{ob} > 0$, то берем $\Delta\alpha(i+1) = k\Delta\alpha_{gr}$

значение коэффициента k подбиралось опытным путем и положено равным -4 .

4. Если $L_y \leq \varepsilon_2$ и $L_{ob} < 0$, то берем $\Delta\alpha(i+1) = 0$.

Вычисляем

$$\Delta P(i+1) = -B(\bar{\alpha}(i), P_0(i)) + \frac{\partial B(\bar{\alpha}(i), P_0(i))}{\partial \bar{\alpha}} \Delta\alpha(i+1) / \frac{\partial B(\bar{\alpha}(i), P_0(i))}{\partial P_0}$$

Шаг 6. Подготовка к следующему шагу

$$\bar{\alpha}(i+1) = \bar{\alpha}(i) + \Delta\alpha(i+1),$$

$$P_0(i+1) = P_0(i) + \Delta P(i+1)$$

В качестве первого приближения берутся значения $(\bar{\alpha}, P_0)$, определенные без учета вращения Земли и ветра. В этом случае значение P_0 равно пеленгу геодезической линии, проведенной из точки старта в центр разрешенного района падения корпуса первой ступени, а $\bar{\alpha}$ может быть найдено однократно для всех условий пуска методом баллистической пристрелки.

Третий вариант определения $(\bar{\alpha}, P_0)$ был протестирован на шести запусках РН Союз-2 при задании составляющих ветра равными полученным по данным метеозондирования перед пуском, а также при задании систематических возмущений по термодинамическим характеристикам атмосферы для каждого месяца года по ОСТ.

Во всех рассмотренных условиях запусков РН Союз-2 число итераций не превысило 23, при этом обеспечивалось выполнение требований по точности приведения корпуса первой ступени в разрешенный район падения и выполнение требований по времени построения программной траектории.

Заключение

Проведенные исследования позволили разработать простой, показавший в проведенном тестировании хорошую сходимость и удовлетворяющий требованиям по точности метод определения параметров управления и построения программной траектории на атмосферном участке полета РН Союз-2 в условиях учета данных по метеозондированию атмосферы.

Литература

1. Апазов, Р.Ф. Методы проектирования траекторий носителей и спутников Земли / Р.Ф. Апазов, О.Г. Сытин. – М.: Наука, 1987.
2. Баллистические ракеты и ракеты-носители / О.М. Алифанов, А.Н. Андреев, В.Н. Гуцин и др. – М.: Дрофа, 2004.
3. Федоренко, Р.П. Приближенное решение задач оптимального управления / Р.П. Федоренко. – М.: Наука, 1978.
4. Химмельблау, Д. Прикладное и нелинейное программирование / Д. Химмельблау. – М.: Мир, 1975.
5. Разработка оптимального способа построения программного движения на АУ без ограничений на районы падения элементов конструкций РН. Отчет по научно-исследовательской работе. – Екатеринбург: УрО РАН ИММ, 2008.

Поступила в редакцию 14 мая 2010 г.

БЕЗРЕДУКТОРНЫЕ МЕХАТРОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ**Ю.С. Смирнов****DIRECT-DRIVE MECHATRONIC TRANSDUCERS****Y.S. Smirnov**

Проанализированы характеристики современных безредукторных мехатронных преобразователей. Описаны достоинства их использования в различных сферах деятельности в аспектах универсальности, надежности, энергосбережения.

Ключевые слова: безредукторный мехатронный преобразователь, энергосбережение, моментный электродвигатель.

Characteristics of modern direct-drive mechatronic transducers are considered. The advantages of its use in various areas in the aspects of universality, reliability and energy efficiency are described.

Keywords: direct-drive mechatronic transducer, energy saving, torque drive.

В большинстве применений целесообразным становится использование безредукторных мехатронных преобразователей (БМП), осуществляющих преобразование непрерывных [1] или дискретных [2] сигналов в перемещения. Структура БМП (рис. 1) представляет собой сочетание электромеханики и микроэлектроники, которые выполняют исполнительную и измерительную функции. Энергетика и быстродействие БМП в значительной мере определяются характеристиками моментных электродвигателей (МЭД). Опыт разработки МЭД и применения серии ДБМ в непрерывных БМП представлены в [1].

На основе МЭД типа ДБМ 185 был реализован дискретный БМП повышенной точности, компоненты которого представлены на рис. 2. Электромеханика БМП находится в особо тяжелых условиях и наработала 50 тыс. часов без ремонта и потери заданной точности преобразования, как в статике, так и в динамике. Согласно критерию Миллера динамическая ошибка в следящей системе не может быть меньше удвоенной величины мертвого хода редуктора. Последний без специальных устройств выборки зазора, увеличивающих трудоёмкость изготовления и снижающих срок службы редуктора, трудно сделать менее 5'. В БМП люфт отсутствует, поскольку объект управления, роторы МЭД и датчиков положения ротора (ДПР) связаны жёстко. Такое выполнение БМП позволяет реализовать единое информационное обеспечение процесса управления [3] по сигналам ДПР, в качестве которого используется двухотсчетный редуктосин (см. рис. 2).

Микроэлектронная часть БМП находится в

более комфортных условиях и служит для преобразования квадратурных сигналов ДПР в цифровой эквивалент перемещения, дискретные сигналы коммутации обмоток МЭД и аналоговые эквиваленты скорости и ускорения перемещения, необходимые для реализации оптимального и адаптивного алгоритмов [2].

При работе МЭД в режиме вентильного электродвигателя в качестве ДПР могут использоваться бесконтактные синусно-косинусные датчики угла [1] или оптоэлектронные датчики (рис. 3). При этом регулирование скорости достигается изменением угла или алгоритма коммутации [4].

К достоинствам серии ДБМ следует отнести:

1. Удобство агрегатирования нескольких МЭД на общий вал.
2. Возможность эффективного отвода тепла от статора.
3. Продолжительная работа при токовом формировании.
4. Достижение эффекта ресурсосбережения за счёт многократного увеличения срока службы БМП путём исключения редуктора, требующего при изготовлении трудоёмких металлорежущих операций.

Эти преимущества стали определяющими для разработки новой серии – ДБМВ, в которой реализуется преемственность по наружным диаметрам, длине пакета, значению показателей теплоотвода статора, пусковым токам.

В отличие от ДБМ новая серия МЭД ДБМВ характеризуется более широким диапазоном электромеханических выходных параметров. По сравнению с ДБМ статическая добротность увеличена

Смирнов Юрий Сергеевич – д-р техн. наук, профессор, начальник курсов экологической безопасности Челябинской государственной агроинженерной академии; su@susu.ac.ru

Smirnov Yuri Sergeevich – PhD, professor, head of Ecological Safety courses of Chelyabinsk State Agroengineering Academy; su@susu.ac.ru

Рис.1

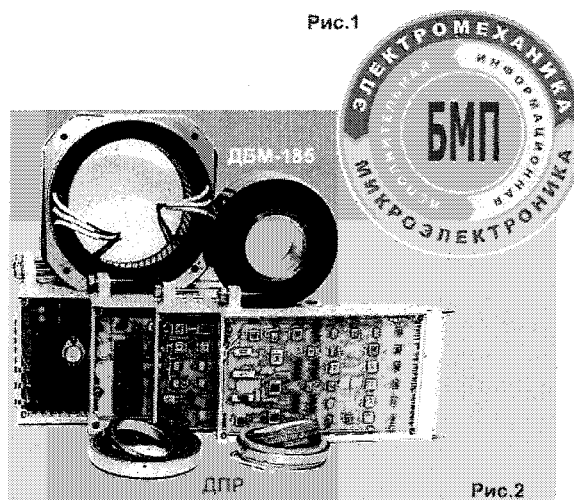


Рис.2

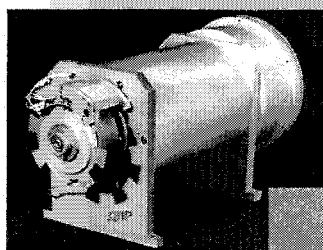


Рис.3

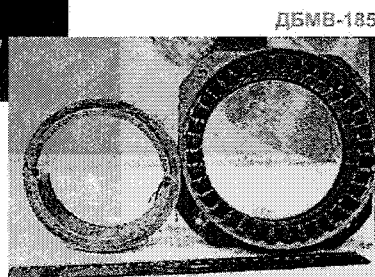


Рис.4

Характеристики МЭД

Параметр	ДБМВ185	ДБМ185	ДБМВ ДБМ
Пусковой ток, А	15,70	16,00	0,98
Максимальная мощность на валу, Вт	104	106	0,98
Пусковой момент не менее, Нм,	56,5	27,3	2,07
Частота вращения при ХХ, об/мин	71	150	0,47
Электромеханическая постоянная времени, мс	3	9	0,33
Внутренний диаметр ротора, мм	110	66	1,67
Масса двигателя не более, кг	6,44	9,25	0,70
Электромагнитная постоянная времени, мс	5	3	1,67

в 1,7–3,4 раза, электромеханическая постоянная времени снижена от 2 до 4 крат, увеличен внутренний диаметр ротора [5].

Сопоставление МЭД габарита 185 (рис. 2 и 4) представлено в таблице.

Литература

1. Беленький, Ю.М. Опыт разработки и применения бесконтактных моментных приводов / Ю.М. Беленький, Г.С. Зеленков, А.Г. Микеров. – Л.: ЛДНТИ, 1987. – 28 с.

2. Домрачев, В.Г. Цифроаналоговые системы позиционирования. Электромехатронные преобразователи: производственное издание / В.Г. Домрачев, Ю.С. Смирнов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 240 с.

3. Smirnov, Y.S. Common Dateware of Robotics Mechatronic Converters. Proceedings of the Third ISMCR '93/ Y.S. Smirnov. – ITALY: Torino, 1993.

4. Смирнов, Ю.С. Системы управления сервомеханизмами с шаговыми электродвигателями / Ю.С. Смирнов // Микропроцессорные средства и системы. – 1985. – № 4. – С. 71–77.

5. Создание новой серии моментных двигателей интенсивного использования для бесконтактного моментного привода / А.Г. Микеров, Л.М. Епифанова, Д.А. Любин и др. // Труды 5 Международной (16 Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП2007. – СПб.: Новекс, 2007. – С. 240–243.

Поступила в редакцию 4 марта 2010 г.

АЛГОРИТМ КАЛИБРОВКИ ЭТАЛОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ*

А.Г. Щипицын, А.Е. Попов

CALIBRATION ALGORITHM FOR REFERENCE PRESSURE TRANSDUCER

A.G. Shchipitsyn, A.E. Popov

В работе рассматривается усовершенствованный алгоритм калибровки эталонных измерительных преобразователей давления, основанный на итеративном приближении полиномиальной функции, аппроксимирующей выходные характеристики преобразователя в соответствии с критерием равномерности. Также рассматриваются основные свойства и этапы алгоритма, и его применение в ходе калибровки измерительных преобразователей давления.

Ключевые слова: калибровка измерительных преобразователей, метод наименьших квадратов, определение калибровочных коэффициентов, образцовый измеритель давления.

The paper discusses the improved algorithm for calibration of reference pressure transducers, which is based on iterative selection of a polynomial function that approximates the output characteristics of the converter in accordance with uniform criteria minimization. Also paper demonstrates the main features and stages of the algorithm with the results of use during the calibration of pressure modules.

Keywords: calibration of measuring transducers, the method of least squares, the calculation of calibration coefficients, the reference pressure transducer.

В последние годы наблюдается беспрецедентное повышение уровня точности приборов измерения давления. За десять лет приведенная погрешность типовых датчиков давления уменьшена с уровня 0,25 % до уровня 0,04...0,075 % от диапазона. Существует постоянная потребность в калибровке и проверке метрологических характеристик датчика. Необходимость в этом возникает вследствие того, что в условиях эксплуатации за счет влияния внешних факторов погрешность датчиков увеличивается и важно, чтобы она удовлетворяла требованиям технологического процесса. Для осуществления процедуры поверки высокоточных датчиков необходимы эталонные измерительные преобразователи давления, в несколько раз превосходящие по точности поверяемые приборы.

Для решения поставленной задачи используются математико-алгоритмические методы, позволяющие повысить качество процедуры.

В работе [1] представлена общая теория функционирования измерительного преобразователя давления и описан способ калибровки.

1. Модель погрешности измерительного преобразователя

Применительно к эталонным преобразователям давления, используемым при поверке датчиков, был сформулирован следующий перечень требований к математической модели:

1. Модель должна наиболее полно описывать выходную характеристику преобразователя в температурном диапазоне от 15 до 35 °С. Допускается понижение степени адекватности при изменении температуры относительно нормальных климатических условий (на величину, не превышающую основной погрешности при изменении температуры на 10 °С относительно НКУ).

2. Абсолютная погрешность модели должна

* Работа выполнена в рамках реализации федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы. Государственный контракт № П497 от 05.08.2009.

Щипицын Анатолий Георгиевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой систем управления ЮУрГУ; ags@susu.ac.ru

Попов Андрей Евгеньевич – аспирант кафедры систем управления ЮУрГУ; andrey.popov@emerson.com

Shchipitsyn Anatoly Georgievich – PhD, professor, head of Control systems department of SUSU; ags@susu.ac.ru

Popov Andrey Evgenievich – postgraduate student of Control systems department of SUSU; andrey.popov@emerson.com

быть минимизирована во всем рабочем диапазоне измерительного преобразователя.

3. Математическая модель не должна содержать резких отклонений от моделируемой выходной характеристики ни в одной точке, включая крайние точки температурного диапазона.

В табл. 1 представлены усредненные показатели вклада каждого из видов погрешности в суммарную приведенную погрешность измерения давления, полученные в ходе экспериментов и исходя из анализа документации на измерительные преобразователи.

Как видно из анализа таблицы, с использованием математического и алгоритмического обеспечения процедуры калибровки можно уменьшить приведенную погрешность измерительных преобразователей с 2,71 до 0,016 %. Для дальнейшего повышения точности необходимо переходить к более совершенным чувствительным элементам.

Для достижения указанного предела при имеющейся элементной базе необходимо провести исследование математической модели измерительного преобразователя с тем, чтобы выявить существенные особенности выходной характеристики преобразователя и затем учесть их при проведении процедуры калибровки.

2. Недостатки существующих методов калибровки

В настоящее время наиболее часто расчет калибровочных коэффициентов измерительного преобразователя производится методом наименьших квадратов, в основе которого лежит подбор поли-

номиальной функции, аппроксимирующей выходную характеристику преобразователя путем минимизации выражения

$$Q_1 = \left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |f(x_k) - y_k|^2 \right)^{1/2}. \quad (1)$$

Вследствие интегрального характера критерия (1) погрешность аппроксимации в отдельных точках может достигать значительной величины. Однако из-за простоты реализации этот критерий получил наибольшее распространение.

В силу того, что в метрологии принято оценивать точность преобразователя по характеристике, называемой приведенной погрешностью, возникает интерес к оптимизации по равномерному критерию (2), поскольку минимизация максимального значения погрешности приводит к минимизации приведенной погрешности прибора:

$$Q_2 = \max_{1 \leq k \leq N} \{ |f(x_k) - y_k| \}. \quad (2)$$

В разработанном алгоритме расчета калибровочных коэффициентов эталонных измерительных преобразователей предпринята попытка перехода от критерия (1) к критерию (2), поскольку потребительские свойства измерительного преобразователя обусловлены именно максимальной приведенной погрешностью.

Помимо высоких требований к точности существует особенность, отличающая эталонные преобразователи от других измерительных преобразователей, – они должны обеспечивать предельную точность при работе в лабораторных условиях. Требования к точности измерения давления при темпе-

Таблица 1

Модель погрешности преобразователя

Причина возникновения погрешности	Максимальная приведенная погрешность, % диапазона	Предел уменьшения математическими методами, % диапазона	Способ уменьшения
Нелинейность выходного сигнала чувствительного элемента	1	0	Выполнение линеаризации выходной характеристики методами регрессионного анализа
Влияние углового положения (для преобразователей абсолютного давления)	0,4	0	Усовершенствование математической модели преобразователя с целью компенсации влияния углового положения
Изменение температуры окружающего воздуха	5	0	Построение многомерной регрессионной модели, учитывающей фактор влияния температуры
Гистерезис чувствительного элемента	0,001	0,001	–
Помехи на выходе чувствительного элемента	0,01	0,005	Цифровой фильтр помех на выходе чувствительного элемента
Нестабильность	0,01	0,01	–
	6,421	0,016	

ратурах, отличных от нормальных климатических условий (НКУ), значительно менее жесткие и нормируются дополнительной погрешностью. Стандартные алгоритмы калибровки на основе метода наименьших квадратов не позволяют получить результат, удовлетворяющий данному требованию.

3. Обоснование выбора метода линеаризации выходной характеристики измерительного преобразователя

Проанализируем возможность применения различных методов линеаризации.

Точные методы линеаризации неприменимы для решения поставленной задачи в силу того, что, появляется необходимость снятия чрезмерно большого числа экспериментальных данных при калибровке измерительного преобразователя, что в ряде случаев является неосуществимым и экономически не целесообразным. Помимо этого требуется хранение большого объема экспериментальных данных в памяти микроконтроллера измерительного преобразователя, что в несколько раз превышает имеющиеся возможности встроенных запоминающих устройств.

Для применения сегментных аппроксимирующих функций необходимо разбить выходную характеристику измерительного преобразователя на линейные участки и описать уравнение каждого участка. Очевидно, что данный подход требует трудоёмких вычислений и появляется необходимость хранения большого объема калибровочной информации в памяти измерительного преобразователя. Ситуация усложняется тем, что в данном случае речь идет о двумерной выходной характеристике и сегменты должны будут представлять собой части поверхности. Вычислительные мощности микроконтроллеров, применяемых в настоящее время в измерительных преобразователях, не позволяют решить поставленную задачу.

Таким образом, аппаратные особенности современных измерительных преобразователей позволяют использовать только глобальные аппроксимирующие функции для линеаризации выходной характеристики.

В работе [4] произведен анализ применения некоторых классов функций для аппроксимации выходной характеристики. В анализе были использованы следующие типы функций:

1. Алгебраические полиномы вида

$$P(U) = a_0 + a_1U + \dots + a_nU^n,$$

где n – порядок полинома; a_i – коэффициенты полинома.

2. Дробно-рациональные функции вида

$$P(U) = \frac{a_0 + a_1U + \dots + a_mU^m}{1 + a_{m+1}U + \dots + a_nU^n},$$

где n и m – некоторые натуральные числа.

3. Функции, являющиеся решением обыкновенного дифференциального уравнения

$$\frac{d^n P}{dU^n} = a_0 \frac{d^{n-1} P}{dU^{n-1}} + \dots + a_{n-1}P + a_nU.$$

Для каждого класса функций было рассчитано среднее квадратическое отклонение математической модели, абсолютное максимальное значение отклонений, приведенное к диапазону значения максимального значения отклонения. Помимо этого производилась оценка применимости функций с точки зрения удобства дальнейшего использования функции по количеству математических операций, входящих в состав функции.

В ходе анализа выявлено, что «оптимальный по всем выбранным нами критериям качества аппроксимирующих функций является выбор либо алгебраических полиномов 3-го порядка, либо дробно-рациональных функций 1-го порядка, так как они являются сравнимыми по сложности реализации и по точности описания» [4].

Дополнительным преимуществом алгебраических полиномов является возможность вычисления давления внутри микроконтроллера измерительного преобразователя по схеме Горнера с минимальным числом вычислительных операций.

Таким образом, применение алгебраических полиномов для аппроксимации выходной характеристики является наиболее целесообразным.

4. Особенности алгоритма калибровки

Перечислим основные особенности алгоритма.

