Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издаётся с 1947 г.

Том 73 **1 / 2019**

Главный редактор

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Афанасьев В.Н. – д.т.н., проф., МИЭМ НИУ ВШЭ
Ван Мэйлин – д.т.н., проф., Пекинский политехн. ун-т (КНР)
Иванов А.П. – д.э.н., проф., МГУПС (МИИТ)
Кларк Р. – д.т.н., проф., КИУ (г. Ворвик, Великобритания)
Криони Н.К. – д.т.н., проф., УГАТУ (г. Уфа)
Кузнецов А.Е. – д.т.н., проф., РГРТУ (г. Рязань)
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»
Пролетарский А.В. – д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Путилов В.Н. – ООО «Изд-во "Инновационное машиностроение"» (заместитель главного редактора)
Румянцева О.Н. – генеральный директор ООО «Изд-во "Инновационное машиностроение"»
Ся Юаньцин – д.т.н., проф., Пекинский политехн. ун-т (КНР)
Фу Ли – д.т.н., проф., Ин-т Бейхан (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 политехн. ин-т (Польша)

Редакторы — **Мымрина И.Н., Селихова Е.А.**
Компьютерная вёрстка — **Конова Е.В.**

Адрес редакции:
107076, Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2.
Тел.: 8 (499) 268-41-77.
E-mail: ast@mashin.ru; astmashin@yandex.ru;
http://www.mashin.ru

Учредитель:

ООО «НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО "ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ"»

Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре 29 мая 2014 г. (ПИ № ФС77-58102), входит в перечень утверждённых ВАК при Минобрнауки России изданий для публикации трудов соискателей учёных степеней, а также в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Аносов М.С., Колчин П.В. Оптимизация управляющей программы для станков с ЧПУ с учётом динамической устойчивости процесса резания и оптимальных режимов обработки в условиях цифровых производств 3

Семенов А.Д., Авдеева О.В. Анализ топологии поверхности алмазного шлифовального круга с использованием сингулярного разложения 8

Григорьев-Фридман С.Н. Автоматический способ регулировки коэффициента стоячей волны по напряжению и неравномерности по АЧХ в СВЧ-аттенюаторах 14

Резчиков А.Ф., Кушников В.А., Иващенко В.А., Фоминых Д.С., Богомолов А.С., Филимонюк Л.Ю. Снижение ущерба от критических сочетаний событий при сварке роботизированными технологическими комплексами 22

Козлов В.Г., Скрыпников А.В., Чернышова Е.В., Микова Е.Ю., Ломакин Д.В. Автоматизированные уровни управления лесовозной автомобильно-дорожной системой 27

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Клячкин В.Н., Кувайскова Ю.Е., Жуков Д.А. Влияние способа отбора значимых показателей на качество диагностики состояния технического объекта 32

Мирзаханов В.Э. Синтез графической системы распознавания участков человеческой кожи посредством лингвистического реферирования 37

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ НАУЧНОЙ И ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Кондрашов Ю.Н. Хранилище данных для анализа бюджетного процесса 42

© Издательство «Инновационное машиностроение», «Автоматизация. Современные технологии», 2019

Automation. Modern Technologies

MONTHLY INTERBRANCH SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

It is published since 1947

Volume 73 1 2019

Chief in Editor

Mikrin E.A. – dr.en.s., prof., academician of the RAS, RSC «Energy» behalf of S.P. Korolev

EDITORIAL COUNCIL:

