Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЁТСЯ С 1947 ГОДА

6

2016

Главный редактор
Микрин Е.А. — д.т.н., проф., академик РАН, ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королёва

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:
Белоусов В.Л. — д.э.н., проф., МГУПИ
Ван Сяофэн — д.т.н., проф., Нанкинский ун-т науки и технологии (КНР)
Ван Мэйлин — д.т.н., проф., Пекинский политехнический ун-т (КНР)
Дегтярёв Ю.И. — д.т.н., проф., МАИ
Елисеев В.А. — д.т.н., проф., Ин-т инновац.-технологич. менеджмента
Иванов А.П. — д.э.н., проф., МГУПС (МИИТ)
Криони Н.К. — д.т.н., проф., УГАТУ (г. Уфа)
Мальцева С.В. — д.т.н., проф., НИУ ВШЭ
Микаева С.А. — д.т.н., проф., МГУПИ
Неусыпин К.А. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Нефёдов Е.И. — д.ф.-м.н., ИРЭ РАН
Никифоров В.М. — д.т.н., проф., ФГУП «НПЦАП им. Н.А. Пилюгина»
Осипова В.Г. — ООО «Изд-во Инновационное машиностроение» (заместитель главного редактора)
Пролетарский А.В. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Румянцева О.Н. — генеральный директор ООО «Изд-во Инновационное машиностроение»
Ся Юаньцин — д.т.н., проф., Пекинский политехнический ун-т (КНР)
Фёдоров И.Б. — д.т.н., проф., академик РАН, президент МГТУ им. Н.Э. Баумана
Хэ Юн — д.т.н., проф., Нанкинский ун-т науки и технологии (КНР)
Шахнов В.А. — д.т.н., проф., член-кор. РАН, МГТУ им. Н.Э. Баумана
Шибанов Г.П. — д.т.н., проф., Гос. лётно-испытат. центр им. В.П. Чкалова
Янович Е.А. — д.э.н., проф., Кошалинский политехнич. ин-т (Польша)

Редактор — **Лутовинина О.Н.**
Редактор — **Селихова Е.А.**
Компьютерная вёрстка — **Конова Е.В.**

Адрес редакции:
107076, Москва, Колодезный пер., д. 2А, стр. 2.
Тел.: (499) 268-41-77.
E-mail: ast@mashin.ru; astmashin@yandex.ru;
http://www.mashin.ru

УЧРЕДИТЕЛИ:

ОБЩЕСТВО
С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
"НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
"ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ"

Журнал зарегистрирован 29 мая 2014 г.
за № ФС77-58102 в Роскомнадзоре

Журнал входит в перечень утверждённых ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей учёных степеней, а также в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

ООО "Издательство
"Инновационное машиностроение"

Адрес издательства:
107076, Москва, Колодезный пер., д. 2А, стр. 2.
Тел.: (495) 661-03-36

© Издательство "Инновационное машиностроение",
"Автоматизация. Современные технологии", 2016

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Вздулева Н.О., Гитлин В.Б. Система регулирования температуры термостатов хроматографа 3

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Кай Шэнь, Неусыпин К.А. Критерий степени наблюдаемости переменных состояния нестационарных систем 10

Горбунов А.А., Микаева С.А., Микаева А.С., Бойчук М.И. Исследования характеристик галогенных ламп накаливания и светодиодных ламп 16

Шибанов Г.П. Оценка определяющих параметров газотурбинных двигателей в процессе автоматизированных испытаний 20

СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Андронов А.В. Автоматизация современной технологии процесса диагностики состояния организма человека . . . 24

СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ УПРАВЛЕНИЯ

Белик Б.В., Верба В.С., Меркулов В.И. Мониторинг подвижных источников радиоизлучения со стробовым отождествлением измерений 29

Лукьянова Н.В., Пью Си Тху. Выбор метода идентификации для комплекса полунатурного моделирования 32

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ НАУЧНОЙ И ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Скрыпников А.В., Козлов В.Г., Скворцова Т.В., Арутюнян А.Ю. Автоматизированное проектирование лесовозной дороги 38

Грекул В.И. Обоснование выбора CRM-решения для торгового холдинга 42

ОБЗОР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

По страницам журналов 48

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION PROCESSES

Vzduleva N.O., Gitlin V.B. Temperature control system the chromatograph thermostats 3

MODERN TECHNOLOGY

Kay Shen, Neusypin K.A. The observability degree criterion of the state variables for the non-stationary systems . . 10

Gorbunov A.A., Mikaeva S.A., Mikaeva A.S., Boychuk M.I. The characteristics studies of halogen incandescencet lamps and LED lamps 16

Shibanov G.P. The determining parameters valuation of the gas turbine engine in the automatic testing process 20

MODERN INFORMATION TECHNOLOGY

Andronov A.V. Automation of the diagnostic process modern technology of the human organism state 24

SYSTEMS AND CONTROL DEVICES

Belik B.V., Verba V.S., Merkulov V.I. Monitoring of mobile radiation sources with the measurements strobe identification. 29

Lukyanova N.V., Pyu Si Tkhu. The choice of identification method for the halfnature modelling complex 32

ECONOMY AND ORGANIZATION OF SCIENTIFIC AND ECONOMIC ACTIVITIES

Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Skvoptsova T.V., Arutyunyan A.Yu. Automatic design of timber-carrying road 38

Grekul V.I. The choice substantiation of the CRM-solutions for commercial holding 42

SURVEY OF PERIODICALS

On the journal pages 48

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу "Роспечать" — 70537, по каталогу "Пресса России" — 27838, по каталогу российской прессы "Почта России — 60267) или непосредственно в издательстве по e-mail: realiz@mashin.ru, на сайте www.mashin.ru (без почтовых наценок, с любого месяца, со своего рабочего места); телефоны для справок: (495) 785-60-69

Сдано в набор 31.03.2016.	Отпечатано в ООО "Канцлер"
Подписано в печать 26.05.2016.	150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.	Оригинал-макет: ООО "Адвансед солюшнз".
Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.	119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Перепечатка материалов из журнала "Автоматизация. Современные технологии" возможна при обязательном письменном согласии редакции журнала. При перепечатке материалов ссылка на журнал "Автоматизация. Современные технологии" обязательна. За содержание рекламных материалов ответственность несёт рекламодатель

© Издательство "Инновационное машиностроение", "Автоматизация. Современные технологии", 2016

УДК 681.536.5: 543.544

Н.О. Вздулева, В.Б. Гитлин, д-р техн. наук, проф.
(Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова)
sizovan@list.ru

СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕРМОСТАТОВ ХРОМАТОГРАФА

Предложена система автоматического регулирования температур в термостатах, устанавливаемых в газовых хроматографах, по величине отношения суммарного времени цикла регулирования к времени охлаждения термостата (по скважности). Показано, что выбор скважности в качестве управляющего параметра соответствует принципу ПИД-регулирования. Определены параметры системы управления, от которых зависит выбор значений скважности. Наличие микропроцессора в системе регулирования обеспечивает работоспособность системы в широком диапазоне температур уставки при наличии существенных нелинейностей в системе регулирования.

Ключевые слова: хроматограф; регулирование температур; скважность; нелинейные системы; авторегулирование; ПИД-регулирование.

The system of automatic temperature control of thermostats installed in the gas chromatograph, on the grounds of the relationship magnitude of adjustment cycle total time to the thermostat cooling time (duty factor) is offered. It is shown that the selection of the duty factor as a control parameter corresponds to principle of PID-regulation. Control system parameters that affect the selection of the duty cycle values are determined. Microprocessor presence in the adjustment system ensures the system efficiency in a setting wide temperature range when there are significant non-linearities in the adjustment system.

Keywords: chromatograph; temperature adjustment; duty factor; nonlinear systems; autoregulation; PID-regulation.

Введение. В основе работы хроматографа, в том числе газового [1], лежит хроматографическое разделение смесей веществ, позволяющее определить химический состав вещества с высокой степенью точности. Сигнал хроматографа представляет собой последовательность пиков гауссовой формы с наложенным на них шумом. Время выхода пиков зависит от химического состава вещества, а площадь пика характеризует количество вещества в пробе. Технические характеристики хроматографа определяются рядом параметров, таких как предел детектирования, погрешность определения временных параметров пика, химический состав веществ, которые можно подвергать хроматографическому анализу, длительность хроматографического эксперимента [1, 2].

В значительной степени указанные технические характеристики определяются соотношением сигнал/шум в выходном сигнале хроматографа, допустимым рабочим диапазоном температур хроматографа, переходными процессами при переходе на новый режим работы [1, 2]. Причины появления шума в выходном сигнале хроматографа можно разделить на две большие категории. Во-первых, это шумы, обусловленные статистической природой физических и химических процессов, протекающих в ходе хроматографического эксперимента и принципиально не устранимые. Снизить уровень шумов подобного типа можно выбором соответствующего режима работы хроматографа и/или фильтрацией сигнала. Во-вторых, это параметры и характеристики хроматографа (статические и динамические), которые можно определённым образом оптимизировать, изменяя конструкцию и алгоритм управления работой хроматографа.

В статье рассмотрены методы, позволившие повысить стабильность поддержания температуры термостатов хроматографа во всём их рабочем диапазоне, а также предложены алгоритмы фильтрации выходного сигнала, позволившие существенно снизить предел детектирования.

Построение системы регулирования температуры термостата с использованием отношения времени цикла регулирования к времени охлаждения. В качестве прототипа взят хроматограф ЛГХ-3000, выпускаемый серийно на предприятиях России. Согласно техническим условиям на хроматограф ЛГХ-3000 допуск на

отклонение температуры испарителей задан в диапазоне ±1 °С, температуры детекторов — ±0,5 °С, температуры термостата колонок — не хуже ±0,1 °С [3, 4]. Хроматограф включает в себя до шести различных термостатов, каждый из которых имеет свою отличную от других конструкцию, геометрические размеры и раздельную систему регулирования температуры. Наличие тепловых связей между каждым из термостатов имеет существенное значение с учётом того, что температура конкретного термостата заранее неизвестна и может меняться в широком диапазоне значений. Это справедливо для каждого из шести термостатов, которые, кроме того, могут использоваться или не использоваться в зависимости от желания оператора. Рабочая температура каждого из термостатов определяется проводимым хроматографическим экспериментом и может находиться в диапазоне от комнатной температуры до 400 °С.

Структурная схема управления температурой термостатов, используемая в хроматографе ЛГХ-3000, представлена на рис. 1. Особенностью системы стабилизации температуры термостатов является её существенная нелинейная зависимость от температуры уставки, связанная с широким диапазоном рабочих температур, с нелинейными свойствами параметров термостатов, с зависимостью режимов работы термостатов от состояния окружающей среды.

В существующей модели хроматографа ЛГХ-3000 проблема нелинейности, присущая системе управления температурой термостата, решена путём использования микропроцессора в блоке анализа, установленного в цепи обратной связи ПИД-регулятора (пропорционального интегрирующего дифференцирующего регулятора). Используется релейный тип управления нагревателем [5, 6] периодическим его включением и выключением. Решение о включении и выключении нагревателя принимается на основании расчёта управляющего значения Y по формуле [6]:

$$Y = \Delta t(n-1)k_1 + \frac{\Delta t(n-1) + \Delta t(n-2) + \Delta t(n-3) + \Delta t(n-4)}{k_2} + k_3(\Delta t(n-1) - \Delta t(n-1)), \quad (1)$$

где $t(n)$ — значение температуры в дискретный момент времени n; $\Delta t(n) = t_{уст} - t(n)$ — отклонение текущей температуры от заданной; k_1, k_2, k_3 — коэффициенты ПИД-регулирования, подбираемые эмпирически.

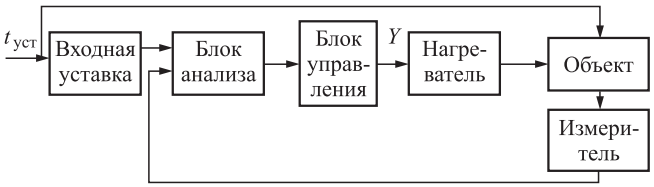


Рис. 1. Структурная схема управления термостатами хроматографа:
$t_{уст}$ — температура уставки; Y — управляющее воздействие

Первое слагаемое в выражении (1) соответствует пропорциональной части закона регулирования, второе — интегральной части, третье и четвертое — зависят от скорости изменения температуры. Коэффициенты k_1, k_2, k_3 зависят от температуры уставки, конкретного исполнения нагревательных элементов, качества термоизоляции, материала корпуса термостата и изменяются от прибора к прибору. Практика показывает, что выбор значений коэффициентов k достаточно трудоёмок и может существенно отличаться от прибора к прибору, что неприемлемо в условиях серийного производства.

Предложен отличный от существующего алгоритм управления нагревателем хроматографа, выполненного по схеме рис. 1, позволивший повысить точность поддержания температуры термостатов хроматографа и уменьшить время выхода в рабочий режим. Формализована процедура выбора параметров ПИД-регулирования, что существенно упростило процесс настройки ПИД-регулятора.

Как и в модели хроматографа ЛГХ-3000, используется релейный тип управления стабилизацией температуры колонок относительно температуры уставки $t_{уст}$, но в качестве управляемого параметра выбрана *скважность* γ. Под скважностью γ понимается отношение суммарной длительности времени нагрева и времени охлаждения нагревателя к длительности времени нагрева:

$$\gamma = \frac{\Delta\tau_{нагр} + \Delta\tau_{охл}}{\Delta\tau_{нагр}} = \frac{\Delta\tau_0}{\Delta\tau_{нагр}}, \quad (2)$$

где $\Delta\tau_0 = \Delta\tau_{нагр} + \Delta\tau_{охл}$ — длительность цикла нагрев—охлаждение; $\Delta\tau_{нагр}$ — длительность интервала нагревания; $\Delta\tau_{охл}$ — длительность интервала охлаждения.

Количество тепла, поступающего или теряемого термостатом, пропорционально времени нагрева или охлаждения соответственно. Следовательно, значение скважности связано интегральным преобразованием с темпера-

турой уставки. Использование скважности γ в качестве регулируемого параметра реализует в данной системе принцип интегрального управления *относительно ошибки отклонения температуры термостата от температуры уставки.*

Длительность времени нагрева $\Delta\tau_{нагр}$ для заданной температуры уставки $t_{уст}$ была постоянной. Изменение скважности достигалось изменением времени охлаждения термостата, когда нагреватель отключён. Использование только одного управляемого параметра в системе управления существенно упростило процесс регулирования температуры. Наличие микропроцессора в системе регулирования позволило учесть нелинейные зависимости работы регулятора от температуры уставки $t_{уст}$.

Выполненные исследования [7] показали, требуемая величина скважности γ в принятой системе управления зависит от четырёх параметров:

Отклонение текущей температуры $t_{тек}$ от температуры уставки $t_{уст}$: $\Delta t = t_{уст} - t_{тек}$. Отклонение температуры от температуры уставки, при которой нужно вводить корректировку скважности с учётом инерции системы, хорошо аппроксимируется линейной зависимостью [7]:

$$\Delta t = 0{,}08808 - 4{,}91209 \cdot 10^{-4} t_{уст}. \qquad (3)$$

Минимальное значение скважности нагревающих импульсов γ_{min}. В рассматриваемой системе нагрева хроматографа длительность интервала нагрева $\Delta\tau_{нагр}$ взята равной одному периоду дискретизации:

$$\Delta\tau_{нагр} = \frac{1}{f_s}, \qquad (4)$$

где f_s — частота дискретизации.

При $f_s = 10$ Гц согласно формуле (4) $\Delta\tau_{нагр} = 0{,}1$ с, при $f_s = 20$ Гц $\Delta\tau_{нагр} = 0{,}05$ с. Минимальное значение скважности γ_{min} для любой температуры $t_{уст}$ должно обеспечить нагрев термостата до этой температуры с некоторым запасом. Зависимость γ_{min} от $t_{уст}$ оказалась существенно нелинейной и удовлетворительного варианта аппроксимируемой кривой найти не удалось. По этой причине было принято решение разбить весь диапазон температур, определяющих минимальное значение скважности, на поддиапазоны и выполнять выбор минимального значения скважности в соответствии с алгоритмом, представленным в табл. 1 [7].

Пороговое значение максимальной скважности γ_{max}. Выбор значения скважности, большего, чем минимально требуемое, гарантирует режим поддержания температуры термостата на уровне не меньше заданного. Но интегральный принцип управления и наличие погрешностей в оценке требуемой длительности времени охлаждения $\Delta\tau_{охл}$ приводит к постепенному накоплению избыточной тепловой энергии. Погрешность оценки требуемого времени охлаждения определяется несколькими причинами. К ним можно отнести: погрешность оценки температуры термостата; поступление дополнительного тепла от нагретых конструкций хроматографа; наличие температурных и других изменений во внешней окружающей среде; асинхронность частоты релейного управления и аналоговых процессов в системе управления скважностью; дрейф напряжений внешней электрической сети и рядом других причин.

Таблица 1

Алгоритм выбора значений минимальной скважности

Диапазон температуры, °С	Значение скважности	Частота дискретизации, Гц
До 80	$\gamma = 50 - 0{,}5t_{уст}$	20
80—100	$\gamma = 10$	20
100—120	$\gamma = 30 - 0{,}2t_{уст}$	20
120—180	$\gamma = 5$	20
180—220	$\gamma = 4$	20
220—240	$\gamma = 3$	20
240—270	$\gamma = 4$	10
270—290	$\gamma = 3$	10
290—320	$\gamma = 2$	10

Примечание. Размерность коэффициента при $t_{уст}$ является 1/°С.

На накопление избыточного тепла система регулирования реагирует резким увеличением скважности (рис. 2). Резкое увеличение скважности приводит к переохлаждению термостата и, как следствие, к росту колебательности температуры термостата. В то же время максимальное значение скважности γ_{max} совместно с γ_{min} определяет зону захвата системы авторегулирования и не может быть выбрано слишком малым. Экспериментально полученная зависимость γ_{max} от температуры уставки оказалась близкой к линейной [7]. В соответствии с этой зависимостью выбор предельного значения γ_{max} выполняли по следующему алгоритму [7].

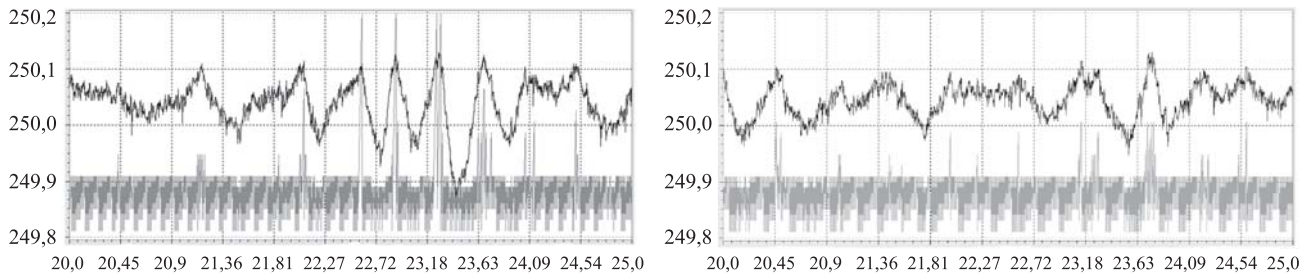


Рис. 2. Значение температуры — толстая линия; изменение значения скважности в процессе регулирования — тонкая линия: слева — пороговое значение при $\gamma_{max} = 20$; справа — при $\gamma_{max} = 10$

Прекращение процесса охлаждения и переход на процесс нагрева выполняли, если

$$\begin{cases} \gamma_{max} > 350 - 3\ t_{уст}, \quad t_{уст} < 111\ ^\circ C; \\ \gamma_{max} > 4\gamma, \quad t_{уст} > 111\ ^\circ C \text{ и } t_{уст} < 220\ ^\circ C; \\ \gamma_{max} > 3\gamma, \quad t_{уст} > 220\ ^\circ C, \end{cases}$$

где размерность коэффициента при $t_{уст}$ является 1/°C.

Ограничение по скорости изменения температуры в режиме стабилизации. С ростом температуры уставки $t_{уст}$ скважность γ снижается. Параметры процесса нагрева остаются в данной системе регулирования постоянными для всех значений температуры уставки. В том числе остаётся постоянной скорость нарастания температуры термостата. При низких температурах и относительно большом времени охлаждения $\Delta\tau_{охл}$ высокая скорость нагрева не сказывается существенно на величине перерегулирования температуры термостата колонок $\Delta t = t_{уст} - t_{тек}$. Однако при $t_{уст} \geqslant 200$°C большая скорость нагрева и небольшое значение $\Delta\tau_{охл}$ приводят к перерегулированию, соответственно к росту $\Delta t = t_{уст} - t_{тек}$. Это явление связано с инерционностью и нелинейностью работы системы и объекта регулирования [8, 9], с дискретностью работы релейной системы управления [6] и с дискретностью обработки информации в микропроцессоре блока анализа [6].

Наличие перерегулирования свидетельствует о снижении устойчивости системы регулирования температуры [5]. В целях снижения величины перерегулирования в системе управления температурой термостата введена составляющая управления скважностью, зависящая от скорости изменения усреднённой температуры колонок $\Delta\overline{t} = \overline{t}_{тек} - \overline{t}_{-1}$. Ограничение по скорости изменения температуры в регуляторе температуры хроматографа выполняется по следующему алгоритму:

нагреватель дополнительно выключается, если:

$$\begin{cases} \Delta\overline{t} > k_1; \\ -2k < \Delta t < k, \end{cases}$$

где $\Delta\overline{t} = \overline{t}_{тек} - \overline{t}_{-1}$ — усреднённое изменение температуры термостата; $k = 0{,}15$, $k_1 = 0{,}09$ — константы, подобранные экспериментально; $\overline{t}_{тек}$ — скользящее среднее по пяти точкам для текущей температуры; $\overline{t}_{-1}$ — скользящее среднее по пяти точкам, предшествующим тем, что уже использовались в расчёте $\overline{t}_{тек}$.

На рис. 3 представлен пример работы системы стабилизации температуры с учётом и без учёта скорости нарастания температуры.

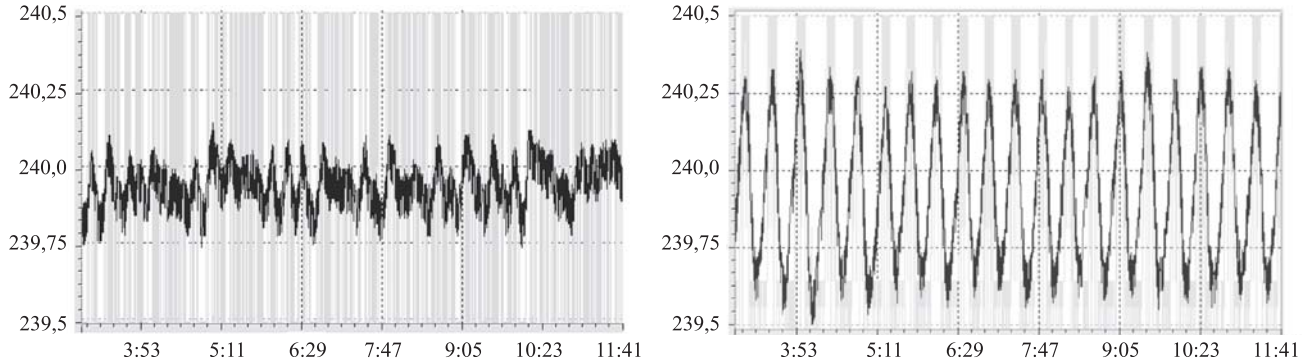


Рис. 3. Стабильность поддержания температуры 240 °C: слева — алгоритм управления с ограничением по скорости; справа — управления без ограничения по скорости

Как следует из графика, учёт влияния скорости нагрева позволил существенно снизить амплитуду колебаний температуры термостата.

Сокращение времени выхода термостата на рабочий режим. Методика выбора значений параметров управления нагревателем. Для снижения длительности хроматографического эксперимента использовано импульсное регулирование при отключённой обратной связи [6]. На начальном этапе разогрев термостата происходит с максимальной скоростью, определяемой мощностью, передаваемой в нагреватель термостата, без перехода в режим отключения нагревателя. При постоянной скорости нагрева, равной максимальной, возникает опасность значительного перерегулирования (перегрева) термостата. Было решено снижать мощность нагрева при подходе к требуемой температуре уставки по следующему алгоритму:

$$\begin{cases} t_{\text{уст}} - t \leqslant 20\dfrac{200}{t_{\text{уст}}} \; — \\ \text{полная мощность;} \\ 20\dfrac{200}{t_{\text{уст}}} \leqslant t_{\text{уст}} - t \leqslant \dfrac{200}{t_{\text{уст}}} \; — \\ \text{половинная мощность;} \\ t_{\text{уст}} - t_{\text{тек}} \geqslant \dfrac{200}{t_{\text{уст}}} \; — \\ \text{режим стабилизации.} \end{cases}$$

В соответствии с принятым алгоритмом регулирования температуры по скважности при переходе от режима нагрева в режим стабилизации температуры необходимо установить значение скважности $\gamma_{\text{пор}}$, соответствующее заданной температуре уставки $t_{\text{уст}}$. Значение $\gamma_{\text{пор}}$ можно определить исходя из равенства количества тепла, передаваемого нагревателем в термостат на интервале нагрева, количеству тепла, теряемому термостатом на интервале охлаждения.