- Перед расчетом коэффициентов измерительного преобразователя производится фильтрация экспериментальных данных с целью выделения резко выделяющихся значений. Точки, признанные выбросами, не участвуют в процедуре расчета коэффициентов.

- Порядок регрессионного полинома по температуре и давлению выбирается на этапе калибровки с учетом индивидуальных особенностей эталонного измерительного преобразователя.

- После расчета оператор может выбрать наиболее подходящий набор калибровочных коэффициентов аппроксимации из вариантов, предложенных программой. Программа предоставляет пользователю 8 математических моделей с минимальной приведенной погрешностью и представляет график абсолютной ошибки каждой модели во всем рабочем диапазоне измерительного преобразователя.

- Реализован итерационный алгоритм расчета на основе методов интервального анализа, позволяющий минимизировать абсолютную ошибку измерения.

Применительно к измерительным задачам важным дополнительным свойством измерительных преобразователей должно быть включение аппарата для оценивания погрешностей результатов измерений.

Для каждого сочетания параметров производится оценка величины невязки с использованием расширенного набора экспериментальных данных.

Таблица 2

Результаты применения алгоритма калибровки

Измерительный преобразователь	Диапазон измерения, кПа	Макс. абсолютная ошибка при НКУ, кПа		Приведенная погрешность, %		Повышение точности, %
		Метод наименьших квадратов	Модернизированный алгоритм	Метод наименьших квадратов	Модернизированный алгоритм	
№ 2	160	0,0446	0,0267	0,0279	0,0167	40
№ 4	160	0,0139	0,0114	0,0087	0,0071	18
№ 5	160	0,0412	0,0283	0,0258	0,0177	31
№ 9	6,3	0,0004	0,0001	0,0067	0,0021	69
№ 11	6,3	0,0014	0,0004	0,0217	0,0059	73

Опишем методику оценки величины невязки.

1. После расчета коэффициентов производится вычисление абсолютной ошибки в каждой экспериментальной точке.

2. Величина абсолютной ошибки в точках, снятых при 0 и 50 градусах, делится на 2.

3. Производится исключение выбросов (слишком больших значений абсолютной ошибки), обусловленных погрешностью снятия данных. При исключении использован робастный критерий отсева резко выделяющихся значений. Использование именно робастного критерия обусловлено тем, что закон распределения абсолютной ошибки неизвестен.

4. Вычисляется максимальная величина из остаточного набора абсолютных ошибок. Эта величина является оценкой величины невязки (адекватности математической модели).

Для эффективного функционирования предложенному алгоритму на вход необходимо подавать расширенный набор экспериментальных точек. Большая часть точек используется в алгоритме расчета коэффициентов. Остальные точки применяются при оценивании степени адекватности модели. Применение данной методики обусловлено тем, простое увеличение объема экспериментальных данных не приводит к повышению степени адекватности модели в силу того, что некоторые экспериментальные точки сняты с погрешностью и не отражают свойств реальной выходной характеристики преобразователя.

Представленный алгоритм реализован в виде динамической библиотеки Coefficients_calculation.dll, написанной на языке C# платформы .Net.

После окончания расчета программа выводит на экран графики приведенной погрешности, полученные при использовании девяти наборов коэффициентов, из которых пользователь может выбрать наиболее подходящий набор исходя из специфических требований к измерительному преобразователю.

Для того чтобы измерительный преобразователь можно было откалибровать с использованием разработанного программного обеспечения, необходимо модифицировать программное обеспечение, функционирующее в микроконтроллере интеллектуального измерительного преобразователя.

Формула расчета давления по значениям ко-

дов давления и температуры должна иметь следующий вид:

$$P(t, d) = r_0 + d \cdot (r_1 + d \cdot (r_2 + d \cdot (r_3 + d \cdot (r_4 + d \cdot r_5))))),$$

где $r_0 = q_0 + t \cdot (q_1 + t \cdot (q_2 + t \cdot (q_3 + t \cdot q_4)))$;

$$r_1 = q_5 + t \cdot (q_6 + t \cdot (q_7 + t \cdot (q_8 + t \cdot q_9)))$$

$$r_2 = q_{10} + t \cdot (q_{11} + t \cdot (q_{12} + t \cdot (q_{13} + t \cdot q_{14})))$$

$$r_3 = q_{15} + t \cdot (q_{16} + t \cdot (q_{17} + t \cdot (q_{18} + t \cdot q_{19})))$$

$$r_4 = q_{20} + t \cdot (q_{21} + t \cdot (q_{22} + t \cdot (q_{23} + t \cdot q_{24})))$$

$$r_5 = q_{25} + t \cdot (q_{26} + t \cdot (q_{27} + t \cdot (q_{28} + t \cdot q_{29})))$$

d – код давления, считанный с АЦП;

t – код температуры, считанный с АЦП;

q – набор калибровочных коэффициентов.

В табл. 2 приводятся численные значения, характеризующие повышение точности в процентах при использовании модернизированного алгоритма по сравнению со стандартным методом наименьших квадратов.

Апробация алгоритма на исследуемых измерительных преобразователях давления показала эффективность алгоритма по сравнению со стандартными способами: повышение точности составило до 73 %. Данный результат позволит повысить класс точности выпускаемых эталонных измерительных преобразователей давления.

Литература

1. Попов, А.Е. Использование двухпараметрических математических моделей для аппроксимации функций преобразования давления / А.Е. Попов, А.В. Лазуков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2008. – Вып. 7. – № 3. – С. 38–40.

2. Зоркальцев, В.И. Метод наименьших квадратов / В.И. Зоркальцев. – Новосибирск: ВО «Наука», 1995. – 220 с.

3. Попов, Б.А. Приближение функций для технических приложений / Б.А. Попов, Г.С. Теслер. – Киев: Наукова Думка, 1980.

4. Исследование некоторых классов функций для аппроксимации выходной характеристики тензопреобразователей давления / Ю.Г. Свинолулов, А.А. Светлаков, В.В. Бычков, А.С. Пронин // Приборы. – 2005. – № 9. – С. 29–41.

Поступила в редакцию 22 октября 2009 г.

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ УПРЕЖДАЮЩИХ ОЦЕНОК ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Л.С. Казаринов, Д.А. Шнайдер

METHOD OF DEVELOPING OF LOOK-AHEAD ENERGY EFFICIENCY ESTIMATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES

L.S. Kazarinov, D.A. Shnaider

В статье рассматриваются теоретические основы повышения энергетической эффективности технологических процессов на основе упреждающих оценок с использованием обратных моделей динамики технологических объектов управления, а также повышение эффективности теплоэнергетических комплексов на основе автоматизации мониторинга и прогнозирования остаточного ресурса стареющего оборудования с использованием обобщенных показателей.

Ключевые слова: упреждающие оценки, упреждающее управление, энергетическая эффективность.

Theoretical foundations of obtaining process energy efficiency with predictive estimates are considered. Inverse dynamics models of control objects are applied. Monitoring and prediction of reliability estimates for energy systems using generalized indices also considered.

Keywords: predictive estimates, predictive control, energy efficiency.

Введение

Существующие теории и практика управления большими технологическими системами используют в основном методы централизованного диспетчерского управления в сочетании с локальными автоматическими регуляторами технологических параметров. При этом обеспечение качества и эффективности управления требует получения достоверной прогнозной информации о состоянии системы, позволяющей формировать оперативные управляющие воздействия в соответствии с заданными критериями управления. Решение данной задачи основано на создании автоматизированных систем управления на базе различных подходов, в том числе прогнозирующих моделей технологических объектов управления (ТОУ), описывающих динамику выработки, аккумулярования и потребления энергетических ресурсов (ЭР) (далее, прямые прогнозирующие модели), а также моделей развития аварийных ситуаций для энергетического оборудования.

Однако для энергетических комплексов построение точных прогнозирующих моделей явля-

ется крайне сложной и объемной задачей. Реально во многих случаях, подобные модели обладают недостаточной точностью оценки показателей эффективности, требуемой в соответствии с технологическими регламентами. Поэтому применение известных методов управления, основанных на построении прямых прогнозирующих моделей ТОУ, для эффективного управления энергетическими комплексами производства имеет определенные ограничения.

В этой связи актуальной проблемой является разработка подхода к управлению, который основывается на упреждающих оценках эффективности процессов, получаемых, исходя из непосредственных измерений двух сторон оценочного отношения: текущих расходов энергетических ресурсов, объемов выходной продукции, а также статистики отказов и аварийных ситуаций. Построение подобных оценок приводит к нетривиальным задачам, так как их решение должно существенно базироваться на комбинированных моделях прямой и обратной динамики управляемых процессов. При этом сам принцип управления, основанный на

Казаринов Лев Сергеевич – д-р техн. наук, профессор, декан приборостроительного факультета ЮУрГУ; kazarinov@ait.susu.ac.ru

Шнайдер Дмитрий Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматики и управления ЮУрГУ; shnayder@ait.susu.ac.ru

Kazarinov Lev Sergeevich – PhD, professor, dean of Electronics Faculty of SUSU; kazarinov@ait.susu.ac.ru

Shnaider Dmitry Aleksandrovich – PhD, assistant professor of Automation and Control Department of SUSU; shnayder@ait.susu.ac.ru

упреждающих оценках эффективности использования ресурсов до того, как эти ресурсы будут реально использованы или исчерпаны, является естественным условием достижения функциональной и эксплуатационной эффективности в сложных технологических комплексах.

1. Теоретические основы повышения энергетической эффективности ТП на основе упреждающих оценок с использованием обратных моделей динамики ТОУ

На рис. 1 представлена предлагаемая общая схема оперативного упреждающего оценивания энергетической эффективности.

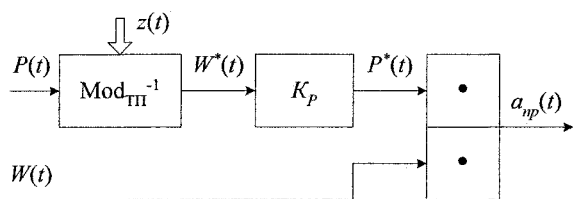


Рис. 1. Общая схема оперативного упреждающего оценивания энергетической эффективности

Здесь $P(t)$ – текущий объем производимой продукции; $W(t)$ – текущий расход ЭР; $W^*(t)$ – модельная оценка текущего расхода ЭР; Mod_{TP}^{-1} – обратная модель динамики технологического процесса; $z(t)$ – режимные факторы; K_p – нормирующий коэффициент, обеспечивающий статистически единичную передачу $P_{cp} \xrightarrow{1} P_{cp}^*$; $a_{np}(t)$ – упреждающая оценка энергетической эффективности

$$a_{np}(t) = \frac{P^*(t)}{W(t)}. \quad (1)$$

Для того чтобы понять существо подхода, приведем элементарный пример. Модель процесса характеризуется запаздыванием выработки продукции относительно потребления ресурсов

$$Mod_{TP}: P(t) = a_p(t)W(t-\tau). \quad (2)$$

При этом если энергетическую эффективность определять на основе отношения выработки продукции к потреблению ресурсов:

$$a_p(t) = \frac{P(t)}{W(t)}, \quad (3)$$

то оценка будет некорректной.

Запаздывающая оценка определяется на основе соотношения

$$a_p(t) = \frac{P(t)}{W(t-\tau)}. \quad (4)$$

Упреждающая оценка – на основе соотношения

$$a_{np}(t) = a_p(t+\tau) = \frac{P(t+\tau)}{W(t)}, \quad (5)$$

где $P(t+\tau)$ – плановое задание.

Условия корректного оценивания:

1. Оценки энергетической эффективности $a_{np}(t)$ должны основываться на реальных измерениях двух сторон отношения $P(t)$ и $W(t)$.

2. Оценки должны быть статистически несмещенными

$$M\{P^*(t)\} = M\{P(t)\} = P_{cp}$$

3. Стороны оценочного отношения должны быть синхронизированы в динамике

$$P^*(t) \sim W^*(t) \sim W(t)$$

При построении упреждающего управления могут быть использованы частично упреждающие оценки, схемы построения которых представлены ниже.

Модель технологического процесса представлена на рис. 2.

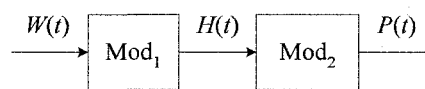


Рис. 2. Модель технологического процесса

Схема частично упреждающего оценивания приведена на рис. 3.

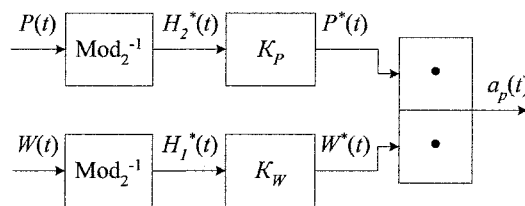


Рис. 3. Схема частично упреждающего оценивания

Учет режимных факторов и обратная модель приведены на рис. 4 и 5 соответственно.

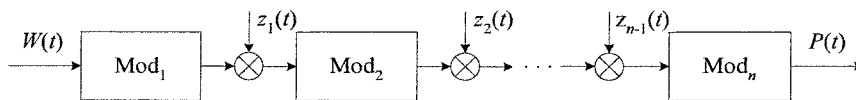


Рис. 4. Учет режимных факторов

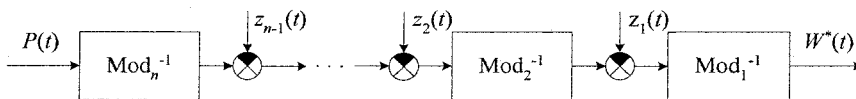


Рис. 5. Обратная модель

Таким образом, центральным моментом предлагаемой методики является построение обратных моделей динамики технологических процессов. Математически данная задача сводится к решению обратной задачи

$$\text{Mod}(W_i) = P_{i,0}, \quad (6)$$

где $P_{i,0}$ – заданный процесс; W_i – искомый процесс.

Данная задача является некорректно поставленной. Регуляризация некорректно поставленной задачи может быть выполнена двумя способами. Первый способ основан на использовании специального регуляризующего оператора α_R :

$$\text{Mod}(W_i) + \alpha_R W_i = P_{i,0}. \quad (7)$$

Второй способ основан на использовании методов экспоненциальной фильтрации. Решение первой задачи осуществляется по структурной схеме, приведенной на рис. 6, при использовании известных методов теории автоматического управления.

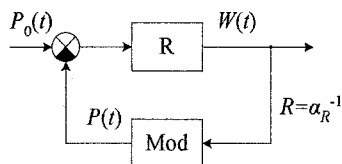


Рис. 6. Структурная схема решения первой задачи

Решение второй задачи осуществляется с использованием структурной схемы обратного оператора, представленной на рис. 7.

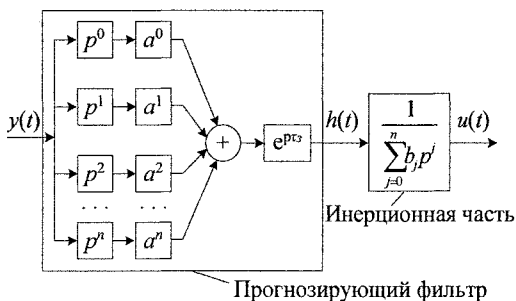


Рис. 7. Структурная схема обратного оператора

Рассмотрим построение прогнозирующего фильтра.

Пусть дано разложение входного сигнала в полиномиальном базисе:

$$y(t - \lambda) = \sum_{i=0}^n g_i(t) \lambda^i, \quad (8)$$

где λ – интервал ретроспективы.

Экспоненциально-средняя квадратичная ошибка разложения

$$E^2(t) = \frac{1}{\tau_\phi} \int_0^\infty \left[y(t - \lambda) - \sum_{i=0}^n g_i(t) \lambda^i \right]^2 e^{-\frac{\lambda}{\tau_\phi}} d\lambda, \quad (9)$$

где τ_ϕ – постоянная времени фильтра.

Условия оптимальности

$$\frac{\partial E^2(t)}{\partial g_i(t)} = 0; \quad i = \overline{0, n}. \quad (10)$$

Структура оптимального фильтра представлена на рис. 8.

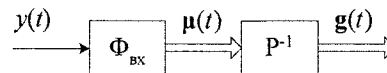


Рис. 8. Структура оптимального фильтра

Здесь $\mu(t) = (\mu_0(t), \mu_1(t), \dots, \mu_n(t))^T$ – вектор моментов входного сигнала; $g(t)$ – вектор координатных функций разложения.

Выход дифференциальной части с прогнозом

$$h(t + \tau_{np}) \approx \sum_{i=0}^n i! a_i g_i(t) \tau_{np}^i. \quad (11)$$

Применение методов экспоненциальной фильтрации позволяет построить общую структуру обратного оператора (рис. 9).

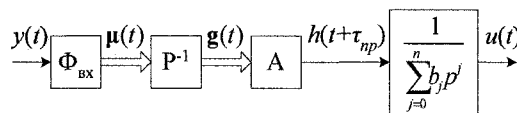


Рис. 9. Общая структура обратного оператора

В работе задача построения обратного оператора была решена в общем случае на фоне белого шума и цветных помех.

Выходная реакция прогнозного фильтра

$$h(t + \tau_{np}) = \int_0^\infty y(t - \lambda) \omega(\lambda) d\lambda = \sum_{i=0}^n g_i(t) \int_0^\infty \lambda^i \omega(\lambda) d\lambda. \quad (12)$$

Сравнивая (11) и (12), можем записать

$$\int_0^\infty \lambda^i \omega(\lambda) d\lambda = i! a_i \tau_{np}^i, \quad i = \overline{0, n}. \quad (13)$$

На фоне белого шума оптимальное решение определяется выражением

$$\omega(\tau) = \sum_{i=0}^n \gamma_i \tau^i e^{-c\tau}, \quad (14)$$

где γ_i – неизвестные множители Лагранжа, значения которых определяются из условий (13).

На фоне цветных помех оптимальное решение определяется интегральным уравнением

$$\int_0^\infty K_z(t - \lambda) \omega(\lambda) d\lambda + \alpha \omega(\tau) = \sum_{i=0}^n \gamma_i \tau^i e^{-c\tau}, \quad (15)$$

где $K_z(t - \lambda)$ – корреляционная функция помехи; α – коэффициент регуляризации.

Решение уравнения (15) в частотной области

$$W(s) = \frac{\sum_{i=0}^n \gamma_i L\{\tau^i e^{-c\tau}\}}{F_z(s) + \alpha}, \quad (16)$$

где $L\{\cdot\}$ – преобразование Лапласа; $F_z(s)$ – передаточная функция формирующего фильтра помехи.

Соотношение (16) представляет собой передаточную функцию оптимального прогнозирующего фильтра.

Структурная схема АСУ с контуром упреждающего управления по критерию энергетической эффективности приведена на рис. 10.

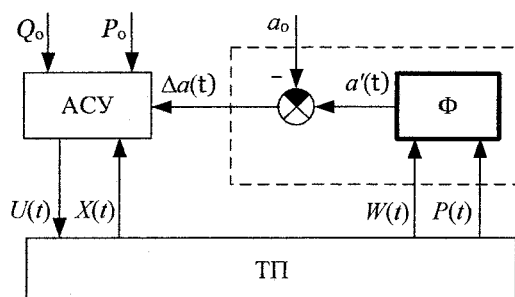


Рис. 10. Структурная схема АСУ с контуром упреждающего управления по критерию энергетической эффективности

2. Теоретические основы повышения эффективности теплоэнергетических комплексов на основе автоматизации мониторинга и прогнозирования остаточного ресурса стареющего оборудования с использованием обобщенных показателей

Рассмотрение вопроса прогнозирования остаточного ресурса стареющего оборудования энергетического комплекса имеет прямое отношение к задаче повышения энергетической эффективности. Дело в том, что прямые потери энергетических ресурсов как раз возникают при авариях в энергетическом комплексе. При чем потери ресурсов могут достигать значительных масштабов. Ущерб здесь может перекрывать эффект от использования АСУ.