Afanasyev V.N. – dr.en.s., prof., MIEM NRU HSE
Wang Meiling – Ph.D., prof., Beijing Ins. of Technology, P.R. China
Ivanov A.P. – dr.ec.s., prof., MSURE (MIIT)
Clark R. – Ph.D., prof., EMB of Warwick Un., UK
Krioni N.K. – dr.en.s., prof., USATU, Ufa
Kuznetsov A.E. – dr.en.s., prof., RSREU, Ryazan
Maltseva S.V. – dr.en.s., prof., NRU HSE
Mikaeva S.A. – dr.en.s., prof., MSUPI
Neusypin K.A. – dr.en.s., prof., MSTU behalf of N.E. Bauman
Nefedov E.I. – dr.ph.-m.s., IRE RAS
Nikiforov V.M. – dr.en.s., prof., FSUE «NPCAP behalf of N.A. Pilyugin»
Proletarskiy A.V. – dr.en.s., prof., MSTU behalf of N.E. Bauman
Putilov V.N. – LLC «Publishing "Innovative machine building"» (deputy chief editor)
Rumyantseva O.N. – General Director of LLC «Publishing "Innovative mashine building"»
Xia Yuantsin – Ph.D., prof., Beijing Ins. of Technology, P.R. China
Fu Li – Ph.D., prof., Beikhan Un., P.R. China
Fedorov I.B. – dr.en.s., prof., academician RAS, President of MSTU behalf of N.E. Bauman
He Yung – Ph.D., prof., Nanjing Un. of Science and Technology, P.R. China
Shakhnov V.A. – dr.en.s., prof., corr. member of RAS, MSTU behalf of N.E. Bauman
Shibanov G.P. – dr.en.s., prof., State Flight Test Center behalf of V.P. Chkalov
Yanovich E.A. – dr.ec.s., prof., Koszalin Polytechnic. Ins., Poland

Editors — **Mymrina I.N., Selikhova E.A.**
Computer layout — **Konova E.V.**

Editorial address:
107076, Moscow, Kolodezny lane – 2a, build. 2
Tel.: +7 (499) 268-41-77.
E-mail: ast@mashin.ru; astmashin@yandex.ru;
http://www.mashin.ru

Founder:

LLC «SCIENTIFIC AND TECHNICAL PUBLISHING "INNOVATIVE MACHINE BUILDING"»

The journal was registered in the Roskomnadzor on May 29, 2014 (PI No. FS77-58102), it is included in the list of publications approved by the Higher Attestation Commission (VAK) of the Russian Ministry of education and science for publication of the works of applicants for academic degrees and the system of the Russian index scientific citation (RINC)

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION PROCESSES

Kabaldin Yu.G., Shatagin D.A., Anosov M.S., Kolchin P.V. Optimization of the control program for CNC machine tools with regard to the dynamic stability of the cutting process and the optimal processing modes in digital production condition 3

Semenov A.D., Avdeeva O.V. Analysis of the surface topology of the diamond grinding wheel through the use of singular decomposition 8

Grigorev-Fridman S.N. Automatic adjusting method of the standing wave coefficient by voltage and nonuniformity by the amplitude-frequency characteristic in microwave attenuators 14

Rezchikov A.F., Kushnikov V.A., Ivashchenko V.A., Fominykh D.S., Bogomolov A.S., Filimonyuk L.Yu. Reducing damage from critical combinations of events during welding by robotic technological systems 22

Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Chernyshova E.V., Mikova E.Yu., Lomakin D.V. Automated control levels of the timber-carrying motor-car road system 27

MODERN TECHNOLOGIES

Klyachkin V.N., Kuvayskova Yu.E., Zhukov D.A. The influence of the significant indicators selection method on the quality of the technical object diagnostics 32

Mirzakhanov V.E. Synthesis of a graphical human skin detection system by means of linguistic summarizanion 37

ECONOMY AND ORGANIZATION OF SCIENTIFIC AND ECONOMIC ACTIVITIES

Kondrashov Yu.N. Data storage for budget analysis 42

© Publishing «Innovative machine building», «Automation. Modern technologies», 2019

УДК 004.9

Ю.Г. Кабалдин, д-р техн. наук, **Д.А. Шатагин, М.С. Аносов, П.В. Колчин**
(Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева)
uru.40@mail.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЯЮЩЕЙ ПРОГРАММЫ ДЛЯ СТАНКОВ С ЧПУ С УЧЁТОМ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ И ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Рассмотрен новый подход к формированию управляющей программы для станков с ЧПУ — путём встраивания в CAM-систему модулей, взаимодействующих с её ядром, учитывающих хаотичность траектории инструмента, оптимизацию режимов обработки на основе нейросетевого моделирования, обеспечивающих устойчивую динамику процесса резания. После обучения нейронная сеть способна идентифицировать динамическое состояние упругой системы станка (отличать устойчивое резание от неустойчивого, прогнозировать параметры траектории перемещения вершины резца) и диагностировать амплитуду колебаний режущего инструмента относительно обрабатываемой детали в проекциях на оси координат станка.

Ключевые слова: цифровое производство; динамическая устойчивость процесса резания; режимы обработки; хаотичное движение; нейросетевое моделирование; резание, оптимизация управляющей программы ЧПУ.