Количество тепла, передаваемого в термостат при нагреве при постоянном режиме нагрева:

$$\Delta Q_{\text{нагр}} = Ck_p \int_0^{\Delta\tau_{\text{нагр}}} d\tau = Ck_p\Delta\tau_{\text{нагр}}, \qquad (5)$$

где k_p — коэффициент, зависящий от мощности нагревателя; C — обобщённая теплоёмкость термостата, рассматриваемого как чёрный ящик; τ — время.

Скорость охлаждения в состоянии свободного остывания зависит от конструктивных особенностей термостата и может быть измерена экспериментально. В соответствии с законом Ньютона — Рихмана [8, 10, 11] процессу свободного остывания хроматографа, как чёрного ящика, соответствует экспоненциальное снижение температуры:

$$t(\tau) = t_{\text{с}} + e^{-k\tau}(t_0 - t_{\text{с}}), \qquad (6)$$

где $k = \alpha S/C$; α — обобщённый коэффициент теплоотдачи; S — площадь внешней поверхности термостата; C — теплоёмкость; t_0 — начальная температура остывания; $t_{\text{с}}$ — температура внешней среды.

Дифференцируя выражение (6) по времени, можно определить скорость остывания термостата как функцию времени:

$$v(\tau) = \frac{dt(\tau)}{d\tau} = kt_c - kt(\tau). \qquad (7)$$

Из равенства (7) следует, что скорость остывания и температура хроматографа в процессе остывания связаны между собой линейным соотношением.

На рис. 4 представлены экспериментально снятые зависимости между скоростью остывания и текущим значением температуры для термостатов детектора и термостата испарителя. Положение тренда линии регрессии на этих графиках зависит от параметра $k = \alpha S/C$, что позволяет найти оценку этого параметра экспериментально для каждого типа термостата.

Исходя из того, что изменение количества тепла можно найти из соотношения

$$\frac{dQ(t)}{d\tau} = \frac{dQ}{dt}\frac{dt}{d\tau} = Cv(\tau),$$

получим следующую формулу для оценки количества потерь тепла в режиме свободного остывания:

$$\Delta Q_{\text{охл}} = C\int_0^{\Delta\tau_{\text{охл}}} v(\tau)d\tau. \qquad (8)$$

Приравнивая $\Delta Q_{\text{нагр}}$ и $\Delta Q_{\text{охл}}$ (формулы (5) и (8)), видим, что соотношение длительностей интервалов $\Delta\tau_{\text{нагр}}$ и $\Delta\tau_{\text{охл}}$ зависит только от параметров нагревателя и от скорости снижения температуры в режиме охлаждения и не зависит от параметров термостата C и k. На рис. 5 показана экспериментально полученная зависимость скважности γ от скорости снижения температуры для термостата колонок в режиме свободного остывания. Подобные графики были получены для термостатов испарителя и детектора.

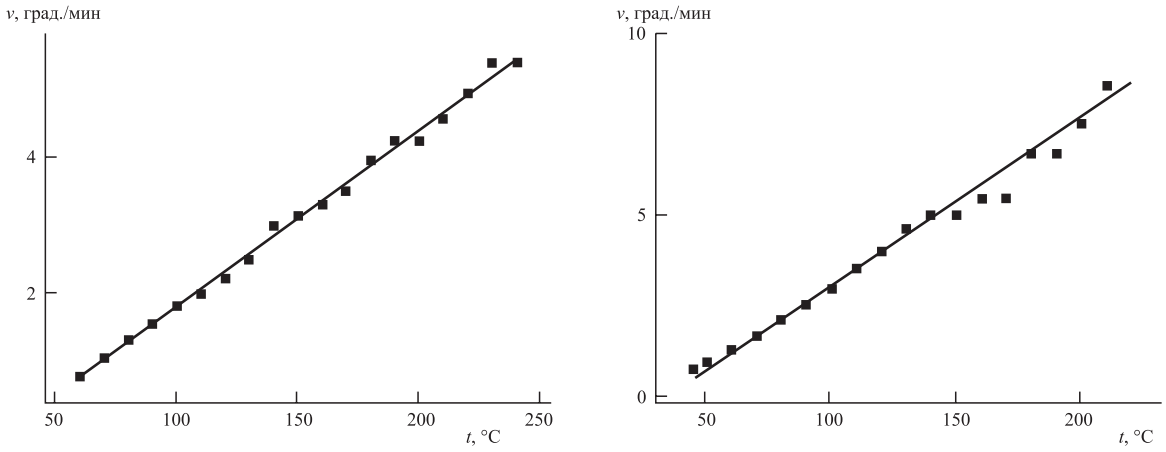


Рис. 4. Зависимость скорости остывания от температуры:
слева для термостата детектора; справа — термостата испарителя

Аппроксимация по методу МНК, выполненная с помощью пакета Origin [12], показала, что зависимость между скважностью γ и скоростью остывания термостата v может быть представлена выражением:

$$\gamma = 3{,}45 + 29{,}6e^{-0{,}993v(\tau)}. \qquad (9)$$

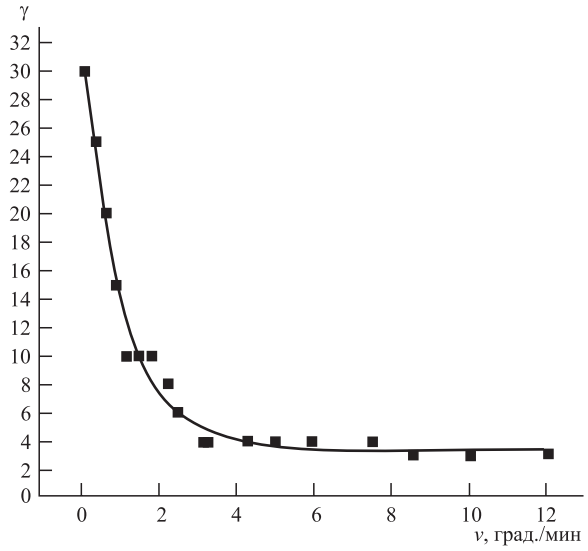


Рис. 5. Зависимость скважности от скорости снижения температуры в режиме свободного остывания

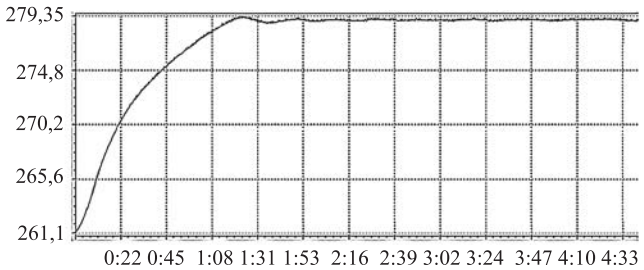


Рис. 6. График выхода на температуру $t_{уст}$ = 279 °C

Таким образом, порядок выбора значений параметров управления нагревателем выглядит следующим образом:

1. Экспериментально (если это возможно, то по формулам) оценивается зависимость (формула (6)) температуры термостата от времени в режиме свободного охлаждения.

2. Определяется скорость остывания термостата как функция времени по формуле (7).

3. Вычисляется значение скважности по формуле (9), обеспечивающее переход от режима нагрева к режиму регулирования. Имеющиеся погрешности в оценке скважности устраняются системой регулирования при условии устойчивости работы этой системы.

На рис. 6 показан график выхода температуры термостата колонок на температуру уставки $t_{уст}$ = 279 °C в системе, рассчитанной по указанной методике.

Фильтрация выходного сигнала хроматографа позволяет снизить уровень шумов при условии сохранения формы полезного сигнала. Такая фильтрация может быть выполнена только фильтрами с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтры) с линейной фазой [13]. Анализ спектров сигнала и шума показал, что порядок фильтра должен быть достаточно высоким [13]. Была разработана упрощённая методика проектирования квазиоптимальных КИХ-фильтров каскадным соединением нескольких оптимальных КИХ-фильтров низкого порядка. Эта методика и результаты её применения к сигналам хроматографа изложены в работе [13]. В настоящей работе применяли КИХ-фильтр 52-го порядка.

Заключение. Организация системы регулирования температуры термостата, алгоритм её работы и методика выбора параметров си-

Таблица 2

Параметры выходных сигналов хроматографа с прежней и предложенной системой регулирования температуры

Параметр	Норматив для ДТП	Старый алгоритм	Новый алгоритм	Старый алгоритм с фильтрацией	Новый алгоритм с фильтрацией
Флуктуационные шумы, В	$6\cdot10^{-7}$	$9{,}3\cdot10^{-7}$	$6{,}15\cdot10^{-7}$	$2{,}9\cdot10^{-7}$	$1{,}9\cdot10^{-7}$
		$9{,}2\cdot10^{-7}$	$6{,}65\cdot10^{-7}$	$2{,}95\cdot10^{-7}$	$2{,}05\cdot10^{-7}$
		$9{,}8\cdot10^{-7}$	$6\cdot10^{-7}$	$3{,}35\cdot10^{-7}$	$1{,}6\cdot10^{-7}$
Дрейф, В	$6\cdot10^{-5}$	$3{,}7655\cdot10^{-5}$	$2{,}36\cdot10^{-5}$	$3{,}7425\cdot10^{-5}$	$2{,}33\cdot10^{-5}$
		$3{,}5256\cdot10^{-5}$	$2{,}19\cdot10^{-5}$	$3{,}5011\cdot10^{-5}$	$2{,}17\cdot10^{-5}$
		$2{,}6431\cdot10^{-5}$	$2{,}37\cdot10^{-5}$	$2{,}6071\cdot10^{-5}$	$2{,}37\cdot10^{-5}$
Предел детектирования, г/см^3	$5\cdot10^{-9}$	$4{,}2079\cdot10^{-9}$	$2{,}8930\cdot10^{-9}$	$1{,}3087\cdot10^{-9}$	$0{,}787\cdot10^{-9}$

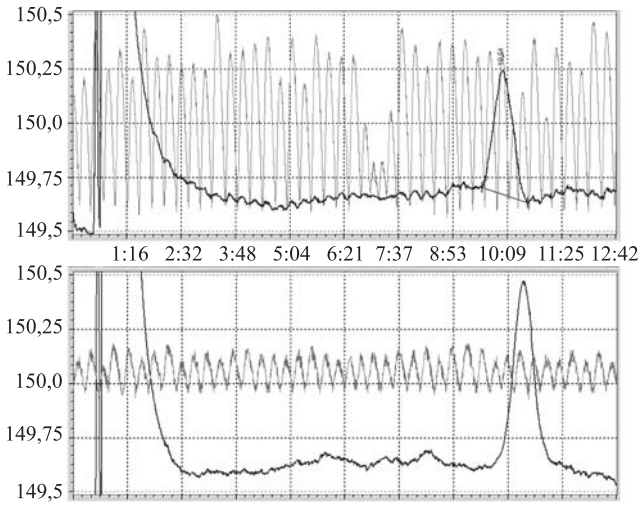


Рис. 7. Выходной сигнал хроматографа (толстая линия), сигнал датчика температуры (тонкая линия):
вверху — сигнал на выходе прежней системы регулирования температуры термостата; внизу — на выходе предложенной системой регулирования температуры термостата с последующей фильтрацией КИХ-фильтром 52-го порядка сигнала (внизу)

стемы были использованы для организации работы всех термостатов системы (от 4 до 6 термостатов, в зависимости от комплектации) промышленных хроматографов и дали положительный результат вне зависимости от исходной мощности используемого нагревателя и объёма нагреваемого термостата. Необходимо отметить, что на некоторых термостатах установлены нагреватели, имеющие в 2 раза меньшую мощность, но это не отразилось на выходных качествах регулирования. Примеры сигналов, полученных с помощью прежней и предложенной систем, показаны на рис. 7. Результаты измерений параметров выходного сигнала с применением прежней и предложенной в настоящей работе систем управления представлены в табл. 2, где показано, что предложенная система обеспечила улучшение практически всех параметров хроматографа. В частности, предлагаемая система совместно с КИХ-фильтром повысила чувствительность хроматографа более чем в 5 раз.

Библиографические ссылки

1. **Айвазов Б.В.** Введение в хроматографию. М.: Высш. шк., 1983. 240 с.

2. **Винарский В.А.** Хроматография: курс лекций в двух частях: Ч. 1. Газовая хроматография. Мн: БГУ, 2002. 192 с.

3. **Морозов В.А., Скурихин С.А., Старикова Л.М., Сизова Н.О.** Термостат хроматографа // Патент России № 2476874. 2013. Бюл. № 6.

4. **Основные** технические характеристики хроматографа ЛГХ-3000. http://www.kupol.ru/grazhdanskaya-produktsiya/khromatograficheskoe-oborudovanie/tekhnicheskie-kharakteristiki/ (дата обращения: 17.03.2015 г.).

5. **Бесекерский В.А., Попов Е.П.** Теория систем автоматического управления. 4-е изд. перераб. и доп. СПб., Изд-во "Профессия", 2003. 752 с.

6. **Денисенко В.В.** ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации // Современные технологии автоматизации. 2006. № 4. С. 66—74; 2007. № 1. С. 78—88.

7. **Вздулева Н.О., Гитлин В.Б.** Поддержание температурного режима колонок хроматографа путём изменения скважности управляющих импульсов // Вестник ИжГТУ, Ижевск: Издательство ИжГТУ, 2012. № 3. С. 111—113.

8. **Егоров В.И., Кораблев В.А., Шарков А.В.** Системы термостатирования: методические указания к лабораторным работам. СПб: СПБ ГУ ИТМО, 2006. 51 с.

9. **Солонина А.И., Улахович Д.А.** Основы цифровой обработки сигналов. 2-е изд., испр. и перераб. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 768 с.

10. **Ярышев Н.А., Андреева Л.Б.** Тепловой расчёт термостатов. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1984. 176 с.

11. http://ru.wikipedia.org/wiki/%C796E0. Закон Ньютона—Рихмана. (дата обращения: 12.04.2015 г.).

12. **Исакова О.П., Тарасевич Ю.Ю., Юзюк Ю.И.** Обработка и визуализация данных физических экспериментов с помощью пакета Origin. М.: Книжный дом "ЛИБКОМ", 2009. 136 с.

13. **Вздулева Н.О., Гитлин В.Б.** Каскадное соединение оптимальных КИХ-фильтров с линейной фазой // Цифровая обработка сигналов. 2014. № 1. С. 12—15.

УДК 681.518

Кай Шэнь, К.А. Неусыпин, д-р техн. наук, проф.
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)
shenkaichn@mail.ru

КРИТЕРИЙ СТЕПЕНИ НАБЛЮДАЕМОСТИ ПЕРЕМЕННЫХ СОСТОЯНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ СИСТЕМ

Исследованы критерии степени наблюдаемости и управляемости, выявлены их недостотки. Представлен численный критерий степени наблюдаемости конкретных переменных состояния стационарного объекта. Предложена модификация известного критерия степени наблюдаемости для исследования нестационарных объектов. Применение критерия продемонстрировано на примере определения качества наблюдения погрешностей инерциальных навигационных систем.

Ключевые слова: нестационарная система; критерий степени наблюдаемости; качество наблюдения; навигационная система.

The observability degree criterion and controllability are researched and their shortcomings are indicated. The observability degree numerical criterion of the stationary object specific state variables is represented. A modification of the well-known observability degree criterion for the study of non-stationary objects is proposed. Criteria application was demonstrated as an example of the determination of the error observation quality for inertial navigation systems.

Keywords: non-stationary system; observability degree criterion; observation quality; navigation system.

Введение. Понятие наблюдаемости играет важную роль при исследовании свойств динамических объектов. Известны критерии наблюдаемости [1], которые позволяют определить эти свойства. Учитывая свойство дуальности [2, 3], можно использовать критерии управляемости для определения наблюдаемости исследуемого объекта, что расширяет методологический аппарат.

В практических приложениях необходимо определять качество наблюдения, т.е. насколько эффективно можно осуществлять наблюдение за объектом. Для определения наиболее достоверной информации объекта часто используют различные диаграммы, полученные на основе опыта при эксплуатации объекта [4]. Например, диаграмма оценок лётчиком характеристик управляемости летательного аппарата (ЛА) [5], апостериорные оценки качества наблюдения параметров инерциальных навигационных систем (ИНС), полученные при анализе результатов лётных экспериментов [4]. Получение диаграмм и опыта сопряжено с проведением дорогостоящих экспериментов, требует длительного времени и участия высокопрофессиональных специалистов, а также использования уже созданных систем и объектов, которые подвергаются исследованию. Для определения свойств новых объектов, проектируемых систем и снижения себестоимости анализа существующих объектов используются критерии степени наблюдаемости [6], которые разработаны для стационарных объектов, но, после некоторой модификации, возможно определение степени наблюдаемости переменных состояния и нестационарных объектов.

Критерии наблюдаемости и управляемости. Пусть объект описывается уравнением:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \qquad (1)$$

а уравнение измерения имеет вид:

$$z(t) = Hx(t), \qquad (2)$$

где x – $(n \times 1)$ — вектор состояния; u – $(n \times 1)$ — вектор управления; z – $(m \times 1)$ — вектор измерений; A – $(n \times n)$ — матрица системы; B – $(n \times n)$ — матрица управления; H – $(m \times n)$ — матрица измерений.

Система уравнений (1) и (2) называется полностью наблюдаемой, если вектор состояния $x(t_0)$ можно определить по известному вектору измерений $z(t)$ на интервале времени $[t_0, t_1]$.

Проверку наблюдаемости можно осуществить, воспользовавшись критерием полной

наблюдаемости Калмана [1]. Система (1), (2) является полностью наблюдаемой, если ранг матрицы наблюдаемости равен порядку системы n, т.е. если измерения $z(t)$ содержат достаточную информацию для определения $x(t_0)$.

Матрица наблюдаемости S имеет следующий вид:

$$S = [H^T | A^T H^T | (A^T)^2 H^T | \cdots | (A^T)^{n-1} H^T]. \quad (3)$$

Если ранг матрицы наблюдаемости меньше порядка системы, то по измерениям $z(t)$ можно оценить лишь часть вектора состояния $x(t)$.

Понятия наблюдаемости и управляемости дуальны, т.е. если система полностью наблюдаема, то построенная для этой системы сопряжённая система будет полностью управляема. Следовательно, рассмотрение наблюдаемости исследуемой системы можно проводить в следующей последовательности. Сначала построить сопряжённую систему, а затем исследовать с помощью какого-либо критерия управляемости.

Рассмотрим линейную нестационарную систему, вектор состояния для которой удовлетворяет уравнению

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t), \quad (4)$$

а уравнение измерений имеет вид:

$$z(t) = H(t)x(t), \quad (5)$$

где z – $(l \times 1)$ — вектор измерений.

Система (4) и (5) называется вполне наблюдаемой [7] в момент t, если можно определить состояние системы $x(t)$ из наблюдения выходной функции $z(t)$ на интервале времени $[t_0, t]$.

В большинстве практических случаев $l < n$ и уравнение (5) представляют собой систему l уравнений с n неизвестными. Поэтому значение вектора z в момент t не даёт достаточной информации для восстановления вектора $x(t)$. Нужно учесть информацию о векторе z на отрезке $[t_0, t]$.

Рассмотрим нестационарную систему (4) и (5). Вектор z в момент $\tau \times [t_0, t]$ можно представить в виде [7]:

$$z(\tau) = H(\tau)\varphi(\tau, t)x(t), \quad (6)$$

где $\varphi(\tau, t)$ — переходная матрица нестационарной системы (4).

Введём матрицу граммиана наблюдаемости $N(t, t_0)$:

$$N(t, t_0) = \int_{t_0}^{t} \varphi^T(\tau, t) H^T(\tau) H(\tau) \varphi(\tau, t) d\tau. \quad (7)$$

Для наблюдаемости системы (3) необходимо и достаточно существование момента $t_0 < t$, для которого матрица $N(t, t_0)$ положительно определена, т.е. $\det N \neq 0$. Эквивалентная формулировка для этого такова, что необходимо и достаточно, чтобы уравнение

$$H(\tau)\varphi(\tau, t)x(t) = 0 \quad (8)$$

имело единственное нулевое решение.

Граммиан наблюдаемости $N(t, t_0)$ в определённом смысле может служить мерой наблюдаемости. Для системы (3), по определению наблюдаемости, отношение между векторами состояния $x(t)$ и измерения $z(t)$ можно описать уравнением вида [8]:

$$y(t) = \begin{bmatrix} z(t) \\ z^{(1)}(t) \\ \vdots \\ z^{(n-1)}(t) \end{bmatrix} = N(t, t_0)x(t). \quad (9)$$

Если ранг матрицы граммиана наблюдаемости $N(t)$ равен порядку системы n, то решение $x(t_0) = x_0$ имеет вид:

$$x(t_0) = S^{\#}(t_0)y(t_0), \quad (10)$$

где $S^{\#}(t_0) = [S^T(t_0)S(t_0)]^{-1} S^T(t_0)$.

Когда система (3) равномерно наблюдаема [9], то для любого момента времени t вектор состояния $x(t) = x_t$ можно сформулировать в соответствии с уравнением (8).

Критерии степени наблюдаемости для стационарных систем. Подходы, представленные в работах [10, 11], позволяют определить лишь, какие из компонент вектора состояния наблюдаются лучше. Эти подходы отражают только относительную оценку наблюдаемости компонент конкретного вектора состояния исследуемой системы и не позволяют проводить сравнение наблюдаемости компонент векторов состояния различных систем. Эти критерии неудобны для использования при сравнении качества наблюдения в общем случае.

Обычно в практических приложениях необходимо знать возможность эффективного определения каждой конкретной компоненты вектора состояния. Для этого введено понятие меры или степени наблюдаемости каждой конкретной переменной состояния [11]. В данном случае рассматривается сопряжённая система, и к ней применяется критерий полной управляемости.

Сопряжённая система для систем (1) и (2) имеет вид:

$$\dot{x}_c(t) = -A^T x_c(t) - H^T u_c(t); \qquad (11)$$

$$z_c(t) = B^T x_c(t). \qquad (12)$$

Системы вида (11) и (12) полностью управляемы, а система (1) наблюдаема, если найденные определители линейно независимы и ни один из них не равен нулю.

Исследуем критерий управляемости вида [2]:

$$C_1\Delta_1 + C_2\Delta_2 + \cdots + C_n\Delta_n \neq 0. \qquad (13)$$

Данный критерий позволяет получить непосредственную связь между компонентами вектора состояния и вектора управления. Эта связь позволяет выносить суждение о степени управляемости по той или иной переменной состояния. В случае одинаковой структуры выражений Δ по коэффициентам этих выражений можно судить о степени управляемости.

Степень управляемости можно определить, исследовав систему канонического вида, т.е. систему уравнений, в которой отсутствует связь по переменным состояния.

Запишем уравнение (1) в канонической форме:

$$\dot{x}_c^k(t) = -A^k x_c^k(t) - H^k u_c^k(t), \qquad (14)$$

где $A^k = -\Lambda^{-1}A^T\Lambda$; $H^k = -\Lambda^{-1}H^T$; $\Lambda = [\ell_1, \cdots, \ell_n]$ — матрица канонического преобразования; ℓ_i — собственные векторы исследуемой системы.

Система является полностью управляемой, если матрица H^k канонической системы (14) не содержит строк, все элементы которых равны нулю. Следует отметить, что данный критерий можно применять лишь при отсутствии кратных собственных значений системы. Степень управляемости характеризуют модули элементов строк матрицы H^k.

Представленный критерий позволяет проводить сравнительный анализ управляемости и определять лучше или хуже управляемы компоненты вектора состояния при сравнении друг с другом. Лучше управляемы те компоненты вектора состояния, у которых модули элементов строк матрицы больше модулей соответствующих элементов у других строк.

Пусть объект описывается в дискретной форме:

$$x_k = \Phi x_{k-1} + w_{k-1}, \qquad (15)$$

где x_{k-1} — $(n \times 1)$ — вектор состояния; w_{k-1} — $(n \times 1)$ — вектор входного шума, который является дискретным аналогом белого гауссового шума с нулевым математическим ожиданием; Φ — $(n \times n)$ — матрица системы.

Часть вектора состояния измеряется

$$z_k = Hx_k + v_k, \qquad (16)$$

где z_k — $(m \times 1)$ — вектор измерений; H — $(m \times n)$ — матрица измерений; v_k — $(m \times 1)$ — вектор измерительного шума, который является дискретным аналогом белого гауссового шума с нулевым математическим ожиданием, причем v и w некоррелированы между собой.

Не теряя общности постановки задачи, предположим, что измеряется одна компонента вектора состояния, т.е. $H = [1 \quad 0 \quad \cdots \quad 0]$.