Оценка ресурса энергетического оборудования основывается на понятии режимных и параметрических частных ресурсов, определяемых соответственно соотношениями (17), (18):

$$r_i(t) = \frac{|\Pi_{\text{доп}}^{\text{аб}} - \Pi_i(t)|}{|\Pi_{\text{доп}}^{\text{аб}} - \Pi_{\text{ном}}|}, \quad (17)$$

$$\rho_j(t) = 1 - b \int_{t_k}^t \varphi_j(\tau) d\tau, \quad (18)$$

$$\varphi_j = \begin{cases} |P_{\text{доп}}^{\pm} - P_j|, & P_j \notin [P_{\text{доп}}^-, P_{\text{доп}}^+]; \\ 0, & P_j \in [P_{\text{доп}}^-, P_{\text{доп}}^+], \end{cases}$$

где Π_i – текущее значение i -го параметрического показателя работоспособности; $\Pi_{\text{доп}}^{\text{аб}}$ – предельное (аварийное) значение Π_i ; $\Pi_{\text{ном}}$ – номинальное (рабочее) значение Π_i ; r_i – частный параметрический ресурс контролируемого агрегата по Π_i ; P_j – j -й режимный показатель работоспособности; ρ_j –

частный режимный ресурс контролируемого агрегата по показателю P_j ; φ_j – функция отклонения P_j от диапазона допустимых значений $[P_{\text{доп}}^-, P_{\text{доп}}^+]$; b – нормирующий коэффициент; $[t_k, t]$ – интервал времени с момента окончания k -го рассматриваемого ремонта до текущего момента времени.

Типовой подход к оценке текущего ресурса агрегата основан на выявлении критических мест, где возникает аварийная ситуация. Однако использование только частных оценок, несмотря на их чрезвычайную важность, не закрывает полностью проблему оценки состояния оборудования. В рамках АСУ ТП наряду с частными оценками целесообразно использовать обобщенные оценки, которые интегрально характеризуют эволюцию состояния объекта контроля во времени.

Приведем основные соотношения, по которым можно вводить обобщенные показатели работоспособности. При введении обобщенных показателей используются веса частных показателей работоспособности, которые характеризуют относительную величину потерь энергетических ресурсов при возникновении аварии по соответствующему частному показателю:

$$\alpha_i = \frac{c_i}{\sum_j c_j}, \quad i, j = \overline{1, n},$$

$$\alpha_i \geq 0; \quad \sum_i \alpha_i = 1, \quad i = \overline{1, n},$$

где c_i – потери энергетических ресурсов при возникновении аварийной ситуации на энергетическом объекте.

Вводятся следующие обобщенные показатели:

– средневзвешенный показатель работоспособности:

$$R_{\text{ср}}(t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i R_i(t);$$

– средневзвешенное квадратичное отклонение показателей работоспособности:

$$\sigma_{\text{ср}}^2(t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i (R_i(t) - R_{\text{ср}}(t))^2;$$

– взвешенный мультипликативный показатель по критическим ресурсам:

$$R_{\text{кр}}(t) = \prod_{i \in I_{\text{кр}}} R_i^{\alpha_i}(t).$$

На рис. 11 приведена типовая диаграмма эволюции обобщенных показателей. Данная диаграмма дает обзор эволюции состояния объекта контроля по средневзвешенному показателю, по средневзвешенному квадратичному показателю и выбросы по мультипликативному показателю, характеризующего аварийные состояния.

Для прогноза траектории эволюции обобщенных показателей используется специализирован-

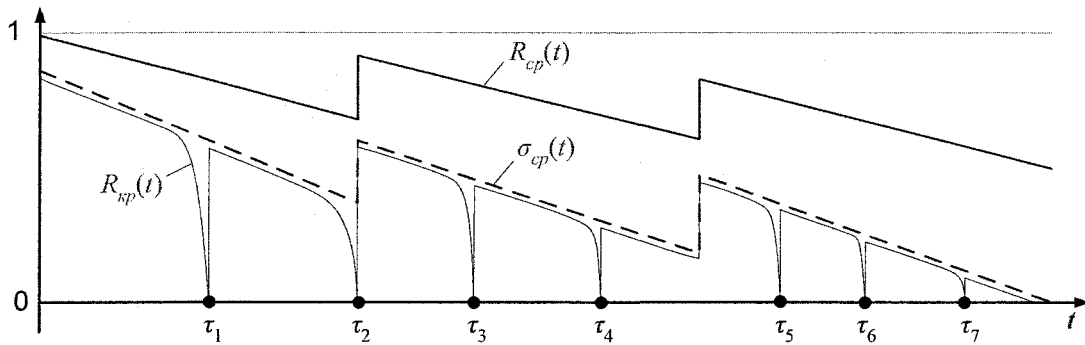


Рис. 11. Типовая диаграмма эволюции обобщенных показателей

ная прогнозная модель, для которой цена ошибки зависит от ее знака.

Общий вид прогнозной модели:

$$y = f[\mathbf{a}](\mathbf{x}), \quad (19)$$

где y – объем потребления ресурса; \mathbf{x} – вектор технологических факторов, \mathbf{a} – вектор структурных параметров прогнозирующих моделей.

Ошибка прогнозирования:

$$e_k = y_k - f[\mathbf{a}](\mathbf{x}_k), \quad k \in I_n, \quad (20)$$

где k – индекс статистического наблюдения, принимающий значение из индексного множества I_n .

На рис. 12 представлена зависимость цены ошибки прогнозирования потерь ресурса.

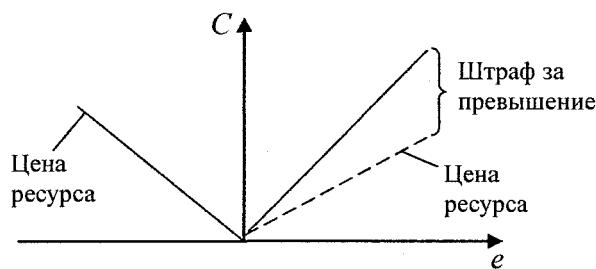


Рис. 12. Цена ошибки прогнозирования потерь ресурса

Суммарный штраф за неточный прогноз

$$C = \sum_k c_r |e_k^-| + \sum_k c_{ш} |e_k^+|, \quad (21)$$

где c_r , $c_{ш}$ – цена ресурса и величина штрафа соответственно; e_k^- , e_k^+ – отрицательные и положительные значения ошибки, определяемые выражением (20).

Предположим, что зависимость (19) имеет линейный характер

$$y = \sum_{j=0}^n a_j x_j, \quad x_0 \equiv 1. \quad (22)$$

Решение задачи будем осуществлять на основе модифицированного критерия

$$S = 0,5 \sum_k s_r^2 |e_k^-|^2 + 0,5 \sum_k s_{ш}^2 |e_k^+|^2, \quad (23)$$

где s_r , $s_{ш}$ – некоторые весовые коэффициенты; e_k^- , e_k^+ – отрицательные и положительные значения ошибки соответственно,

$$e_k = y_k - \sum_{j=0}^n a_j x_{jk}. \quad (24)$$

Условие минимума критерия (23)

$$\frac{\partial S}{\partial a_i} = -s_r^2 \sum_k I(|e_k^-|) \left(y_k - \sum_{j=0}^n a_j x_{jk} \right) x_{ik} - s_{ш}^2 \sum_k I(|e_k^+|) \left(y_k - \sum_{j=0}^n a_j x_{jk} \right) x_{ik} = 0, \quad (25)$$

где $I(|e_k^-|)$, $I(|e_k^+|)$ – характеристические функции, определяемые выражением

$$I(e) = \begin{cases} 1, & \text{при } e > 0, \\ 0, & \text{при } e \leq 0. \end{cases}$$

Характеристические функции $I(|e_k^-|)$, $I(|e_k^+|)$

определяют вхождение соответствующих слагаемых в состав выражения критерия (23) в зависимости от знака ошибок (24) и удовлетворяют условию

$$I(|e_k^-|) \cdot I(|e_k^+|) = 0.$$

Соотношения (25) определяют систему алгебраических уравнений, которые на основе эквивалентных преобразований можно привести к каноническому виду

$$\sum_{j=0}^n g_{ij} a_j = d_i, \quad i = 0, 1, \dots, n; \quad (26)$$

$$g_{ij} = s_r^2 \sum_k I(|e_k^-|) x_{ik} x_{jk} + s_{ш}^2 \sum_k I(|e_k^+|) x_{ik} x_{jk},$$

$$d_i = s_r^2 \sum_k I(|e_k^-|) y_k x_{ik} + s_{ш}^2 \sum_k I(|e_k^+|) y_k x_{ik}.$$

При фиксированных значениях характеристических функций $I(|e_k^-|)$, $I(|e_k^+|)$ система уравнений (26) будет линейной и может быть решена известными методами. В результате для полученного решения значения характеристических функций $I(|e_k^-|)$, $I(|e_k^+|)$ могут быть пересчитаны.

Дальнейшее решение нелинейной задачи осуществляется итерационно на основе последовательных

решений системы линейных алгебраических уравнений (26) с последующим пересчетом значений характеристических функций. Описанный решающий процесс реализует метод наискорейшего спуска минимизации целевой функции (23). Если решающий процесс сходится, то он сходится к искомому решению.

Выводы

1. Разработан метод построения оперативных упреждающих оценок показателей энергетической эффективности процессов, основанный на использовании обратных моделей динамики технологических объектов управления. Использование указанных оценок в системах адаптивного управления технологическими процессами позволяет в оперативном режиме организовать оптимизацию управления по критериям максимума показателей энергетической эффективности с учетом динамики процессов потребления энергетических ресурсов и выработки продукции.

2. Для решения задач прогнозирования состояния технологического оборудования с пози-

ции системного подхода наряду с используемыми частными показателями работоспособности объектов контроля предложено дополнительно использовать показатель обобщенного остаточного ресурса, который интегрально оценивает текущее состояние объектов контроля. Исследование динамики обобщенного остаточного ресурса по данным эксплуатации позволяет прогнозировать предаварийные состояния объектов контроля и организовать ремонтно-профилактические работы объектов по текущему состоянию.

Литература

1. Горелик, С.И. Прогнозирование случайных колебательных процессов на основе метода экспоненциального сглаживания / С.И. Горелик, Л.С. Казаринов // *Автоматика и телемеханика*. РАН. – 1994. – № 10. – С. 27–34.

2. *Автоматизированные системы управления в энергосбережении (опыт разработки): моногр.* / под ред. Л.С. Казаринова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ: Издатель Т. Лурье, 2010.

Поступила в редакцию 6 июня 2010 г.

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ УЛИЧНЫМ ОСВЕЩЕНИЕМ ГИБКОЙ СТРУКТУРЫ*

Д.А. Шнайдер, Е.И. Крахмалев

STREET ILLUMINATION CONTROL SYSTEMS OF FLEXIBLE STRUCTURE

D.A. Shnayder, E.I. Krakhmalyov

В статье рассмотрены недостатки современных систем управления уличным освещением традиционной структуры, предложена новая структура автоматизированной системы управления освещением с распределенной силовой частью, рассмотрены технологии связи между элементами распределенной системы управления.

Ключевые слова: освещение, управление, передача данных.

Lacks of modern control systems of street illumination with traditional structure are considered. A new structure of the automated control system with the distributed power part is proposed, technologies of communication between elements of the distributed control system are considered.

Keywords: illumination, control, data transmission.

Введение

Одним из основных факторов повышения эффективности использования электрической энергии, затрачиваемой на уличное освещение, является внедрение систем автоматического управления и диспетчерского контроля. Эффективность применения автоматического управления уличным освещением обусловлена нормативными документами [1, 2], допускающими снижение уровня наружного освещения в ночные часы до 50 %. Кроме того, допускается с целью получения дополнительной экономии электроэнергии в вечернее и утреннее темное время суток снижать уровень освещения: на 30 % при уменьшении интенсивности движения до 1/3 максимальной величины; на 50 % при уменьшении интенсивности до 1/5 максимальной величины. При этом из соображений безопасности снижение уровня освещения на 1/3 путем прямого отключения питания одной из фаз, практикуемое в ряде организаций, нельзя считать приемлемым, так как при этом возникают локальные зоны с крайне низким уровнем освещенности, что отрицательно сказывается на безопасности

пешеходов и водителей. Отсюда актуальной задачей является создание автоматизированных систем управления, реализующих функции плавного регулирования уровня уличного освещения в соответствии с заданными алгоритмами управления. Решение данной задачи требует разработки принципов структурной организации и методов управления освещением, обеспечивающих требуемую функциональность, гибкость, надежность и энергоэффективность систем уличного освещения.

В общем виде структура традиционной системы управления включает в себя следующие уровни:

1. Верхний уровень автоматизированного диспетчерского управления (АСДУ), включающий сервер базы данных и автоматизированные рабочие места (АРМ) пользователей на базе ПЭВМ.
2. Средний уровень, представленный автоматизированными пунктами питания (АПП) линий освещения, подключенных с помощью проводных либо беспроводных линий связи к серверу верхнего уровня.
3. Нижний (полевой) уровень, представленный светильниками, подключенными к АПП.

* Работа выполнена в рамках реализации федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

Шнайдер Дмитрий Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации и управления ЮУрГУ; shnayder@ait.susu.ac.ru

Крахмалев Евгений Игоревич – аспирант кафедры автоматизации и управления ЮУрГУ; christian_e@mail.ru

Shnayder Dmitry Aleksandrovich – PhD, assistant professor of Automation and Control Department of SUSU; shnayder@ait.susu.ac.ru

Krakhmalyov Evgeny Igorevich – postgraduate student of Automation and Control Department of SUSU; christian_e@mail.ru

Верхний уровень рассматриваемой структуры представляет собой традиционное решение для систем промышленной автоматизации и включает в себя систему управления базой данных (СУБД), например Oracle, MS SQL и др., а также SCADA-систему одного из производителей, широко представленных на рынке (НПО «МИР», НПП «Политех-Автоматика» и др.). Поэтому далее остановимся на рассмотрении структуры взаимодействия АПП с устройствами полевого уровня.

Современные АПП линий освещения ведущих производителей представляют собой достаточно сложные и многофункциональные электротехнические устройства, включающие блок автоматического управления освещением по временному расписанию и/или по сигналу с фотореле, блок связи с диспетчерским пунктом (GSM/GPRS-модем, сеть Ethernet и др.), электросчетчик и бесконтактный силовой блок управления, обеспечивающий повышенную надежность по сравнению с традиционными электромагнитными пускателями. При этом, однако, вследствие больших нагрузок и пиковых токов, достигающих 100 А и более по каждой фазе, бесконтактный силовой блок представляет собой достаточно габаритное устройство, оснащенное мощным радиатором охлаждения силовых элементов, а также системами электронных силовых защит и блокировок. Указанные факторы приводят к существенному удорожанию АПП (до 1,5 раз), увеличению его габаритов и снижению энергоэффективности. Кроме того, использование традиционных АПП, реализующих функции пофазного управления нагрузок, не решает проблемы безопасного снижения уровня освещенности в ночное время, о чем уже говорилось ранее. Поэтому с точки зрения энергосбережения вариант структурного построения системы управления освещением, основанный на использовании АПП с силовыми бесконтактными блоками управления, на наш взгляд нельзя считать оптимальным.

От указанных недостатков свободна рассматриваемая далее структура автоматизированной системы управления освещением с распределенной силовой частью. В такой системе функции коммутации нагрузок выполняют электронные пускорегулирующие аппараты (ЭПРА), устанавливаемые непосредственно в светильниках. Управление и контроль режимов работы ЭПРА осуществляется при помощи встроенных локальных интеллектуальных регуляторов, оснащенных интерфейсами связи с АПП. При этом в самих АПП вместо громоздких силовых блоков предусматриваются интерфейсы связи с ЭПРА, обеспечивающими индивидуальный контроль и регулирование уровня освещенности каждого светильника.

Ключевым вопросом в реализации рассматриваемой распределенной структуры является вопрос технологии передачи данных между АПП и ЭПРА светильников. Наиболее перспективными

вариантами организации передачи данных, на наш взгляд, являются:

- 1) передача цифровых сигналов управления по отдельному проводнику в составе самонесущего изолированного провода (СИП);
- 2) передача сигналов управления по силовым питающим линиям при помощи PLC-модемов, устанавливаемых в ЭПРА и в АПП;
- 3) применение для передачи данных мало-мощной радиосети стандарта ZigBee.

Рассмотрим особенности указанных вариантов структурной организации распределенной системы управления освещением.

Первый вариант (рис. 1) отличается относительной простотой и дешевизной приемо-передающих устройств, а также высокой помехоустойчивостью канала связи. Однако его недостатком является необходимость прокладки СИП с дополнительной жилой, что увеличивает его стоимость. При этом оценочные расчеты показывают, что увеличение стоимости СИП практически компенсируется низкой стоимостью приемо-передатчиков, что в настоящее время позволяет рекомендовать данный вариант в качестве базового для построения систем управления.

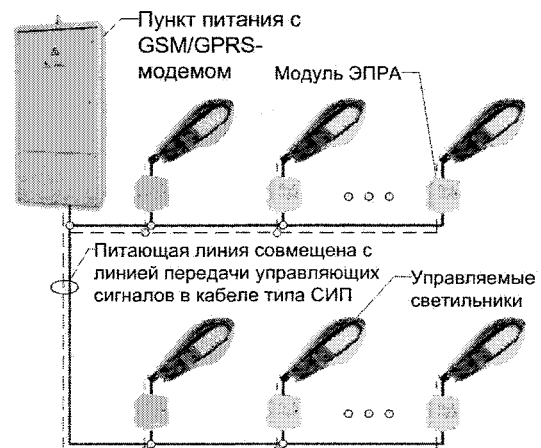


Рис. 1. Структура системы с передачей сигналов управления по отдельному проводнику в составе СИП

Вариант передачи данных с использованием PLC-модемов (рис. 2) достаточно широко применяется в системах связи различного назначения. Современные PLC-модемы обладают хорошей помехоустойчивостью и обеспечивают необходимую для целей распределенного управления освещением скорость передачи данных. Недостатками данной технологии является относительно высокая стоимость модемов и ограниченная дальность связи, зависящая от состояния питающих линий и действия помех. Поэтому практическое применение данного варианта имеет ряд ограничений и требует в общем случае реализации механизма ретрансляции данных, передаваемых от источника к удаленному потребителю сигнала.

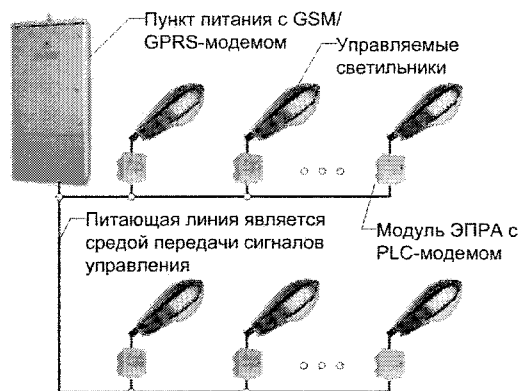


Рис. 2. Структура системы с передачей сигналов управления с помощью PLC-модемов

Вариант на основе радиоинтерфейса ZigBee (рис. 3) отличается наибольшей гибкостью и высокой надежностью за счет реализованного на системном уровне механизма ретрансляции данных и структурного резервирования каналов связи. Суть данного механизма состоит в динамическом поиске и гибком изменении структуры сети, обеспечивающих оперативную реализацию резервных каналов связи при выходе из строя одного либо нескольких элементов сети. При этом условием работы сети при этом является обеспечение максимального расстояния между ближайшими работоспособными элементами сети не выше максимальной дальности связи приемопередатчиков, составляющей около 100 м. Кроме того, стоимость приемопередатчиков ZigBee в настоящее время еще достаточно высока, что также несколько ограни-

чивает возможности применения данной технологии на практике.