A new approach to the formation of a control program for CNC machine tools is considered by integrating into the CAM system modules interacting with its core, taking into account the randomness of the tool path and optimization of the processing modes based on the neural network modeling, ensuring stable dynamics of the cutting process. After learning, the neural network is able to identify the dynamic state of the machine tool elastic system (to distinguish stable cutting from unstable, to predict the parameters of the tool tip movement trajectory) and to diagnose the amplitude of oscillations of the cutting tool relative to the workpiece in projections on the machine tool axes of coordinates.

Keywords: digital production; dynamic stability of the cutting process; processing modes; chaotic movement; neural network modeling; optimization of the NC control program.

В настоящее время отсутствует единая базовая управляющая платформа [1], на основе которой бы разрабатывалось новое поколение систем управления технологическим оборудованием для цифровых производств. Такие платформы должны обладать большими вычислительными ресурсами и высоким быстродействием обработки большой базы данных. Это как существенно сократит расходы на разработку и эксплуатацию технологического оборудования, так и обеспечит его вхождение в единое информационное пространство предприятия. Отсутствие базовой платформы управления технологическим оборудованием сдерживает также разработку новых высокопроизводительных методов изготовления деталей (высокоскоростная обработка, аддитивные технологии, гибридные технологии обработки и т. д.) и в целом рост эффективности цифровых производств. Создание единой платформы управления оборудованием позволит решить и другую важную задачу — обеспечить технологическую безопасность нашей страны, так как большинство отечественных предприятий, в том числе и оборонного комплекса, оснащено импортными оборудованием и системами управления.

Следовательно, формирование нового подхода к управлению оборудованием цифровых производств и разработка базовой унифицированной платформы, создание на её основе новых и усовершенствование существующих систем управления технологическим оборудованием являются актуальными задачами цифровых производств.

Такой единой платформой могут выступать открытые системы ЧПУ станков [2—8] с встроенными в них модулями высокопро-

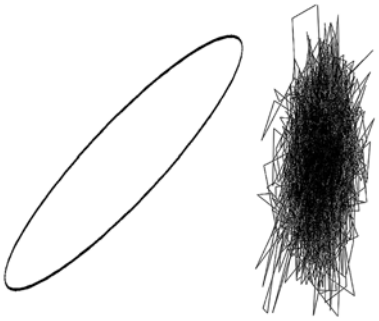
изводительных вычислений и глубокого обучения искусственного интеллекта (ИИ) с использованием технологий nVidia CUDA, что обеспечивает возможность масштабирования на базе графических процессоров (GPU), и модулями связи с промышленным интернетом, т. е. с возможностью использования облачных технологий обработки больших баз данных как на серверах предприятий (локальные сети), так на серверах провайдеров. Все это создает основу для интеллектуального управления широкой номенклатурой технологического оборудования, оснащённого системами ЧПУ с расширенными возможностями, в частности при высокоскоростной обработке, применении аддитивных технологий и т. д., а также интеграции в него подсистем диагностики, например износа инструмента. При этом особое внимание следует уделять разработке систем диагностики динамического состояния механообрабатывающего оборудования.

В современном компьютеризированном производстве, как правило, всю необходимую информацию о номенклатуре изготовляемых деталей можно извлечь из базы данных САПР или из корпоративной PDM-системы (системы управления проектом). В соответствии с этой информацией ставится задача оптимизировать управляющую программу (УП) и режимы обработки деталей.

Дело в том, что на качество и производительность обработки деталей влияет как динамическое состояние станочного оборудования, так и режимы резания, износ инструмента, которые могут вызывать хаотический режим работы оборудования [3]. Как показывают наши исследования, при работе с САМ-системами следует оптимизировать процесс формирования УП станка с ЧПУ на основе нелинейной динамики и искусственных нейронных сетей (ИНС). Алгоритмы нелинейной динамики позволяют оценить хаотичность движения исполнительных органов станка и оптимизировать траекторию движения инструмента, а ИНС — оптимизировать режимы обработки деталей [2—4].

Информацию об относительных вибрациях инструмента и обрабатываемой детали можно получить только в результате косвенных измерений. Основная задача анализа подобных данных состоит в определении качественных и количественных характеристик регистрируемых сигналов, позволяющих судить об истинном состоянии динамических процессов в зоне резания.