Разобьём каждый шаг измерений на n подтактов и выразим эти измерения через вектор состояния на первом подтакте измерений [13]:

$$\begin{gathered} z_1 = Hx_1 + v_1 \\ z_2 = H\Phi x_1 + Hw_1 + v_2 \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ z_n = H\Phi^{n-1}x_1 + H\Phi^{n-2}w_1 + \ldots + Hw_{n-1} + v_n. \end{gathered} \qquad (17)$$

Или в матричной форме:

$$z^* = Sx_1 + v^*, \qquad (18)$$

где $z^* = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \cdots \\ z_n \end{bmatrix}$; $S = \begin{bmatrix} H \\ H\Phi \\ \cdots \\ H\Phi^{n-1} \end{bmatrix}$;

$$v^* = \begin{bmatrix} v_1 \\ Hw_1 + v_2 \\ \cdots\cdots\cdots\cdots \\ H\Phi^{n-2}w_1 + \ldots + Hw_{n-1} + v_n \end{bmatrix}.$$

Выразим из уравнения объекта вектор состояния в первом подтакте измерения:

$$x_1 = S^{-1}z^* - S^{-1}v^*. \quad (19)$$

Введём обозначение

$$y = S^{-1}z^*. \quad (20)$$

Запишем уравнения (14) в скалярном виде:

$$y^i = s_1^i z_1 + s_2^i z_2 + \cdots + s_n^i z_n, \quad (21)$$

где y^i — i-й элемент вектора y; s^i — i-я строка матрицы S^{-1}.

Для остальных компонент вектора состояния уравнения измерений формулируются в соответствии с уравнением (18).

Введём понятие приведённого измерительного шума [10]. Для произвольной компоненты вектора состояния приведённый измерительный шум в соответствии с уравнением (21) имеет вид:

$$v^{*i} = s_1^i v_1 + s_2^i v_2 + \cdots + s_n^i v_n. \quad (22)$$

Дисперсия приведённого к i-й компоненте измерительного шума определяется коэффициентами $s_1^i, s_2^i, \cdots, s_n^i$, т.е.

$$r^{*i} = M[(v^{*i})^2] = [s_1^{i2} + s_2^{i2} + \cdots + s_n^{i2}]r, \quad (23)$$

где $r = M[v^2]$ — дисперсия исходного измерительного шума v.

Судить о мере наблюдаемости можно по двум характеристикам: точности оценивания и времени сходимости. Критерий, по которому определяется степень наблюдаемости, имеет вид [6]:

$$\lambda^i = \frac{M[(x^i)^2]r}{M[(y^i)^2]r^{*i}}, \quad (24)$$

где $M[(x^i)^2]$ — дисперсия произвольной i-й компоненты вектора состояния; $M[(y^i)^2]$ — дисперсия непосредственно измеряемого вектора состояния.

В критерии степени наблюдаемости (24) мерой наблюдаемости является скаляр. Эта особенность выгодно отличает критерий от известных, так как позволяет проводить сравнение степеней наблюдаемости компонент различных векторов состояния.

Модификация критерия степени наблюдаемости для нестационарных систем. Критерии степени наблюдаемости [6, 10] предполагают анализ объектов, описываемых стационарными уравнениями вида (15), (16). Однако часто встречаются случаи, когда уравнения объекта имеют явно выраженный нестационарный характер. Для определения степеней наблюдаемости компонент вектора состояния нестационарных объектов критерии необходимо модифицировать.

Рассмотрим модификацию критерия (24) для определения степени наблюдаемости переменных состояния нестационарного объекта.

Уравнение нестационарного объекта имеет вид:

$$x_k = F_{k-1}x_{k-1} + w_{k-1}, \quad (25)$$

а уравнение измерений

$$z_k = H_k x_k + v_k. \quad (26)$$

Запишем выражение для вектора состояния, используя $l(1 \leqslant l \leqslant n)$ проведённых измерений:

$$\begin{gathered} z_k = H_k x_k + v_k \\ z_{k+1} = H_{k+1}F_k x_k + H_k w_k + v_{k+1} \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ z_{k+l-1} = H_{k+l-1}F_{k+l-2}\cdots F_k x_k + \\ + H_{k+l-2}F_{k+l-3}\cdots F_k w_k + \cdots + H_k w_{k+l-2} + v_{k+l-1}. \end{gathered} \quad (27)$$

Перепишем в матричной форме:

$$z_k^{*k+l-1} = S_k^{k+l-1}x_k + v_k^{*k+l-1}, \quad (28)$$

где $z_k^{*k+j-1} = \begin{bmatrix} z_k \\ z_{k+1} \\ \cdots \\ z_{k+l-1} \end{bmatrix}$; $S_k^{k+l-1} = \begin{bmatrix} H_k \\ H_{k+1}F_k \\ \vdots \\ H_{k+l-1}F_{k+l-2}\cdots F_k \end{bmatrix}$;

$$v_k^{*k+l-1} = \begin{bmatrix} v_k \\ H_k w_k + v_{k+1} \\ \cdots\cdots\cdots\cdots \\ H_{k+l-2}F_{k+l-3}\cdots F_k w_k + \ldots. + H_k w_{k+l-2} + v_{k+l-1} \end{bmatrix}.$$

Матрица S для стационарных объектов является матрицей наблюдаемости. При анализе наблюдаемости нестационарных систем ис-

пользуется граммиан наблюдаемости в соответствии с уравнением (7), который имеет вид:

$$\Gamma_k = S_k^T S_k = \begin{bmatrix} H_k \\ H_{k+1}F_k \\ \vdots \\ H_{k+l-1}F_{k+l-2}\cdots F_k \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} H_k \\ H_{k+1}F_k \\ \vdots \\ H_{k+l-1}F_{k+l-2}\cdots F_k \end{bmatrix}. \quad (29)$$

Нестационарные системы (25) и (26) наблюдаемы, если ранг матрицы граммиана наблюдаемости равен порядку системы, т.е. ранг (Γ_k) = ранг $(S_k^T S_k) = n$.

Выразим вектор состояния x_k из уравнения (28):

$$x_k = S_k^{-1} z^{*k+l-1}_k - S_k^{-1} v^{*k+l-1}_k. \quad (30)$$

В соответствии с уравнением (10) введём обозначение

$$y_k = S_k^{-1} z^{*k+l-1}_k. \quad (31)$$

Предполагаем, что вычислим степени наблюдаемости компонент состояния системы, учитывая только одно измерение, т.е. сначала при одном измерении вычисляем степени наблюдаемости переменных систем, затем при других. Например, когда $H = [1 \;\; 0 \;\; \cdots \;\; 0]$, запишем уравнения (31) в скалярном виде:

$$y_k^i = \varsigma_1^i z_k + \varsigma_2^i z_{k+1} + \cdots + \varsigma_l^i z_{k+l-1}, \quad (32)$$

где y^i — i-й элемент вектора y; ς^i — i-я строка матрицы S_k^{-1}.

Для остальных компонент вектора состояния уравнения измерений формулируются в соответствии с уравнением (32).

В соответствии с уравнением (32) приведённый измерительный шум имеет вид:

$$v^{*i}_k = \varsigma_1^i v_1 + \varsigma_2^i v_2 + \cdots + \varsigma_l^i v_l, \quad (33)$$

тогда дисперсия приведённого измерительного шума:

$$r_k^{*i} = M[(v^{*i}_k)^2] = [\varsigma_1^{i2} + \varsigma_2^{i2} + \cdots + \varsigma_l^{i2}] r_k, \quad (34)$$

где $r_k = M[v_k^2]$ — дисперсия исходного измерительного шума v_k.

Поэтому получим модифицированный критерий степени наблюдаемости для нестационарных систем вида:

$$\lambda_k^i = \frac{M[(x_k^i)^2]}{M[(y_k^i)^2] \sum_{j=1}^{l} \varsigma_{ij}^2}, \quad (35)$$

где $M[(x_k^i)^2]$ — дисперсия произвольной i-й компоненты вектора состояния; $M[(y_k^i)^2]$ — дисперсия формируемого измеряемого вектора состояния; ς_{ij} — i-я строка матрицы S_k^{-1}.

В отличие от известных критериев численный критерий удобен в практическом применении.

Определение степени наблюдаемости нестационарных ошибок навигационных систем. Рассматривается задача оценивания переменной состояния углов отклонения и дрейфа навигационных систем. Наиболее распространёнными навигационными системами являются ИНС, корректируемые от внешних источников информации — глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Для полной компенсации погрешностей в выходной информации необходимо предварительно оценить ошибки ИНС. Имея информацию об ошибках по скорости от ИНС и ГНСС, можем оценить угловые ошибки и дрейф гироскопов. Ошибки в измерении этих параметров оценим с помощью алгоритмов оценивания, например нестационарный фильтр Калмана.

Уравнение нестационарных ошибок навигационных систем имеет вид:

$$x_k = \Phi_{k,k-1} x_{k-1} + w_{k-1}; \quad (36)$$

$$z_k = H_k x_k + v_k, \quad (37)$$

где $x_k = \left[\delta V_x \;\; \delta V_y \;\; \psi_x \;\; \psi_y \;\; \psi_z \;\; \varepsilon_x \;\; \varepsilon_y \;\; \varepsilon_z\right]^T$;

$w_{k-1} = \left[B_x \;\; B_y \;\; 0 \;\; 0 \;\; 0 \;\; \varpi_x \;\; \varpi_y \;\; \varpi_z\right]^T$;

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -gT & a_yT & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & gT & 0 & -a_xT & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{T}{R} & 1 & \omega_zT & -\omega_yT & 1 & 0 & 0 \\ \frac{T}{R} & 0 & -\omega_zT & 1 & \omega_xT & 0 & 1 & 0 \\ \frac{T}{R}tg\varphi & 0 & \omega_yT & -\omega_xT & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-\mu T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-\mu T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-\mu T \end{bmatrix};$$

$$z_k = \begin{bmatrix} z_x \\ z_y \end{bmatrix}; \; v_k = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix}; \; H_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

δV_x, δV_y — составляющие погрешности в определении путевой скорости ЛА; a_x, a_y — составляющие ускорения ЛА; ψ_x, ψ_y, ψ_z — углы отклонения относительно опорной системы координат; ω_x, ω_y, ω_z — проекции абсолютной угловой скорости; ε_x, ε_y, ε_z — проекции скорости дрейфа; ϖ_x, ϖ_y, ϖ_z — возмущающие внешние воздействия; φ — широта местоположения; R — радиус Земли; g — ускорения силы тяжести; T — период дискретизации; μ — средняя частота случайного изменения дрейфа.

Для определения степени наблюдаемости ошибок ИНС сформируем скалярные приведённые измерения и воспользуемся численным критерием степени наблюдаемости конкретных компонент вектора состояния. В результате получим степени наблюдаемости различных ошибок навигационных систем, например, углов отклонения и дрейфов, показанные на рис. 1 и 2.

В соответствии с результатами использованных реальных данных лабораторного эксперимента [14] степени наблюдаемости угла отклонения ψ лучше, чем степени наблюдаемости горизонтального дрейфа ε, и особенно, слабонаблюдаемого азимутального дрейфа.

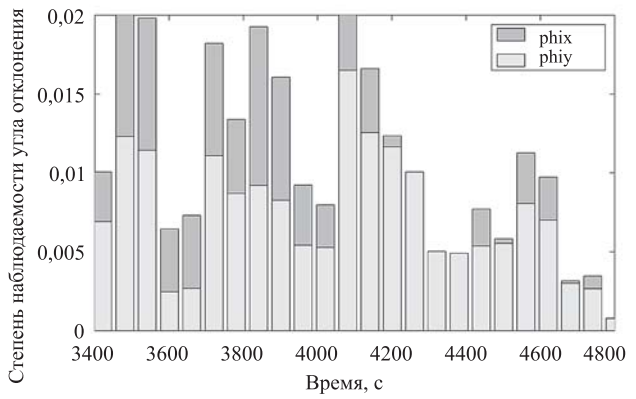


Рис. 1. Степень наблюдаемости углов отклонения ψ_x и ψ_y

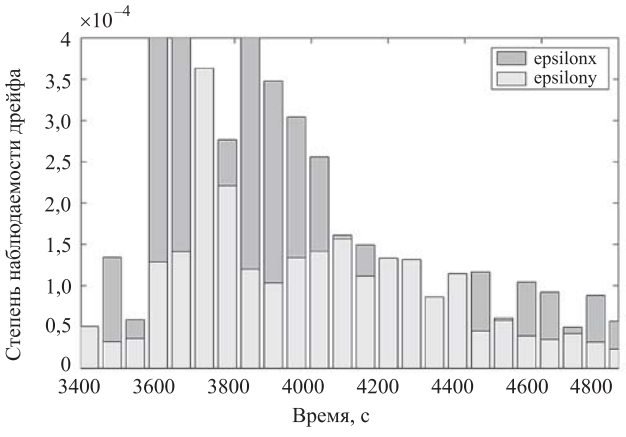


Рис. 2. Степень наблюдаемости дрейфов ε_x и ε_y

Слабонаблюдаемые компоненты вектора состояния, являющиеся формально наблюдаемыми, на практике не подвергаются обработке алгоритмами оценивания, так как их возможно оценить лишь на достаточно больших интервалах функционирования системы. Поэтому обычно подразделяют компоненты вектора состояния системы на "хорошо" наблюдаемые, которые подлежат оцениванию, ненаблюдаемые, а также слабонаблюдаемые компоненты.

Итак, задача оценивания "хорошо" наблюдаемых компонент вектора состояния решается с помощью разнообразных алгоритмов оценивания. Но с течением времени точность оценивания и время сходимости у нестационарных систем могут изменяться. Поэтому актуальной является задача исследования степени наблюдаемости в процессе функционирования системы.

На рис. 1, 2 представлены диаграммы, по которым можно определить интервалы времени, когда процесс оценивания осуществляется с большой эффективностью. Критерием эффективности является максимальная достигаемая точность и минимальное время получения оценки.

Выводы. Таким образом, рассмотрена задача определения степени наблюдаемости компонент вектора состояния нестационарных систем. Предложена модификация численного критерия степени наблюдаемости переменных состояния для нестационарного случая. Практическое применение разработанного критерия степени наблюдаемости продемонстрировано на примере исследования погрешностей ИНС. Представлены диаграммы, показывающие изменение показателя степени наблюдаемости с течением времени функционирования ИНС. Диаграммы чрезвычайно удобны при использовании на практике, так как позволяют определить временные интервалы функционирования ИНС, когда качество оценивания погрешностей будет максимальным и, соответственно, коррекция ИНС наиболее эффективна.

Библиографические ссылки

1. **Kalman R.E., Ho Y.C., Narendra K.S.** Controllability of linear dynamical systems. // Contributions to the Theory of Differential Equations. Vol. I, No. 2, 1963. P. 189—213.

2. **Кузовков Н.Т., Карабанов С.В., Салычев О.С.** Непрерывные и дискретные системы управления и методы идентификации. М.: Машиностроение. 1978. 221 с.

3. **Парусников Н.А., Морозов В.М., Борзов В.И.** Задача коррекции в инерциальной навигации. М.: Изд-во МГУ. 1982. 173 с.

4. **Salychev O.S.** MEMS-based Inertial Navigation: Expectations and Reality. Moscow: Bauman MSTU Press. 2013. 208 p.

5. **Богословский С.В., Дорофеев А.Д.** Динамика полёта летательных аппаратов. Учеб. пособие. СПб.: СПб ГУАП. 2002. 64 с.

6. **Кай Шэнь, Неусыпин К.А., Пролетарский А.В.** Исследование критериев степени наблюдаемости. Материалы конф. "Информационные технологии в управлении". СПб.: ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2014. С. 254—260.

7. **Кабанов С.А.** Оптимизация динамики систем при действии возмущений. М.: Физматлит, 2008. 200 с.

8. **Silverman L.M., Meadows H.E.** Controllability and observability in time-variable linear systems // SIAM Journal on Control. № 5 (1), 1964. P. 64—73.

9. **Астровский А.И., Гайшун И.В.** Равномерная и аппроксимативная наблюдаемость линейных нестационарных систем // Автоматика и телемеханика, 1998. Вып. 7. С. 3—13.

10. **Неусыпин К.А.** Современные системы и методы наведения, навигации и управления летательными аппаратами. М.: Изд-во МГОУ. 2009. 500 с.

11. **Kai Shen, Neusypin K.A., Proletarsky A.V.** On State Estimation of Dynamic Systems by Applying Scalar Estimation Algorithms. Proceedings of 2014 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference. August 8—10, 2014. Yantai, China. P. 124—129.

12. **Неусыпин К.А., Фам С.Ф.** Повышение степени управляемости летательного аппарата // Автоматизация и современные технологии. 2007. № 2. С. 21—25.

13. **Салычев О.С.** Скалярное оценивание многомерных динамических систем. М.: Машиностроение, 1987. 216 с.

14. **Пролетарский А.В., Неусыпин К.А.** Оценка точности алгоритма построения моделей по данным лабораторного эксперимента с навигационными системами // Автоматизация и современные технологии. 2014. № 6. С. 40—44.

УДК 628.9.041.678

А.А. Горбунов, канд. техн. наук, доц.

(Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, г. Саранск)

С.А. Микаева, д-р техн. наук, проф., **А.С. Микаева,** канд. экон. наук, доц., **М.И. Бойчук**

(Московский технологический университет)

mikaeva@ npo.lit.ru

ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЛОГЕННЫХ ЛАМП НАКАЛИВАНИЯ И СВЕТОДИОДНЫХ ЛАМП

Представлены результаты исследований электрических и светотехнических галогенных ламп накаливания с цоколем GU10 и дано сравнение их с аналогами — светодиодными лампами (ретрофитами).

Ключевые слова: галогенная лампа накаливания; цоколь; светодиодная лампа; характеристика; срок службы; спектр; анализ.

The studies results of electrical and illuminating halogen incandescencet lamps with GU10 basement are represented and a comparison with their analogs — LED lamps (retrofit) is given.

Keywords: halogen incandescent lamp; basement; LED lamp; characteristic; life time; range; analysis.

Как известно, галогенные лампы накаливания (ГЛН) обладают высокой цветопередачей. В отличие от обычных ламп накаливания (ЛН) ГЛН восстанавливают свою нить накала [1], что позволяет увеличить температуру спирали. Это повышает КПД ГЛН, делая её экономичнее обычной ЛН, что способствует высокой цветопередаче. ГЛН имеют непрерывный спектр излучения, включающий все цвета радуги. Из всех искусственных источников света ГЛН обладают наиболее естественным освещением.

ГЛН имеют существенные недостатки. Во-первых, во время включения через спираль проходит большой ток, под действием которого спираль лампы может разрушиться. Поэтому срок службы ГЛН сравнительно невысок. Применение специальных устройств (трансформаторов, диммеров) позволяет в 5—20 раз продлить срок службы ГЛН. Во-вторых, ГЛН нельзя брать руками, чтобы не оставить следов. Под действием высокой температуры органические соединения на колбе сгорают. Это приводит к потемнению колбы и её перегреву,

вследствии чего она может разрушиться. Существует ещё одна разновидность ГЛН — это IRC-ГЛН. Эти лампы изнутри покрывают напылением, которое пропускает видимое излучение, а инфракрасное — отражает к спирали. Это повышает экономичность и долговечность ламп.

Новейшие светодиодные технологии успешно распространяются на мировом рынке. Светодиод имеет множество положительных качеств: малые размеры и потребление электроэнергии, высокий срок службы, отсутствие пульсаций, возможность создания любого спектра, что позволяет применять его во многих областях, начиная с рекламной вывески, фоновой подсветки как общего, так и декоративного освещения, подсветки архитектурных сооружений и пр. Светодиодные лампы активно заменяют ГЛН.

Целью настоящего исследования являются анализ и сравнение характеристик галогенных и светодиодных источников света с цоколем GU10, а также проверка заявленных производителем характеристик. Лампы с цоколем GU10 изначально были галогенными и создавались для применения в светильниках [2]. Современные технологии позволили производить светодиодные лампы с цоколем GU10. Для полноценной замены ГЛН в настоящее время существует широкая линейка LED, или светодиодных ламп. Поэтому подобрать лампу, источником излучения в которой является светодиод, можно к любому современному осветительному прибору.

Светодиодные лампы различной мощности со "стартерным" цоколем GU10 широко используют для бытовых светильников, освещения торговых залов и витрин. Практически во всех растяжках стоит такая светодиодная лампа. Два штырька с утолщением на концах необходимы для поворотного закрепления лампы в патроне, что даёт дополнительную гарантию от выпадения (рис. 1).

В качестве экспериментальных образцов были рассмотрены галогенные и светодиодные лампы с цоколем GU10, заявленные параметры которых представлены в табл. 1.

Для исследования заявленных производителями параметров были проведены измерения электрических и светотехнических характеристик экспериментальных ламп как в начальный период времени, так и после 500, 1000 и 1500 ч непрерывного горения.

Для исследования продолжительности горения был создан макет экспериментального стенда для четырёх источников света — две галогенные лампы накаливания и две светодиодные лампы (рис. 2). Стенд был установлен в помещении с постоянной температурой (25 °С) и подключён к сети питания 220 В. Контроль постоянства напряжения не проводился.

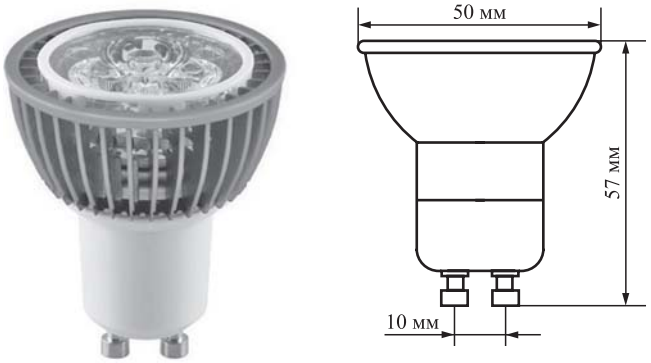


Рис. 1. Внешний вид светодиодной лампы с цоколем GU10

Таблица 1

Характеристики экспериментальных образцов ламп

Наименование ламп, страна-производитель	Потребляемая мощность, Вт	Угол рассеивания, град.	Срок службы (по данным производителя), ч
Electrostantard LED (Китай)	4	120	30 000
Novotech LED (Китай)	6	38	50 000
Gauss LED (Китай)	1	80	30 000...50 000
Electrostandart (Китай)	35	36	2000
Camelion (Китай)	35	36	2000
Osram (Германия)	20	35	2000

Исследование электрических параметров экспериментальных ламп проводилось на гониофотометрическом комплексе GO2000A. Гониофотометрический комплекс предназначен для измерения фотометрических характеристик светодиодных светильников, источников света и другого светотехнического оборудования (силы света, светового потока, световой отдачи источников света).

Результаты исследования электрических характеристик экспериментальных ламп показаны в табл. 2 и 3.

Анализируя данные табл. 2 и 3, можно сделать следующие выводы:

электрические характеристики галогенных экспериментальных ламп в начальный момент времени соответствуют заявленным значениям;

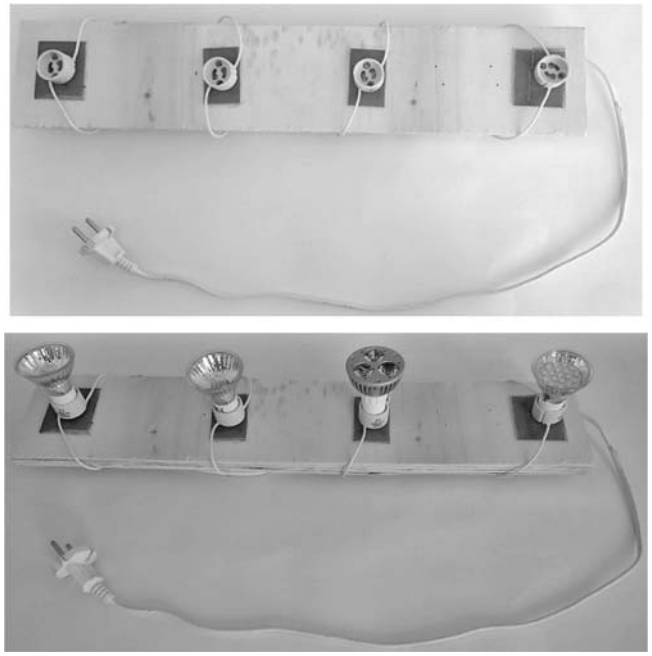


Рис. 2. Макет экспериментального стенда для исследования продолжительности горения ламп

электрические характеристики светодиодных экспериментальных ламп в начальный момент времени несколько завышены заявленным значениям, что объясняется различием в условиях измерений данных показателей и некоторой погрешностью в измерениях;

при измерениях электрических характеристик через определённые промежутки горения две галогенные лампы вышли из строя, не прогорев 1000 ч, одна — вышла из строя после 1000 ч горения в момент измерения характеристик, что говорит о несоответствии характеристикам, указанным производителями;

светодиодные лампы успешно прошли все этапы измерений, не показав существенных отклонений от заявленных значений.

Исследование световых и колориметрических характеристик проводили на фотоколориметрической установке, предназначенной для измерения светового и энергетического потоков, спектральной плотности энергетического потока, коррелированной цветовой температуры, общего и специальных индексов цветопередачи, координат цвета и цветности в системах *XYZ* (1931), *uv* (1960), *u'v'*(1976), доминирующей длины волны.

Результаты исследования световых и колориметрических характеристик показаны в табл. 4 и 5, на рис. 3—5.