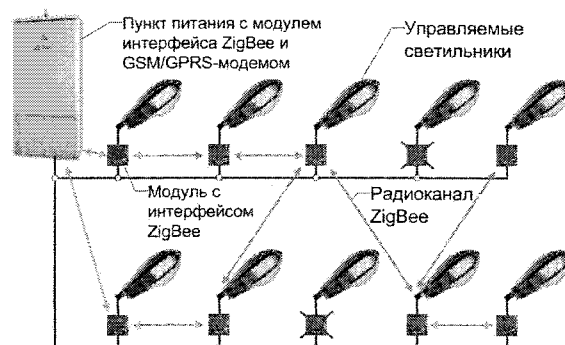


Рис. 3. Структура системы с передачей сигналов управления с помощью радиомодулей стандарта ZigBee

Итоговый выбор варианта структурной организации автоматизированной системы управления уличным освещением зависит от особенностей конкретной системы освещения, объемов финансирования и должен основываться на результатах технико-экономических расчетов.

Литература

1. СНиП 23-05-95. *Естественное и искусственное освещение*. – Введ. 1996-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1995.
2. *Методические рекомендации по определению стоимости эксплуатации объектов уличного освещения*. Центр муниципальной экономики и права. – М., 2006.

Поступила в редакцию 2 июня 2010 г.

УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОННОГО БАЛЛАСТА ДЛЯ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ЛАМП С ЧАСТОТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ МОЩНОСТЬЮ*

А.Ю. Вставский, Е.В. Вставская, В.И. Константинов, В.В. Хатеева

IMPROVEMENT OF THE ELECTRONIC BALLAST CHARACTERISTICS FOR GAS-DISCHARGE LAMPS WITH FREQUENCY POWER CONTROL

A.Y. Vstavskiy, E.V. Vstavskaya, V.I. Konstantinov, V.V. Khateeva

В статье рассматриваются вопросы улучшения характеристик электронного балласта для газоразрядных ламп на основе моделирования электромагнитных процессов в устройстве, применения методов частотного управления выходной мощностью и учета влияния деградации характеристик лампы на режимы работы электронного устройства.

Ключевые слова: ЭПРА, частотное управление, моделирование, учет деградации характеристик.

Improvement of an electronic ballast characteristics for gas-discharge lamps on the basis of modelling of electromagnetic processes in the device, applications frequency power control methods and the account of influence of lamp characteristics degradation on operating modes of the electronic device are considered.

Keywords: HID-ballast, frequency power control, lamp characteristics degradation.

Введение

Газоразрядная лампа высокого давления на текущий момент является наиболее эффективным осветительным прибором благодаря высоким характеристикам удельной отдачи (люмен/ватт) и относительно низкой цене. Однако обеспечение длительного и надежного функционирования лампы связано с поддержанием ее эксплуатационных характеристик в требуемом диапазоне значений, что не всегда обеспечивается при использовании простейших балластных устройств [1, 2].

Современные электронные балласты позволяют, с одной стороны, благодаря наличию корректора коэффициента мощности (ККМ) обеспе-

чить близкое к единице значение $\cos\phi$, с другой стороны обеспечить зажигание лампы и формирование требуемого режима горения за счет частотного управления коммутацией ключей полумостового инвертора (ПМИ) с LC фильтром. Структурная схема балластного устройства, реализующего указанную функцию, представлена на рис. 1.

1. Описание схемы замещения колебательного контура

Эксплуатационной функцией ККМ является формирование на выходном фильтре постоянного по величине напряжения при соблюдении потребляемым током формы напряжения питающей сети.

* Работа выполнена в рамках реализации федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

Вставский Анатолий Юрьевич – инженер кафедры автоматизации и управления ЮУрГУ; tolik@ait.susu.ac.ru

Вставская Елена Владимировна – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации и управления ЮУрГУ; lana@ait.susu.ac.ru

Константинов Владимир Игоревич – доцент кафедры информационно-измерительной техники ЮУрГУ; kvi@ait.susu.ac.ru

Хатеева Виктория Валерьевна – студентка ЮУрГУ; lana@ait.susu.ac.ru

Vstavskiy Anatoliy Yurievich – engineer of Automation and Control Department of SUSU; tolik@ait.susu.ac.ru

Vstavskaya Elena Vladimirovna – PhD, assistant professor of Automation and Control Department of SUSU; lana@ait.susu.ac.ru

Konstantinov Vladimir Igorevich – assistant professor of Equipment for Information and Measuring Department of SUSU; kvi@ait.susu.ac.ru

Khateeva Victoria Valerievna – student of SUSU; lana@ait.susu.ac.ru

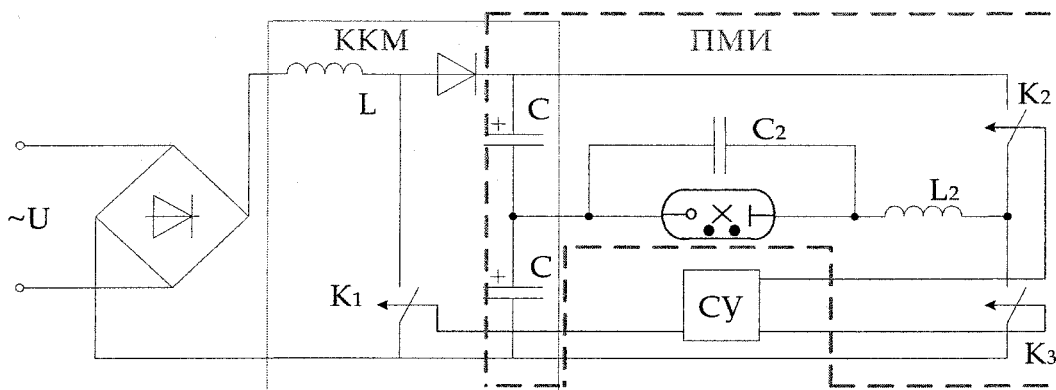


Рис. 1. Структурная схема балластного устройства: ККМ – корректор коэффициента мощности; ПМИ – полумостовой инвертор; СУ – система управления

Структурно он построен по схеме повышающего преобразователя напряжения, выходной фильтр представлен последовательным соединением конденсаторов для лучшего согласования с полумостовым инвертором.

Полумостовой инвертор резонансного типа реализует частотное управление током нагрузки за счет использования в нагрузочной цепи дросселя L_2 . Наличие конденсатора C_2 позволяет обеспечить формирование высоковольтного зажигающего напряжения при работе контура на резонансной гармонике.

Следует отметить, что основной проблемой использования такой схемы электронного балласта является непостоянство электрических характеристик газоразрядной лампы, так как в процессе эксплуатации лампа деградирует. Изменение свойств лампы принято оценивать изменением активного сопротивления газоразрядного столба в режиме горения лампы. Для наиболее популярных ламп (ДНАТ-250) это сопротивление может изменяться от 27 до 104 Ом. Изменение активного сопротивления приводит к изменению электрической мощности, потребляемой лампой, и для ее стабилизации применяется частотное управление коммутаторными ключами.

Для анализа воздействия частоты коммутации и изменяющегося активного сопротивления лампы на энергетические режимы преобразователя построена математическая модель, отражающая работу резонансного колебательного контура на основной гармонике коммутационного напряжения. Схема замещения колебательного контура представлена на рис. 2, где U_1 – входное гармоническое напряжение основной гармоники входного коммутационного напряжения; U_2 – напряжение на газоразрядной лампе; C_1 – эквивалент выходного сопротивления полумостового преобразователя; L – токостабилизирующий дроссель; C_2 – резонансный поджигательный конденсатор; R – активное сопротивление газоразрядной лампы.

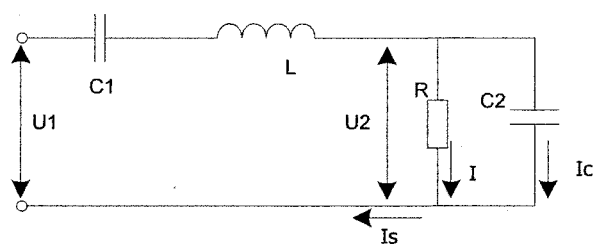


Рис. 2. Схема замещения колебательного контура

2. Режим работы схемы замещения

Рассматривая режим работы схемы на основной гармонике, имеем:

$$U_2 = U_1 \frac{R \parallel \frac{1}{j\omega C_2}}{R \parallel \frac{1}{j\omega C_2} + \frac{1}{j\omega C_1} + j\omega L},$$

$$\text{где } R \parallel \frac{1}{j\omega C_2} = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C_2}} = \frac{R}{1 + j\omega RC_2},$$

тогда

$$\begin{aligned} U_2 &= U_1 \frac{\frac{R}{1 + j\omega RC_2}}{\frac{R}{1 + j\omega RC_2} + \frac{1}{j\omega C_1} + j\omega L} = \\ &= U_1 \frac{R}{R + \frac{1 + j\omega RC_2}{j\omega C_1} + (1 + j\omega RC_2)j\omega L} = \\ &= U_1 \frac{1}{\left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right) + \frac{1}{j\omega RC_1} + j\omega \frac{L}{R} - \omega^2 LC_2} = \\ &= U_1 \frac{1}{\left(1 + \frac{C_2}{C_1} - \omega^2 LC_2\right) + j\left(\omega \frac{L}{R} - \frac{1}{\omega RC_1}\right)}. \end{aligned}$$

Учитывая, что для гармонического сигнала мощность, выделяемая в активном сопротивлении,

$$P = \frac{(U^M)^2}{2R}, \text{ можно записать:}$$

$$2PR = \frac{(U_1^M)^2}{\left[\left(1 + \frac{C_2}{C_1} - \omega^2 LC_2 \right) + j \left(\omega \frac{L}{R} - \frac{1}{\omega RC_1} \right) \right]^2};$$

$$\frac{(U_1^M)^2}{2PR} = \left(1 + \frac{C_2}{C_1} - \omega^2 LC_2 \right)^2 + \left(\omega \frac{L}{R} - \frac{1}{\omega RC_1} \right)^2;$$

$$\frac{(U_1^M)^2}{2PR} \omega^2 = \left(\left(1 + \frac{C_2}{C_1} \right) \omega - \omega^3 LC_2 \right)^2 + \left(\omega^2 \frac{L}{R} - \frac{1}{RC_1} \right)^2,$$

откуда

$$\begin{aligned} & \left(1 + \frac{C_2}{C_1} \right)^2 \omega^2 - 2 \left(1 + \frac{C_2}{C_1} \right) LC_2 \omega^4 + \\ & + (LC_2)^2 \omega^6 + \left(\frac{L}{R} \right)^2 \omega^4 - 2 \frac{L}{R^2 C_1} \omega^2 + \\ & + \left(\frac{1}{RC_1} \right)^2 - \frac{(U_1^M)^2}{2PR} \omega^2 = 0. \end{aligned}$$

Конечное уравнение:

$$\begin{aligned} & (LC_2)^2 \omega^6 + \left[\left(\frac{L}{R} \right)^2 - 2 \left(1 + \frac{C_2}{C_1} \right) LC_2 \right] \omega^4 + \\ & + \left[\left(1 + \frac{C_2}{C_1} \right)^2 - 2 \frac{L}{R^2 C_1} - \frac{(U_1^M)^2}{2PR} \right] \omega^2 + \left(\frac{1}{RC_1} \right)^2 = 0. \end{aligned}$$

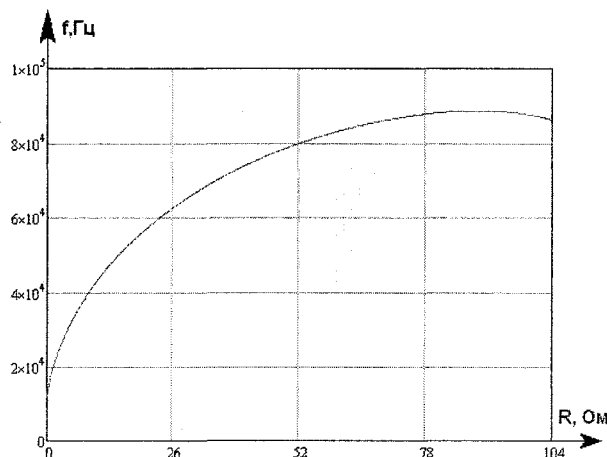


Рис. 3. Зависимость частоты коммутации от сопротивления лампы

3. Расчет схемы замещения

При фиксированных параметрах схемы замещения:

$$L = 138 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}; C_1 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф};$$

$$C_2 = 3,4 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}; P = 250 \text{ Вт}; U_1^M = 255 \text{ В}.$$

Построим характеристику зависимости требуемой частоты коммутации сопротивления (рис. 3).

В табл. 1 представлены численные значения зависимости частоты коммутации от активного сопротивления лампы.

Таблица 1
Зависимость частоты от сопротивления

R, Ом	27	53	104
f, кГц	63,4	80,3	86,2

Для устранения токовой перегрузки преобразователя при низких значениях частоты коммутации ограничим минимальное значение частоты на уровне 57 кГц (рис. 4).

При этом зависимость напряжения на активном сопротивлении лампы от ее сопротивления будет иметь следующий вид:

$$U_2 = \frac{U_1^M}{\sqrt{\left(\left(1 + \frac{C_2}{C_1} \right) - (2\pi f)^2 \cdot L \cdot C_2 \right)^2 + \left(\frac{2\pi f \cdot L}{R} - \frac{1}{2\pi f \cdot R \cdot C_1} \right)^2}}$$

В табл. 2 и на рис. 5 представлена зависимость напряжения на газоразрядной лампе от ее сопротивления.

Таблица 2
Зависимость напряжения на лампе от ее сопротивления

R, Ом	27	53	104
U ₂ , В	116,19	162,79	228,04

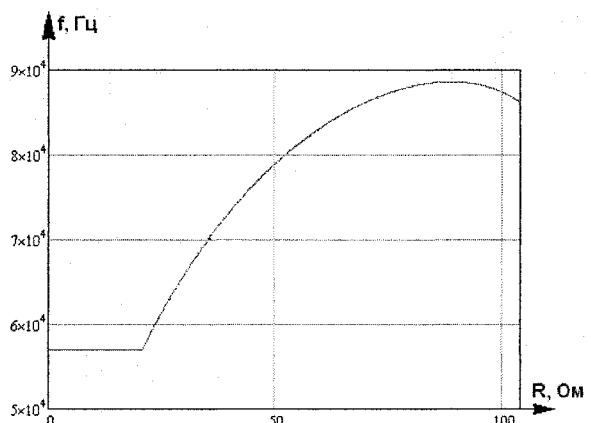


Рис. 4. Зависимость частоты коммутации с ограничением от сопротивления лампы

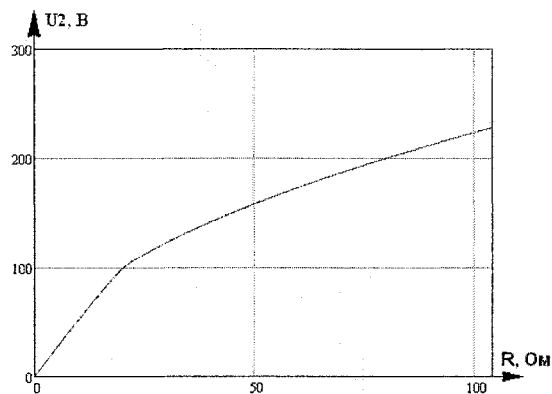


Рис. 5. Зависимость напряжения на газоразрядной лампе от ее сопротивления

Ограничение позволяет сформировать ток лампы (рис. 6 и табл. 3):

$$I = \frac{U_2}{R\sqrt{2}}$$

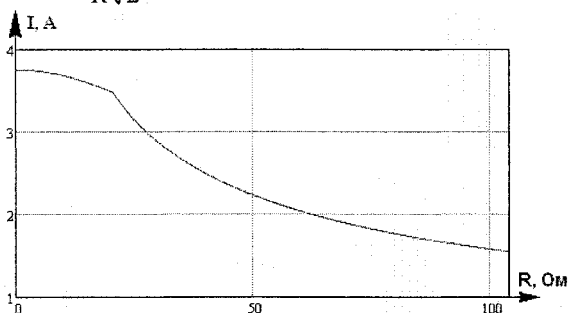


Рис. 6. Зависимость тока лампы от ее сопротивления

Таблица 3

Зависимость тока от сопротивления лампы

R, Ом	27	53	104
I, A	3,043	2,172	1,55

Для анализа влияния резонансного конденсатора (C_2) на энергетические характеристики лампы, проанализируем зависимость тока через конденсатор от сопротивления лампы (рис. 7):

$$I_C = \frac{2\pi f \cdot U_2 \cdot C_2}{\sqrt{2}}$$

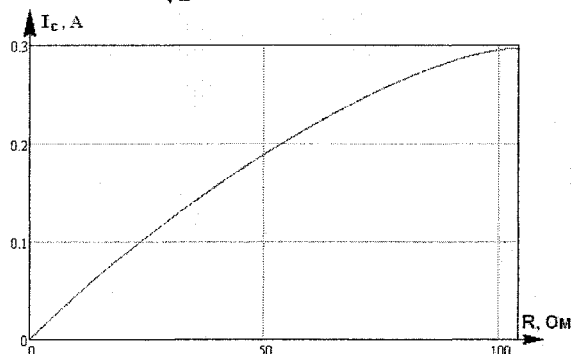


Рис. 7. Зависимость тока через резонансный конденсатор от сопротивления газоразрядной лампы

Отсюда можно сделать вывод, что ток несущественно влияет на характеристику лампы.

Определим зависимость электрической мощности лампы от ее активного сопротивления при постоянной частоте коммутации (рис. 8).

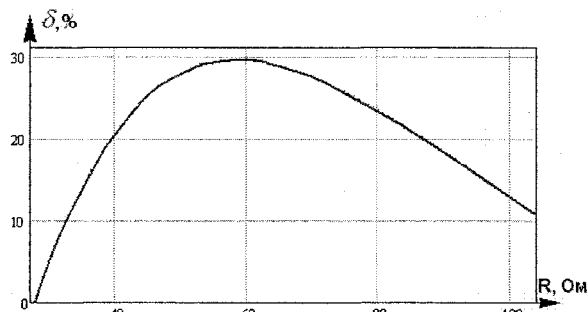


Рис. 8. Погрешность мощности лампы, с фиксированной частотой коммутации

Из графика видно, что за время жизни лампы при фиксированной частоте коммутации ключей ПМИ электрическая мощность лампы изменяется на 30 %, что, с одной стороны, сокращает жизненный цикл лампы за счет перегрузки по мощности, с другой, может считаться объектом энергосбережения, поскольку светотехническое проектирование использования светильников предполагает получение минимально гарантированной световой отдачи, а она меняется с течением времени.

Устранение этого недостатка – построение ПМИ с обратной связью по потребляемой мощности с целью ее стабилизации. В качестве сигнала о текущей потребляемой мощности легко использовать сигнал выходного тока ККМ, поскольку его выходное напряжение фиксировано, а КПД стремится к единице.

Следует отметить, что проведенный электрический анализ по сигналам основной гармоники дает высокую точность определения токов и напряжений, поскольку расчетные и экспериментальные результаты анализа электрических режимов отличаются не более чем на 3 %.