Наличие многих степеней свободы упругой системы металлорежущего станка [9, 10]



а) *б)*

Рис. 1. Траектории относительного движения инструмента и заготовки при точении:
а — теоретическая (эллипс перемещений); *б* — зафиксированная с помощью системы поляризованных вибродатчиков, установленных на державке резца

приводит к тому, что колебания инструмента относительно заготовки являются результатом сложения нескольких связанных между собой простейших (поступательных или крутильных) колебаний. Поэтому образующаяся в результате сложения колебаний траектория относительного движения инструмента и заготовки имеет форму замкнутой кривой, теоретически форму эллипса (рис. 1). Этот эллипс принято называть эллипсом перемещений [2].

В силу разнообразных возмущений реальная траектория движения вершины инструмента [2—4] имеет хаотичный вид (рис. 1, *б*). То есть теоретический эллипс перемещений для данного установившегося режима резания является своеобразным аттрактором — притягивающим множеством точек в фазовом пространстве относительного положения инструмента и детали.

Зафиксировать реальную траекторию движения вершины инструмента с достаточной для эффективной диагностики точностью можно, только применив специальную прецизионную аппаратуру, например лазерный интерферометр. Естественно, использование столь сложного и дорогого оборудования в составе систем управления металлорежущими станками нецелесообразно из-за слишком высоких затрат на настройку и обслуживание. Поэтому для измерения колебаний при резании, как правило, используют более дешёвые, но менее точные приборы. Наиболее широкое применение в этой области получили вибродатчики и датчики акустической эмиссии [2—4].

Поляризованные (обладающие чувствительностью вдоль одной оси) вибродатчики крепятся на элементах упругой системы станка таким образом, чтобы в совокупности они образовывали ортогональную систему. Это

позволяет по одномерным сигналам датчиков, фиксирующих одну из проекций колебаний, сформировать их пространственную трёхмерную картину.

Однако вследствие волновых явлений в упругой системе станка вибродатчики помимо полезного сигнала фиксируют достаточно большое количество побочных колебаний, вызванных отражениями волн. Происходят деформации от разнообразных стыков и переходных сечений элементов конструкций станка, расположенных рядом с местами крепления датчиков. В результате этого восстановленная по результатам виброизмерений траектория движения вершины инструмента [2—4] является сильно искажённой (рис. 1, *б*).

Для изучения относительных колебаний инструмента и заготовки при резании разработана нейросетевая динамическая модель колебательной системы инструмент—деталь. Применение данной модели позволяет с точностью, сопоставимой с точностью лазерной интерферометрии, осуществлять непосредственно в процессе резания динамическую диагностику относительных перемещений резца и обрабатываемой детали, используя недорогие виброрегистрирующие датчики и датчики силы тока.

Схема процесса диагностики с использованием нейросетевой модели приведена на рис. 2. В качестве входных данных модели использованы амплитуды сигналов ортогональной системы поляризованных вибродатчиков $S_x(t)$, $S_y(t)$, $S_z(t)$, расположенных на элементах упругой системы станка, а также значения силы тока в обмотках электродвигателей главного привода $I_z(t)$ и приводов подач $I_x(t)$ и $I_y(t)$.

В качестве выходных данных приняты амплитудные значения проекций относительных перемещений обрабатываемой детали и инструмента $X(t)$, $Y(t)$, $Z(t)$. Действующие значения силы тока характеризуют квазистатические, медленно изменяющиеся составляющие силы резания P, а сигналы вибродатчиков позволяют оценить динамику изменения этих сил.

Динамическая модель колебательной системы инструмент—деталь формируется на основе двухслойной нейронной сети обратного распространения. Задачами сети являются аппроксимация по входным данным параметров траектории вершины инструмента (размеров эллипса перемещений, угла его наклона по отношению к системе координат) и вычисление предполагаемых значений амплитуды относительных перемещений обрабатываемой детали и инструмента в проекциях.