Анализируя данные табл. 4, 5 и рис. 3—5, можно сделать следующие выводы:

все производители галогенных и светодиодных ламп указывали завышенные характеристики световых параметров;

Таблица 2

Электрические параметры ламп в начальный момент времени при напряжении 220 В

Наименование ламп	Мощность, Вт	Сила тока, А
Electrostantard LED	3,83	0,0373
Novotech LED	3,40	0,0300
Gauss LED	0,97	0,0194
Electrostandart	34,3	0,0152
Camelion	34,5	0,0150
Osram	18,32	0,083

Таблица 3

Электрические параметры экспериментальных ламп при напряжении 220 В

Характеристика ламп	Галогенные лампы		Светодиодные лампы		
	Через 500 ч горения	Через 1000 ч горения	Через 500 ч горения	Через 1000 ч горения	Через 1500 ч горения
Camelion, 35 Вт			Novotech, 3 Вт		
Мощность, Вт	34,7	34,0	3,58	3,69	4,0
Сила тока, А	0,0154	0,0159	0,0300	0,0320	0,0360
Electrostandart, 35 Вт			Gauss, 1 Вт		
Мощность, Вт	34,8	—	0,97	0,90	0,80
Сила тока, А	0,0159	—	0,0189	0,0183	0,024

Таблица 4

Световые и колориметрические характеристики исследуемых ламп в начальный момент времени при напряжении 220 В

Наименование ламп	Световой поток, лм	Световая отдача, лм/Вт	Цветовая температура, К
Electrostantard LED	3139	819,582	6658
Novotech LED	1026	301,76	6338
Gauss LED	4353	4487,62	6909
Electrostandart	1704	49,67	2585
Camelion	3128	90,6	2691
Osram	2534	138,31	8079

Таблица 5

Световые и колориметрические характеристики экспериментальных ламп при напряжении 220 В

Характеристика ламп	Галогенные лампы Camelion, 35 Вт		Светодиодные лампы Novotech, 3 Вт		
	Через 500 ч горения	Через 1000 ч горения	Через 500 ч горения	Через 1000 ч горения	Через 1500 ч горения
Световой поток, лм	2339	2062	1062	1086	1025
Световая отдача, лм/Вт	67,40	60,64	296,64	294,30	256,25
Цветовая температура, К	2673	2664	6349	6311	6326
Характеристика ламп	Галогенные лампы Electrostandart, 35 Вт		Светодиодные лампы Gauss, 1 Вт		
	Через 500 ч горения	Через 1000 ч горения	Через 500 ч горения	Через 1000 ч горения	Через 1500 ч горения
Световой поток, лм	1693	–	4361	4433	4436
Световая отдача, лм/Вт	48,649	–	4495,87	4925,5	5,545
Цветовая температура, К	2576	–	6870	7137	6899

галогенные лампы, участвовавшие в эксперименте по исследованию характеристик от продолжительности горения, показали небольшой спад светового потока и, соответственно, световой отдачи к 500 ч горения и практически на 30 % спад к 1000 ч горения, цветовая температура изменилась незначительно;

светодиодные лампы, участвовавшие в эксперименте по исследованию характеристик от продолжительности горения, показали неоднозначную картину. Так, у лампы фирмы Novotech световой поток после 500 ч горения не изменился, после 1000 ч был небольшой его рост (2...2,5 %), к 1500 ч — значение светового потока снизилось до уровня 500 ч; световая отдача к 1500 ч незначительно уменьшилась.

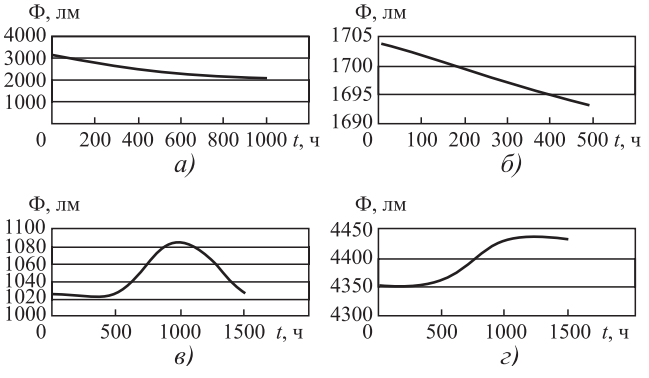


Рис. 3. Зависимости светового потока от продолжительности горения ГЛН Camelion (*а*), ГЛН Elektrostandart (*б*), светодиодной лампы Novotech (*в*) и светодиодной лампы Gauss (*г*)

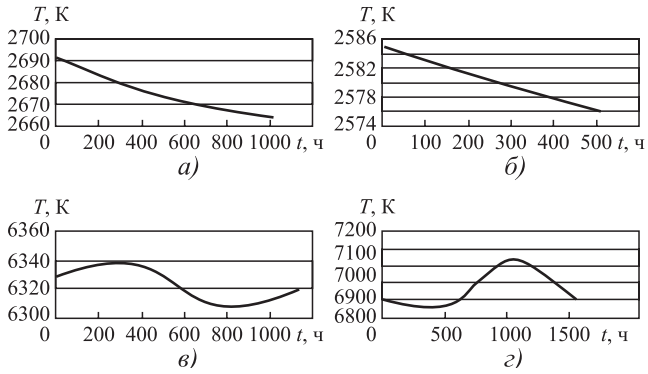


Рис. 4. Зависимости цветовой температуры от продолжительности горения ГЛН Camelion (*а*), ГЛН Elektrostandart (*б*), светодиодной лампы Novotech (*в*) и светодиодной лампы Gauss (*г*)

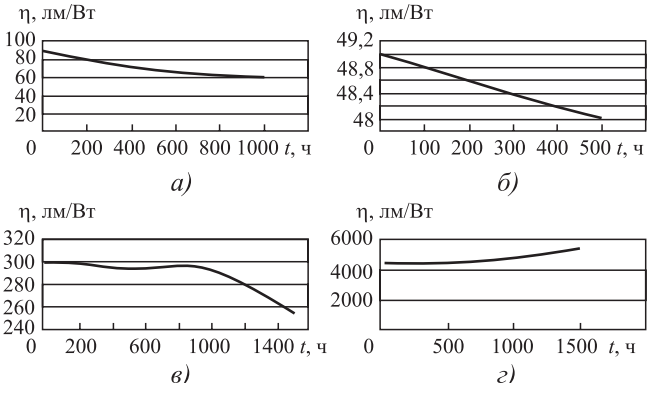


Рис. 5. Зависимости световой отдачи от продолжительности горения ГЛН Camelion (*а*), ГЛН Elektrostandart (*б*), светодиодной лампы Novotech (*в*) и светодиодной лампы Gauss (*г*)

У лампы фирмы Gauss световой поток после 500 ч также не изменился, после 1000 ч горения был также небольшой рост (2...2,5 %), к 1500 ч — значение не изменилось; световая отдача к 1500 ч незначительно увеличилась. Цветовая температура у светодиодных ламп изменилась также незначительно.

Изменение световых характеристик можно объяснить различием температурных режимов, связанных с различием климатических условий, при измерениях в контрольных точках (500, 1000 и 1500 ч), которые значительно влияют на результаты.

В результате развития светодиодных технологий стала возможна адекватная замена ГЛН на лампы с цоколем GU10. Их неоспоримые преимущества — низкое энергопотребление и отсутствие нагрева. Рабочая температура на поверхности ГЛН приближается к 300 °С, вследствие чего большое количество таких ламп может существенно повышать температуру в помещении и стать источником опасности. Светодиодные лампы при работе нагреваются гораздо меньше — их можно брать в руки и они не нагревают помещение.

Результатом настоящего исследования являются статистические и графические данные электрических и светотехнических характеристик ГЛН и светодиодных ламп с цоколем GU10 разной мощности, конструкции и фирм-изготовителей. Исследования показали, что все ГЛН, участвовавшие в экспериментах, не подтвердили своих заявленных значений по световому потоку и сроку службы. Две лампы (фирм Camelion и Elektrostandart) вышли из строя, не прогорев и 500 ч. Одна лампа фирмы Camelion догорела лишь до 1000 ч и имела 30 %-ный спад светового потока при заявленном значении у всех образцов 2000 ч и условии, что в процессе эксплуатации будут иметь место циклы включения-выключения.

Светодиодные лампы, участвовавшие в эксперименте, несмотря на небольшие завышения в заявленных значениях, показали стабильную работу и минимальные отклонения световых параметров в зависимости от продолжительности горения. Что касается неоднозначности поведения зависимостей от продолжительности горения, её можно объяснить различием температурных режимов в момент проведения измерения в контрольных временных точках, связанных с изменениями климатических условий, которые повлияли на результат в некоторых контрольных точках. В целом результаты исследования подтвердили неоспоримые преимущества светодиодных источников перед галогенными. Результаты работы актуальны, обладают научной новизной и могут быть использованы для оценки качества ламп при выборе поставщиками. Производителям необходимо обратить внимание на технологию изготовления данных источников.

Библиографические ссылки

1. **Алексеев Е.Г.** Моделирование процессов в галогенных лампах накаливания. Особенности расчёта и конструирования: автореф.... канд. техн. наук: Саранск, 2007, с. 24.

2. **Айзенберг Ю.Б.** Светодиоды и их применение для освещения. М.: Знак, 2012. 280 с.

УДК 629.7.036.001.4

Г.П. Шибанов, д-р техн. наук, проф.
(Государственный лётно-испытательный центр им. В.П. Чкалова, г. Ахтубинск)

gpshibanov@mail.ru

ОЦЕНКА ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Рассмотрена методика оценки определяющих параметров газотурбинных двигателей (ГТД) в процессе автоматизированных стендовых испытаний на примере одного из заданных режимов их эксплуатации.

Ключевые слова: автоматизация; параметр; оценка; газотурбинный двигатель; стендовые испытания.

The valuation methodology of the gas turbine engines determining parameters (GTE) in the automatic test bench test as an example of the one preset modes of operation is considered.

Keywords: automation; parameter; valuation; gas turbine engine; bench tests.

В настоящее время газотурбинные двигатели (ГТД) являются основным элементом силовых установок, используемых на летательных аппаратах, судах и мощных автотранспортных средствах как гражданского, так и военного назначения, а также на станциях перекачки газа по трубопроводам.

В технологических процессах опытного и серийного производств ГТД наиболее трудоёмким и ответственным является процесс их стендовых испытаний и доводки до требований заказчика. На современном этапе развития двигателестроения данный процесс в значительной мере автоматизирован. Вместе с тем эффективность автоматизированных испытаний и отладки ГТД существенно зависит от надёжности оценки определяющих параметров на каждом из режимов работы двигателя.

Основными параметрами ГТД, подлежащими оценке и отладке, являются тяга (мощность) двигателя, секундный расход топлива, частота вращения ротора или роторов низкого и высокого давления (в случае двухконтурных двигателей), температура в характерных сечениях газовоздушного тракта двигателя, положение рычага управления двигателем и др. Поскольку ГТД является многорежимным объектом эксплуатации (режимы малого газа, номинальный, максимальный и т.д.), то, естественно, в процессе его автоматизированных испытаний оценка параметров, по совокупности значений которых делается заключение о его техническом состоянии, осуществляется на каждом из режимов. Однако с теоретической точки зрения технология оценки каждого из параметров на одном каком-либо заданном режиме не отличается от технологии его оценки на других режимах. Поэтому для упрощения последующих рассуждений и выкладок будем рассматривать процедуру оценки одного из определяющих параметров лишь на одном из заданных режимов работы ГТД.

Параметр двигателя, измеряемый в заданном режиме, в аналитическом отношении представляет собой величину вида [1]

$$y = y(x, u, b, l),$$

где y — действительное значение параметра двигателя (тяга или мощность, секундный расход топлива и т.д.); x — действительное значение параметра двигателя, по которому устанавливается его режим работы (частота вращения ротора, положение дозирующей иглы автомата дозировки топлива и т.п.); $u = (u_1, u_2, ...)$ — вектор действительных значений координат u регулирующих элементов; $b = (b_1, b_2, ...)$ — вектор действительных значений характеристик b внешней среды (температура, давление, влажность воздуха и т.п.); $l = (l_1, l_2, ...)$ — вектор нерегулируемых в процессе испытаний геометрических характеристик l двигателя.

Приведённое состояние параметра y' можно представить в виде

$$y' = \chi y = \chi(b)y(x, u, b, l),$$

где $\chi = \chi(b)$ — коэффициент приведения (нормализации), являющийся известной функцией аргумента $b = (b_1, b_2, ...)$.

Первичная цель стендовых испытаний состоит в построении оценок параметров y' по результатам измерений y и компонентов вектора $b = (b_1, b_2, ...)$.

В процессе автоматизированных стендовых испытаний возможно многократное измерение этих параметров. Поэтому в распоряжении испытателя имеются выборки измерений вида

$$y_i = y + \Delta y_i \ (i = 1, 2, ..., n);$$
$$b_{sj} = b_s + \Delta b_{sj} \ (s = 1, 2, ..., q; j = 1, 2, ..., m),$$

где y_i — результат i-го измерения параметра y; b_{sj} — результат j-го измерения s-го параметра вектора b; Δy_i и Δb_{sj} — соответствующие ошибки измерений.

Можно считать, что ошибки измерений являются независимыми случайными величинами с нулевыми математическими ожиданиями (отсутствие систематических ошибок измерителей) и неизменными дисперсиями $D(\Delta y_i) = \sigma_y^2$ и $D(\Delta b_{si}) = \sigma_{bs}^2$.

По выборкам y_i, b_{sj} необходимо построить наиболее подходящую, так называемую оптимальную оценку параметра y'. Оценку $\hat{y}$ параметра y' можно считать оптимальной, если она несмещённая (не имеет систематической ошибки) и имеет минимальное рассеивание, характеризующееся её дисперсией $D(\hat{y})$.

Для решения этой задачи необходимо предварительно выборки b_{js} свести к выборке значений коэффициента приведения χ:

$$\chi_j = \chi + \Delta\chi_j \ (j = 1, 2, ..., m),$$

где $\chi_j = \chi(b_{2j}, b_{1j}, ..., b_{qj})$ — результат j-го измерения коэффициента приведения, вычисляемый по соответствующей формуле в зависимости от значения b_{sj}; $\Delta\chi_j$ — ошибка измерения χ в j-м измерении.

В свою очередь

$$\Delta\chi_j \cong \sum_{s=1}^{q} \frac{\partial\chi}{\partial b_s}\Delta b_{sj}.$$

Следовательно, ошибки $\Delta\chi_j$ можно считать независимыми с параметрами

$$M(\Delta\chi_j) = 0;\ D(\Delta\chi_j) = \sigma_\chi^2 = \sum_{s=1}^{q}\left(\frac{\partial\chi}{\partial b_s}\right)\sigma_{bs}^2,$$

которые не зависят от номера измерения.

Найдём оптимальную оценку $\hat{y}$ по формуле $\hat{y} = \overline{\chi}\overline{y}$, где $\overline{\chi}$ и $\overline{y}$ — средние арифметические выборок $(\chi_1, ..., \chi_m)$ и $(y_1, ..., y_n)$, т.е.

$$\overline{\chi} = \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}\chi_j;\ \overline{y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i. \qquad (1)$$

Дисперсия оценки $\hat{y}$ выражается соотношением

$$D(\hat{y}) = \frac{\sigma_y^2\sigma_\chi^2}{nm} + y^2\frac{\sigma_\chi^2}{m} + \chi^2\frac{\sigma_y^2}{n}.$$

Из последнего выражения видно, что если $n \to \infty$, $m \to \infty$, то $D(\hat{y}) \to 0$, что свидетельствует о состоятельности оценки $\hat{y}$, заключающейся в том, что при достаточно больших значениях n и m мала вероятность какого-нибудь существенного отклонения оценки $\hat{y}$ от действительного значения параметра y.

При вычислении оценки $\hat{y}$ по формуле $\hat{y} = \overline{\chi}\overline{y}$ следует предварительно исключить грубые ошибки из выборок измерений $(y_1, y_2, ..., y_n)$ и $(\chi_1, \chi_2, ..., \chi_m)$ либо $(b_{s1}, b_{s2}, ..., b_{sm})$. Грубые ошибки исключаются с помощью теории проверки статистических гипотез.

Накопленные в процессе стендовых испытаний ГТД статистические данные говорят о том, что распределение ошибок наблюдения подчиняется нормальному закону. С учётом этого процедура исключения грубых ошибок на примере выборки $(y_1, y_2, ..., y_n)$ может быть представлена в следующей технологической последовательности:

в выборке $(y_1, y_2, ..., y_n)$ устанавливают минимальный y_- и максимальный y_+ элементы;

вычисляются параметры

$$\overline{y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i;\ s_y = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i-1}^{n}(y_i - \overline{y})^2};$$

задаваясь уровнем значимости критерия проверки гипотезы о наличии грубой ошибки в выборке q = (10; 5; 2,5; 1) %, по входным данным n и q из специальных таблиц [2] находят величину g_{qn} и вычисляют параметры

$$u_{qn}^- = \overline{y} - s_y g_{qn};\ u_{qn}^+ = \overline{y} + s_y g_{qn};$$

величины y_- и y_+ считаются грубыми ошибками и исключаются из выборки, если выполняются неравенства

$$y_- < u_{qn}^-;\ y_+ > u_{qn}^+.$$

Если оправдана гипотеза нормальности ошибок измерений, то обработку результатов наблюдений целесообразно проводить для всякой исходной выборки.

Перейдём к исследованию надёжности оценки $\hat{y}$. Для этого используем метод построения доверительного интервала для оцениваемого параметра y', т.е. такого случайного интервала, который с вероятностью, близкой к единице, содержит оцениваемый параметр y'. Рассмотрим случай, когда ошибки измерений распределены по нормальному закону. При таком предположении величины

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \overline{y})^2};\ s_\chi = \sqrt{\frac{1}{m}\sum_{j-1}^{m}(\chi_i - \overline{\chi})^2} \qquad (2)$$

распределены по закону Стьюдента соответственно с $n - 1$ и $m - 1$ степенями свободы.

Используя этот закон распределения и задаваясь доверительной вероятностью P (P = 0,95; 0,99; ...), можно построить доверительные интервалы $I_y = (y_-, y_+)$, $I_\chi = (\chi_-, \chi_+)$, которые содержат параметры y и χ с вероятностью P. Алгоритм построения интервалов обосновывается в математической статистике и состоит в следующем:

используя выборки наблюдений, очищенные от грубых ошибок, вычисляют $\overline{y}, \overline{\chi}$, s_y, s_χ по формулам (1) и (2);

задаваясь доверительной вероятностью P, из таблиц распределения Стьюдента по входным величинам $q = (1 - P)\cdot 100$ и $k = n - 1$, $k' = m - 1$ находят параметры $t_{q(n-1)}$ и $t_{q(m-1)}$;

определяют границы доверительных интервалов $I_y = (y_-, y_+)$ и $I_\chi = (\chi_-, \chi_+)$ для y и χ по формулам

$$y_- = \overline{y} - \frac{s_y t_{q(n-1)}}{\sqrt{n-1}};\quad y_+ = \overline{y} - \frac{s_y t_{q(n-1)}}{\sqrt{n-1}};$$

$$\chi_- = \overline{\chi} - \frac{s_\chi t_{q(m-1)}}{\sqrt{m-1}};\quad \chi_+ = \overline{\chi} + \frac{s_\chi t_{q(m-1)}}{\sqrt{m-1}}.$$

Отсюда следует, что с вероятностью $P \approx 1$

$$|\overline{y} - y| < \frac{t_{q(n-1)S_y}}{\sqrt{n-1}};$$

$$|\overline{\chi} - \chi| < \frac{t_{q(m-1)S_\chi}}{\sqrt{m-1}}.$$

Поскольку $\overline{y}$ и $\overline{\chi}$ — независимые случайные величины, то нетрудно убедиться в том, что интервал

$$I'_y = (y'_-, y'_+),$$

где $y'_- = \min\{y_-\chi_-, y_-\chi_+, y_+\chi_-, y_+\chi_+\}$; $y'_+ = \max\{y_-\chi_-, y_-\chi_+, y_+\chi_-, y_+\chi_+\}$, содержит оцениваемый параметр y' с вероятностью не меньшей, чем P^2. Следовательно, I'_y может служить мерой надёжности оценки параметра y'.

Отметим, что величины y и χ вследствие естественных флуктуаций в действительности сами являются случайными величинами. В этом случае вопрос об оценке параметра y' состоит в оценке его математического ожидания. Можно показать, что выражение $\hat{y} = \overline{\chi}\overline{y}$ представляет собой несмещённую оценку математического ожидания параметра y'. Что же касается $\overline{y}$ и $\overline{\chi}$, то они являются несмещёнными оценками y и χ с минимальными дисперсиями в классе линейных относительно результатов измерений оценок. Точно так же доверительные интервалы I_y, I_χ, I'_y являются характеристиками надёжности оценок математических ожиданий y, χ и y'.

При испытаниях серийных ГТД располагают обширной статистической информацией об их параметрах. Здесь можно считать, что законы распределения параметров ГТД известны, и, в частности, известны математическое ожидание m_y и среднеквадратичное отклонение σ_y параметра у двигателя, поступающего на стендовое испытание. Поэтому эту информацию целесообразно использовать в процессе построения "оптимальной" оценки $\tilde{y}$ данного параметра.

В случае, когда ошибки измерений Δy_i независимы и распределены по нормальному закону, параметр y также подчиняется нормальному закону, так что "оптимальную" оценку $\tilde{y}$ параметра y можно определить как

$$\tilde{y} = \frac{m_y + n\overline{y}\left(\frac{\sigma_y^2}{\sigma_{yu}^2}\right)}{1 + n\left(\frac{\sigma_y^2}{\sigma_{yu}^2}\right)},$$

где σ_{yu} — среднеквадратичное отклонение параметра y по результатам n его измерений, выполненных при стендовом испытании двигателя.

Аналогичная "оптимальная" оценка $\tilde{\chi}$ может быть получена для параметра χ

$$\tilde{\chi} = \frac{m_\chi + m\overline{\chi}\left(\frac{\sigma_\chi^2}{\sigma_{\chi u}^2}\right)}{1 + m\left(\frac{\sigma_\chi^2}{\sigma_{\chi u}^2}\right)},$$

где m_χ, σ_χ — априорные математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение χ; $\sigma_{\chi u}$ — апостериорное среднее квадратичное отклонение измеренного параметра χ.

"Оптимальная" приведённая оценка $\tilde{y}'$ может быть определена как

$$\tilde{y}' = \tilde{y}\tilde{\chi}.$$

Таким образом, рассмотренная выше технология получения оценок определяющих параметров на заданном режиме работы ГТД позволяет последовательно оценить по всей совокупности параметров каждый из режимов. Для автоматизации процесса стендовых испытаний ГТД целесообразно все эти оценки свести в базу данных и представить её в табличной форме.

Библиографические ссылки

1. **Шибанов Г.П.** Принципы автоматизированной проверки работоспособности авиадвигателей и функционально связанных с ними систем // Автометрия. 1970. № 5. С. 111—117.

2. **Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В.** Курс теории вероятностей и математической статистики. М.: Наука, 1969, 511 с.

УДК 629.7

А.В. Андронов, канд. техн. наук
(Государственный лётно-испытательный центр им. В.П. Чкалова, г. Ахтубинск)
andronov.plk@mail.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ СОВРЕМЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЦЕССА ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ОРГАНИЗМА ЧЕЛОВЕКА

Обоснован вариант автоматизации диагностики состояний организма человека по излучаемым им электромагнитным спектрам ИК-диапазона, преобразованным с помощью кривых второго порядка в полутоновые изображения для последующего сравнения в целях выявления произошедших изменений.

Ключевые слова: инфракрасные лучи; биохимические процессы; считывающее устройство; электронный луч; эталонное изображение; инварианты; топологические признаки; критерии различимости; база данных.

Automation version of the human organism state diagnostics on the grounds of the human emitted electromagnetic spectrum in the IR range, transformed in the halftone images by means of the second order curves for subsequent comparison with the purpose of occurred changes revelation is substantiated.

Keywords: infrared rays; biochemical processes; reader; electron beam; a reference image; invariants; topological features; observability criteria; database.

Любое нагретое тело, имеющее температуру выше абсолютного нуля, в том числе организм человека, излучает электромагнитные волны в широком спектре частот. Невидимые глазом тепловые лучи были открыты в 1800 г. Гершелем, который дал им название "инфракрасные лучи". ИК-излучение занимает на шкале электромагнитных волн спектральную область между концом красного цвета видимой части спектра (с длиной волны 0,74 мм) и коротковолновым радиоизлучением (длина волны 1—2 мм). Источником излучаемых человеком электромагнитных волн являются биохимические процессы, непрерывно проходящие в каждой клетке человеческого организма, сопровождаемые выделением тепла с температурой 31—42° по шкале Цельсия. Практический диапазон этого излучения имеет длину волн 2—50 мкм с максимальной спектральной плотностью в диапазоне 8—16 мкм. Таким образом, человеческий организм создаёт вокруг себя биоэнергетический спектр, несущий информацию о функционировании каждого органа и организма в целом и позволяющий с помощью инструментальных средств по изменению характера излучения определять не только начало изменений, протекающих в организме, но и "проблемный" орган по проекции на кожные покровы.