Литература

1. Ben-Yakov, Smuel. Design and Performance of an Electronic Ballast for High-Pressure Sodium (HPS) Lamps / Smuel Ben-Yakov, Michael Gulko // IEEE Transaction on Industrial Electronics. – Aug. 1997. – Vol. 44, № 4.
2. Евстифеев, А.Н. Особенности построения балластов для ламп высокого давления / А.Н. Евстифеев // Силовая электроника. – 2008. – № 3.

Поступила в редакцию 12 июня 2010 г.

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СЕТЬЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПАРΟΣНАБЖЕНИЯ

И.Е. Вахромеев

DISTRIBUTION AUTOMATED SYSTEM, INDUSTRIAL STEAM SUPPLY NETWORK MANAGEMENT

I.E. Vakhromeyev

В статье рассматривается автоматизированное управление сложной системой технологического пароснабжения крупного промышленного предприятия на примере промплощадки ККЦ ОАО «ММК». Приводятся общая характеристика, анализ режимов пароснабжения промплощадки ККЦ, структурная схема разработанной распределенной автоматизированной системы управления пароснабжением промплощадки, результаты математического моделирования.

Ключевые слова: пароснабжение, управление, моделирование.

Automated industrial steam supply network management is considered. A structure of the distributed steam supply management system is proposed. An analysis of network regimes for the Magnitogorsk Steel works case study is implemented. Results of simulation are discussed.

Keywords: steam supply, management, simulation.

1. Общая характеристика и анализ режимов пароснабжения промплощадки ККЦ

Проведем анализ работы сети технологического пароснабжения промышленного предприятия на примере промплощадки кислородно-конвертерного цеха (ККЦ) ОАО «ММК». Структурная схема системы пароснабжения промплощадки ККЦ ОАО «ММК» представлена на рис. 1.

Проблемным вопросом пароснабжения площадки ККЦ является обеспечение максимальной подачи пара на турбины ST-3 с целью увеличения выработки электроэнергии при полном удовлетворении снабжения паром вакууматора ККЦ. Вакууматор работает циклически. При этом подача пара на вакууматор в пиковом режиме достигает до 30 % от общего расхода пара на выходе ППУ. Тем самым работа вакууматора создает существенное ограничение на пароснабжение турбин ST-3 и обуславливает пониженные объемы выработки электроэнергии.

Базовым источником пароснабжения площадки ККЦ является нитка 2 Ду500 ПВЭС-2 (см. рис. 1). Дополнительным источником пара на паропроводе выступает РОУ-2 ЦЭС. РОУ-2 работает в режиме стабилизации давления пара и в автоматическом

режиме частично демпфирует пики нагрузки вакууматора, являясь резервным источником пара в случае технологического останова другого дополнительного источника – котельной № 2 ЛПЦ-10. Центральным элементом пароснабжения площадки ККЦ является энергокорпус (ЭК). Режим работы ЭК определяется установленными в нем паровыми аккумуляторами (ПА). Заряд ПА производится от котлов ОКГ, утилизирующих тепло, образующееся при плавках в кислородных конвертерах ККЦ. Пиковое поступление пара от ОКГ аккумулируется в ПА. Однако объем производства пара от ОКГ является резко переменным и аккумулирующей способности ПА может быть недостаточно для аккумуляции всего пара. В этом случае оператор ЭК осуществляет сброс пара в атмосферу через свечи.

Существенным фактором повышения эффективности пароснабжения турбин ST-3 от ПА является автоматизация управления сбросом пара свечи, что позволит минимизировать потери пара. Другим фактором повышения эффективности работы ПА, является обеспечение эффективного регулирования зарядно/разрядных процессов ПА от котлов ОКГ при переменной нагрузке вакууматора.

Вахромеев Иван Евгеньевич – аспирант кафедры автоматизации и управления ЮУрГУ; vakhromeev@mmk.ru

Vakhromeev Ivan Evgenievich – postgraduate student of Automation and Control Department of SUSU; vakhromeev@mmk.ru

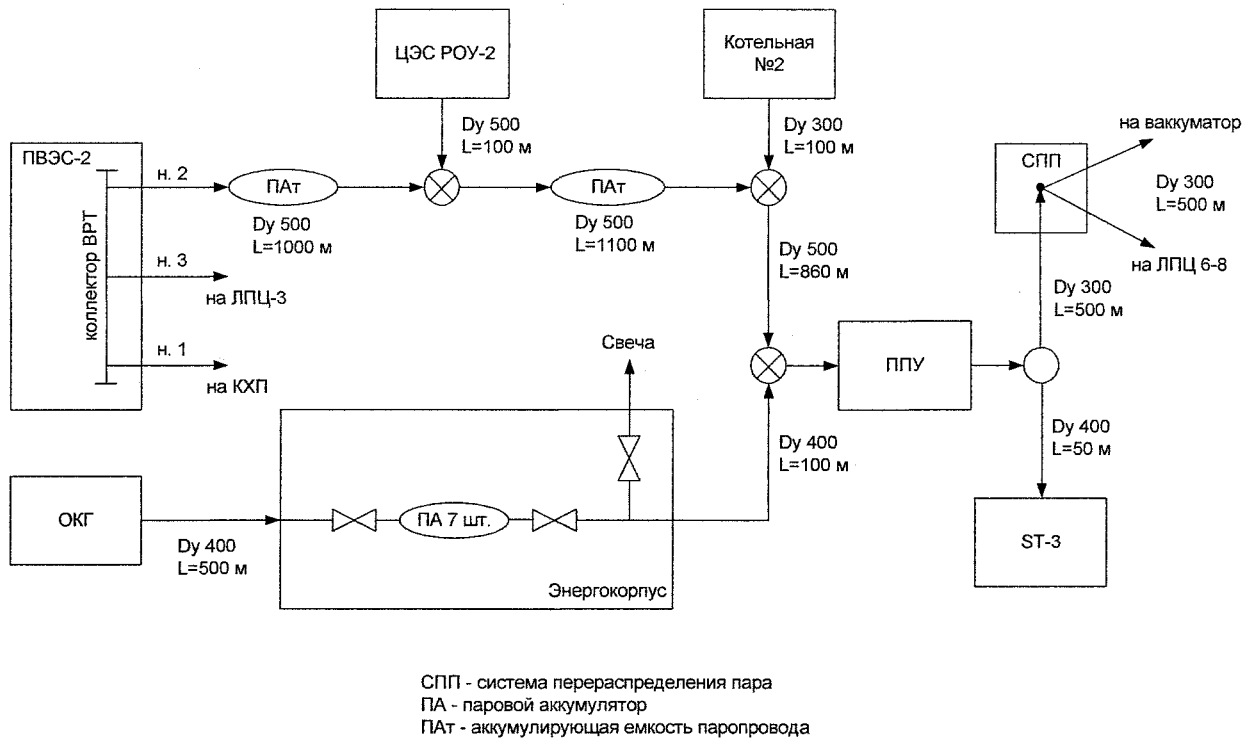


Рис. 1. Структурная схема системы пароснабжения промплощадки ККЦ

Анализ фактических режимов работы системы пароснабжения промплощадки ККЦ показал, что в моменты включения вакууматора при малом расходе пара с ЭК на ППУ, вызванном разрядом ПА, суммарная подача пара на турбины СТ-3 вынужденно снижается на 40–50 т/ч, что приводит к снижению выработки активной электрической мощности на турбинном участке ПСЦ на 4–5 МВт. При этом в случае, когда накопленного в ПА пара достаточно – снижение выработки электроэнергии не происходит.

Таким образом, актуальной задачей оперативного управления пароснабжением промплощадки ККЦ является автоматизация зарядно-разрядных процессов паровых аккумуляторов ЭК и паровых свечей по критерию максимального демпфирования нагрузки вакууматора ККЦ и максимальной подачи пара на турбины СТ-3. Решение данной задачи требует разработки распределенной автоматизированной системы управления пароснабжением промплощадки ККЦ.

2. Распределенная автоматизированная система управления пароснабжением промплощадки ККЦ

Из проведенного анализа функционирования системы пароснабжения промплощадки ККЦ следует, что целесообразным является использовать следующие системы автоматического регулирования (САР) пароснабжения:

1. САР зарядно-разрядными процессами паровых аккумуляторов ЭК.
2. САР распределения пара между вакууматором и ЛПЦ 6-8.

3. САР режимов турбин СТ-3.

4. САР режимов паропровода Ду500 нитки № 2 с помощью РОУ-2 ЦЭС и автоматизированной свечи в районе котельной ППУ.

Так как указанные системы должны работать на единую цель – обеспечение инвариантности системы пароснабжения к переменной нагрузке вакууматора при максимальном повышении уровня пароснабжения турбин СТ-3, то необходима координация их работы. Координацию данных САР можно осуществить с помощью диспетчерской ЭК. С этой целью в диспетчерской ЭК должна находиться программа оптимального планирования пароснабжения площадки ККЦ. В диспетчерскую ЭК поступает упреждающий сигнал с ККЦ за 15–20 минут до начала включения вакууматора. В соответствии с этим сигналом из диспетчерской ЭК должны быть поданы координирующие управляющие сигналы на локальные САР с целью обеспечения инвариантности режима пароснабжения по отношению к нагрузке вакууматора в пределах допустимого технологического уровня.

Общая структурная схема разработанной распределенной автоматизированной системы управления пароснабжением промплощадки ККЦ приведена на рис. 2. Система включает в себя два уровня управления. На верхнем уровне расположены автоматизированные рабочие места диспетчера (АРМ) ПСЦ, энергокорпуса и ККЦ, связанные информационной сетью. Нижний уровень содержит локальные системы автоматического регулирования (локальные регуляторы – ЛР), которые

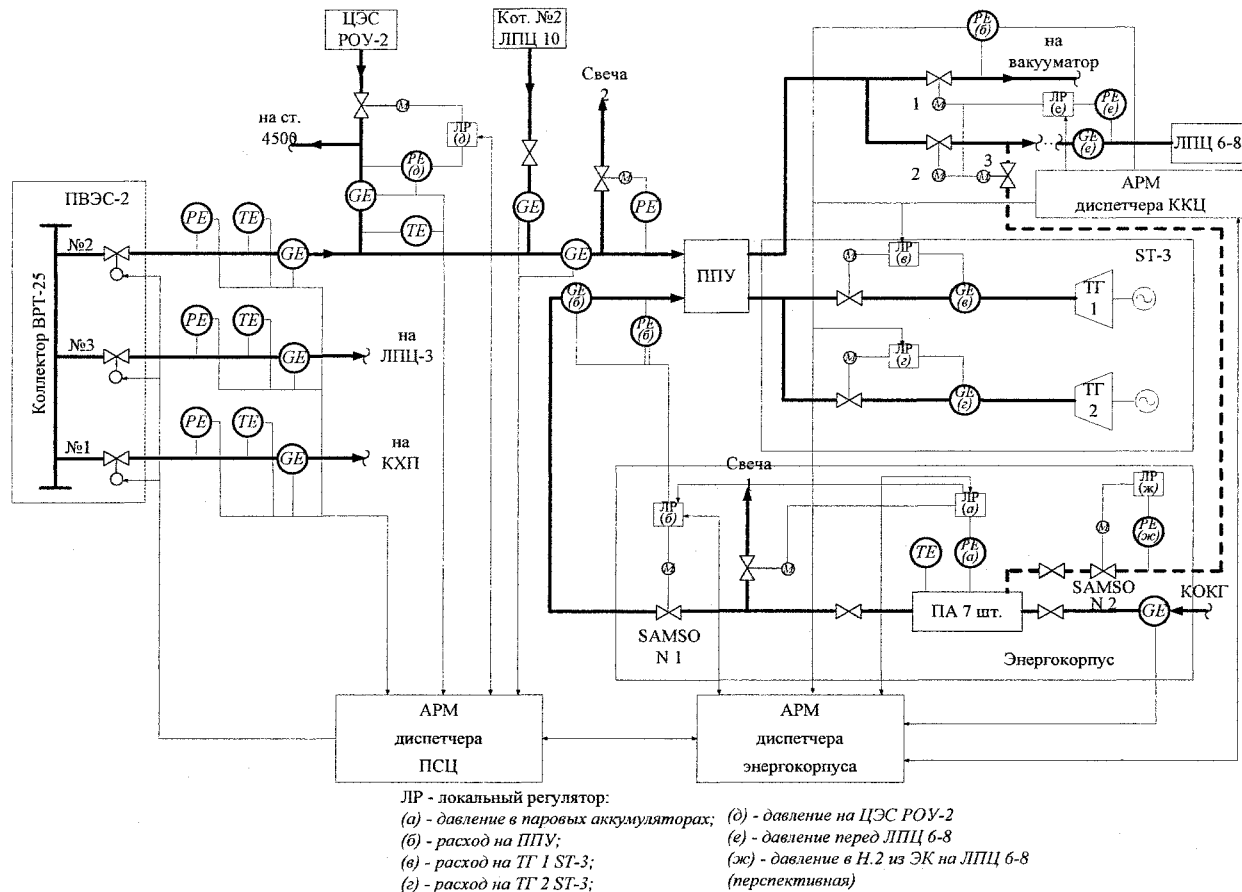


Рис. 2. Структурная схема распределенной автоматизированной системы управления пароснабжением

осуществляют автоматическое регулирование технологических параметров (расход, давление пара) в соответствии с требуемыми значениями, задаваемыми с АРМ верхнего уровня.

Представленная на рис. 2 автоматизированная система включает в себя локальные регуляторы следующих технологических параметров: а) давления пара в пароаккумуляторах; б) давления/расхода пара на ППУ; в) расхода пара на турбогенератор ТГ1; г) расхода пара на турбогенератор ТГ2; д) давления пара на РОУ-2 ЦЭС; е) давления пара на вакууматор; ж) давление пара в нитке 2 из ЭК на ЛПЦ 6-8.

Разряд ПА осуществляется через разрядные паропроводы. Регулирование давления либо расхода пара, подаваемого из ПА на ППУ, осуществляется регулирующим клапаном Samson под управлением локального регулятора ЛР(б). Такой вариант регулирования позволяет демпфировать вариации расхода, вызванные не только включением/отключением котлов ОКГ, но и работой деаэраторов и сетевых бойлеров. Требуемое значение давления либо расхода пара задается с АРМ диспетчера энергокорпуса в зависимости от режима работы вакууматора, упреждающая информация о включении/отключении которого поступает с АРМ диспетчера ККЦ. При этом в зависимости от среднего давления пара в аккумуляторах, опре-

деляемого интенсивностью продувок конверторов, автоматическим регулятором ЛР(а) корректируется текущее задание регулятора ЛР(б) пара, которое увеличивается при увеличении среднего давления в парах в аккумуляторах и уменьшается при его снижении. Время усреднения определяется экспериментально.

Регулируемое ограничение давления пара в пароаккумуляторах энергокорпуса осуществляется регулятором ЛР(а) при помощи электрифицированных задвижек на свече 1. В случае, если давление пара в аккумуляторах достигает заданного максимального значения, происходит постепенное открытие клапана на свече 1 под управлением ЛР(а) в следящем режиме. При снижении давления пара в ПА до допустимого значения сброс пара через свечу автоматически прекращается для контроля давления пара в требуемых допустимых пределах.

В комплексе применение регуляторов ЛР(а) и ЛР(б) позволит с одной стороны ограничить рост давления пара в аккумуляторах и снизить его выброс через свечу, с другой стабилизировать параметры пара подаваемого с энергокорпуса на ППУ.

Регулирование расхода пара на турбогенераторы 1 и 2 осуществляется штатными системами регулирования ЛР(в), ЛР(г) под управлением диспетчера энергокорпуса.

РОУ-2 ЦЭС является резервным источником пара, включающимся в работу в автоматическом режиме с помощью регулятора ЛР(д) при понижении давления на выходе РОУ-2 ниже допустимого предела, задаваемого с АРМ диспетчера ПСЦ в зависимости от текущего режима пароснабжения. При этом избыточное давление пара перед ППУ и котельной № 2 ограничивается в допустимых пределах свечой 2 в автоматическом режиме.

В основе реализации разработанного подхода к автоматизированному управлению пароснабжением промплощадки ККЦ лежит динамическая программная модель, описанная в [1, 2]. Модель позволяет рассчитывать ресурс пара в системе и его прогноз в зависимости от структуры системы, параметров и режимов источников и потребителей пара. Программная модель использует в качестве исходных данных фактические значения параметров пара на источниках и потребителях, получае-

мые из АСУ «Энерго» ОАО «ММК». Результаты расчетов передаются на АРМ диспетчера УГЭ, ПСЦ, энергокорпуса, а также диспетчера, контролирующего работу вакууматора и котлов ОКГ. В результате каждый из указанных диспетчеров получает возможность контролировать не только текущие значения параметров, но и прогнозируемые значения, полученные с помощью модели.

3. Анализ режимов пароснабжения промплощадки ККЦ на основе динамической программной модели

Методика моделирования теплогидравлических паровых систем на ЭВМ изложена в работах [1–3]. Далее рассмотрим режимы работы системы пароснабжения промплощадки ККЦ при работе системы автоматизированного управления на основе использования динамической программной модели. На рис. 3 приведены результаты модели-

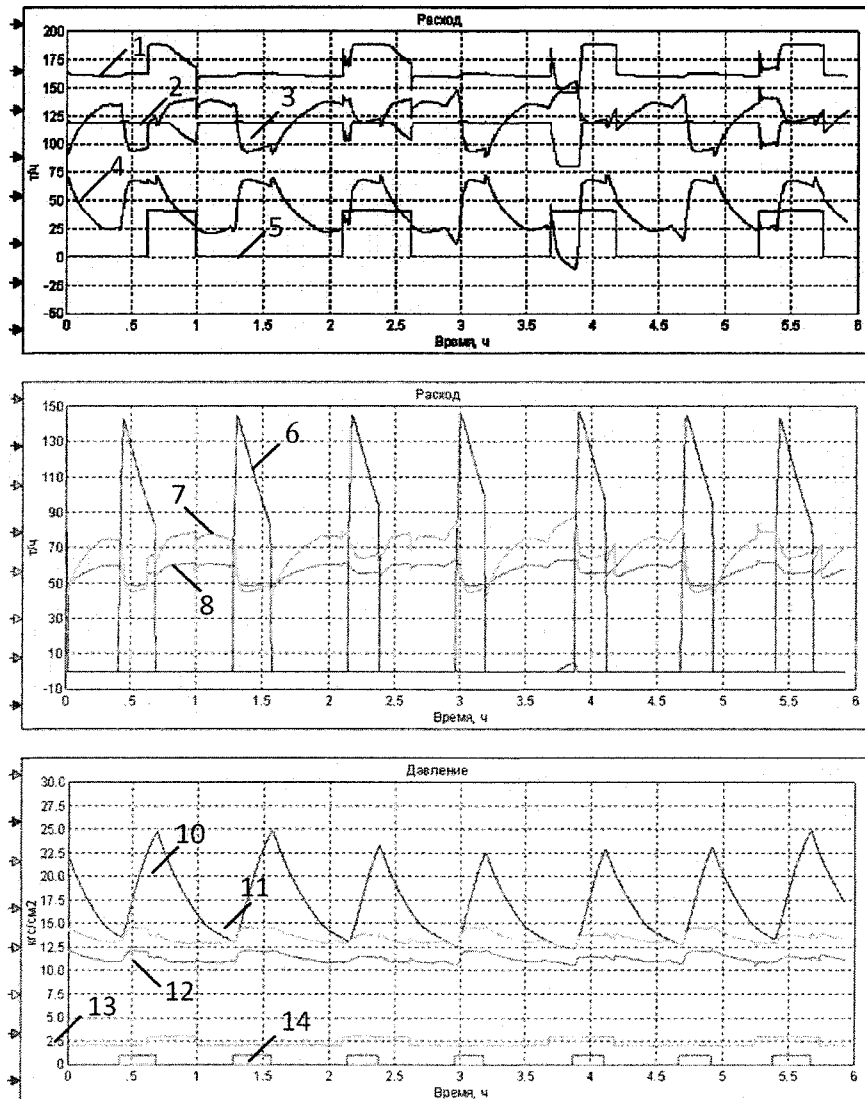


Рис. 3. Моделирование режима пароснабжения промплощадки ККЦ.
 Расход пара: 1 – выход ППУ; 2 – турбины СТ-3; 3 – вход ППУ из сетей; 4 – вакууматор; 6 – котлы ОКГ (деленный на 2); 7 – котельная № 2 ЛПЦ-10; 8 – ПВЭС-2 н.2; 9 – РОУ-2 ЦЭС. Давление пара: 10 – паровые аккумуляторы ЭК; 11 – выход ЭК на ППУ; 12 – вакууматор. Циклограммы работы: 13 – вакууматор; 14 – котлы ОКГ

рования существующего режима пароснабжения промплощадки ККЦ в программном пакете Vissim при следующих условиях: в работе [3] кислородных конвертера, включающиеся попеременно; в работе котельная № 2 ЛПЦ-10; РОУ-2 ЦЭС включена в автоматическом режиме поддержания давления; при снижении давления пара на работающем вакууматоре происходит компенсирующее снижение подачи пара на турбины ST-3; регулирование подачи пара с ЭК на ППУ осуществляется клапаном Samson под управлением автоматического регулятора расхода пара.