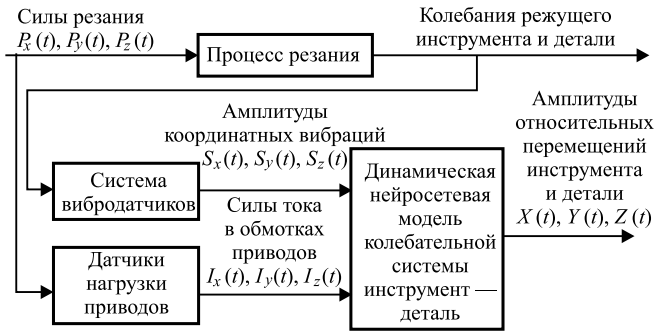


Рис. 2. Схема диагностики относительных перемещений режущего инструмента и обрабатываемой детали с использованием нейросетевой динамической модели колебательной системы инструмент—деталь

На рис. 3 приведена структура нейросетевой динамической модели колебательной системы инструмент—деталь. Первый, входной, слой сети содержит 16 нейронов, второй, выходной, слой состоит из 3 нейронов. В качестве функции активации нейронов обоих слоёв используется экспоненциальный сигмоид. Сеть имеет 240 входов, на которые

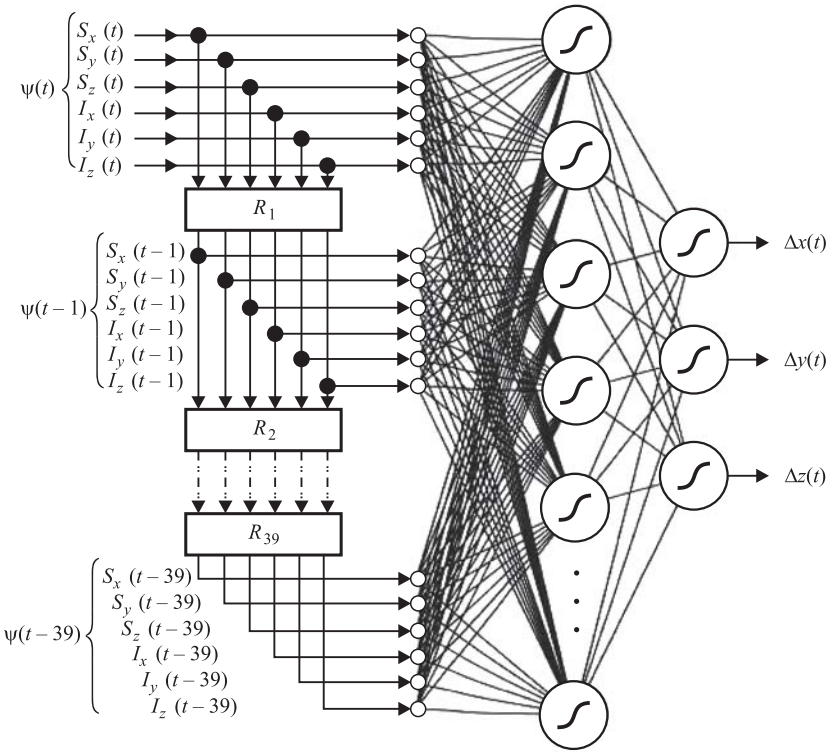


Рис. 3. Структура нейросетевой динамической модели колебательной системы инструмент—деталь

подаются актуальные значения вектора физически измеренных величин $\psi(t) = S_x(t)$, $S_y(t)$, $S_z(t)$, $I_z(t)$, $I_x(t)$, $I_y(t)$, а также предыстория этого вектора за 39 предыдущих отсчётов времени $\psi(t - 1)$, ..., $\psi(t - 39)$, сформированная с помощью сдвиговых регистров (на рис. 3 обозначены $R_1 ... R_{39}$). Три выхода сети являются выходами модели.

Входной вектор $P(t)$ сети формируется во временной области дискретно, на основе синхронных измерений мгновенных значений сигналов вибродатчиков S_x, S_y, S_z и силы тока I_x, I_y, I_z в обмотках электродвигателей приводов. Измерения проводятся в режиме реального времени с частотой дискретизации 10 000 Гц. Регулярно, с периодичностью 10 Гц, на основе временны́х рядов, зафиксированных мгновенных значений, выполняется вычисление амплитуд колебаний $S_x(t)$, $S_y(t)$, $S_z(t)$ и значений действующих сил тока $I_z(t)$, $I_x(t)$, $I_y(t)$, т. е. задаётся очередной временной отсчёт вектора $\psi(t)$.