Такая технология процесса диагностики состояния организма человека необходима для определения начала изменений, происходящих в ещё относительно здоровом организме под воздействием неблагоприятных внешних факторов, изменяющих условия и скорости протекающих в клетках биохимических реакций, снижающих, в свою очередь, функциональные возможности клеток, отвечающих за адекватный иммунный ответ, т.е. снижая сам иммунитет. Одновременно данный процесс сопровождается ослаблением спектральной плотности и изменением самого биоэнергетического спектра, излучаемого человеческим организмом. Поэтому указанную выше технологию диагностики состояния организма человека целесообразно использовать, прежде всего, для профессий, связанных с лётной работой и космонавтикой, предполагающих регулярное глубокое медицинское освидетельствование [1]. В качестве инструмента, позволяющего решить задачу преобразования невидимого глазом излучения в каждой точке исследуемого спектра в значение параметра, позволяющего увидеть начало происходящих изменений, может служить иконоскоп с непрерывной развёрткой, которая квантуется генератором стандартной частоты. С помощью иконоскопа, убедившись в отсутствии откло-

нений в здоровье обследуемого, записывается первоначальное полутоновое, разноуровневой контрастности изображение состояния организма, которое принимается за эталонное и заносится в базу данных. При последующих плановых медицинских обследованиях эталонное изображение сравнивают с вновь получаемыми изображениями. При идентичности сравниваемых изображений необходимость дальнейшего медицинского обследования в полном объёме отпадает. Если имеются отличия, то продолжается целевое обследование.

Полутоновые изображения можно сравнивать распознаванием, основанным на способах кодирования выделенных топологических признаков получаемых изображений. Особого внимания заслуживают способы, базирующиеся на аппроксимации изображений набором кривых второго порядка по нескольким уровням контрастности. При реализации этих способов предполагается дискретное получение информации, описывающей распознаваемое изображение, что и обеспечивает считывающее устройство — иконоскоп [2]. Для каждой точки квантования в запоминающее устройство распознающей системы поступает напряжение, пропорциональное в данных точках коэффициенту контрастности распознаваемого изображения. В связи с этим предварительно все значения выходных величин (напряжений U_0, снимаемых с иконоскопа) от $U_{0\min}$ до $U_{0\max}$ разбиваются на m равных участков, каждому из которых ставится в соответствие определённый уровень контрастности. Причём i-му участку этого диапазона будут соответствовать все напряжения U_0, находящиеся в интервале от $U_{0\min} + (i-1)\dfrac{U_{0\max} - U_{0\min}}{m}$ до $U_{0\min} + i\dfrac{U_{0\max} - U_{0\min}}{m}$, а например, самым тёмным местам изображений — интервал напряжений от $U_{0\min}$ до $U_{0\min} + \dfrac{U_{0\max} - U_{0\min}}{m}$.

Через точки изображения, соответствующие одному уровню контрастности (например, через точки, относящиеся к самому тёмному участку изображения), способом наименьших квадратов проводится кривая второго порядка, описываемая уравнением

$$b'xy + c'y^2 + d'x + e'y + f' = -x^2,$$

получаемая из канонического уравнения кривых второго порядка вида

$$ax^2 + 2bxy + cy^2 + 2dx + 2cy + f = 0$$

делением последнего на коэффициент при первом члене и переносом первого члена уравнения в правую часть.

"Построение" такой кривой для каждого уровня контрастности осуществляется в следующей последовательности. Определяются и записываются в запоминающее устройство распознающей системы координаты x_i, y_i ($i = 1, 2, ..., n$) точек изображения, имеющие данный уровень контрастности. Значения координат x_i, y_i подставляют в систему уравнений

$$\begin{aligned}
&[x^2y^2]b' + [xy^3]c' + [x^2y]d' + \\
&+ [xy^2]e' + [xy]f' = -[x^3y];\\
&[xy^3]b' + [xy^2]c' + [xy^2]d' + \\
&+ [y^3]e' + [y^2]f' = -[x^2y^2];\\
&[x^2y]b' + [xy^2]c' + [x^2]d' + \\
&+ [xy]e' + [x]f' = -[x^3];\\
&[xy^2]b' + [y^3]c' + [xy]d' + \\
&+ [y^2]e' + [y]f' = -[x^2y];\\
&[xy]b' + [y^2]c' + [x]d' + \\
&+ [y]e' + [1]f' = -[x^2],
\end{aligned} \qquad (1)$$

где $[x^2y^2] = \sum_{i=1}^{n} x_i^2 y_i^2$; $[xy^3] = \sum_{i=1}^{n} x_i y_i^3$ и т.д.,

полученную на основе свёртывания системы

$$\begin{aligned}
&b'x_1y_1 + c'y_1^2 + d'x_1 + e'y_1 + f' = -x_1^2;\\
&b'x_2y_2 + c'y_2^2 + d'x_2 + e'y_2 + f' = -x_2^2;\\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\
&b'x_{n-1}y_{n-1} + c'y_{n-1}^2 + d'x_{n-1} + e'y_{n-1} + f' = -x_{n-1}^2;\\
&b'x_ny_n + c'y_n^2 + d'x_n + e'y_n + f' = -x_n^2,
\end{aligned}$$

и решают её относительно b', c', d', e', f'. Значения b', d' и e', полученные в результате решения системы (1), делят на 2 и значения

$$b'' = \frac{b'}{2};\ c'' = c';\ d'' = \frac{d'}{2};\ e'' = \frac{e'}{2} \text{ и } f'' = f'$$

при $a'' = 1$ используют при вычислении инвариантов

$$\Delta = \begin{vmatrix} a'' & b'' & d'' \\ b'' & c'' & e'' \\ d'' & e'' & f'' \end{vmatrix};\ \delta = \begin{vmatrix} a'' & b'' \\ b'' & c'' \end{vmatrix} \text{ и } S = a'' + c''. \qquad (2)$$

Указанные инварианты (2) являются характеристиками излучаемого спектра (для данного фиксированного уровня контрастно-

сти его изображения), не зависящими от положения распознаваемых изображений в поле зрения входного устройства распознающей системы. Инварианты эталонного изображения обозначим Δ_0, δ_0, S_0.

Процесс распознавания хранящегося в памяти эталонного изображения по записанным уровням контрастности с вновь получаемым изображением одного и того же обследуемого заключается в сравнении эталонных инвариантов с полученными Δ, δ, S. Необходимым (но в общем случае недостаточным) условием того, что вновь полученное изображение соответствует эталонному, является выполнение равенств

$$\Delta = \Delta_0,\ \delta = \delta_0,\ S = S_0, \qquad (3)$$

которые, очевидно, должны выполняться с некоторой допустимой погрешностью, устанавливаемой в процессе практических экспериментов.

Так как каждое эталонное изображение хранится в памяти распознающей системы в виде одной или нескольких (в зависимости от количества принятых уровней контрастности и отдельных участков, на которые они предварительно разбиваются) групп предельных (экстремальных) значений инвариантов, т.е. в виде групп значений Δ_{0max}, Δ_{0min}; δ_{0max}, δ_{0min}; S_{0max}, S_{0min}, то непосредственно автоматизированный процесс распознавания может быть сведён к следующим этапам:

вычисление по коэффициентам уравнений (определяемым методом наименьших квадратов) их инвариантов;

определение по значениям инвариантов групп распознаваемых изображений;

последовательное сравнение вычисленных значений инвариантов с соответствующими им эталонными экстремальными значениями.

При этом если окажется, что все вычисленные значения инвариантов укладываются в установленные для них пределы, то изображение (или его отдельный участок) по данному уровню контрастности считается принадлежащим искомому образцу. Если хотя бы один из инвариантов не укладывается по своей величине в установленные пределы, то в зависимости от того, меньше эта величина минимального эталонного значения или больше максимального эталонного значения соответствующего инварианта, осуществляется условный переход в одну из двух соседних ячеек памяти. После этого описанный процесс сравнения повторяется до тех пор, пока вычисленные значения инвариантов не будут соответствовать установленным для них расчётным пределам, т.е. пока отличия не будут минимизированы, а изображение опознано.

Описанный способ может быть реализован с помощью распознающей системы, представленной на рисунке. Данная система позволяет при аппроксимации распознаваемых изображений кривыми второго порядка разбить каждое из распознаваемых изображений, например, на четыре участка и вести распознавание на каждом из участков по нескольким уровням контрастности.

Система работает следующим образом. По мере прохождения считывающим лучом электронно-лучевой трубки (*ЭЛТ*) её экрана с выходных шин всех четырёх участков *I*, *II*, *III* и *IV* сигнальной пластины в последовательности, определяемой устройством управления (*УУ*), снимают потенциал, величина которого в каждой точке распознаваемого изображения пропорциональна его контрастности.

Полученные на резисторах R_1—R_4 уровни напряжения предварительно усиливаются (на схеме усилители не показаны) и через один из клапанов *1*, *2*, *3* или *4* поступают на усилитель-формирователь (*УФ)*, а затем — на триггеры Шмитта $T_{г1}$—$T_{г4}$. Распознавание можно проводить либо по четырём уровням контрастности, либо по их меньшему числу (2 или 3). Если распознавание ведут по четырём уровням контрастности, то на клапаны *7* и *5* устройства управления подают низкий управляющий потенциал, под воздействием которого они открываются. В этом случае сигналы с УФ беспрепятственно проходят через данные клапаны на правые входы триггеров $T_{г2}$ и $T_{г3}$ и на соответствующие входы $T_{г1}$ и $T_{г4}$.

При необходимости проведения процесса распознавания по двум или трём уровням контрастности оба клапана *5* и *7* (или один из них) запирают высоким управляющим потенциалом, препятствуя тем самым записи в оперативное запоминающее устройство (*ОЗУ*) координат поля изображения, соответствующих промежуточным уровням контрастности.

Отметим, что триггеры имеют различные минимальные пороги срабатывания, пропорциональные соответствующим уровням контрастности распознаваемого изображения. При этом наиболее тёмным местам изображения соответствуют, например, потенциалы от 3 до 5 В, а наиболее светлым — от 9 В до максимально возможного значения (12 В).

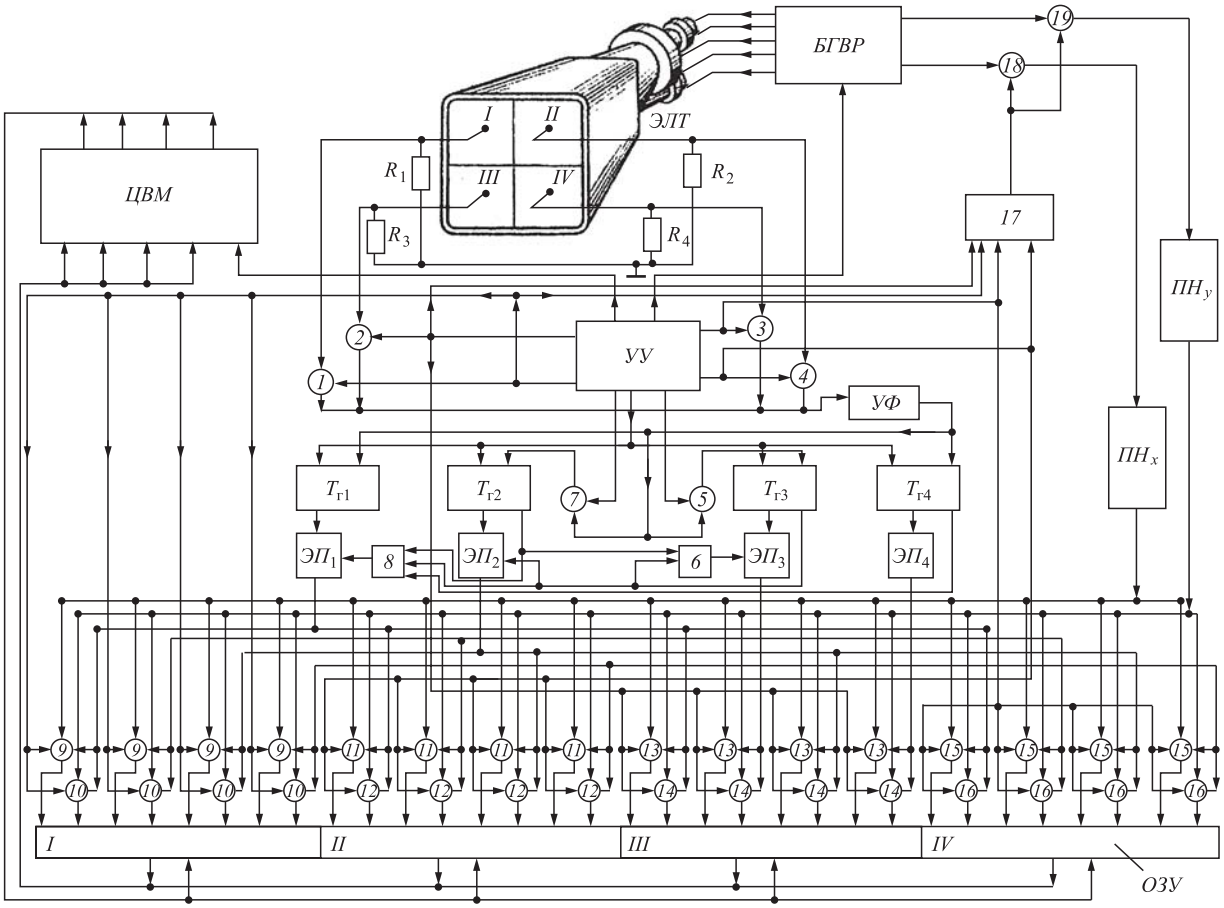


Схема распознающей системы, аппроксимирующей распознаваемые изображения кривыми второго порядка

Промежуточным уровням контрастности соответствуют потенциалы от 5 до 7 В. Поэтому минимальный порог срабатывания $Т_{г1}$ составляет 3, $Т_{г3}$ — 5, $Т_{г2}$ — 7 и $Т_{г4}$ — 9 В. Верхний порог срабатывания триггеров не ограничивают. При этом время срабатывания триггера $Т_{г1}$ больше в 4 и $Т_{г2}$ в 2 раза по сравнению со временем срабатывания триггера $Т_{г4}$.

Перед переходом к каждой очередной точке съёма информации с экрана *ЭЛТ* из *УУ* на левые входы триггеров подаётся импульс гашения, устанавливающий последние в нулевое положение. При этом на левых коллекторах триггеров, а следовательно, и на выходах эмиттерных повторителей $ЭП_1$, $ЭП_2$, $ЭП_3$, $ЭП_4$ появляется высокий управляющий потенциал, под воздействием которого все клапаны *9—16* записи в *ОЗУ* координат *x* и *y* оказываются запертыми. Как указывалось выше, при переходе считывающего луча *ЭЛТ* в очередную точку съёма информации на выходе *УФ* появляется сигнал, амплитуда которого пропорциональна контрастности изображения в данной точке. Предположим, что амплитуда этого сигнала равна 9 В. Очевидно, что при такой амплитуде все триггеры перейдут из положения, принятого за нулевое, в положение, при котором на их левых коллекторах появится низкий управляющий потенциал. При этом могут открыться все клапаны записи *x* и *y*. Однако благодаря системе блокировки открываются лишь клапаны, соответствующие данному уровню контрастности, т.е. может открыться лишь каждый четвёртый клапан справа из всех восьми групп клапанов, показанных на рисунке, при условии, что на их вторые управляющие входы будут поданы отпирающие сигналы из *УУ*, используемые для управления клапанами *1—4*. Благодаря наличию в составе $ЭП_1$, $ЭП_2$ и $ЭП_3$, клапанных схем и тому, что время срабатывания $Т_{г4}$ меньше времени срабатывания триггеров $Т_{г1}$, $Т_{г2}$ и $Т_{г3}$, при срабатывании $Т_{г4}$ на его правом коллекторе появится запирающий потенциал, который подаётся непосредственно на клапанную схему $ЭП_2$, а через схемы *ИЛИ 8* и *6* — на $ЭП_1$ и $ЭП_3$, и прежде чем сработают триггеры $Т_{г1}$, $Т_{г2}$ и $Т_{г3}$ их выходы будут уже

заперты. При этом запирающий потенциал от $T_{г4}$ поступит на выходные шины $ЭП_1$, $ЭП_2$, $ЭП_3$, и подсоединённые к этим шинам клапаны останутся закрытыми.

Далее предположим, что в момент появления на входе *УФ*-сигнала напряжением 9 В считывающий луч *ЭЛТ* оказался в одной из точек, например, участка *IV* сигнальной пластины. В этом случае по команде *УУ* предварительно открывается клапан *3* и по этой же команде на управляющие входы клапанов *15* и *16* секции *IV ОЗУ* непосредственно и через схему *ИЛИ 17* на клапаны *18* и *19* подаётся управляющий потенциал. Клапаны *18*, *19* и последние справа клапаны *15* и *16* отпираются. Из блока развёртки *БГВР ЭЛТ* через открытые клапаны *18* и *19* на входы преобразователей $ПН_x$ и $ПН_y$ поступает "мгновенное" значение напряжений развёртки по горизонтальному *x* и вертикальному *y* каналам. Это напряжение преобразуется в импульсный код, который и поступает через клапаны *15* и *16* в секцию *IV ОЗУ*. Так же проводится запись в *ОЗУ* координат всех остальных точек распознаваемого изображения, имеющих такую же контрастность, но расположенных на участках *I*, *II* и *III* сигнальной пластины с той лишь разницей, что запись осуществляется не в секцию *IV*, а в аналогичные ячейки секций *I*, *II* и *III ОЗУ*.

Принцип записи в *ОЗУ* координат точек, имеющих другие уровни контрастности, аналогичен приведённому выше принципу. Затем записанная в *ОЗУ* информация используется для определения на ЦВМ методом наименьших квадратов значений коэффициентов кривых второго порядка и определения на их основе инвариантов. Запись координат точек распознаваемого изображения в четыре секции, соответствующие четырём участкам изображения излучаемого человеком спектра, позволяет при необходимости вести распознавание как по всей площади изображения, так и по его отдельным, заранее выбранным участкам.

Библиографические ссылки

1. **Андронов А.В., Ким Т.Д.-Н., Попов В.И., Хруленко В.Н.** Из опыта профилактики заболеваний и укрепления иммунной системы организма // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. Т. 12. № 3, 2013. С. 771—776.

2. **Шибанов Г.П.** Автоматизация процесса диагностики состояния организма человека по изменению картины его теплового излучения // Мехатроника, автоматизация, управление. № 6. 2013. С. 32—35.

Уважаемые авторы и читатели!

Редакция и редакционная коллегия сообщают:
межотраслевой научно-технический журнал "Автоматизация. Современные технологии"
успешно прошёл аккредитацию в ВАК для публикации работ
соискателей учёных степеней по отрасли науки:
05.00.00 — технические науки
и четырём группам специальностей:
05.02.00 — машиностроение и машиноведение;
05.07.00 — авиационная и ракетно-космическая техника;
05.11.00 — приборостроение, метрология
и информационно-измерительные приборы и системы;
05.13.00 — информатика, вычислительная техника и управление.
Напоминаем: статьи следует подавать в редакцию заблаговременно!
С правилами оформления статей можно ознакомиться на сайте mashin.ru

УДК 629.7.058

Б.В. Белик, В.С. Верба, д-р техн. наук, проф., **В.И. Меркулов,** д-р техн. наук, проф.
(АО "Концерн "Вега", г. Москва)

boris_belik@mail.ru

МОНИТОРИНГ ПОДВИЖНЫХ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ СО СТРОБОВЫМ ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕМ ИЗМЕРЕНИЙ

Рассмотрен метод многообъектного сопровождения движущихся источников радиоизлучения с подвижного носителя на основе стробового отождествления измеренных параметров принимаемых сигналов и их аналого-дискретной α−β-фильтрации. Приведены результаты моделирования.

Ключевые слова: источники радиоизлучения; многообъектное сопровождение; пеленгация; станция радиотехнической разведки; стробовая идентификация; α−β-фильтрация.

A method for multi-site tracking of the moving radiation sources from the mobile carrier on the basis of strobe identification of measured values for the received signals and their analog discrete α−β filtrations is considered. Modeling results are adduced.

Keywords: radiation sources; multi-site tracking; direction finding; electronic intelligence station; strobe identification; α−β filtration.

Введение. Одним из наиболее интенсивно развивающихся видов мониторинга окружающей среды [1] является контроль электромагнитной обстановки, необходимость которого обусловлена значительным возрастанием количества функционирующих радиоэлектронных систем различного назначения, начиная от детских дистанционно-управляемых игрушек, радиостанций, телевидения до сложнейших систем радиолокации и радиоуправления летательными аппаратами.

Наиболее распространённым видом систем такого контроля являются так называемые станции радиотехнической разведки (СРТР) [2], размещаемые как на земле, так и на летательных аппаратах, когда требуется осуществлять мониторинг больших объёмов пространства.

В общем случае СРТР способны измерять (оценивать) вектор состояния j-го источника радиоизлучения (ИРИ) ($j = 1, ..., J$)

$$\mathbf{X} = \left[X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6\right]^{\mathrm{T}} = \left[\varphi_{\mathrm{г}}, \varphi_{\mathrm{в}}, f_{\mathrm{н}}, t_{\mathrm{и}}, F_{\mathrm{П}}, \Delta f\right]^{\mathrm{T}}, \quad (1)$$

где $\varphi_{\mathrm{г}}$, $\varphi_{\mathrm{в}}$ — бортовые пеленги в горизонтальной и вертикальной плоскостях соответственно (рис. 1); $f_{\mathrm{н}}$ и $F_{\mathrm{П}}$ — несущая частота сигнала и частота повторения импульсов; $t_{\mathrm{и}}$ и Δ_f — длительность импульсов и ширина спектра контролируемых сигналов.

Режим работы СРТР, при котором постоянно контролируется несколько ИРИ, в дальнейшем будем называть многообъектным сопровождением (МОС). Специфика этого режима — необходимость не только измерять параметры радиосигналов, но и выполнять их отождествление на принадлежность конкретным ИРИ.

Известным способом отождествления является так называемая стробовая идентификация, суть которой состоит в проверке попадания принятых измерений $X_{ии}(k)$ в многомерный строб $\Delta X_{ji}(k)$, построенный относительно результатов экстраполяции $X_{эji}(k)$ предыдущих оценок на момент прихода новых измерений.

Правило отождествления в соответствии с работой [3] формулируется следующим образом. Если все компоненты $X_{ии}(k)$ вектора $\mathbf{X}_{\mathrm{и}}(k)$ удовлетворяют условию

$$\widehat{X}_{эji}(k) - \Delta X_{ji}(k) \leqslant X_{ui}(k) \leqslant \widehat{X}_{эji}(k) + \Delta X_{ji}(k), \quad (2)$$

то принимается решение об их отождествлении с фазовыми координатами j-го ИРИ.

Наиболее простым вариантом получения оценок параметров ИРИ является использование аналого-дискретного варианта α−β-фильтрации [4], которая при наличии иденти-

фицированных измерений $X_{иji}$ позволяет сформировать оценки $\widehat{X}_{ji}$ и $\widehat{\dot{X}}_{ji}$ по правилу

$$\begin{cases} X_{эji}(k+1) = \widehat{X}_{ji}(k) + \widehat{\dot{X}}_{ji}(k)\Delta t(k);\ X_{эji}(0) = X_{иji}(0); \\ \dot{X}_{эji}(k+1) = \widehat{\dot{X}}_{ji}(k);\ \dot{X}_{эji}(0) = \mathrm{M}\left\{\dot{X}_{ji}\right\}; \\ \widehat{X}_{ji}(k+1) = X_{эji}(k+1) + \alpha_{j,i}\left(X_{иji}(k+1) - X_{эji}(k+1)\right); \\ \widehat{\dot{X}}_{ji}(k+1) = \dot{X}_{эji}(k+1) + \dfrac{\beta_{j,i}}{\Delta t(k)}\left(X_{иji}(k+1) - X_{эji}(k+1)\right), \end{cases} \quad (3)$$

где $X_{иji}(0)$ — измерение, полученное при завязке траектории ИРИ; $\mathrm{M}\{\dot{X}_{ji}\}$ — математическое ожидание производной соответствующей координаты состояния; $\alpha_{j,\,i}$ и $\beta_{j,\,i}$ — постоянные коэффициенты, значения которых выбираются исходя из компромисса между точностью и устойчивостью фильтра.

Цель статьи — исследование работоспособности МОС подвижных ИРИ с подвижного носителя.

Постановка и решение задачи. Пусть в контролируемом пространстве имеется J подвижных ИРИ, от каждого из которых на движущейся СРТР формируются измерения $X_{иji}$.

Необходимо сформировать оценки координат состояния (1) и их производных при следующих условиях:

рассматривается наиболее сложный для отождествления вариант, когда измеряются только бортовые пеленги;

решение об обнаружении ИРИ уже принято и ведётся формирование оценок $\hat{\varphi}_г$, $\hat{\dot{\varphi}}_г$, $\hat{\varphi}_в$, $\hat{\dot{\varphi}}_в$ по правилам (2) и (3).

Исследования проводились на основе результатов имитационного моделирования движения двух ИРИ и подвижной СРТР. При этом результаты измерений $\varphi_{иг}$, $\varphi_{ив}$ формировались наложением на реальные значения $\varphi_{гj}$, $\varphi_{вj}$ случайных ошибок, распределённых по гауссовскому закону со среднеквадратичными ошибками (СКО) $\sigma_{\varphi_г} = 0{,}5°$ и $\sigma_{\varphi_в} = 2°$ соответственно. При моделировании стробы отождествления по бортовым пеленгам в горизонтальной и вертикальной плоскостях полагались равными $\Delta\varphi_г = 3°$ и $\Delta\varphi_в = 12°$ соответственно.

Моделирование процедур МОС выполнялось в два этапа. На первом этапе исследовалась работоспособность рассматриваемого варианта МОС при сопровождении ИРИ движущихся по траекториям, при которых нет совпадения бортовых пеленгов, на втором — при движении ИРИ по траекториям, при которых происходит совпадение бортовых пеленгов в некоторый момент времени.