Как видно из рис. 3, в рассматриваемом режиме пики нагрузки вакууматора демпфируются за счет паровых аккумуляторов энергокорпуса, повышения подачи пара от ПВЭС-2 н.2 и котельной № 2 ЛПЦ-10. РОУ-2 ЦЭС практически выведена из работы. При этом наблюдаются вынужденные кратковременные снижения подачи пара на турбинный участок ПСЦ (со 120 до 80–100 т/ч) при включении вакууматора, благодаря чему обеспечивается требуемое давление пара на вакууматоре в районе 11–12 кгс/см².

Заключение

В целом, сопоставление полученных результатов моделирования с фактическими данными эксплуатации показывает достаточную для практического использования точность, что свидетельствует об адекватности разработанной математической модели и позволяет на ее основе проводить

анализ режимов и оперативное управление сетью технологического пароснабжения промплощадки ККЦ ОАО «ММК».

Внедрение разработанной автоматизированной системы оперативного управления позволит обеспечить эффективную работу системы пароснабжения промплощадки ККЦ и максимизировать выработку электрической энергии на турбинном участке ПСЦ с учетом технологических особенностей работы источников и потребителей пара.

Литература

1. Казаринов, Л.С. Математическое описание потоков энергоресурсов в сложных сетях с учетом динамики их аккумулярования / Л.С. Казаринов, О.В. Попова, Д.А. Шнайдер // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2007. – Вып. 5. – № 7(79). – С. 29–33.
2. Шнайдер, Д.А. Оперативное управление потоками энергетических ресурсов в производственных сетях с учетом динамики их аккумулярования / Д.А. Шнайдер // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2008. – Вып. 8. – №17(117). – С. 45–49.
3. Шишкин, М.В. Моделирование теплогидравлических систем в среде VisSim / М.В. Шишкин, Д.А. Шнайдер // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2004. – Вып. 3. – № 9(38). – С. 120–123.

Поступила в редакцию 7 июня 2010 г.

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВЕЛЬЦ-ПРОЦЕССОМ

А.Р. Вернергольд, Л.С. Казаринов, О.В. Колесникова

POWER EFFICIENT MANAGEMENT OF ROTARY PROCESSES

A.R. Verner gold, L.S. Kazarinov, O.V. Kolesnikova

В статье рассматривается двухуровневая постановка задачи управления эффективностью вельц-процессов, состоящая из системы нижнего уровня, которая осуществляет стабилизацию параметров режимов, и системы верхнего уровня, которая осуществляет адаптивное управление вельц-процессами, исходя из критерия максимума его эффективности.

Ключевые слова: вельц-процесс, вельц-печь, автоматизированное управление.

A two-level rotary kiln automation management system is considered. Stabilization of regime parameters at the low level is achieved. Adaptive control at the higher level is implemented. Algorithms of obtaining general rotary kiln efficiency are given.

Keywords: rotary process, rotary kiln, automated control.

Введение

В настоящее время в цинковом производстве управление вельц-печью, как правило, ведется машинистом-оператором в ручном режиме. Недостатком ручного управления является то, что параметры режимов при ведении вельц-процессов могут изменяться в широких пределах в рамках технологических допусков. Однако для достижения оптимальности процесса необходимо удерживать его вблизи оптимальных значений параметров. Это можно достичь лишь на основе автоматизированного управления параметрами режимов.

В работе предлагается двухуровневая постановка задачи управления эффективностью вельц-процессов, состоящая из системы нижнего уровня, которая осуществляет стабилизацию параметров режимов, и системы верхнего уровня, которая осуществляет адаптивное управление вельц-процессами, исходя из критерия максимума его эффективности.

1. Краткая характеристика системы автоматизированной стабилизации параметров режимов вельц-процессов

На рис. 1 представлена схема автоматизированного регулирования значений базовых режимных параметров, определяющих тепловой баланс вельц-печи.

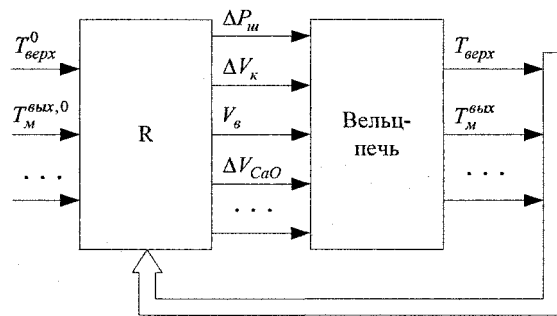


Рис. 1. Структура автоматизированной системы регулирования

Здесь: $T_{\text{верх}}^0$, $T_{\text{м}}^{\text{вых},0}$ – соответственно температура в верхней головке вельц-печи, температура материала при сходе вельц-печи, заданные как номинальные значения согласно технологической схеме ведения процесса вельцевания цинковых кеков; $T_{\text{верх}}$, $T_{\text{м}}^{\text{вых}}$ – соответственно реальные значения температуры в верхней головке вельц-печи, температуры материала при сходе вельц-печи, измеренные соответствующими приборами, передаваемые в блок регулирования R и используемые при автоматизированном регулировании; $\Delta P_{\text{ш}}$,

Вернергольд Александр Рудольфович – начальник цеха КИП, главный метролог ОАО «Челябинский цинковый завод»; arv@zinc.ru

Казаринов Лев Сергеевич – д-р техн. наук, профессор, декан приборостроительного факультета ЮУрГУ; kazarinov@ait.susu.ac.ru

Колесникова Ольга Валерьевна – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматики и управления ЮУрГУ; popova_ov@ait.susu.ac.ru

Verner gold Alexander Rudolfovich – head of Control and Measuring Apparatus Facility, chief metrologist of «Chelyabinsk Zinc Plant» (open joint stock company); arv@zinc.ru

Kazarinov Lev Sergeevich – PhD, professor, dean of Electronics Faculty of SUSU; kazarinov@ait.susu.ac.ru

Kolesnikova Olga Valerjevna – PhD, assistant professor of Automation and Control Department of SUSU; popova_ov@ait.susu.ac.ru

$\Delta V_K, \Delta V_{CaO}$ – отклонения соответственно расхода шихты, коксовой мелочи, известняка в пересчете на оксид кальция на входе печи от номинальных значений, определяемых технологической схемой ведения вельц-процесса, используемые как регулирующие параметры на процессы в вельц-печи; V_B – расход воздуха на вельц-печь.

Автоматизированная система регулирования (см. рис. 1) обеспечивает стабилизацию параметров режимов относительно базовых параметров, определяющих тепловой баланс вельц-печи $T_{\text{верх}}$, $T_M^{\text{вых}}$. Тем самым стабилизируются все процессы, происходящие в вельц-печи, что обеспечивает управляемость ее режимами.

В основе системы автоматизированной стабилизации параметров режимов вельц-процессов лежат факторные модели возможных отклонений от технологического регламента, непосредственно влияющих на эффективность вельц-процесса. Особенность предлагаемых факторных моделей состоит в том, что в них учтены качественные признаки вельц-процессов, измеряемые в порядковых шкалах.

2. Постановка задачи оптимизации режимов вельц-печи

Для решения задачи оптимизации режимов вельц-печи необходимо сформировать целевую функцию оптимизации.

Факторная зависимость целевой функции от действующих факторов представляется в виде

$$g_0 = \sum_{i=1}^5 a_i x_i, \quad x_0 = 1, \quad (1)$$

где g_0 – линейная свертка нормированных показателей расходов шихты и коксовой мелочи; a_i – неизвестные коэффициенты; x_i – значение i -го действующего фактора в относительных единицах.

Постановка задачи оптимизации режимов вельц-печи следующая:

$$\max g_0, \\ g_0 = \sum_{i=1}^5 a_i x_i, \quad x_0 = 1, \quad (2)$$

$$x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max},$$

x_i^{\min}, x_i^{\max} – соответственно минимальное и максимальное значение i -го действующего фактора.

Целевая функция задачи оптимизации строится на основе линейной свертки нормированных показателей расходов шихты и коксовой мелочи:

$$g_0 = \alpha_{\text{ш}} g_{\text{ш}} + \alpha_{\text{к}} g_{\text{к}}, \quad (3)$$

где $\alpha_{\text{ш}}, \alpha_{\text{к}}$ – удельные веса, определяющие значимость нормированных показателей в составе общей целевой функции.

Нормированный показатель загрузки шихты в печь определяется по формуле

$$g_{\text{ш}} = \frac{P_{\text{ш}} - P_{\text{ш}}^{\min}}{P_{\text{ш}}^{\max} - P_{\text{ш}}^{\min}}. \quad (4)$$

Нормированный показатель загрузки шихты в печь определяет непрерывную шкалу изменения загрузки $g_{\text{ш}} \in [0, 1]$. При $g_{\text{ш}} = 0$ работа вельц-печи осуществляется при минимальной производительности. При $g_{\text{ш}} = 1$ производительность вельц-печи соответствует верхнему значению проектной мощности печи. Оценка величины $g_{\text{ш}}$ в автоматизированной системе регулирования вельц-печью (АСУ ВП) осуществляется непрерывно по соотношению (4).

Инверсный нормированный показатель расхода коксовой мелочи определяется по формуле

$$g_{\text{к}} = \frac{V_{\text{к}} - V_{\text{к}}^{\max}}{V_{\text{к}}^{\min} - V_{\text{к}}^{\max}}. \quad (5)$$

Нормированный показатель расхода коксовой мелочи определяет непрерывную шкалу изменения загрузки $g_{\text{к}} \in [0, 1]$. При $g_{\text{к}} = 0$ работа вельц-печи осуществляется при максимальном расходе коксовой мелочи. При $g_{\text{к}} = 1$ работа вельц-печи – при минимальном расходе. Оценка величины $g_{\text{к}}$ АСУ ВП осуществляется непрерывно по соотношению (5).

На удельные веса накладываются условия нормирования:

$$\alpha_{\text{ш}} > 0; \quad \alpha_{\text{к}} > 0; \quad \alpha_{\text{ш}} + \alpha_{\text{к}} = 1.$$

Выбор весов $\alpha_{\text{ш}}, \alpha_{\text{к}}$ может быть осуществлен на основе различных соображений. Так, например, в соответствии с работой [1], где указывается, что «в затратах на получение цинка в виде вельц-возгонов доля затрат на коксовую мелочь составляет 25 %», можно рекомендовать следующие веса нормированных показателей в составе общей целевой функции:

$$\alpha_{\text{ш}} = 0,75, \quad \alpha_{\text{к}} = 0,25.$$

Действующими факторами при решении задачи оптимизации являются:

- расход шихты $P_{\text{ш}}, 15 \leq P_{\text{ш}} \leq 24$ т/ч;
- расход коксовой мелочи $V_{\text{к}}, 1,8 \leq V_{\text{к}} \leq 11,1$ т/ч;
- расход известняка (оксида кальция) $V_{\text{CaO}}, 0 \leq V_{\text{CaO}} \leq 5$ т/ч;
- расход воздуха V_B :
 - а) сжатого $V_B^{\text{сж}}, 0 \leq V_B^{\text{сж}} \leq 5$ тыс. $\text{нм}^3/\text{ч}$;
 - б) вентиляторного $V_B^{\text{вент}}, 0 \leq V_B^{\text{вент}} \leq 10$ тыс. $\text{нм}^3/\text{ч}$;
- температура в верхней головке вельц-печи $T_{\text{верх}}, 600 \leq T_{\text{верх}} \leq 800$ °С;
- температура материала при сходе вельц-печи $T_M^{\text{вых}}, 1000 \leq T_M^{\text{вых}} \leq 1200$ °С.

Задача (2) является типовой задачей линейного программирования и решается стандартными методами.

Общая процедура оптимизации параметров режимов вельц-процесса реализует метод крутого восхождения в соответствии со следующими этапами:

1. Задаются начальные значения показателей в базовой точке идентификации процесса $s = 0$. Для базовой точки все значения $x_i = 0$.

2. Составляется план активного эксперимента, в соответствии с которым производятся зондирующие изменения значений параметров x_j .

3. На основе метода наименьших квадратов производится идентификация зависимости (1).

4. Решается задача (2) и находится оптимальное решение x_{opt} .

5. В соответствии с направлением движения $x_l = (1-l)x_s + lx_{opt}$

осуществляется изменение параметров режима по шагам.

При этом для каждого шага l осуществляется оценка достигнутого значения $g_0(l)$.

6. Проверяется условие оптимальности достигнутого решения. Решение будет оптимальным, если для полученного решения не наблюдается нарушение ограничений, определяемых явно для вектора x и других параметров, которые определяются неформально машинистом-оператором в процессе регулирования режима.

Режим считается оптимальным, если для формализованных компонент вектора x коэффициенты влияния равны нулю либо совпадают с оптимальными значениями формального решения задачи (2), а сами режимные параметры вельц-процесса удовлетворяют неформальным ограни-

чениям, определяемым машинистом-оператором.

7. Если полученное решение не признано оптимальным, то полученная точка $x_{l,opt}$ принимается в качестве следующей базовой точки идентификации x_{s+1} и осуществляется переход к п. 2.

В противном случае осуществляется «останов» – задача оптимизации режима решена.

3. Результаты экспериментального исследования

На основе разработанных алгоритмов было проведено экспериментальное исследование по данным эксплуатации вельц-печи № 5 ОАО «Челябинский цинковый завод». Результаты экспериментального исследования приведены на рис. 2, 3.

Так, на рис. 2 представлена зависимость нормированного показателя расхода коксовой мелочи.

Для того чтобы из эффективных режимов работы вельц-печи выделить оптимальный, необходимо ввести соответствующую целевую функцию. Была рассмотрена целевая функция вида (3) при различных значениях весов $\alpha_{ш}$, $\alpha_{к}$, составляющих ее нормированных показателей (рис. 3).

При весе нормированного показателя производительности $\alpha_{ш} = 0,75$ и нормированного показателя по расходу коксовой мелочи $\alpha_{к} = 0,25$ оптимальным получается режим максимальной производительности (точка А, рис. 3). При обратном соотношении весов: $\alpha_{ш} = 0,25$, $\alpha_{к} = 0,75$ опти-

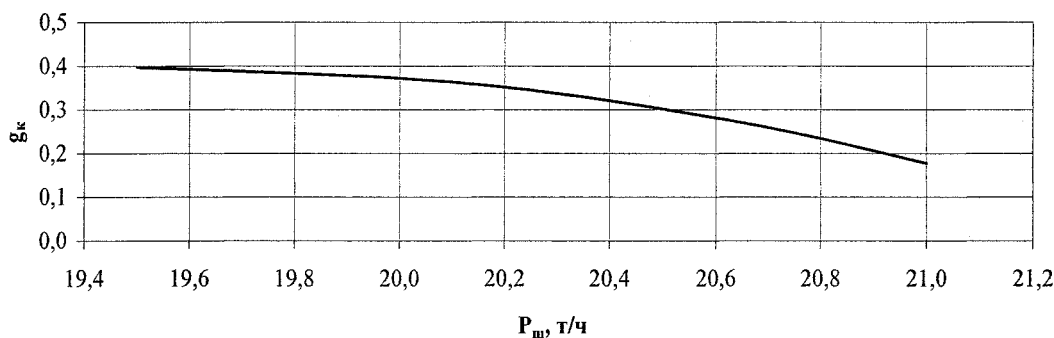


Рис. 2. Зависимость инверсного нормированного показателя расхода коксовой мелочи от производительности вельц-печи по шихте

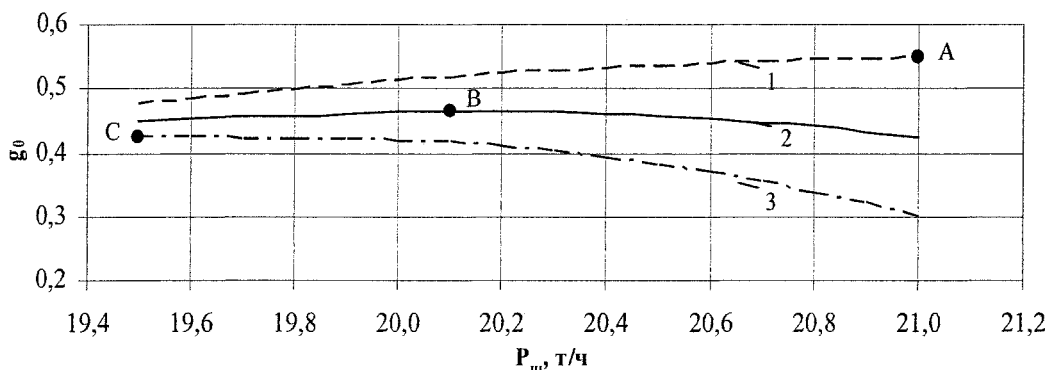


Рис. 3. Целевая функция: 1 – при $\alpha_{ш} = 0,75$, $\alpha_{к} = 0,25$; 2 – при $\alpha_{ш} = 0,5$, $\alpha_{к} = 0,5$; 3 – при $\alpha_{ш} = 0,25$, $\alpha_{к} = 0,75$

мальным получается режим при минимальном расходе коксовой мелочи (точка С, рис. 3). При равенстве весов нормированных показателей оптимальной является средняя точка области Парето, где снижение расхода коксовой мелочи и рост производительности сбалансированы по величине (точка В, рис. 3).

Выбор оптимального решения осуществляется в зависимости от целевой установки ведения вельц-процесса, которая задается технологами.

Заключение

Вследствие значительного воздействия возмущающих факторов на режимные параметры вельц-процессов решение задач оптимизации режимов

необходимо осуществлять на основе двухуровневой постановки задачи управления. На нижнем уровне должна решаться задача стабилизации параметров режимов вельц-печи. На верхнем уровне решается задача экстремального управления по критерию максимальной производительности печи при снижении энергетических затрат.

Литература

1. Козлов, П.А. Вельц-процесс / П.А. Козлов – М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2002.
2. Лисиенко, В.Г. Вращающиеся печи: теплотехника, управление и экология: справ. изд.: в 2 кн. / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелоков, М.Г. Ладыгичев; под ред. В.Г. Лисиенко. – М.: Теплотехник, 2004.

Поступила в редакцию 11 июня 2010 г.