Согласно расчётам время реакции модели составляет 0,1 с, ёмкость хранения предыстории развития колебательных процессов в системе инструмент—деталь (максимальная продолжительность учитываемых переходных явлений) равна 4 с.

Моделирование динамических параметров колебательной системы инструмент—деталь проводится путём обучения сети. Обучающая выборка формируется на основе сопоставления значений входных параметров для различных вариаций режима резания и амплитуд относительных микроперемещений обрабатываемой детали и режущего инструмента $X(t)$, $Y(t)$, $Z(t)$, определяемых с помощью лазерного интерферометра.

Обучение сети проводится с использованием алгоритма обратного распространения ошибки [2—4]. Во избежание эффекта «переобучения» на финальном шаге формирования сети выполняется процедура контрастирования синаптических весов.

После обучения нейронная сеть способна идентифицировать динамическое состояние упругой системы станка (отличать устойчивое резание от неустойчивого, прогнозировать параметры траектории перемещения вершины резца) и диагностировать амплитуды колебаний режущего инструмента относительно обрабатываемой детали в проекциях на оси координат станка.

Предлагаемая нейросетевая модель аппаратно может быть реализована на основе небольшого числа микроэлектронных компонентов, большинство из которых широко используется в автоматизированных системах управления технологическими процессами. Для динамической регистрации мгновенных значений S_x, S_y, S_z, I_x, I_y и I_z в состав аппаратной реализации модели должны входить аналоговый коммутатор и аналого-цифровой преобразователь. Управление входными устройствами модели, определение амплитуд вибраций $S_x(t)$, $S_y(t)$, $S_z(t)$ и значений действующих сил тока $I_z(t)$, $I_x(t)$, $I_y(t)$ следует возложить на сигнальный процессор, а всю вычислительную нагрузку по нейросетевой обработке данных возьмёт на себя специализированный нейросетевой процессор (нейрочип), содержащий в своих регистрах памяти нейросетевую динамическую модель колебательной системы инструмент—деталь, полученную на этапе обучения. В качестве конечного формирователя выходных параметров модели $X(t)$, $Y(t)$, $Z(t)$ может использоваться цифроаналоговый преобразователь.

На рис. 4 показана схема формирования и оптимизации УП. Из этой схемы следует, что для оптимизации УП должна быть дополнена следующими процедурами:

оценка хаотичности УП методами нелинейной динамики;

нейросетевая оптимизация траектории движения инструмента;

нейросетевая оптимизация режимов обработки.

Алгоритм взаимодействия данных программных модулей с ядром САМ-системы можно представить в виде блок-схемы, приведённой на рис. 5.

На крупных предприятиях существует база данных, которая обеспечивает автоматизацию как подбора инструмента, так и режимов резания непосредственно из САМ-системы и передачу параметров распознанных конструктивных элементов по 3D-модели обрабатыва-

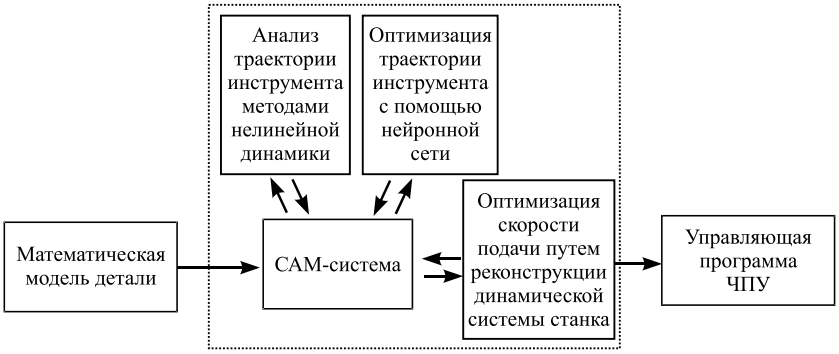


Рис. 4. Схема процесса формирования и оптимизации управляющей программы ЧПУ с учётом динамических характеристик станка