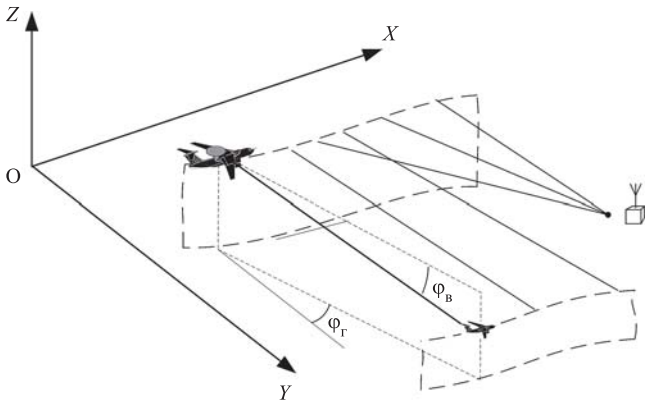


Рис. 1. Траектории ИРИ и СРТР

Предполагалось, что в начальный момент времени $t_1 = 0$ самолёт-носитель СРТР находится в точке с координатами $(x_c,\ y_c,\ z_c) = (0,\ 0,\ 10)$ км в системе координат $OXYZ$ и в течение времени наблюдения движется равномерно прямолинейно со скоростью $v_c = 200$ м/с вдоль оси OX, сохраняя постоянную высоту (см. рис. 1). При моделировании полагалось, что в СРТР с периодом $\Delta t = 1$ с поступают измерения угловых координат от одного из наблюдаемых ИРИ.

В качестве показателей эффективности использовались текущие ошибки сопровождения

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{гj}(k) &= \left(\hat{\varphi}_{гj}(k) - \varphi_{гj}(k)\right); \\ \Delta\varphi_{вj}(k) &= \left(\hat{\varphi}_{вj}(k) - \varphi_{вj}(k)\right), \end{aligned} \quad (4)$$

где $\varphi_{гj}(k)$, $\varphi_{вj}(k)$ — истинные бортовые пеленги j-го ИРИ в момент времени t_k; $\hat{\varphi}_{гj}(k)$, $\hat{\varphi}_{вj}(k)$ — их оценки, СКО ошибок сопровождения по пеленгам и их производным, вычисленные в предположении эргодичности процесса в соответствии с формулами:

$$\begin{aligned} \sigma_{\varphi_{гj}}(k) &= \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{k}\Delta\varphi_{гj}(n)^2}}{k-1}; \\ \sigma_{\dot{\varphi}_{гj}}(k) &= \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{k}\left(\hat{\dot{\varphi}}_{гj}(n) - \dot{\varphi}_{гj}(n)\right)^2}}{k-1}; \\ \sigma_{\varphi_{вj}}(k) &= \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{k}\Delta\varphi_{вj}(n)^2}}{k-1}; \\ \sigma_{\dot{\varphi}_{вj}}(k) &= \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{k}\left(\hat{\dot{\varphi}}_{вj}(n) - \dot{\varphi}_{вj}(n)\right)^2}}{k-1}. \end{aligned} \quad (5)$$

При исследовании первого этапа полагалось, что в момент времени $t_1 = 0$ ИРИ находились в точках с координатами $(x_1, y_1, z_1) = (30, 100, 10)$ км и $(x_2, y_2, z_2) = (50, 100, 10)$ км. В течение всего времени наблюдения они двигались равномерно и прямолинейно со скоростями $(v_{x1}, v_{y1}, v_{z1}) = (-50, -150, 0)$ м/с и $(v_{x2}, v_{y2}, v_{z2}) = (50, -150, 0)$ м/с соответственно. Графики зависимостей поступающих в СРТР измерений бортовых пеленгов ИРИ в горизонтальной плоскости (кресты), их истинных значений (пунктирные линии) и оценок пеленгов (сплошные линии) отождествлённых ИРИ, от времени, представлены на рис. 2 (см. обложку).

Эффективное сопровождение подвижных ИРИ возможно осуществлять (см. рис. 2 на обложке), если в течение времени наблюдения не происходит совпадения их бортовых пеленгов (пересечения траекторий движения).

На рис. 3 (см. обложку) представлены графики зависимости ошибок сопровождения двух ИРИ по бортовом пеленгам в горизонтальной плоскости от времени. Точками на рисунке отмечены измерения пеленгов в соответствующие моменты времени.

На рис. 4 (см. обложку) представлены графики зависимости СКО ошибок сопровождения по бортовом пеленгам (рис. 4, *а*, на обложке) и их производных (рис. 4, *б*, на обложке) в горизонтальной плоскости от времени: сплошная линия — графики для 1-го ИРИ, пунктирная — для 2-го.

Из рис. 3 и 4 (см. обложку) видно, что ошибки оценивания пеленгов меньше ошибок измерений и со временем имеют тенденцию к убыванию, что свидетельствует об эффективности работы фильтра.

Далее рассмотрим сопровождение подвижных ИРИ, если в некоторый момент времени их бортовые пеленги совпадают (пересечение траекторий полёта ИРИ). В момент времени $t_1 = 0$ ИРИ находились в точках с координатами $(x_1, y_1, z_1) = (30, 100, 10)$ км и $(x_2, y_2, z_2) = (50, 100, 10)$ км и в течение времени наблюдения двигались равномерно и прямолинейно со скоростями $(v_{x1}, v_{y1}, v_{z1}) = (50, -150, 0)$ м/с и $(v_{x2}, v_{y2}, v_{z2}) = (-50, -150, 0)$ м/с соответственно. Графики зависимостей поступающих в систему РТР измерений бортовых пеленгов (кресты) ИРИ в горизонтальной плоскости, их истинных значений (пунктирные линии) и оценок пеленгов (сплошные линии) отождествлённых ИРИ от времени представлены на рис. 5 (см. обложку). Цифрами отмечены номера отождествлённых ИРИ.

Из рис. 5 (см. обложку) видно, что при приближении значений бортовых пеленгов ИРИ может произойти ложное отождествление. В рассмотренном примере после пересечения траекторий ИРИ произошло ложное отождествление 2-го сопровождаемого ИРИ с измерениями, полученными от 1-го ИРИ, а после 250-й с имела место завязка траектории нового ИРИ.

На рис. 6 (см. обложку) представлены графики зависимости текущих ошибок сопровождения по бортовом пеленгам в горизонтальной плоскости. Точками отмечены измерения соответствующих пеленгов в соответствующие моменты времени.

Графики зависимости СКО ошибок сопровождения по бортовом пеленгам (рис. 6, *а*, см. обложку) и их производных (рис. 6, *б*, см. обложку) в горизонтальной плоскости двух подвижных ИРИ от времени представлены на рис. 7 (см. обложку): сплошная линия — графики для 1-го ИРИ, пунктирная — для 2-го.

При сравнении графиков, представленных на рис. 5—7, видно, что погрешность оценивания координат состояния ИРИ в момент совпадения их пеленгов резко возрастает. Таким образом, достоверное МОС подвижных ИРИ с использованием стробового отождествления в случае, если совпадают их бортовые пеленги, невозможно, а при совпадении бортовых пеленгов разных ИРИ происходит срыв сопровождения за счёт ложного отождествления.

Заключение. Рассмотрен метод многообъектного сопровождения движущихся ИРИ с подвижного носителя на основе стробового отождествления измеренных параметров принимаемых сигналов и их аналого-дискретной $\alpha-\beta$-фильтрации.

Проведено имитационное моделирование работы метода, на основании которого можно сделать следующие выводы:

рассмотренный метод позволяет осуществлять сопровождение подвижных ИРИ, в случае если не происходит совпадения бортовых пеленгов наблюдаемых ИРИ (пересечении траекторий ИРИ);

при сопровождении подвижных ИРИ совпадения их бортовых пеленгов (пересечения траекторий) приводят к ложным отождествлениям и нарушению точности и достоверности сопровождения;

целесообразно разработать более совершенные способы идентификации измерений. Одним из возможных способов решения этой задачи является использование бесстробо-

вых методов идентификации, основанных на определении экстремумов тех или иных функционалов качества.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 15-08-04000-а).

Библиографические ссылки

1. **Верба В.С., Меркулов В.И.** Проблемы разработки мобильных многодатчиковых систем мониторинга окружающего пространства // Полёт. 2015. № 5. С. 31—35.

2. **Радзиевский В.Г., Сирота А.А.** Теоретические основы радиоэлектронной разведки. М.: Радиотехника, 2004. 432 с.

3. **Меркулов В.И., Тетеруков А.Г., Гребенников В.Б.** Стробовое отождествление сигналов с источниками радиоизлучения в условиях многоцелевой обстановки // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2014. № 3. С. 35—38.

4. **Тихонов В.И., Харисов В.Н.** Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. М.: Радио и связь, 1991. 608 с.

УДК 681.513

Н.В. Лукьянова, канд. техн. наук, доц., **Пью Си Тху**
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

neysipin@mail.ru

ВЫБОР МЕТОДА ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЛЯ КОМПЛЕКСА ПОЛУНАТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассмотрена задача выбора метода идентификации при исследовании динамического объекта с помощью стенда полунатурного моделирования. Исследован метод идентификации, основанный на использовании разложения Винера, искусственной нейронной сети Вольтерра. В условиях жёстких временных ограничений использована искусственная нейронная сеть Вольтерра, модифицированная с помощью метода самоорганизации.

Ключевые слова: стенд полунатурного моделирования; разложение Винера; нейронная сеть Вольтерра; самоорганизация.

The problem of the identification method choice at the dynamic object choice via halfnature modelling bench is considered. The identification method based on the utilization of Wiener's decomposition, Volterra's artificial neural network is researched. Volterra's artificial neural network, modified via a self-organization method, is used in the hard time limitation.

Keywords: halfnature modelling test bench; Wiener's decomposition; Volterra's neural network; self-organization.

Введение. При полунатурном моделировании аппаратура управления дополняется вычислительной машиной, воспроизводящей в реальном времени поведение той части системы управления, работа которой не может быть воспроизведена в лабораторных условиях [1, 2].

При разработке систем управления и наведения движущихся объектов используется полунатурное моделирование с динамическими стендами. Такая полунатурная модель включает: математическую модель в реальном времени, воспроизводящую динамику исследуемой системы; динамический стенд.

Метод полунатурного моделирования с динамическими стендами позволяет воспроизводить в лабораторных условиях режимы работы, близкие к реальным.

Одной из важных проблем полунатурного моделирования является проблема выбора адекватной модели исследуемого процесса, управления процессом в реальном времени и обеспечения быстродействия вычислительных средств.

В связи с трудностями в организации и проведении полунатурного моделирования перед разработчиками ставится цель — значительно сократить объём исследований с реальной аппаратурой, чтобы повысить надёжность и точность полунатурного моделирования. Это возможно при изменении схемы моделирования таким образом, чтобы основной объём исследований проводился на математических моделях. Вместе с тем должна быть решена задача выбора математического аппарата для адекватного описания реальной аппаратуры.

Методы идентификации. Обычно в качестве модели исследуемого процесса используются системы дифференциальных уравнений, которые адекватно отражают динамику на значительных временных интервалах [3].

Другим способом построения априорных моделей является формирование их с использованием теории марковских процессов [4].

Моделирование случайных процессов строится на основе базовых распределений случайных величин. Одним из таких процессов является марковский процесс.

В дальнейшем рассматриваются простые однородные марковские цепи с дискретным временем (ДМЦ). Основным математическим соотношением для ДМЦ является уравнение Колмогорова—Чепмена, с помощью которого определяется состояние системы на любом её шаге [4].

Уравнение Колмогорова—Чепмена относится к классу рекуррентных соотношений, позволяющих вычислить вероятность состояний марковского случайного процесса на любом шаге (этапе) при наличии информации о предшествующих состояниях.

Эволюция цепи описывается вероятностями перехода. Следовательно, необходимо воспользоваться вероятностью перехода за $m-n$ шагов [4].

Большой эффект позволяет использовать простые динамические математические модели, которые обычно строятся методами линейных трендов и Тайла—Вейджа [5, 6] и др.

Идентификация на основе разложения функционалов Винера. Рассмотрим метод определения динамических характеристик реальных объектов подачей тестирующего сигнала в виде белого гауссова шума, в общем случае многомерного гауссова процесса, и регистрацией в течение некоторого времени реакции системы.

Пусть модель реального объекта определяется рядом Винера [7]:

$$\hat{y}_n(t) = \sum_0^\infty G_n[h_n, x(t)], \qquad (1)$$

где $x(t)$ — белый гауссов шум; $\{h_n\}$ — набор ядер Винера.

Задача моделирования системы сводится к построению такой адекватной модели, чтобы среднеквадратическое отклонение выхода реального объекта $y(t)$ от выхода его модели $\hat{y}_n(t)$ было минимальным.

Тогда результатом идентификации реальной системы является набор ядер Винера $\{h_n\}$, который минимизирует

$$e^2(t) = M[|(y(t) - \hat{y}_n(t))^2|]$$

или

$$e^2(t) = M\left[\left|(y(t) - \sum_{n=0}^{\infty} G_n[h_n, x(t)])^2\right|\right].$$

Если ввести многомерные полиномы Эрмита

$$H^{(0)} = 1;$$
$$H^{(1)}[x(\tau)] = x(\tau);$$
$$H^{(2)}[x(\tau_1), x(\tau_2)] = x(\tau_1)x(\tau_2) - R_{xx}(\tau_1 - \tau_2);$$
$$H^{(3)}[x(\tau_1), x(\tau_2), x(\tau_3)] =$$
$$= x(\tau_1)x(\tau_2)x(\tau_3) - [x(\tau_1)R_{xx}(\tau_2 - \tau_3) +$$
$$+x(\tau_2)R_{xx}(\tau_1 - \tau_3) + x(\tau_3)R_{xx}(\tau_1 - \tau_2), \ldots,$$

обдающие свойством ортогональности

$$M[|\, H^{(n)}[x(\tau_1), \ldots, x(\tau_n)]H^{(*)}[x(\tau_1), x(\tau_n)]\,|] =$$
$$= \begin{cases} n! \prod_{r=1}^{\infty} R_{xx}(\tau_r - G_r); \\ 0 \end{cases}$$
$$n = k;$$
$$n \neq k,$$

тогда полиномы Винера имеют вид

$$G_n[h_n, x(t)] =$$
$$= \int \ldots \int_0^\infty h_n(\tau_1, \ldots, \tau) H^{(n)}[x(t - \tau_1), \ldots, x(t - \tau_n)]\, dv_\tau, \qquad (2)$$

где R_{xx} — корреляционная функция процесса $x(t)$; $dv_\tau = d\tau_1 d\tau_2 \ldots d\tau_n$.

Перепишем выражение ошибки в форме

$$e^2(t) = M\left[\left|\left(y(t) - \sum_{n=0}^{\infty} \int \ldots \int_0^\infty h_n(\tau_1, \ldots, \tau_n) \times \right.\right.\right.$$
$$\left.\left.\left. \times H^{(n)}\left[x(t - \tau_1), \ldots, x(t - \tau_n)\right] dv_\tau\right)^2\right|\right].$$

Одно из решений задачи минимизации заключается в использовании стандартного метода вариационного исчисления.

Введём функцию

$$h_n(\tau_1, \ldots, \tau_n) = h_n(\tau_1, \ldots, \tau_n) + \alpha\delta h_n(\tau_1, \ldots, \tau_n),$$

где α — действительный параметр; $\alpha\delta h_n(\tau_1, \ldots, \tau_n)$ — характеристика объекта в разрешённом классе (может рассматриваться как произвольное возмущение ядра $h_n(\tau_1, \ldots, \tau_n)$).

Учитывая свойство ортогональности многомерных полиномов Эрмита, получим следу-

ющие уравнения для определения оптимальных ядер Винера:

$$M[\|(y(t)H^{(n)}[x(t-\tau_1),\ldots,x(t-\tau_n)]\|] = \\ = n!\int_0^\infty\ldots\int h_n(\sigma_1,\ldots,\sigma_n)\prod_{r=1}^{n}R_{xx}(\tau_r-\sigma_r)dv_\sigma. \quad (3)$$

В результате получим линейные n-мерные уравнения Фредгольма первого рода.

Решения уравнений Фредгольма будут некорректными, так как оператор

$$A(h_n(\sigma_1,\ldots,\sigma_n)) = \\ = \int_0^\infty\ldots\int h_n(\sigma_1,\ldots,\sigma_n)\prod_{r=1}^{n}R_{xx}(\tau_r-\sigma_r)dv_\sigma$$

является вполне непрерывным, а обратный ему оператор не будет устойчивым. Малым погрешностям в оценках функций в левой части уравнения для определения оптимальных ядер Винера и $R_{xx}(\tau_r - \sigma_r)$ могут отвечать сколь угодно большие погрешности в вычислении $\{h_n(\sigma_1, ..., \sigma_n)\}$. Некорректность приводит к тому, что модель может оказаться неадекватной идентифицируемой системе.

Указанное обстоятельство вызвало необходимость в разработке специальных методов регуляризации [7, 8].

Использование процесса типа белого шума с интенсивностью K снимает проблему решения интегральных уравнений для определения оптимальных ядер Винера, и ядра определяются по формуле

$$h_n(\sigma_1,\ldots,\sigma_n) = \\ = \frac{1}{K^n n!}M[|\,(y(t)H^{(n)}[x(t-\tau_1),\ldots,x(t-\tau_n)]\,|]; \quad (4)$$
$$n = 1, 2, \ldots .$$

Подставив выражения многомерных полиномов Эрмита, получим формулу, предложенную Ли и Шетценом:

$$h_n(\sigma_1,\ldots,\sigma_n) = \\ = \frac{1}{K^n n!}M\left[\left|\left(y(t)-\sum_{i=0}^{n-1}G_i[h_i,x(t)]\right)\prod_{r=1}^{n}x(t-\sigma_r)\right|\right]; \quad (5)$$
$$n = 1, 2, \ldots .$$

Таким образом, чтобы на практике пользоваться двумя последними формулами, определяющими в явном виде ядра Винера, следует на вход моделируемой системы подать идеальный белый шум. Реально это осуществить невозможно, поэтому в расчётах ядер неизбежно появляются ошибки. Однако при оптимальном выборе параметров идентификации эти ошибки можно свести к минимуму.

Оптимальный набор ядер $\{h_n\}$ полностью описывает динамику реальной аппаратуры. Полученные значения ядер $\{h_n\}$ используются для последующего моделирования, синтеза управления и расчёта точности.

Рассмотрим вопросы практической реализации процедуры идентификации, результатом которой являются наборы оптимальных ядер Винера, определяемые взаимокорреляционным методом.

Ранее отмечалось, что задачу определения ядер Винера можно считать корректной, если на вход исследуемой системы подаётся идеальный белый шум. Но поскольку практически такой процесс не реализуем, возникает проблема выбора оптимальных параметров тестирующего сигнала с тем, чтобы он воспринимался системой как белый шум. Для разрешения этой проблемы необходима информация о соответствующих характеристиках системы. Полученная информация определяет параметры процедуры идентификации, оптимальный выбор которых является средством повышения точности эксперимента.

Искусственные нейронные сети. На сегодняшний день для динамической идентификации параметров систем широко используются искусственные нейронные сети (ИНС). В рассматриваемом случае среди возможных областей применения ИНС наибольший интерес представляют динамические нейронные сети и алгоритмы их обучения, позволяющие идентифицировать процессы в системе. Важным аспектом широкого применения ИНС является наличие сигнала, несущего как можно более полную информацию о процессах в системе.

Входом ИНС является выборка значений обобщённой координаты объекта управления, полученная задержкой задающего и управляющего сигналов по времени. В общем случае ИНС может обучаться как с учителем, так и без него. Коррекцию обучения можно осуществлять в процессе функционирования ИНС [4].

Согласно теореме Колмогорова [3], любая непрерывная функция $f(x_1, ..., x_n)$, определённая на n-мерном единичном кубе, может быть представлена в виде суммы $2n + 1$ суперпозиций непрерывных и монотонных отображений единичных отрезков:

$$f(x_1,\ldots,x_n) = \sum_{i=1}^{2_n+1} g_i\left(\sum_{j=1}^{n}\varphi_{ij}(x_j)\right), \quad (6)$$

где $x = (x_1, ..., x_n)$ — вектор переменных; $\Phi = (\varphi_{11}, ..., \varphi_{nn})$ — вектор монотонных непрерывных на $x \in [-1; 1]$ отображений; $g = (g_1, ..., g_n)$ — вектор коэффициентов ряда.

Важным моментом теоремы является то, что вид отображений $\Phi = (\varphi_{11}, ..., \varphi_{nn})$ не определён, т.е. может быть выбрана любая достаточно сложная структура. Данная теорема является основой аппарата ИНС.

Из всего многообразия ИНС в данной задаче требуется использовать аппарат рекуррентных нейронных сетей, так как в задаче идентификации необходима обратная связь по выходу ИНС при обучении. К классу рекуррентных нейронных сетей, применимых для анализа динамических процессов, относятся следующие основные типы:

рекуррентный многослойный персептрон;

рекуррентная сеть Эльмана;

специального вида рекуррентные сети.

Сеть на основе рекуррентного многослойного персептрона (РМП) используется для динамической идентификации нелинейных объектов с последующим использованием модели в управлении.

Возможности РМП позволяют при малой размерности сети получать высокую точность оценки параметров простых нелинейных объектов управления. Однако, в силу сложности алгоритма обучения, применение этой сети для анализа сложных систем представляется затруднительным.

Рекуррентная сеть Эльмана также представляет собой многослойный персептрон, в котором обратная связь введена со скрытого слоя нейронов. Областью применения РМП является распознавание реакции нелинейной детерминированной системы в условиях повышенной зашумлённости информационных сигналов. Также данная сеть часто используется для краткосрочного прогнозирования многопараметрических процессов.

В отличие от РМП-сети ИНС не использует информацию о прошедших сигналах управления $x(k)$, последовательно задержанных на такт расчёта. Вместо этого используются полученные на предыдущей фазе расчёта взвешенные выходные значения промежуточного слоя нейронов, подаваемые на вход нейронной сети. Информация о выходном сигнале используется только при обучении ИНС.

Особенностью работы сети Эльмана является её предварительное обучение на тестовых последовательностях информационных сигналов исследуемой системы. Такой подход может обеспечить удовлетворительный уровень прогноза изменения в случае детерминированного зашумлённого сигнала. Однако в рассматриваемом случае принята модель с частично детерминированным сигналом и поэтому, как было показано выше, анализ только детерминированной составляющей не приводит к желаемому результату.

ИНС Вольтерра. К рекуррентным сетям специального вида относятся ИНС, структура которых разработана без применения персептрона. Среди таких структур выделяется ИНС на основе рядов Вольтерра [9], используемая для прогнозирования изменения обобщённой координаты нелинейного нестационарного объекта. Поэтому предлагается использовать ИНС на основе рядов Вольтерра.

Ряд Вольтерра в общем случае имеет следующий вид:

$$y(n) = \sum_{i=0}^{L-1} w_i x(n-i) + \sum_{i=0}^{L-1}\sum_{j=0}^{L-1} w_i w_j x(n-i)x(n-j) + \\ + \sum_{i=0}^{L-1}\sum_{j=0}^{L-1}\sum_{k=0}^{L-1} w_i w_j w_k x(n-i)x(n-j)x(n-k) + \ldots, \quad (7)$$

где $y(n)$ — значение ряда; $x(n - i)$ — i-е значение входной последовательности; w_i — весовые коэффициенты, называемые ядрами Вольтерра; L — длина вектора входных величин.

Целевой функцией адаптации реакции ряда на входное воздействие является выражение вида:

$$E = 0,5\left[y(n) - d(n)\right]^2, \quad (8)$$

где $d(n)$ — действительное значение; $y(n)$ — результат вычисления ряда Вольтерра при $n = 1, 2, 3...$.

Минимизировать целевую функцию адаптации реакции ряда можно применением универсальных методов оптимизации ИНС. В рассматриваемом случае минимальное значение ошибки будет достигнуто при определении весовых коэффициентов согласно дифференциальному уравнению:

$$\frac{d\mathbf{w}}{dt} = -\mu\frac{dE}{d\mathbf{w}}, \quad (9)$$

где μ — коэффициент обучения нейронной сети; $\mathbf{w}$ — вектор весовых коэффициентов ряда.

Для дальнейшего описания необходимо определить степень ряда, т.е. размерность входного вектора значений, определяющего поведение системы, и количество слоев ИНС.

Из анализа теоремы Колмогорова применительно к ИНС следует, что для аппроксимации любой непрерывной функции $f(x_1, ..., x_n)$ достаточно одного скрытого нейронного слоя. Из этого следует, что достаточно ограничиться первыми тремя слагаемыми ряда Вольтерра.

В связи с результатами, представленными в работах [2, 6, 8], предварительно полагаем размерность входного вектора $L = 3$. Тогда система уравнений для определения весовых коэффициентов примет вид:

$$\begin{cases} \dfrac{dw_i}{dt} = -\mu[y(n) - d(n)]x(n-i); \\ \dfrac{dw_{ij}}{dt} = -\mu[y(n) - d(n)]x(n-i)x(n-j); \\ \dfrac{dw_{ijk}}{dt} = -\mu[y(n) - d(n)]x(n-i)x(n-j)x(n-k), \end{cases} \quad (10)$$

где $i, j, k = 0, 1, ..., L - 1$; $w_{ij} = w_i w_j$ и $w_{ijk} = w_i w_j w_k$ — весовые коэффициенты.