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И АВТОМАТИЗАЦИИ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ЗДАНИЙ

С.В. Панферов, А.И. Телегин, В.И. Панферов

SOME PROBLEMS OF ENERGY SAVING AND AUTOMATION OF BUILDINGS HEAT SYSTEMS

S.V. Panferov, A.I. Telegin, V.I. Panferov

Рассматривается решение проблемы энергосбережения при теплоснабжении зданий за счет применения систем автоматического управления. Приводится аналитический обзор по данной проблематике и выявляются основные направления совершенствования систем автоматизации теплового режима зданий.

Ключевые слова: энергосбережение, температура, теплоснабжение, тепловой режим, принцип управления, система автоматизации, адаптация.

We consider the problem of energy saving in heat supply of buildings through the use of automatic control systems. When the custom-analytical review on this issue, tick and identifies key issues for improving automation of thermal conditions of buildings.

Keywords: energy saving, temperature, heat, heat treatment, the principle of control, automation system, adaptation.

Введение

Энергосбережение в жилищно-коммунальной сфере – это одна из первоочередных проблем настоящего времени, требующих незамедлительного решения. При этом следует заметить, что даже относительно небольшой успех в решении этой задачи в силу масштабности энергозатрат приводит к ощутимым эффектам в абсолютном выражении. Данную проблему пытаются решить различными методами, например, часто утверждается, что существенный эффект можно получить за счет установки теплосчетчиков. Однако при этом необходимо учитывать следующее обстоятельство. Нужно очень отчетливо понимать, что установка теплосчетчиков это вообще-то неэнергосберегающее мероприятие, это то, что способствует энергосбережению, но само по себе по своей сути таковым не является. Финансовый выигрыш здесь получается из-за того, что нормы потребления завышены, фактическое энергопотребление ниже расчетного, поэтому оплата за энергоснабжение снижается. Настоящее энергосбережение начинается

только тогда, когда самым серьезным образом начинают заниматься тепловым режимом отапливаемых зданий, исследованием и выявлением его особенностей, разработкой и внедрением систем автоматизации отопления и теплоснабжения в целом. Объясняется это тем, что автоматическое управление позволяет экономить теплоту за счет учета (как правило, опосредованного) тех факторов, учет которых проектно-расчетными методами либо невозможен, либо достаточно проблематичен:

- 1) влияние солнечной радиации;
- 2) тепловыделений от оборудования и людей;
- 3) избыточной мощности системы отопления при данной температуре наружного воздуха;
- 4) оперативного учета колебаний температуры наружного воздуха, скорости и направления ветра и других возмущений со стороны наружной среды;
- 5) хаотичности режима работы систем вентиляции и др.

Поэтому рассмотрим вопросы, связанные с автоматизацией систем отопления, и попытаемся выделить интересные, на наш взгляд, направления

Панферов Сергей Владимирович – аспирант кафедры систем управления и математического моделирования Миасского филиала ЮУрГУ; tgsiv@mail.ru

Телегин Александр Иванович – д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой систем управления и математического моделирования Миасского филиала ЮУрГУ; tgsiv@mail.ru

Панферов Владимир Иванович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции ЮУрГУ; tgsiv@mail.ru

Panferov Sergei Vladimirovich – postgraduate student of Control Systems and Mathematical Modeling Department of The Miass Branch of SUSU; tgsiv@mail.ru

Telegin Alexander Ivanovich – PhD, professor, head of Control Systems and Mathematical Modeling Department of The Miass Branch of SUSU; tgsiv@mail.ru

Panferov Vladimir Ivanovich – PhD, professor, head of Heat and Gas Supply and Ventilation Department of SUSU; tgsiv@mail.ru

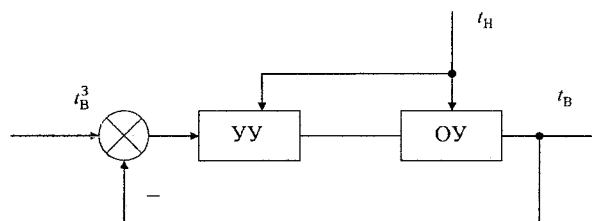
совершенствования автоматизированных систем управления (АСУ) отопительными установками.

Анализ проблематики

Заметим, что в литературе широко известны алгоритмы Е.Я. Соколова [1], предназначенные для компенсации основного возмущения для температурного режима зданий – это температуры наружного воздуха. Эти алгоритмы рассчитаны на использование на источниках теплоты систем централизованного теплоснабжения, именно поэтому, как нам представляется, никакие конкретные теплотехнические характеристики отапливаемых зданий в явном виде в этих алгоритмах не присутствуют. В связи с этим необходимо проанализировать эти алгоритмы и выяснить, как и каким образом при их реализации должны учитываться вообще-то различные теплозащитные свойства зданий и различные теплотехнические и гидравлические характеристики их систем отопления. Как известно, решений, являющихся оптимальными для самых различных условий и характеристик объектов управления, просто быть не может, все должно быть вполне конкретным. Видимо, из-за недостаточной ясности по этим вопросам проблема о температурных графиках достаточно активно обсуждается и до сих пор [2–8]. Выявление этих вопросов позволит разработать концепцию построения интеллектуальных систем управления тепловым режимом зданий. При этом отметим, что для теплового режима зданий известны некоторые разработки в этом направлении [9–13]. Вместе с тем, проблема весьма далека от своего окончательного решения и совершенства.

Оценка характеристик зданий и систем отопления (статических и динамических) важна не только для целей автоматизации, для создания комфортного микроклимата и энергосбережения, но и, например, для определения допустимого времени устранения аварийных ситуаций, для определения теплотерь зданий при отсутствии проектной документации и вообще каких-либо достоверных данных о материалах ограждений и размерах слоев многослойных конструкций и т. п.

При этом следует иметь в виду, что наиболее разумным, на наш взгляд, принципом управления тепловым режимом зданий является комбинированный принцип, когда в структуру системы управления вводится канал компенсации основного возмущения – температуры наружного воздуха и одновременно при этом в системе используется сигнал обратной связи о температуре воздуха внутри так называемых представительных помещений (в представительных точках) здания [14] (см. рисунок). Здесь t_H – температура наружного воздуха, t_B^3 , t_B – соответственно заданное и действительное значения температуры внутреннего воздуха, УУ и ОУ – соответственно управляющее устройство и объект управления.



Структурная схема системы управления

Известно, что эффективность применения принципа компенсации во многом зависит от точности модели, отражающей влияние возмущения на выходную величину объекта управления, т. е. от характеристик канала «температура наружного воздуха – регулируемая температура». Также хорошо известно, что эти характеристики заметно меняются, например, из-за старения здания и его системы отопления, при накоплении влаги в ограждающих конструкциях и т. п. Поэтому вполне понятно, что для построения высококачественной системы управления необходимо своевременно отслеживать изменение этих характеристик, т. е. решать задачу идентификации модели канала, причем лучше всего это делать с помощью адаптивного алгоритма, отличающегося достаточной оперативностью. При этом следует иметь в виду, что нецелесообразно и даже нереально [14, с. 24], чтобы система управления мгновенно реагировала на изменение температуры наружного воздуха. По данным [14, с. 8] подача теплоты по текущей наружной температуре может приводить к большим амплитудам колебания температуры внутреннего воздуха. Как установлено [15], достаточно отслеживать изменение средней за сутки (или средней дневной и средней ночной) температуры наружного воздуха, следовательно, допустимо воспроизводить лишь статическую модель канала, что удовлетворительно может быть реализовано и с помощью неадаптивного алгоритма. Вместе с тем заметим, что за счет обратной связи в рассматриваемой системе управления будут отрабатываться такие возмущения теплового режима как теплотеплоотпущения от людей, от работающего оборудования, за счет солнечной радиации, увеличение потерь теплоты из-за ветра, а также и все погрешности реализации канала компенсации основного возмущения – температуры наружного воздуха, однако известно, что быстродействие контура обратной связи заметно ниже, чем канала компенсации [8].

В настоящее время на практике обычно применяются системы управления, осуществляющие только компенсацию основного возмущения – температуры наружного воздуха, это так называемые погодные регуляторы температуры (погодные компенсаторы). Обратная связь по температуре внутреннего воздуха здесь не реализуется, во многом это обуславливается некоторыми проблемами, связанными с измерением данной величины [16, 17]. В связи с этим были предложены системы управ-

ления по температуре физической модели здания [16, 17], которая, якобы, позволяет получить информацию о температуре внутреннего воздуха простейшим способом [17]. При этом задание погодным регуляторам температуры теплоносителя, подаваемого на вход системы отопления, вычисляется либо по упомянутой кривой Е.Я. Соколова, либо по указанной заказчиком кривой в зависимости от температуры наружного воздуха, для измерения которой могут применяться и специальные инерционные датчики [16, 17]. Причем кривую качественного регулирования можно корректировать (например, меняя ее коэффициент наклона (рассматриваемая кривая вообще-то достаточно близка к прямой) или за счет параллельного переноса), однако все это выполняется эвристическим способом, используя накопленный опыт эксплуатации [18; 19, с. 183], никаких формализованных процедур, как правило, нет. Так, например, пользовательский интерфейс контроллера OUMAN EH-201/L предусматривает возможность задания и последующей корректировки графика регулирования по трем точкам: при температурах наружного воздуха $-20; 0; +20$ °С. Установка требуемой температуры теплоносителя в этих точках осуществляется «ползучим образом» с помощью клавиш «+» или «-» [20]. Очевидно, что часть графика при температурах наружного воздуха выше $+8$ °С просто не используется. У контроллеров «Xenta» так называемый график температуры подачи для погодного регулятора задается ломаной линией с помощью четырех точек, координаты которых указывают, какой должна быть температура теплоносителя на входе системы отопления при данной температуре наружного воздуха. Причем различаются отдельно режимы «день» и «ночь» (с 21:00 до 06:00 часов). Так, например, для г. Челябинска координаты точек графика подачи для режима «день», рекомендуемые Челябинскими тепловыми сетями для всех отапливаемых зданий?!!!, таковы: $(-34; 95); (-10; 67); (0; 53); (20; 20)$, здесь первая координата указывает температуру наружного воздуха, а вторая – температуру прямой воды.

Таким образом, задача создания математического и программного обеспечения АСУ, позволяющих оценивать как текущие статические характеристики, так и динамические свойства объекта управления (здания вместе со своей системой отопления) и в связи с этим достаточно качественно реализующих или принцип компенсации основного возмущения или (что заметно выгоднее) комбинированный принцип, является одной из первоочередных задач, стоящих перед разработчиками современных систем управления.

Поскольку такие значимые возмущающие воздействия как солнечная радиация, ветер действуют лишь на определенные фасады зданий и вызывают существенную неравномерность теплопотерь [21], то вполне естественным является разде-

ление систем отопления и автоматических устройств для них на пофасадные части. Все это следует иметь в виду при разработке АСУ. Как показывают исследования [21–28] пофасадное регулирование в климатических районах со значительными скоростями ветра и большим количеством солнечных дней позволяет получить экономию теплоты до 15–20 %. Об эффективности этого способа регулирования говорят, например, результаты длительных эксплуатационных исследований, выполненных под руководством В.П. Туркина в жилых домах г. Челябинска [22, 23]. Возможно также разделение систем на зоны и по этажам зданий [8]. Пофасадному и позонному регулированию, как нам представляется, следует отдавать предпочтение, так как вполне очевидно, что чем менее пространственно распределенным является объект, тем выше при прочих равных условиях и качество управления.

Так как теплотехнические свойства отдельных помещений здания различны, как различны гидравлические и теплотехнические характеристики установленных в них отопительных приборов, то качественное поддержание требуемой температуры внутреннего воздуха невозможно без применения комнатных регуляторов температуры – так называемых термостатических вентилей [29–33]. Термостатические вентили позволяют также отрабатывать и влияние как горизонтальной, так и вертикальной (поэтажной) гидравлической разрегулировки систем отопления [34]. Термостатические вентили представляют собой регуляторы комнатной температуры прямого действия, выполняющие свою задачу за счет изменения расхода теплоносителя, поступающего в отопительный прибор. Достоинства и недостатки таких систем автоматического регулирования хорошо известны [29–33], отметим только, что по данным работы [29] экономия теплоты за счет их применения составляет до 10 %, а все проблемы, возникающие из-за создаваемых ими возмущений гидравлического режима систем отопления, вполне решаемы [35].

При относительно высоких температурах наружного воздуха температура воды в тепловых сетях поддерживается на более высоком уровне, чем это требуется собственно для нужд отопления. Объясняется это тем, что тепловые сети регулируются по совместной нагрузке отопления и горячего водоснабжения (ГВС). Температура воды в системе ГВС должна быть $55–60$ °С, поэтому температура воды в тепловых сетях не может быть опущена ниже этого уровня. Вследствие этого при регулировании только на источнике теплоты наблюдается так называемый «перетоп» зданий [5, 36–38], системы автоматического управления (САУ) на абонентских вводах позволяют исключить это, здесь разумно применить импульсный режим отопления зданий [39]. Возможно решение этой проблемы и на центральных тепловых пунктах (ЦТП) [8, 38]. Заметим, однако, что если здание

оснащено автономным источником теплоты, то проблемы «перетопа» обычно не возникает, так как состав используемого основного оборудования, средств автоматизации и тепловая схема системы теплоснабжения обеспечивают достаточную независимость контуров ГВС и отопления [33]. При этом в системах ГВС применяются САУ с обратной связью по температуре воды, подаваемой к потребителям. Для решения этой задачи в недавнем прошлом использовали чаще всего регуляторы температуры прямого действия, а в последнее время задействуют отдельные контуры контроллеров отопления и ГВС.

Системы управления, реализующие импульсный режим отопления [39], конструируются по принципу компенсации основного возмущения – температуры наружного воздуха, обратная связь по температуре внутреннего воздуха здесь не используется. Период и скважность подачи расчетного расхода воды подбираются таким образом, чтобы мощность системы отопления равнялась теплотерям здания. Такие системы управления следует отличать от так называемых систем регулирования пропусками, использующих обратную связь по температуре внутреннего воздуха и двухпозиционное регулирование этой температуры, как правило, методом неполного притока [8, 14, 31].

В нерабочее время в общественно-административных и производственных зданиях температура внутреннего воздуха может быть значительно снижена, т. е. возможен так называемый режим прерывистого отопления, при реализации которого следует обеспечивать восстановление нормируемой температуры к началу использования помещения или к началу работы. При этом возникает вопрос об оптимальном способе как снижения температуры внутри зданий, так и разогрева помещений к нужному моменту времени, то есть, необходимо определить вид кривой, по которой необходимо «вести» температурный режим зданий, чтобы потребление тепловой энергии в этом процессе было бы минимальным. Другими словами, эту задачу можно сформулировать так: как наилучшим образом спроектировать и реализовать режим прерывистого отопления, и это также важная задача.

Необходимость управления температурным режимом общественно-административных зданий в течение суток указывалась во многих работах, данные по достигаемой при этом экономии теплоты достаточно различны, в частности, по оценкам авторов работы [40] экономия может достигать от 20 до 35 % в год. Достаточно детальное решение этой проблемы рассмотрено в работе [41].

Рекомендуется и в жилых зданиях в ночное время температуру внутреннего воздуха снижать на 3–4 °С, например, с 21 °С до 17 °С [8]. По данным [8, 26–28] за счет этого может быть сэкономлено до 5–7 % теплоты.

Утверждается также, что изменение температуры внутреннего воздуха с определенной частотой

благоприятно сказывается на самочувствии людей [8], что, очевидно, следует иметь в виду при решении задач автоматизации.

Отметим, что все эти задачи должны быть реализованы только на индивидуальных тепловых пунктах (ИТП) зданий, так как величина каждого ожидаемого эффекта зависит от точности определения характеристик конкретного здания и его системы отопления. Управляющее воздействие должно быть конкретным, нацеленным на выбранное здание. Здания, имеющие различные статические и динамические свойства, даже при одинаковом заданном значении температуры внутреннего воздуха будут требовать различных управляющих воздействий, подобрать одно воздействие (формируемое на ЦТП или источнике теплоты) одинаково хорошее для разных объектов управления просто не возможно. В связи с этим вполне понятно, что по достигаемой точности поддержания температуры воздуха внутри отапливаемых помещений системы автоматизации располагаются в следующей последовательности (в порядке возрастания точности регулирования): 1) системы, размещаемые на источниках теплоты; 2) системы, размещаемые на центральных тепловых пунктах (ЦТП); 3) системы, размещаемые в ИТП; 4) комнатные регуляторы температуры. По оценкам [14] по росту затрат на создание и эксплуатацию (конечно, в условиях сплошной автоматизации) системы автоматизации располагаются в той же последовательности. По этой причине во многих случаях ограничивались автоматизацией источников теплоты или, в лучшем случае, ЦТП.

Плохое качество централизованного регулирования объясняется еще и тем, что «...теплоснабжающая организация старается без особой нужды не дергать температурный график, держа его на приемлемом максимуме» [42]. Делается это из-за нежелания иметь проблемы, обусловленные температурными деформациями трубопроводных систем, а также и ввиду того, что для ТЭЦ выработка электроэнергии является основной задачей, причем объем электрической нагрузки «...мало зависит от погодных условий» [42]. «...В случае потепления надо либо продолжать гнать в систему теплоснабжения воду с повышенной температурой, либо обеспечивать иную ... утилизацию тепла водяного пара. Естественно, выбирается первый вариант» [42].

Регулирование температуры теплоносителя по температуре наружного воздуха возможно как на источнике теплоты, так и на ЦТП и на ИТП, понятно, что пофасадное (позонное) регулирование, также как и регулирование по температуре внутреннего воздуха в представительных помещениях зданий реализуется только на ИТП.

Подчеркивается, что «...необходимость комплексной (...сплошной) автоматизации всех тепловых пунктов тепловой сети или магистрали» обуславливается тем, что «...автоматизация еди-

ничного теплового пункта, принося экономию теплоты данному потребителю, не дает экономии теплоты в целом по сети, поскольку сэкономленный расход горячей воды поступает к другим потребителям, вызывая перегрев их помещений» [43]. Достаточно отчетливо это следует из анализа гидравлического режима тепловой сети [1]: при увеличении гидравлического сопротивления какого-либо абонента пьезометрический график сети, как образно говорят, «разбухает», потери напора на других абонентских вводах увеличиваются, что приводит к увеличению расхода воды на эти абоненты, т. е. к «перетопу». То же самое можно отметить и для комнатных регуляторов температуры: установка их в отдельных помещениях в целом по зданию может и не давать никакой экономии теплоты.

Если учесть вышеуказанное – индивидуальность характеристик зданий и их систем отопления, то становится понятным, почему на ЦТП «...удельная величина экономии (на 1 Гкал/ч присоединенной нагрузки) несколько меньше, чем при автоматизации местного теплового пункта, расположенного в здании особенно пофасадных систем отопления» [43].

Отмечается, что экономическая целесообразность размещения средств автоматизации только на ЦТП повышается при увеличении степени застройки обслуживаемого района зданиями с примерно одинаковыми характеристиками [28], однако и в такой ситуации ветер и солнечная радиация все смещают в сторону автоматизированных ИТП. Если же район застроен зданиями с существенно различными характеристиками ограждающих конструкций и систем отопления, то средства автоматизации безусловно необходимо размещать на ИТП. Однако и в этом случае для получения эффекта по всей системе теплоснабжения необходима автоматизация всех ИТП.

Разработке систем автоматизации ИТП с элеваторным и насосным смешением посвящены работы [44, 45]. Указывается на целесообразность применения позиционного закона регулирования для элеваторных систем отопления [45] и на экономическую эффективность установки насоса смешения на перемычке между подающей и обратной трубами абонентского ввода зданий [44].