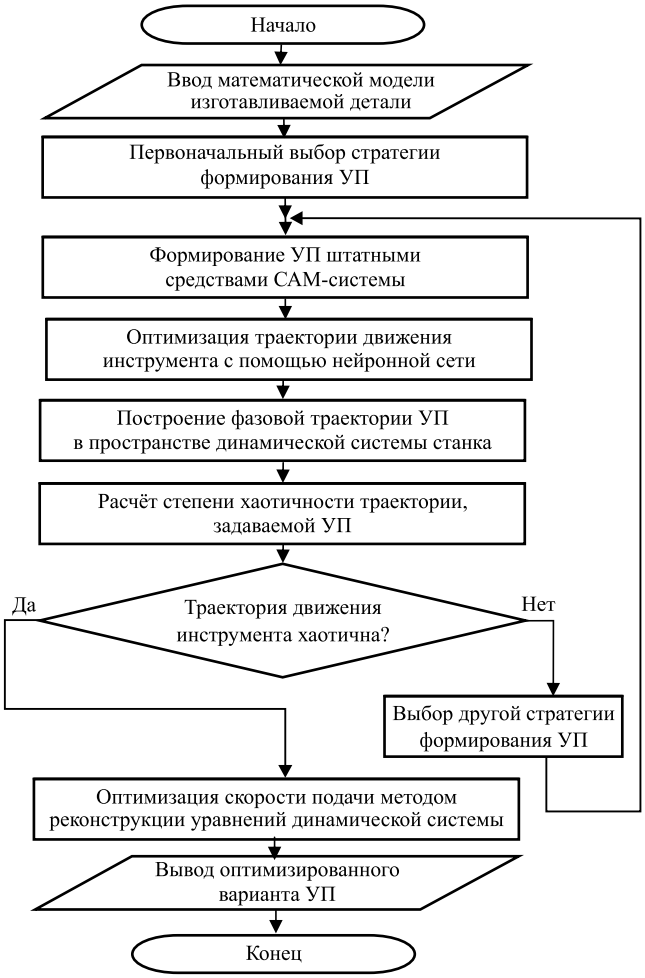


Рис. 5. Алгоритм формирования и оптимизации управляющей программы ЧПУ с использованием ИНС и нелинейной динамики

емой детали в «облако», а обратно получает список инструментов и рекомендованные значения параметров режима обработки. Нужно отметить, что импортированные инструменты не только служат для последующего расчёта траекторий и верификации, но и снабжены каталожными номерами, что значительно облегчает работу технолога, отвечающего за выбор и приобретение инструмента, необходимого для выполнения текущего производственного задания.

Такой подход обеспечивает доступ к обширным производственным данным в «облаке», в первую очередь — к данным о режущем инструменте и оснастке, для анализа которых требуются большие вычислительные возможности. При этом большим преимуществом для пользователей является то, что ответственность за наполнение актуальными данными «облака» ложится на самого потребителя, а не на разработчика САМ-системы или сторонние компании, занимающиеся наполнением баз данных. Это в значительной степени относится к предприятиям оборонного комплекса. Для реализации такой концепции необходимо решить две непростые задачи: во-первых, договориться с производителями оборудования о регулярной работе по наполнению «облака» данными о своей продукции, и, во-вторых, создать свой набор приложений для доступа к «облаку» из различных операционных систем и таким образом обеспечить доступ к «облаку» даже с помощью смартфона на данном производстве, т. е. путём реализации интернета вещей [11].

В качестве основы для реализации нейронных сетей при оптимизации УП, может быть использовано аппаратное нейрокибернетическое устройство, например нейропроцессор CM1K. Он представляет собой кристалл, изготовленный по технологии 130 нм и содержащий сеть из 1024 нейронов. Архитектура процессора не имеет супервизора — все вычисления производятся параллельными нейронами, работающими на частоте до 27 МГц. Благодаря своей универсальности нейропроцессор может применяться как базовый элемент плат нейроускорителей для высокопроизводительных компьютеров, в том числе для вычислительных станций, ориентированных на САПР-приложения.

На основе описанного подхода оптимизации УП был создан программный модуль NeuroModule UG для САМ-системы NX [2] Модуль разработан с помощью механизма UG Open API и позволяет дополнить штатные возможности САМ-системы NX процедурой автоматизированного формирования траекторий движения инструмента для высокоскоростного фрезерования широкого класса авиационных деталей, таких как шпангоут, лонжерон, нервюра, содержащих большое число технологических элементов типа «карман».

Модуль самостоятельно определяет число и геометрию «карманов» и формирует для каждого из них несколько траекторий движения режущего инструмента. Затем из полученных траекторий выбирается наилучшая с позиций высокоскоростной обработки, позволяющая наиболее полно раскрыть преимущества высокоскоростного фрезерования для данной формы «кармана».