ИНС, основанная на такой модели, минимизирует целевую функцию адаптации реакции ряда. Однако при подборе весов, исходя из определения ряда по приведённым формулам, сложность вычислений геометрически возрастает с ростом порядка и количества входных сигналов.

Для удобства использования применяется следующий вид ряда Вольтерра [9], упрощающий его реализацию:

$$y_n = \sum_{i_1=0}^{L-1} x_{n-i}\left[w_i + \sum_{j=0}^{L-1} x_{n-j}\left[w_{ij} + \sum_{k=0}^{L-1} x_{n-k} w_{ijk}\right]\right], \quad (11)$$

где $y_n = y(n)$; $x_{n-i} = x(n-i)$ и т.д.

Каждое слагаемое в квадратных скобках представляет собой линейный фильтр первого порядка. Подбор весов в такой системе проводится послойно, причём процессы независимы. Таким образом, увеличение количества слоёв или входных сигналов практически не влияет на сложность вычислений, а значит, общая сложность задачи растёт линейно. Нейронная сеть на основе преобразованного ряда Вольтерра обучается при помощи алгоритма построения сопряжённого графа для определения градиента ошибки обучения.

Симметрия ядер Вольтерра приводит к равенству весов, номера которых являются перестановками индексов i, j и k, т.е. $w_{ij} = w_{ji}$ и $w_{ijk} = w_{jik} = ... = w_{kji}$. Данное свойство в значительной степени упрощает реализацию вычислительного процесса.

Методы упрощения реализации нейронной сети Вольтерра. На сегодняшний день существует ряд методов оптимизации нейронных сетей: редукция сети с учётом чувствительности; наращивание сети; самоорганизующиеся структуры.

Характерной особенностью данных методов является независимость количества нейронов во входном слое от количества нейронов в промежуточном слое сети, т.е. для использования этих методов необходимо нарушить структуру ряда. Применение метода редукции по параметру минимального влияния нейрона для рекуррентной сети Элмана позволяет существенно сократить количество нейронов в промежуточном слое при решении многопараметрической задачи. Для сети на основе ряда Вольтерра существует строгая зависимость, определяющая соотношение количества нейронов во всех слоях сети от размерности входного вектора состояния системы n.

В качестве основного параметра анализа принимаем выходной сигнал ИНС — спектральную характеристику. В спектре выходного сигнала будут выражены те частоты, обучение которых достигается при данной конфигурации сети.

Конфигурация, удовлетворяющая требованиям минимальной размерности сети, может быть получена при применении методов редукции и наращивания сети, поскольку в обоих случаях говорится об изменении вектора состояния входного сигнала.

ИНС Вольтерра, модифицированная с помощью метода группового учёта аргументов (МГУА). В разделе представлен алгоритм построения модели исследуемого динамического объекта, способный адекватно задать начальные значения весовым коэффициентам ИНС, что значительно ускоряет процесс её обучения.

ИНС позволяют построить модели исследуемых объектов с достаточно высокой точностью, но требуют при этом длительного времени для реализации процесса обучения. Основной задачей построения и обучения ИНС в исследуемом случае является аппроксимация функции. Имея обучающую выборку входных данных и значений функции, требуется определить весовые коэффициенты ИНС так, чтобы значение выходной функции на векторе входных переменных было бы как можно ближе к заданному обучающему значению для этого вектора.

Для модификации ИНС Вольтерра использован метод самоорганизации [10], который, имея принципиально ту же структуру, что и ИНС, обучается совершенно иначе. Алгоритмы

самоорганизации предполагают использование нормализации Гаусса [9] и селекцию лучших результатов, в то время как ИНС базируется на методах обратного распространения и градиентного спуска.

Одной из особенностей ИНС является случайный выбор первоначальных значений весов связей, что увеличивает время обучения. Симбиоз метода самоорганизации и ИНС позволяет обеспечить увеличение скорости функционирования алгоритма и построение модели лучшего приближения.

В ИНС результат работы метода самоорганизации использован как начальная точка для обучения.

ИНС Вольтерра используется для определения весовых коэффициентов функции вида [9]:

$$y = \sum_{i=0}^{L} x_{n-i}\left(w_i + \sum_{j=0}^{L} x_{n-j}\left(w_{ij} + \sum_{k=0}^{L} x_{n-k}\left(w_{ijk} + \ldots\right)\right)\right)$$

или

$$y = \sum_{i=0}^{L} x_{n-i}w_i + \sum_{i=0}^{L}\sum_{j=0}^{L} x_{n-i}x_{n-j}w_{ij} + \sum_{i=0}^{L}\sum_{j=0}^{L}\sum_{k=0}^{L} x_{n-i}x_{n-j}x_{n-k}w_{ijk} + \cdots, \quad (12)$$

где x — входные измерительные сигналы ИНС; y — выходной сигнал ИНС; $l + 1$ — размерность входного вектора.

Для сокращения объёма вычислений из структуры ИНС исключены повторяющиеся базисные функции.

В качестве алгоритма самоорганизации можно использовать МГУА. Для построения моделей в МГУА реализуется перебор моделей-претендентов с использованием обучающей и проверочной последовательностей. Для селекции лучших вариантов последовательно используются критерии простоты модели, корреляции, разнообразия аргументов, минимума среднеквадратичной ошибки [10—13].

МГУА предусматривается частичный или полный перебор возможных комбинаций пар аргументов, выполняемый также по критерию минимума среднеквадратичной ошибки. Коэффициенты частных описаний вычисляются решением малых систем нормальных уравнений Гаусса.

Выводы. Исследованы алгоритмы идентификации, применяемые в комплексах полунатурного моделирования. При полунатурном моделировании динамических объектов в отсутствии жёстких ограничений на быстродействие алгоритмов построения моделей исследуемых процессов используется алгоритм идентификации моделей, основанный на методе рядов Винера. В условиях временных ограничений, но при сохранении высоких точностных требований, выбран алгоритм построения математической модели на основе ИНС. Ускорение работы ИНС осуществляется определением коэффициентов методом самоорганизации. В качестве алгоритма самоорганизации использован МГУА.

Таким образом, в комплексе полунатурного моделирования используется ИНС Вольтерра с редуцированной структурой, что повышает её быстродействие при построении математической модели исследуемого объекта.

Библиографические ссылки

1. **Бусленко Н.П.** Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1978. 399 с.

2. **Лукьянова Н.В.** Модульный метод моделирования с использованием разложения Винера // Автоматизация. Современные технологии. 2015. № 9. С. 17—22.

3. **Льюнг Л.** Идентификация систем: Теория для пользователя. М.: Наука, 1991. 431 с.

4. **Эйкхофф П.** Основы идентификации систем управления. Оценивание параметров состояния. М.: Мир, 1975. 367 с.

5. **Пролетарский А.В., Неусыпин К.А.** Оценка точности алгоритма построения моделей по данным лабораторного эксперимента с навигационными системами // Автоматизация и современные технологии. 2014. № 6. С. 40—44.

6. **Лукьянова Н.В., Кузнецов И.А.** Идентификация нелинейных динамических систем на основе разложения функционалов методом Винера. Материалы конф. "Управление в морских и аэрокосмических системах" (УМАС — 2014). СПб., 2014.

7. **Лукьянова Н.В.** Идентификация нелинейных систем на основе разложения функционалов Винера в системе LABVIEW. В сб.: Актуальные вопросы фундаментальных наук. Тр. междун. науч.-конф. М., 2014. С. 167—172.

8. **Лукьянова Н.В.** Требования, предъявляемые к процессу идентификации на основе разложения функционалов Винера. В сб.: Достижения вузовской науки. Тр. междун. научн.-практ. конф. М., 2014. С. 183—188.

9. **Неусыпин К.А., Вайс Ю.Л.** Модификация нейронной сети Вольтерра методом самоорганизации // Автоматизация и современные технологии. 2007. № 1. С. 30—34.

10. **Ивахненко А.Г., Мюллер Й.Я.** Самоорганизация прогнозирующих моделей. Киев: Техника, 1985. 362 с.

11. **Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Вайс Ю.Л., Шолохов Д.О.** Формирование ансамбля критериев селекции компактного алгоритма самоорганизации // Автоматизация и современные технологии. 2012. № 11. С. 14—16.

12. **Неусыпин К.А.** Разработка модифицированных алгоритмов самоорганизации для коррекции навигационной информации// Автоматизация и современные технологии. 2009. № 1. С. 37—39.

13. **Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Кузнецов И.А.** Синтез численного критерия меры идентифицируемости параметров моделей // Автоматизация. Современные технологии. 2015. № 3. С. 9—13.

УДК 630.383

А.В. Скрыпников, д-р техн. наук, проф.
(Воронежский государственный университет инженерных технологий),
В.Г. Козлов, канд. техн. наук, доц.
(Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I),
Т.В. Скворцова, канд. техн. наук, доц.
(Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова),
А.Ю. Арутюнян
(Ухтинский государственный технический университет)

rivelenasoul@mail.ru

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛЕСОВОЗНОЙ ДОРОГИ

Представлен расчёт стоимости строительства лесовозной дороги, включая: стоимость рубки деревьев и корчёвки пней; снятия растительного слоя; разравнивания, уплотнения и профилирования грунта; возведения земляного полотна с учётом изменения природных факторов в системе автоматизированного проектирования. Для каждого вида работ рассчитывается своё уравнение регрессии с независимыми переменными в закодированном виде. Для увеличения объёма исходной информации использован способ оптимизации решения задач.

Ключевые слова: стоимость строительства; лесовозная дорога; природные факторы; грунт.

The cost calculations of the timber-carrying road is represented. The calculation includes: the cost of trees felling and uprooting stumps; vegetable layer removal; soil leveling, compacting and profiling; the earth road-bed construction by taking into account the natural factors changes in the automatic constraction system. The regression equation with independent variables in coded form is calculated for each type of work. To increase the volume of the initial information the task solving optimization method for increase the volume of the initial information is utilized.

Keywords: construction cost; timber-carrying road, natural factors; soil.

Введение. Анализ современных процессов автоматизации проектирования показывает, что и автоматизация инженерных расчётов, и автоматизация чертёжных работ существенно не повысили качество проектов и не уменьшили сроки проектирования. Разработка систем автоматизированного проектирования (САПР) обеспечивает автоматизацию проектных работ. Проблема автоматизации проектирования практически во всех отраслях в настоящее время решается комплексно в следующих направлениях:

технологическом, включающем разработку структур банков данных, систем управления базами данных, операционных систем, управляющих программ;

концептуальном, обобщающем опыт проектирования, отработку системы принципов проектирования;

методологическом, определяющем процесс проектирования и проектирующих программ на основе современных средств вычислительной техники и методов системного проектирования;

теоретическом, включающем задачу декомпозиции объекта проектирования, анализ общего проектного решения, построение модели функционирования объекта.

В САПР лесовозных автомобильных дорог (САПР ЛАД) одно из важнейших мест должна занять (как составная часть) система имитационного моделирования процесса функционирования проектируемой дороги, определяющая основные транспортно-эксплуатационные показатели по принимаемым проектным решениям.

Развиваясь ускоренными темпами, САПР дорог сформировалась в виде ряда технологических линий проектирования (ТЛП).

Для решения проблемы декомпозиции автомобильной дороги как сложного по структуре объекта проектирования ТЛП ещё разобщены, не связаны в САПР. Причины этого различны, в том числе расхождение в принципах проектирования в разных ТЛП, отсутствие связи входных и выходных данных в базе данных, различный уровень разработки проектирующих программ и т.д. Одна из ос-

новных причин, сдерживающая переход ТЛП в САПР — отсутствие в связке ТЛП объединяющей их подсистемы автоматизированного анализа общего проектного решения, построенной на единой модели функционирования автомобильной дороги.

Таким образом, качественный скачок в автоматизации проектирования, перерастание ТЛП в систему САПР ЛАД обусловливается развитием ТЛП по всем направлениям, но главное — по теоретическому направлению, требующему создания подсистемы имитационного моделирования функционирования автомобильной дороги для решения одной из основных задач проектирования — автоматизированной оценки проектных решений. Такая подсистема позволяет решить главную задачу проектирования — оптимизировать проектное решение в соответствии с принятой концепцией проектирования.

Для эффективной оценки проектных решений, их оптимизации, подсистема моделирования процесса функционирования дороги в качестве входных параметров должна включать целый комплекс основных параметров, решений, спроектированных в различных ТЛП. Выходными параметрами, определяющими качество проектного решения, принято считать стоимость строительства (реконструкции) дороги, уровень безопасности движения, показатели текущих затрат и ежегодных экономических эффектов. В последнее время резко возрастает роль таких выходных параметров, как энергоёмкость перевозок, экологические показатели.

Расчёт стоимости строительства лесовозных дорог по укрупнённым показателям не обеспечивает достаточной точности. Возможность использования ЭВМ позволяет учесть различные параметры лесовозной дороги, а также влияние некоторых природных факторов на стоимость строительства. Необходимо рассчитывать стоимость строительства не одного километра дороги, а одного погонного метра, чем обеспечивается учёт изменения природных факторов на всём протяжении участка [1—3].

Цель исследования — получить уравнение регрессии с независимыми переменными в закодированном виде для каждого вида дорожно-строительных работ.

Объектом исследования является лесовозная дорога.

Используем методы регрессионного и корреляционного анализов.

Наиболее простой вид зависимости получаем при помощи регрессионного анализа.

Общий вид уравнения множественной регрессии следующий:

$$y = f\left(x_1, x_2, \ldots, x_n\right),$$

где f — функция любого вида, связывающая независимые переменные (факторы) с зависимой переменной y.

Для каждого вида работ рассчитывают свое уравнение регрессии с независимыми переменными в закодированном виде. Применяемые коды аналогичны кодам, используемым в САПР ЛАД (табл. 1, 2) [2—5]. Вся нормативно-справочная информация принята согласно СНиП и ЕНиР.

Таблица 1

Код грунта

№ п/п	Наименование грунта	Код грунта
1	Супесь лёгкая крупная	11
2	Супесь лёгкая	12
3	Супесь пылеватая	13
4	Супесь тяжёлая пылеватая	14
5	Суглинок лёгкий	21
6	Суглинок пылеватый	22
7	Суглинок тяжёлый	23
8	Суглинок тяжёлый пылеватый	24
9	Глина песчаная	31
10	Глина пылеватая полужирная	32
11	Глина жирная	33
12	Песок гравелистый	34
13	Песок крупный	41
14	Песок средней крупности	42
15	Песок мелкий	43
16	Песок пылеватый	44

Таблица 2

Код леса

№ п/п	Наименование леса	Код леса
1	Густой крупный	11
2	Густой средней крупности	12
3	Густой мелкий	13
4	Средний крупный	14
5	Средний средней крупности	21
6	Средний мелкий	22
7	Редкий крупный	23
8	Редкий средней крупности	24
9	Редкий мелкий	31

Методика определения влияния некоторых природных факторов на стоимость строительства земляного полотна. Даны серии парных наблюдений величин зависимостей переменной y и двух или нескольких независимых переменных x_i. Использование линейной зависимости y от x_i при применении множественной регрессии для ряда задач может серьёзно ухудшить анализ этой зависимости или совсем исключить возможность её использования [6—8]. Для определения искомой зависимости составлена программа определения множественных криволинейных регрессий.

Данная программа предназначена для определения множественных криволинейных регрессий по следующим законам:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^{n} a_i x_i + \sum_{i=1}^{n} a'_i x_i^2, \qquad (1)$$

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^{n} a_i x_i + \sum_{i=1}^{n} \frac{a_i}{x_i}. \qquad (2)$$

Схема вычисления метода следующая:

определяют массив среднеарифметических отклонений

$$m_i = \sum_{j=1}^{n} \frac{a_{ji}}{n}, \quad i = 1, \ldots, 2t-1, \qquad (3)$$

вычисляют среднеарифметическое отклонение для каждой из независимых переменных

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \left(a_{ij} - m_j\right)^2}{n}}, \; j = 1, \ldots, 2t-1, \qquad (4)$$

рассчитывают элементы системы и правые части линейных уравнений

$$B_{ki} = \sum_{j=1}^{n} \left(a_{jk} - a_{ji}\right) - n m_k m_i, \quad k = 1, \ldots, 2t-1, \qquad (5)$$

$$C_k = \sum_{i=1}^{n} a_{in} x_{it} - n m_k m_{2t-1}, \quad i = 1, \ldots, 2t-1, \qquad (6)$$

определяют свободный член уравнения регрессии

$$a_0 = m_{2t-1} - \sum_{i=1}^{2(t-1)} z_i m_i, \qquad (7)$$

определяют коэффициент регрессии

$$r = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} \left(a_{i,2t-1} - x_{i,1}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n} \left(a_{i,2t-1} - m_{2t-1}\right)^2}}, \qquad (8)$$

где t — количество случайных величин, включая неисследуемую функцию; n — длина выборки для каждой из случайных величин; x_{ij} — массив значений случайных величин, записанных по строкам (включая исследуемую функцию); $a_{n,\,2t-1}$ — массив случайных величин, записанных по строкам, содержащий для закона (1) — x_i, x_i^2, y_i [3], для закона (2) — $x_i, \frac{1}{x_i}, y_i$ [3].

Для увеличения объёма исходной информации использован способ оптимизации решения задач. Применена блочная структура программ для подготовки входной информации, её обработки и вывода на печать результатов расчёта [3—5].

Как показали полученные результаты, влияние вида грунта на ширину работ (Ш) по рубке деревьев, корчёвке пней, снятию растительного слоя, засыпки ям, разравниванию и уплотнению грунта как функция от B (ширина земляного полотна по верху), H (рабочая отметка), Г (вид грунта) выражается зависимостью

$$\begin{aligned} \text{Ш} = {} & -7{,}704 + 0{,}9998B + 3{,}8202H + \\ & + 0{,}0061H^2 + 0{,}14999\text{Г} - 0{,}001435\text{Г}^2. \end{aligned} \qquad (9)$$

Влияние вида грунта на объём V работ по возведению земляного полотна в зависимости от ширины земляного полотна, рабочей отметки и вида грунта следующее:

$$\begin{aligned} V = {} & -6{,}7581 + 0{,}66367B + 3{,}8223H + \\ & + 0{,}81452H^2 + 1{,}04999\text{Г} - 0{,}0014406\text{Г}^2. \end{aligned} \qquad (10)$$

Стоимость C рубки деревьев, корчёвки пней в зависимости от диаметра деревьев

$$C_{\text{к}} = \frac{C_{\text{м.см}}}{10\ 000}\left(\begin{array}{l} -0{,}05129 + 0{,}10495\text{Д} - \dfrac{0{,}000888}{\text{Д}} + \\ + 0{,}02438\text{Ш.Л} - \dfrac{0{,}55484}{\text{Ш.Л}} \end{array}\right), \qquad (11)$$

где $C_{\text{м.см}}$ — стоимость машино-смены механизма, производящего корчёвку пней; Д — диаметр деревьев; Л — код леса.

Рассчитаем стоимость снятия растительного слоя (сн.р.сл) в зависимости от применяемого типа механизма (ТМ), категории трудности разработки грунта (КТР), типа навесного оборудования (НО)

$$\begin{aligned} C_{\text{сн.р.сл}} = {} & 0{,}002453 + 0{,}0001429\text{ТМ} + \\ & + 0{,}001267\text{ТМ}^2 - 0{,}002991\text{КТР} + \\ & + 0{,}0001619\text{КТР}^2 - 0{,}003826\text{НО} + \\ & + 0{,}0006645\text{НО}^2. \end{aligned} \qquad (12)$$

Тогда стоимость разравнивания, уплотнения и профилирования грунта в зависимости от типа механизма, толщины слоя (НСЛ), категории трудности разработки будет

$$C_{\text{разравн}} = 0,031295 + 0,003209\text{ТМ} - 0,0005902\text{ТМ}^2 - 0,01535\text{НСЛ} - 0,017212\text{НСЛ}^2 - 0,0002849\text{КТР} + 0,003893\text{КТР}^2. \quad (13)$$

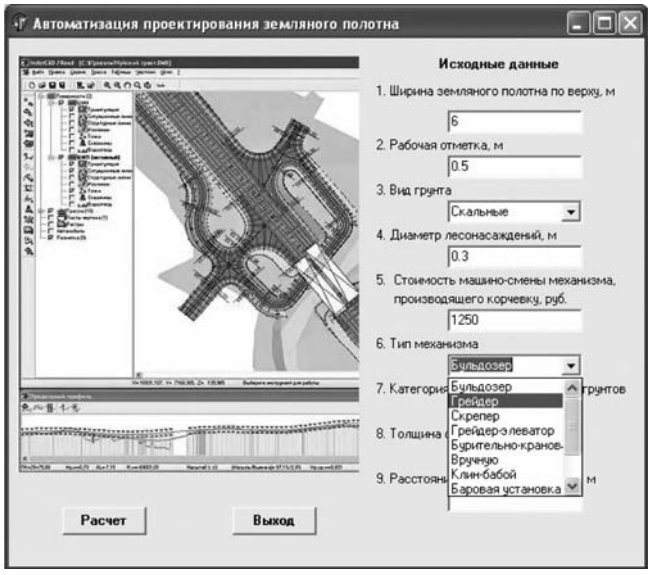
Вычислим стоимость возведения земляного (з) полотна в зависимости от типа применяемого механизма (м), категории трудности разработки, типа навесного оборудования, расстояния перемещения грунта (L):

$$C_{\text{з.м}} = 0,024847 + 0,01235\text{ТМ} + 0,008472\text{ТМ}^2 + 0,00462\text{КТР} + 0,003032\text{КТР}^2 - 0,002094\text{НО} - 0,002847\text{НО}^2 - 0,007743L - 0,000064L^2. \quad (14)$$

После преобразования получаем окончательный вид зависимости:

$$C_{\text{общ}} = Ш\left(C_{\text{к}} + C_{\text{сн.р.сл}}\right) + V\left(C_{\text{разравн}} + C_{\text{з.м}}\right). \quad (15)$$

По разработанной методике составлена программа, упрощающая расчёт стоимости строительства земляного полотна дороги (см. рисунок).



Программа расчёта стоимости строительства земляного полотна

Выводы. Разработанная методика определения стоимости строительства земляного полотна дороги позволяет учесть изменения природных факторов на всём протяжении рассчитываемого участка. Для упрощения решения составлена программа определения множественных криволинейных регрессий. Для каждого вида дорожно-строительных работ рассчитано своё уравнение регрессии с независимыми переменными в закодированном виде.

Библиографические ссылки

1. **Методы**, модели и алгоритмы повышения транспортно-эксплуатационных качеств лесных автомобильных дорог в процессе проектирования, строительства и эксплуатации: монография / А.В. Скрыпников [и др.]. М.: Изд-во ФЛИНТА; Наука, 2012. 310 с.

2. **Скрыпников А.В., Кондрашова Е.В., Скворцова Т.В.** Метод оптимизации планов ремонта участков лесных автомобильных дорог // Современные проблемы науки и образования. 2011. № 6; URL: www.science-education.ru/100-5155 (дата обращения: 15.02.2016).

3. **Анализ** тягово-динамических качеств тракторов / А.В. Скрыпников [и др.] // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 4; URL: www.science-education.ru/110-9803 (дата обращения: 05.02.2016).

4. **Информационные** технологии для решения задач управления в условиях рационального лесопользования / А.В. Скрыпников, Е.В. Кондрашова, Т.В. Скворцова, В.Н. Логачев, А.И. Вакулин // Межд. журнал экспериментального образования № 2: материалы VI Межд. науч. конф. "Современные проблемы науки и образования". М., 27—29 февраля 2012 г. С. 77—78.

5. **Повышение** безопасности движения автомобилей и автопоездов по дорогам в районах лесозаготовок / А.В. Скрыпников [и др.] // Межд. журнал экспериментального образования № 2: материалы VI Межд. науч. конф. "Современные проблемы науки и образования". М., 27—29 февраля 2012 г. С. 76—77.

6. **Скрыпников А.В., Кондрашова Е.В., Скворцова Т.В.** Оптимизация межремонтных сроков лесовозных автомобильных дорог // Фундаментальные исследования. 2011. № 8 (Ч. 3). С. 667—671.

7. **Скрыпников А.В.** Модель определения экономических границ зон действия поставщиков материалов в условиях вероятностного характера дорожного строительства лесовозных автомобильных дорог / А.В. Скрыпников [и др.] // Фундаментальные исследования. 2011. № 8 (Ч. 2). С. 379—385.

8. **Скрыпников А.В.** Имитационное моделирование транспортного потока для оценки транспортно-эксплуатационных характеристик лесовозных автомобильных дорог / А.В. Скрыпников [и др.] // Системы управления и информационные технологии. 2008. № 3. 2 (33). С. 276—278.

УДК 65.011.56:519.81

В.И. Грекул, канд. техн. наук
(Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", г. Москва)
grekoul@hse.ru

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА CRM-РЕШЕНИЯ ДЛЯ ТОРГОВОГО ХОЛДИНГА

Рассмотрена задача выбора программного продукта для автоматизации бизнес-процессов организации вторичных продаж и управления промо-акциями в международном FMCG-холдинге. Проведён анализ бизнес-процессов, задач и дерева целей компании. Разработана многоуровневая иерархическая система критериев для оценки доступных решений. Применена методика анализа иерархий для принятия решения о выборе системы.