В работе [46] сообщается, что при позиционном (двухпозиционном) регулировании водяной системы потребительские качества отопления не ухудшаются, поэтому, учитывая простоту технической реализации, этот закон регулирования рекомендуется к применению в системах автоматизации.

В работе [47] рекомендуют при использовании комнатных регуляторов температуры (термостатических вентилей) отказываться от применения элеваторных узлов смешения, так как энергоэффективная работа системы отопления в этих условиях становится достаточно проблематичной

из-за меняющегося гидравлического сопротивления системы отопления.

По данным авторов работ [47–50] двухтрубные системы отопления выгодно отличаются от однострубных по эффективности совместного применения термостатических вентилей и автоматизированных ИТП.

Понятно, что качественное решение проблем автоматизации невозможно без использования математических моделей (статических и динамических) теплового режима зданий. Вопросы построения таких моделей и оценки статических и динамических свойств объекта управления рассматривались в работах [51–58].

Технологические аспекты автоматизации теплового режима зданий рассмотрены в работах [8, 22, 26–28, 31, 59–61]. В работе [61], в частности, утверждается, что погодная компенсация, реализуемая по температуре обратной воды, предпочтительнее, так как этот импульс отражает, в том числе, и величину расхода воды на абонентский ввод, т.е. позволяет косвенно контролировать гидравлический режим системы. При повышенном расходе воды на ввод при прочих равных условиях повышается температура обратной воды, а расходы воды на другие абоненты, как это следует из анализа гидравлического режима тепловой сети [1], снижаются, что приводит к ухудшению их режима теплоснабжения. Заметим, однако, что эта рекомендация имеет значение только при отсутствии в системе управления тепловым режимом здания контура обратной связи по температуре внутреннего воздуха.

Заключение

Таким образом, все вышеизложенное свидетельствует о заметной незавершенности, о том, что необходимо найти ясные и недвусмысленные ответы на еще многие вопросы, связанные с проблемами энергосбережения и автоматизации в системах теплоснабжения зданий. Причем в случае успешного решения поставленных задач размер выигрыша в части энергосбережения будет достаточно весомым, т.к. в настоящее время ИТП зданий, как правило, не автоматизированы, некая автоматика имеется только на центральных тепловых пунктах (ЦТП) и на источниках теплоты (ТЭЦ, котельные), ориентирована она на управление группой зданий и поэтому в принципе не может достаточно удовлетворительно решить поставленные задачи. Только АСУ, учитывающая конкретные характеристики конкретных зданий и их систем отопления и непрерывно отслеживающая их изменение, а также содержащая в своем составе оптимально сконструированные локальные контура автоматического регулирования отдельных переменных процесса теплоснабжения, способна определить именно то количество теплоты, которое фактически необходимо для поддержания требуемого температурного режима в здании.

Литература

1. Соколов, Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: учеб. для вузов / Е.Я. Соколов. – 7-е изд., стер. – М.: Изд-во МЭИ, 2001. – 472 с.
2. Рябцев, В.И. Определение значений нормативной температуры обратной сетевой воды в нерасчетном режиме / В.И. Рябцев, Г.А. Рябцев // Новости теплоснабжения. – 2001. – № 03. – С. 44–45.
3. Мелехин, Б.И. Определение температурного графика отпуска тепла от теплоисточника при выполнении гидравлического расчета и наладке тепловых сетей с учетом фактической работы элеваторных узлов / Б.И. Мелехин // Новости теплоснабжения. – 2003. – № 11. – С. 11–12.
4. Кравченко, Г.М. Регулирование параметров теплоносителя открытых систем теплоснабжения / Г.М. Кравченко, В.И. Бабенков, Л.Ф. Риполь-Сарагосси // Новости теплоснабжения. – 2004. – № 10. – С. 17–19.
5. Шелудько, Л.П. Анализ возможности сокращения «перетопа» тепловых потребителей при «изломе» температурного графика теплосети / Л.П. Шелудько // Новости теплоснабжения. – 2004. – № 05. – С. 41–44.
6. Балугев, Е.Д. Экономическая эффективность повышения минимальной температуры в водяных тепловых сетях / Е.Д. Балугев // Изв. вузов. Энергетика. – 1977. – № 12. – С. 74–80.
7. Гершкович, В.Ф. Сто пятьдесят... Норма или перебор? (Размышления о параметрах теплоносителя) / В.Ф. Гершкович // Энергосбережение. – 2004. – № 5. – С. 14–19.
8. Автоматика и автоматизация систем теплогазоснабжения и вентиляции: учеб. для вузов / А.А. Калмаков, Ю.Я. Кувишинов, С.С. Романова, С.А. Щелкунов. – М.: Стройиздат, 1986. – 479 с.
9. Табунчиков, Ю.А. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий / Ю.А. Табунчиков, М.М. Бродач. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2002. – 194 с.
10. Автоматизированная система диспетчерского управления инженерными сетями и коммуникациями торгово-развлекательного комплекса / А. Быкадоров, Г. Гладышев, К. Наранов, В. Тыкшаев // Современные технологии автоматизации. – 2006. – № 4. – С. 14–19.
11. Евдокимов, Я. Системы автоматизации зданий: комфорт плюс экономия. / Я. Евдокимов, А. Яковлев // Современные технологии автоматизации. – 2007. – № 2. – С. 32–43.
12. Швецов, Д. Как здания становятся интеллектуальными / Д. Швецов // Современные технологии автоматизации. – 2007. – № 2. – С. 44–47.
13. Волков, Д. Интеллектуальный мир коттеджей / Д. Волков, Д. Швецов // Современные технологии автоматизации. – 2007. – № 4. – С. 40–45.
14. Зингер, Н.М. Повышение эффективности работы тепловых пунктов / Н.М. Зингер, В.Г. Бес-толченко, А.А. Жидков. – М.: Стройиздат, 1990. – 188 с.
15. Ливчак, В.И. Что ждет Россию в будущем – котельные в каждом доме или все-таки централизованное теплоснабжение на базе теплофикации? / В.И. Ливчак // АВОК. – 2008. – № 2. – С. 10–18.
16. Сафонов, А.П. Регулирование отпуска тепла на отопление по соотношению температур воды и наружного воздуха / А.П. Сафонов, Н.А. Воронкова, В.А. Воронов // Водоснабжение и санитарная техника. – 1978. – № 6. – С. 18–20.
17. Соколов, Е.Я. Групповое регулирование отопительной нагрузки / Е.Я. Соколов, А.В. Извеков, А.С. Булычев // Теплоэнергетика. – 1985. – № 3. – С. 50–56.
18. Одноконтурные регуляторы температуры и давления для систем теплоснабжения. – <http://WWW:www.kontel.ru> E-mail: kontel@vtsnet.ru
19. Монахов, Г.В. Моделирование управления режимами тепловых сетей / Г.В. Монахов, Ю.А. Войтинская. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 223 с.
20. OUMAN EH-201/L: инструкция. – <http://www.ouman.fi>
21. Грислис, В.Я. Автоматизация элеваторных узлов систем отопления / В.Я. Грислис, С.А. Чаки, И.А. Стуйт // Водоснабжение и санитарная техника. – 1981. – № 7. – С. 22–23.
22. Туркин, В.П. Автоматическое управление отоплением жилых зданий / В.П. Туркин, П.В. Туркин, Ю.Д. Тыщенко. – М.: Стройиздат, 1987. – 192 с.
23. Туркин В.П. Экономия тепловой энергии на отопление жилых зданий при централизованном теплоснабжении / В.П. Туркин // Водоснабжение и санитарная техника. – 1982. – № 7. – С. 19–21.
24. Локшин, Л.С. Пофасадное регулирование отопления жилых зданий / Л.С. Локшин // Водоснабжение и санитарная техника. – 1983. – № 4. – С. 17–19.
25. Эффективность пофасадного автоматического регулирования систем отопления / В.И. Ливчак, А.А. Чугункин, В.А. Оленев, В.Л. Карасев // Водоснабжение и санитарная техника. – 1986. – № 5. – С. 11–13.
26. Чистович, С.А. Автоматизация установок и систем теплоснабжения и отопления / С.А. Чистович. – М.: Стройиздат, 1964. – 180 с.
27. Чистович, С.А. Автоматическое регулирование расхода тепла в системах теплоснабжения и отопления / С.А. Чистович. – Л.: Стройиздат, 1975. – 159 с.
28. Автоматизированные системы теплоснабжения и отопления / С.А. Чистович, В.К. Аверьянов, Ю.Я. Темпель, С.И. Быков. – Л.: Стройиздат, 1987. – 249 с.
29. Куклик, Л.Ф. Индивидуальное регулирование температуры в отапливаемых помещениях / Л.Ф. Куклик, В.Д. Курбан, С.П. Петров // Водоснабжение и санитарная техника. – 1981. – № 7. – С. 22–23.

снабжение и санитарная техника. – 1983. – № 3. – С. 12–13.

30. Сергеев, И.С. Регуляторы температуры прямого действия для систем отопления / И.С. Сергеев, Б.Л. Табачник // *Водоснабжение и санитарная техника*. – 1976. – № 9. – С. 33–35.

31. Сафонов, А.П. Автоматизация систем централизованного теплоснабжения / А.П. Сафонов. – М.: Энергия, 1974. – 273 с.

32. Применение средств автоматизации «Данфосс» в системах водяного отопления зданий: пособие / разраб. В.В. Невский. – М.: ЗАО «Данфосс», 2005. – 36 с.

33. Автоматизация систем теплоснабжения коттеджей и квартир в многоэтажных зданиях: пособие / разраб. В.В. Невский. – М.: ООО «Данфосс», 2007. – 38 с.

34. Жадович, К.К. Автоматическое регулирование температуры воздуха в помещениях, оборудованных центральным водяным отоплением / К.К. Жадович // *Проблемы отопления жилых и общественных зданий: тр. межвуз. науч. конф.* – Минск: Изд-во Министерства высшего и среднего спец. обр. БССР, 1962. – С. 64–77.

35. Рябцев, Г.А. Совместная работа элеваторов и терморегуляторов в схемах отопления / Г.А. Рябцев, В.И. Рябцев // *Новости теплоснабжения*. – 2004. – № 08. – С. 5–8.

36. Заовражнова, М.Н. О некоторых рациональных схемах и режимах регулирования теплофикационных систем / М.Н. Заовражнова, Л.А. Мелентьев, К.И. Мичурина // *Вопросы автоматизации и режимов эксплуатации городских систем теплоснабжения: тр. Ленинградского инженерно-экономического института*. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. – Вып. 43. – С. 5–15.

37. Черковский, Н.М. Особенности режимов работы систем теплоснабжения в условиях автоматизации потребителей тепла / Н.М. Черковский // *Новости теплоснабжения*. – 2004. – № 03. – С. 16–19.

38. Парамонов, А.А. Реконструкция зависимых систем отопления с организацией регулирования отпуска тепла на ЦТП / А.А. Парамонов // *Энергосбережение*. – 2007. – № 1. – С. 20–21.

39. Дегтярь, А.Б. Построение алгоритма импульсного отопления зданий и исследование режимов его работы / А.Б. Дегтярь, В.И. Панферов // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. – 2008. – Вып. 8. – № 17(117). – С. 41–44.

40. Чеккинато, Л. Современная система управления температурным режимом отапливаемых помещений / Л. Чеккинато, А. Гастальделло, Л. Скибуола // *Энергосбережение*. – 2007. – № 6. – С. 74–78.

41. Анисимова, Е.Ю. Оптимизация температурных режимов общественно-административных и производственных зданий: дис. ... канд. техн. наук / Е.Ю. Анисимова. – Челябинск, 2008. – 172 с.

42. Лачков, В.И. Учет и регулирование теплопотребления / В.И. Лачков, В.К. Недзвецкий // *Экологические системы*. – 2005. – № 2. – http://esco-ecosys.narod.ru/2005_2/art57.htm

43. Громов, Н.К. Автоматизация тепловых пунктов жилых микрорайонов / Н.К. Громов // *Водоснабжение и санитарная техника*. – 1985. – № 3. – С. 26–28.

44. Михайленко, В.К. Экономия тепла при автоматическом регулировании индивидуальных тепловых пунктов с насосами смешения / В.К. Михайленко, Б.С. Борисов // *Водоснабжение и санитарная техника*. – 1982. – № 3. – С. 11–13.

45. Драчнев, В.П. Автоматизированная система централизованного управления работой тепловых пунктов / В.П. Драчнев // *Водоснабжение и санитарная техника*. – 1982. – № 11. – С. 14–17.

46. Гершкович, В.Ф. Динамика изменения параметров отопительной системы при позиционном регулировании / В.Ф. Гершкович // *Энергосбережение в зданиях*. – 2002. – № 15 (№ 2 – 2002). – С. 15–17.

47. Грановский, В.Л. Применение двухтрубных систем отопления с комплексным авторегулированием / В.Л. Грановский, С.И. Прижижский, Н.А. Петров // *АВОК*. – 2001. – № 6. – С. 30–31.

48. Грановский, В.Л. Система отопления жилых зданий массового строительства и реконструкции с комплексным автоматизированием теплопотребления / В.Л. Грановский, С.И. Прижижский // *АВОК*. – 2002. – № 5. – С. 66–69.

49. Яушовец, Р. Гидравлика – сердце водяного отопления / Р. Яушовец. – Вена: Изд-во Герц Арматурен ГмБх, 2005. – 199 с.

50. Тиатор, И. Отопительные системы / И. Тиатор; пер. с нем. Т.Н. Зазаевой. – М.: Изд-во «Техносфера, Евроклимат», 2006. – 271 с.

51. Оценка динамических качеств автоматизированной системы управления технологическими процессами центральных тепловых пунктов на базе микропроцессорного прибора «ТРАНСФОРМЕР» / В.А. Рыженков, М.В. Фролов, А.С. Разговоров, В.М. Кокорев // *Новости теплоснабжения*. – 2004. – № 11. – С. 5–8.

52. Моделирование теплового режима здания / В.Ф. Постаушкин, Д.А. Шнайдер, П.В. Калинин, С.Т. Касюк // *Системы автоматического управления: темат. сб. науч. тр.* – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2000. – С. 66–73.

53. Шнайдер, Д.А. Автоматизация управления системами теплоснабжения промышленных объектов при низкотемпературных режимах: дис. ... канд. техн. наук / Д.А. Шнайдер. – Челябинск, 2003. – 147 с.

54. Казаринов, Л.С. Автоматическое регулирование на тепловых вводах зданий в дефицитных режимах / Л.С. Казаринов, Д.А. Шнайдер // *Энергосбережение в промышленности и городском хозяйстве: сб. тез. докл. науч.-практ. конф.* – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2000. – С. 24–25.

55. Нагорная, А.Н. Математическое моделирование и исследование нестационарного теплового режима зданий: дис. ... канд. техн. наук / А.Н. Нагорная. – Челябинск, 2008. – 148 с.

56. Глухов, В.Н. Регулирование одинаковых параллельных систем отопления / В.Н. Глухов, Е.А. Алешин // Системы автоматического управления: темат. сб. науч. тр. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2000. – С. 30–35.

57. Глухов, В.Н. Расчет параметров настройки процесса теплопотребления в зданиях / В.Н. Глухов, Е.А. Алешин // Приборостроение: темат. сб. науч. тр. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. – С. 150–156.

58. Алешин, Е.А. Энергосберегающая автоматизированная система управления тепловыми

режимами в закрытых тепловых сетях зданий в условиях неопределенности: дис. ... канд. техн. наук / Е.А. Алешин. – Челябинск, 2003. – 162 с.

59. Скрицкий, Л.Г. Основы автоматики и автоматизации систем теплогазоснабжения и вентиляции / Л.Г. Скрицкий. – М.: Стройиздат, 1968. – 248 с.

60. Благих, В.Т. Автоматическое регулирование отопления и вентиляции / В.Т. Благих. – Челябинск: Челябинское книжное издательство, 1964. – 211 с.

61. Драчнев, В.Г. Исследование системы местного автоматического регулирования расхода тепла в эксплуатационных условиях / В.Г. Драчнев, С.Я. Фельдман // Автоматизация отопительных котельных: сб. науч. тр. – Вып. 6. – Л.: Недра, 1971. – С. 129–141.

Поступила в редакцию 2 марта 2010 г.

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

1. **Тематика.** В журнале публикуются статьи по следующим научным направлениям: управление в различных отраслях техники, а также в административной, коммерческой и финансовой сферах; математическое, алгоритмическое, программное и аппаратное обеспечение компьютерных технологий, в том числе компьютерных комплексов, систем и сетей; измерительные системы, приборостроение, радиоэлектроника и связь.

2. **Предоставляемый материал.** В редакцию предоставляются бумажная и электронная (документ Microsoft Word) версии статьи, экспертное заключение о возможности опубликования статьи в открытой печати, информационный листок авторов, где на русском и английском языке указываются: Ф.И.О., место работы и должность для всех авторов, контактная информация ответственного за подготовку рукописи (рабочий и мобильный телефон, адрес для рассылки авторских экземпляров).

3. **Структура статьи.** Статья содержит УДК, название (не более 12–15 слов), список авторов, аннотацию (не более 300 знаков), список ключевых слов, введение, основной текст (структурированный по разделам), заключение (обсуждение результатов), литературу (в порядке цитирования, по ГОСТ 7.1–2003). В конце статьи следуют элементы на английском языке: название, аннотация, список ключевых слов. Бумажная версия статьи подписывается всеми авторами, в конце статьи ставится пометка, что авторы не возражают против размещения статьи в Интернет.

4. **Параметры набора.** Размеры полей: левое – 3 см, правое – 3 см, верхнее и нижнее – по 3 см. Текст статьи набирать шрифтом Times New Roman размером 10 пт. Выравнивание абзацев – по ширине. Отступ первой строки абзаца – 0,7 см. Междустрочный интервал – одинарный. Включить режим автоматического переноса слов. Все кавычки должны быть угловыми («»). Все символы «тире» должны быть среднего размера («-»), а не «-»). Ключевые элементы статьи – шапка, заголовки разделов – следует выделять полужирным. Знак разделения целой и десятичной части числа – запятая. Между числом и единицей измерения должен стоять неразрывный пробел (Ctrl + Shift + Пробел).

5. **Формулы.** Набираются в Microsoft Equation, либо MathType с отступом 0,7 см от левого края. Размер обычных символов – 10 пт, размеры индексов первого порядка – 71 %, индексов второго порядка – 58 %. Номер формулы размещается за пределами формулы, непосредственно после нее, в круглых скобках.

6. **Рисунки и таблицы.** Рисунки имеют разрешение не менее 300 dpi. Рисунки нумеруются и имеют названия (Рис. 1. Здесь следует название рисунка). Таблицы нумеруются и имеют названия (Таблица 1. Здесь следует название таблицы).

7. **Адрес редакции.** 454080 Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, корп. 36, 4 этаж – деканат ПС/КТУР-факультета, зам. отв. ред. д.т.н., проф. Л.С. Казаринову. Адрес электронной почты секретаря журнала: ezfm@yandex.ru

8. **Подробные требования к оформлению.** Полную версию требований к оформлению статей и пример оформления можно загрузить с сайта ЮУрГУ (<http://www.susu.ac.ru>), следуя ссылкам: «Научная деятельность», «Вестник ЮУрГУ», «Серии».

9. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

ВЕСТНИК ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 22(198) 2010

Серия
«КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,
УПРАВЛЕНИЕ, РАДИОЭЛЕКТРОНИКА»
Выпуск 12

Редактор М.Н. Атауллина
Компьютерная верстка С.В. Буновой

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 25.06.2010. Формат 60×84 1/8. Печать трафаретная.

Усл. печ. л. 10,23. Уч.-изд. л. 10,75. Тираж 500 экз. Заказ 249/448.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ. 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.