Ключевые слова: FMCG; CRM-система; принятие решений; иерархия.

The problem of software choice for the business-processe automation at the secondary sales organization and safety stock management in the international FMCG-holding is considered. The analysis of the business processes, tasks and objectives of the company tree was carried out. A multi-level hierarchical system of criteria for the valuation of available solutions is developed. The analysis methodology of hierarchies for a decision over the system choice is applied.

Keywords: FMCG; CRM-system; decisions acceptance; hierarchy.

Введение. Работа торговых компаний на рынке товаров повседневного спроса (FMCG — Fast Moving Consumer Goods) связана с рядом специфических особенностей: большой ассортимент товаров, очень высокая конкуренция в одном отдельно взятом географическом регионе, большое количество клиентов, быстрая оборачиваемость активов. Основные управленческие задачи, которые стоят перед руководством FMCG-компании, включают в себя сегментацию клиентской базы и обеспечение необходимой интенсивности взаимодействия с клиентами различных сегментов, находящимися на территории.

Известно, что наиболее эффективная стратегия работы на рынке — это построение долгосрочных доверительных отношений со всеми существующими и потенциальными клиентами, с деловыми партнерами, т. е. использование стратегии управления взаимоотношениями с клиентами (CRM — Customer Relationship Management). Однако для отрасли FMCG построить персональные отношения с каждым из клиентов не представляется возможным — их очень много, ценность каждого невелика в общей массе, соответственно, размер получаемой прибыли от каждого клиента небольшой и поддержание информации о каждом из них может быть экономически нецелесообразно. В сфере FMCG упор делается не на единичный контакт с покупателем, а на поддержание постоянной связи с ним при помощи маркетинговых акций и программ лояльности. Они служат мощным информационным поводом, на который реагирует большинство покупателей. Таким образом, одной из основных бизнес-целей FMCG-компании является формирование клиентоориентированной сервисной культуры.

Выбор критериев оценки альтернативных решений. Достижение поставленной бизнес-цели предполагает наличие некоторых результатов в сфере автоматизации, которые формулируются в виде ИТ-целей и целей конкретных приложений [1].

В соответствии со схемой каскада целей COBIT [1] непосредственное влияние на формирование клиентоориентированной сервисной культуры оказывают две ИТ-цели: "Соответствие ИТ-стратегии и бизнес-стратегии" и "Предоставление ИТ-услуг в соответствии с бизнес-требованиями". Косвенное влияние оказывают цели "Обеспечение интеграции приложений и технологий в бизнес-процессы", "Извлечение выгоды из программ и проектов, выполняемых в рамках сроков, бюджетов и соответствующих требованиям стандартов качества", "Компетентный и мотивированный ИТ-персонал". В соответствии с особенностями деятельности конкретной организации эти цели могут детализироваться до нужного уровня подробности.

Цели создания системы определяются функциональными и нефункциональными требованиями, направленными на устранение имеющихся недостатков в работе существующей информационной системы:

очень малая оперативность поступающей информации (задержка в получении данных до двух недель);

значительные затраты времени со стороны торговых представителей и операторов на работу с бумажными бланками, высокая вероятность ошибок при занесении информации и переносе данных в информационные системы;

значительные затраты времени со стороны аналитиков на обработку, сопоставление и анализ данных, высокая вероятность ошибок;

задержки в обработке и консолидации данных, отсутствие возможности для оперативного анализа и принятия решений;

низкий уровень контроля ситуации в торговых точках, так как большая часть данных не собирается и/или не консолидируется в информационных системах;

не обеспечивается централизованный оперативный контроль деятельности торговых представителей и соблюдения стандартов работы;

отсутствие возможности оперативно предоставлять информацию в отделе логистики, что ведёт к низкому качеству планирования поставок.

Функциональные требования к системе определяются необходимостью поддержки выполнения задач, реализуемых в рамках основных бизнес-процессов. Эти задачи были определены в процессе обследования деятельности компании.

Задачи для бизнес-процесса "Планирование вторичных продаж":

анализ плана, подготовленного с помощью программы Forecast PRO на шесть месяцев;

разделение плана по регионам с учётом мнения региональных сотрудников;

согласование плана с региональными менеджерами продаж;

разделение плана по продуктам;

разделение плана по дистрибьюторам;

интеграция согласованных планов;

перевод планов из натуральных единиц в денежные;

утверждение плана;

мониторинг исполнения плана.

Задачи для бизнес-процесса "Управление промо-акциями":

создание и утверждение плана организации акции;

создание и утверждение рекомендаций на проведение акции;

оповещение о начале акции;

презентация акции торговым представителям;

выполнение промо-акции;

подготовка отчётности по промо-акции;

проверка отчётности;

составление списка компенсации затрат;

создание, подписание и проверка закрывающих акцию документов;

выплаты участникам промо-акции;

компенсация затрат дистрибьюторам;

подготовка и утверждение финального отчёта по акции.

Основные функциональные требования к системе даны в табл. 1 в форме критериев второго уровня.

Нефункциональные требования определяют следующие возможности системы:

оперативность поступления консолидированной информации из офисов продаж с задержкой не более суток;

сокращение до минимума использования бумажных носителей, что обеспечит повышение эффективности работы супервайзеров, торговых представителей, мерчандайзеров и операторов, уменьшение количества ошибок;

планирование и контроль выполнения поставленных целей с детализацией до конечной розничной торговой точки;

планирование проведения кампаний торгового маркетинга и отслеживание исполнения обязательств на уровне конечных розничных торговых точек;

обеспечение контроля соблюдения стандартов работы торговым персоналом.

На основании выявленных ИТ-целей, требований к системе и их детализации были определены критерии выбора поставщика программного продукта как показатели достижения целей и выполнения требований.

В данном случае была использована двухуровневая иерархическая схема критериев. В табл. 1 приведены критерии двух уровней и основания для их выбора.

Применение метода анализа иерархий (МАИ). Выбор информационной системы для автоматизации деятельности предприятия всегда оказывается задачей сложной и ответственной. Решение этой задачи является первым шагом в реализации дорогостоящих и длительных проектов, зачастую охватывающих целый комплекс бизнес-процессов организации, и от качества её исполнения во многом зависит эффективность проектов автоматизации в целом.

Наиболее простыми, интуитивно понятными и, как следствие, часто применимыми, являются методы поддержки принятия решения, основанные на линейной свёртке взве-

Таблица 1

Критерии выбора решения

Обозначение критерия	Наименование критерия	Основание выбора
К1	**Потенциал поставщика решения**	**ИТ-цели**
$К_{11}$	Наличие успешных внедрений в России	Обеспечение интеграции приложений и технологий в бизнес-процессы
$К_{12}$	Наличие сети партнёров в регионах, которые смогут осуществлять поддержку	
$К_{13}$	Хорошая репутация и отзывы	
$К_{14}$	Стабильное финансовое положение	
К2	**Управление проектом**	**ИТ-цели**
$К_{21}$	Уровень зрелости процессов управления проектами	Извлечение выгоды из программ и проектов, выполняемых в рамках сроков, бюджетов и соответствующих требованиям стандартов качества
$К_{22}$	Наличие собственной команды внедрения, включающей проектного менеджера, аналитиков, разработчиков, специалистов по тестированию	
$К_{23}$	Расположение поставщика и его команды в Москве	
К3	**Архитектура решения**	**ИТ-цели. Требования к системе**
$К_{31}$	Распределённая структура БД с неограниченным числом уровней иерархии	Соответствие ИТ-стратегии и бизнес-стратегии. Предоставление ИТ-услуг в соответствии с бизнес-требованиями
$К_{32}$	Возможность интеграции с различными учётными системами	
$К_{33}$	Возможность размещения решения вне офиса компании (в датацентре)	
$К_{34}$	Возможность быстрого восстановления любого из модулей системы	
$К_{35}$	Возможность интеграции с корпоративной CRM системой по протоколу AS2	
К4	**Функциональность решения**	**ИТ-цели. Требования к системе**
$К_{41}$	Возможность сбора предварительных заказов и продажи "с колёс"	Соответствие ИТ-стратегии и бизнес-стратегии. Предоставление ИТ—услуг в соответствии с бизнес-требованиями
$К_{42}$	Сбор данных о дистрибьюции и остатках, маркетинговой информации	
$К_{43}$	Наличие процедуры репликации между всеми подсистемами комплекса	
$К_{44}$	Наличие разграничения прав доступа	
$К_{45}$	Наличие встроенной системы отчётности, а также OLAP отчётности	
$К_{46}$	Возможность модифицировать систему под бизнес-нужды компании	
К5	**Процесс внедрения**	**ИТ-цели**
$К_{51}$	Наличие ресурсов для обеспечения внедрения на требуемом количестве площадок дистрибьютора (40 площадок)	Извлечение выгоды из программ и проектов, выполняемых в рамках сроков, бюджетов и соответствующих требованиям стандартов качества
$К_{52}$	Наличие ресурсов для проведения модификаций системы под бизнес-нужды компании	
$К_{53}$	Наличие формализованной методологии внедрения продукта	
$К_{54}$	Опыт интеграции с различными учётными системами в процессе внедрения	
К6	**Поддержка**	**ИТ-цели**
$К_{61}$	Наличие собственной службы поддержки с колл-центром, работающим в режиме 24 × 7	Компетентный и мотивированный ИТ-персонал
$К_{62}$	Способность обеспечить поддержку 1500 пользователей (наличие необходимых ресурсов)	
$К_{63}$	Наличие формализованных процедур работы службы технической поддержки, системы автоматизации службы технической поддержки	
$К_{64}$	Возможность поддержки аппаратного обеспечения комплекса	

шенных критериев. Однако при таких подходах возникает проблема задания весов для множества критериев, которая очень редко может быть корректно разрешена [2]. Достаточно эффективно и широко используется для решения задач обоснования выбора решений эвристический метод анализа иерархий [3].

Иерархические модели позволяют понятным и рациональным образом структурировать сложную проблему принятия решений, оценить влияние различных элементов модели на конечный результат, дать количественную оценку альтернативных вариантов решения. Весовые коэффициенты критериев, получаемые при попарном сравнении, оказываются более достоверными, а сам метод содержит внутренние инструменты, позволяющие определить качество обрабатываемых данных и степень доверия к ним.

Общий порядок решения задачи с применением МАИ следующий:

анализ деятельности компании, автоматизируемых бизнес-процессов и разработка требований к информационной системе;

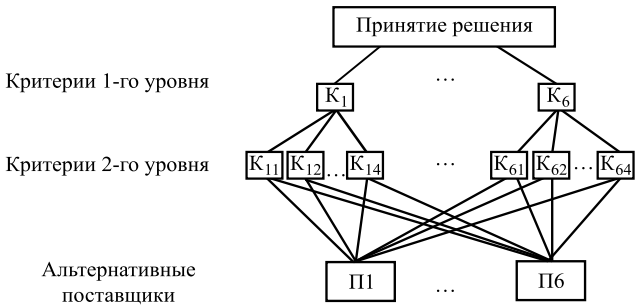
разработка набора критериев для сравнения альтернативных решений;

представление задачи выбора в виде иерархии;

экспертная сравнительная оценка пар элементов каждого уровня, вычисление коэффициентов важности для элементов каждого уровня;

синтез глобальных приоритетов альтернатив путём линейной свёртки приоритетов элементов на иерархии.

Разработанный набор критериев соответствует модели неполной иерархии (см. рисунок), которая предполагает, что часть связей между элементами различных уровней отсутствует. В рассматриваемой задаче имеется два уровня критериев, причём группы критериев второго уровня связаны только с отдельными критериями первого уровня.



Модель неполной иерархии

Сравнение важности критериев осуществлялось с использованием рекомендуемой 9-балльной шкалы [3].

Для описания процедур применения МАИ введём следующие обозначения:

a_{ij} — результат сравнения степени важности i-го и j-го критериев (элемент матрицы попарных сравнений);

$A1_i$ — компонент вектора приоритетов, соответствующий критерию i;

$A2_i$ — компонент нормализованного вектора приоритетов, соответствующий критерию i;

$A3_i$ — компонент собственного значения, соответствующий критерию i;

λ_{max} — оценка максимального собственного значения матрицы попарных сравнений.

Расчёты выполняли согласно приведённым ниже формулам:

$$A1_i = \sqrt[P]{\prod_{n=1}^{P} a_{in}}; \quad (1)$$

$$A2_i = \frac{A1_i}{\sum_{n=1}^{P} A1_n}; \quad (2)$$

$$A3_i = A2_i \sum_{n=1}^{P} a_{ni}; \quad (3)$$

$$\lambda_{max} = \sum_{n=1}^{P} A3_n. \quad (4)$$

Элементы матрицы попарных сравнений (выделены в таблице серым цветом), назначенные для принятия решения о выборе системы, и результаты расчётов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Оценки вектора приоритетов критериев первого уровня

Критерии	К1	К2	К3	К4	К5	К6	$A1_i$	$A2_i$	$A3_i$
К1	1	5	3	3	2	2	2,38	0,32	0,92
К2	0,20	1	0,2	0,33	0,33	0,3	0,34	0,05	0,91
К3	0,3	5	1	1	0,33	0,33	0,76	0,10	1,14
К4	0,3	3	1,0	1	0,2	0,2	0,58	0,079	1,209
К5	0,50	3	3	5	1	1	1,68	0,28	1,103
К6	0,50	3	3	5	1	1	1,68	0,28	1,103

Индекс согласованности вычисляется по формуле

$$\text{ИС} = \frac{\lambda_{\max} - P}{P - 1} = 0{,}0078,$$

где P — размерность матрицы.

При значении случайного индекса (СИ) для матрицы размерности $P = 6$, равного 1,24, относительный индекс согласованности

$$\text{ОС} = \frac{\text{ИС}}{\text{СИ}} = 0{,}0063,$$

что меньше, чем 0,10. Следовательно, полученные суждения о важности критериев являются непротиворечивыми.

Результаты расчётов векторов приоритетов критериев второго уровня (по отношению к критериям первого уровня) представлены в табл. 3.

Процедура оценки степени предпочтительности альтернативных поставщиков (по каждому из критериев второго уровня) была аналогична описанной выше.

Сравнивались шесть поставщиков CRM-систем: CDC Pivotal CRM (П1), System Technology (П2), Softserve SalesWorks (П3), ECOD SFA (П4), Monolit: CRM (П5), PsionTeklogix Dealer Elite CRM (П6), приоритеты которых представлены в табл. 4.

После перемножения матриц, сформированных из таблиц 3, 4, получен вектор приоритетов поставщиков по отношению к групповым критериям первого уровня (табл. 5).

После перемножения матрицы, полученной из табл. 5, и вектора приоритетов критериев первого уровня (см. табл. 2) получен вектор глобальных приоритетов поставщиков, представленный в табл. 6.

Таким образом, на основании полученной оценки в качестве поставщика системы могут быть рекомендованы компания CDC или System Technology, имеющие очень близкие значения приоритетов.

В том случае, когда иерархия является неполной, для корректировки значений при-

Таблица 3

Нормализованные векторы приоритетов критериев второго уровня

i \ j	1	2	3	4	5	6
1	0,113	0,138	0,125	0,624	—	—
2	0,227	0,722	0,051	—	—	—
3	0,099	0,283	0,268	0,187	0,163	—
4	0,459	0,257	0,069	0,022	0,153	0,039
5	0,169	0,386	0,059	0,386	—	—
6	0,282	0,579	0,057	0,081	—	—

Таблица 4

Нормализованные векторы приоритетов поставщиков

Критерии	П1	П2	П3	П4	П5	П6
K_{11}	0,459	0,257	0,069	0,022	0,153	0,039
K_{12}	0,399	0,399	0,081	0,032	0,049	0,039
K_{13}	0,041	0,159	0,196	0,431	0,092	0,080
K_{14}	0,167	0,167	0,167	0,167	0,167	0,167
K_{21}	0,169	0,169	0,169	0,302	0,169	0,021
K_{22}	0,132	0,132	0,209	0,370	0,132	0,025
K_{23}	0,394	0,057	0,041	0,022	0,092	0,394
K_{31}	0,149	0,103	0,348	0,149	0,230	0,020
K_{32}	0,144	0,229	0,229	0,146	0,229	0,021
K_{33}	0,167	0,167	0,167	0,167	0,167	0,167
K_{34}	0,083	0,091	0,292	0,246	0,268	0,019
K_{35}	0,101	0,132	0,300	0,337	0,101	0,028
K_{41}	0,219	0,219	0,219	0,088	0,219	0,036
K_{42}	0,113	0,113	0,256	0,340	0,158	0,020
K_{43}	0,116	0,126	0,321	0,182	0,234	0,020
K_{44}	0,070	0,178	0,314	0,178	0,167	0,092
K_{45}	0,100	0,100	0,249	0,359	0,173	0,019
K_{46}	0,134	0,134	0,227	0,351	0,134	0,020
K_{51}	0,235	0,235	0,235	0,235	0,039	0,023
K_{52}	0,131	0,131	0,223	0,359	0,131	0,024
K_{53}	0,167	0,167	0,167	0,167	0,167	0,167
K_{54}	0,286	0,286	0,286	0,076	0,041	0,024
K_{61}	0,211	0,211	0,226	0,226	0,104	0,021
K_{62}	0,306	0,306	0,144	0,109	0,102	0,034
K_{63}	0,189	0,202	0,227	0,255	0,095	0,031
K_{64}	0,221	0,221	0,221	0,221	0,058	0,056

Таблица 5

Вектор приоритетов поставщиков по критериям первого уровня

Критерии	П1	П2	П3	П4	П5	П6
К1	0,216	0,208	0,148	0,165	0,14	0,124
К2	0,154	0,136	0,189	0,337	0,138	0,046
К3	0,142	0,159	0,239	0,207	0,192	0,061
К4	0,152	0,156	0,238	0,239	0,185	0,03
К5	0,209	0,209	0,244	0,22	0,083	0,034
К6	0,258	0,258	0,183	0,161	0,107	0,033

Таблица 6

Вектор глобальных приоритетов поставщиков CRM-решений

П1	П2	П3	П4	П5	П6
0,209	0,208	0,196	0,194	0,128	0,065

оритетов критериев первого уровня зачастую используют взвешивающие коэффициенты, равные относительному количеству элементов в каждой группе [3], однако в данном случае они не повлияли на соотношения приоритетов поставщиков.

Заключение. Внедрение технологий управления взаимоотношениями с поставщиками в торговой компании сектора FMCG требует автоматизации специфических бизнес-процессов управления вторичными продажами и маркетинговыми акциями. Поддержка операций этих бизнес-процессов предполагает наличие развитых приложений в составе CRM-системы, предусматривающих организацию взаимодействия с разветвлённой сетью торговых точек, торговых представителей, дистрибьюторов, мерчендайзеров. Как видно из табл. 5, с точки зрения архитектурной и функциональной (критерии К3, К4) наиболее подходящими являются решения поставщиков ECOD и Monolit. Однако на результирующее решение оказали существенное влияние другие потребности холдинга. Для того чтобы обеспечить достижение всего комплекса важных для предприятия ИТ-целей, рекомендовано использование решений других поставщиков.

Метод анализа иерархий предоставляет инструмент для декомпозиции сложной задачи обоснования выбора ИТ-решения, позволяющий с необходимой степенью детализации представить и исследовать комплекс критериев различного уровня. Иерархическая модель критериев и методика попарного сравнения элементов дают возможность на каждом шаге анализа сфокусировать внимание на отдельных показателях, временно абстрагируясь от всех прочих компонентов, что повышает достоверность получаемых оценок. Компоненты расчётных векторов приоритетов позволяют дать содержательную интерпретацию получаемым результатам.

Наиболее сложным моментом при использовании МАИ является обоснованный выбор системы критериев. Для решения этой задачи следует использовать методики декомпозиции целей компании, формирования требований к приложениям, что позволяет учесть разнообразные аспекты внедрения и последующей эксплуатации ИТ-решений.

На основании представленных исследований сформированы и исследованы свойства более 30 матриц попарных сравнений. Относительные индексы согласованности для этих матриц имели значения, не превышающие 0,1, что свидетельствует об объективности суждений о свойствах критериев и может служить косвенным подтверждением полезности применения МАИ к решению задачи выбора ИТ-решения.

Библиографические ссылки

1. **COBIT 5:** Бизнес-модель по руководству и управлению ИТ на предприятии http://www.isaca.org/COBIT/Pages/COBIT-5-Russian.aspx (дата обращения 29 дек. 2014 г.).

2. **Горский П.В.** Введение в прикладную дисциплину "поддержка принятия решений" http://www.devbusiness.ru/development/dms/dms_intro.htm (дата обращения 10 янв. 2015 г.).

3. **Саати Т.** Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993, 278 с.

ПО СТРАНИЦАМ ЖУРНАЛОВ

Формование дискретных абразивных сегментов для плоского торцевого шлифования. *Вестник машиностроения.* 2016. № 1.

Рассмотрены процесс формования дискретных абразивных сегментов для плоского торцевого шлифования и технологическая оснастка для его реализации. Определены технические и технологические решения, позволяющие существенно уменьшить затраты при переходе на дискретное плоское торцевое шлифование.

Повышение технического уровня судовых дизелей малой мощности. *Вестник машиностроения.* 2016. № 1.

Рассматривается применение известных и новых технических и технологических решений, позволяющих повысить эксплуатационные показатели серийно выпускаемых судовых дизелей малой мощности при их модернизации, как альтернатива дорогостоящим исследованиям.

Разрушение конструкций при работе в условиях пониженных температур и диагностика устойчивости структурного состояния материала. *Вестник машиностроения.* 2016. № 1.

Исследовано влияние примесей на хладоломкость материалов. Разработана обучаемая нейронная сеть, которая отображает модели процессов усталостного и хрупкого разрушений образцов и формирует числовые ряды, аналогичные эволюции фрактальных характеристик акустической эмиссии, излучаемой при усталостных испытаниях для разных условий нагружения.

Анализ влияния теплового баланса на показатель эксплуатационной стойкости пресс-форм для литья под давлением. *Заготовительные производства в машиностроении.* 2016. № 1.

Рассмотрена возможность увеличения эксплуатационного периода пресс-форм для литья под давлением за счёт изменения составляющих теплового баланса между пресс-формой и отливкой. Предложен способ, основанный на использовании покрытий, нанесённых методом катодно-ионной бомбардировки, позволяющий увеличить термостойкость формообразующей поверхности. Показана возможность использования покрытий различных составов, также указано наиболее оптимальное из них для случая литья под давлением цинковых сплавов. Приведены экспериментальные данные, подтверждающие правильность предлагаемого способа.

Совершенствование процесса формовки коробчатых деталей из листа эластичной средой в жёсткой матрице. *Заготовительные производства в машиностроении.* 2016. № 1.

Предложен способ формовки из листа деталей коробчатой формы эластичной средой в жёсткой матрице. Реализация предложенного способа позволяет расширить технологические возможности процесса формовки, повысить его эффективность и качество изготовляемых деталей.

Холодное комбинированное выдавливание поршня тормозного цилиндра. *Заготовительные производства в машиностроении.* 2016. № 1.

Проведено сравнение процессов выдавливания полой детали типа поршень автомобильного тормозного цилиндра. Для анализа использована конечно-элементная система QForm 2D. Приведены исходные данные и результаты моделирования.

Зависимость временного сопротивления от режима старения штамповок из сплава В-1469 при изотермической деформации. *Заготовительные производства в машиностроении.* 2016. № 1.

На основе метода многофакторного планирования эксперимента построена математическая модель, позволяющая определить зависимость временного сопротивления при разрыве от режима старения штамповок из сплава В-1469, изготовленных методом изотермической деформации.

Автоматический весовой дозатор дискретного действия с измерительным устройством на основе встроенного упругого чувствительного элемента. *Сборка в машиностроении, приборостроении.* 2016. № 1.

Дан анализ принципиально новой конструкции автоматического весового дозатора дискретного действия, в которой применено измерительное устройство на основе кольцевого упругого элемента, составляющего вместе с грузоприёмным рычагом единую колебательную систему. Данное решение позволяет подобрать оптимальный коэффициент демпфирования и минимальную длительность переходного процесса. Отсутствие подвижных опор и бесконтактный датчик деформации способствовали повышению надёжности функционирования дозатора.

Предельные режимы движения шиберов при автоматизированной установке комплекта «уплотнение — сопрягаемая деталь». *Сборка в машиностроении, приборостроении.* 2016. № 1.

Описано автоматизированное устройство установки комплекта «уплотнение – сопрягаемая деталь» и обоснованы предельные режимы движения шибера, при которых уплотнение и деталь не изменяют своих положений на нём.

Автоматизированное проектирование технологических процессов сборки. *Сборка в машиностроении, приборостроении.* 2016. № 1.

Рассматриваются особенности автоматизированного проектирования технологических процессов сборки изделий в машиностроении. Приводится анализ существующего программного обеспечения.

Особенности расчёта и проектирования адаптивных фрикционных муфт. *Сборка в машиностроении, приборостроении.* 2016. № 1.

Решена задача повышения точности срабатывания адаптивных фрикционных муфт с раздельным силовым замыканием на основе расширения интервала значений коэффициента трения за счёт увеличения максимального коэффициента трения по отношению к прогнозируемой величине. Найдены зависимости для вычисления увеличенных значений коэффициента трения.