Применение динамических моделей процессов механической обработки, построенных на основе нейронных сетей для управления металлорежущими станками, позволяет контролировать динамическую устойчивость процесса резания, добиваясь при этом улучшения качества обработки, размерной точности, а также повышения стойкости инструмента.

Библиографические ссылки

1. **Сосонкин В.Л., Мартинов Г.М.** Принципы построения систем с ЧПУ с открытой архитектурой // Приборы и системы управления. 1996. № 8. С. 18—21.
2. **Кабалдин Ю.Г., Биленко С.В., Серый С.В.** Исследование детерминированного хаоса в динамике процессов механообработки методом реконструкции аттрактора // Вестник машиностроения. 2003. № 1. С. 50—56.
3. **Кабалдин Ю.Г., Биленко С.В., Серый С.В.** Управление динамическими процессами в технологических системах механообработки на основе искусственного интеллекта. Комсомольск-на-Амуре, Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т, 2003. 201 с.
4. **Kabaldin Yu.G., Bilenko S.V., Seryi S.V.** Using nonlinear-dynamic methods in the operation of numerically controlled machine tools // Russian Engineering Research. 2003. Vol. 23. No. 3. P. 25—30.
5. **Кабалдин Ю.Г., Лаптев И.Л., Шатагин Д.А., Серый С.В.** Диагностика выходных параметров процесса резания в режиме реального времени на основе фрактального анализа и вейвлет-анализа с использованием программно-аппаратных средств National Instruments и nVidia CUDA // Вестник машиностроения. 2014. № 8. С. 80—82
6. **Кабалдин Ю.Г., Лаптев И.Л., Шатагин Д.А., Зотов В.О., Серый С.В.** Интеллектуальные системы диагностики состояния оборудования и износа инструмента // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. № 2. С. 47—50.
7. **Кабалдин Ю.Г., Лаптев И.Л., Шатагин Д.А., Вытнов Ю.В., Голубев С.В.** Оценка состояния режущего инструмента в режиме реального времени на основе подходов нелинейной динамики с использованием nVidia CUDA в программной среде LABVIEW // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 5 (102). С. 114—121.
8. **Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Лаптев И.Л., Сидоренков Д.А.** Разработка динамического паспорта станка на основе нейросетевого моделирования его рабочего пространства с использованием технологии nVidia CUDA и подходов глубокого обучения // Известия вузов. Машиностроение. 2016. № 10 (679). С. 49—56.
9. **Кудинов В.А.** Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 357 с.
10. **Орликов М.Л.** Динамика станков. Киев: Выща шк., 1989. 272 с.
11. **Промышленный** интернет на практике: удаленная диагностика станков с ЧПУ с помощью технологии Winnum /http://www.controlengrussia.com/ (дата обращения 23.08.2018).

Ссылка для цитирования

Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Аносов М.С., Колчин П.В. Оптимизация управляющей программы для станков с ЧПУ с учётом динамической устойчивости процесса резания и оптимальных режимов обработки в условиях цифровых производств // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 1. С. 3—8.

УДК 621.922

А.Д. Семенов, д-р техн. наук, доц., **О.В. Авдеева,** канд. техн. наук
(Пензенский государственный университет)
rasuma@mail.ru

АНАЛИЗ ТОПОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНГУЛЯРНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ

Статья посвящена разработке моделей профилей поверхности алмазного шлифовального круга. Для моделирования использованы методы современной теории автоматического управления и автоматизации технологических процессов, теории вероятностей и математической статистики, компьютерного моделирования. Смоделированные профили поверхности позволяют наиболее точно описать процесс электроэрозионного профилирования. Результаты исследований, проведённых на математических моделях, показали достаточно хорошее совпадение с расчётными данными, ошибка моделирования не превысила 10 %.

Ключевые слова: алмазный шлифовальный круг; профилограмма; математическое ожидание; сингулярное разложение; случайный сигнал; рекуррентный метод наименьших квадратов.

The article is devoted to the models development for the surface profiles of a diamond grinding wheel. the modern theory propositions of automatic control and technological processes automation, the theory of probability and mathematical statistics, and computer simulation are used for modeling. The simulated surface profiles make it possible to describe most accurately the process of EDM profiling. The results of studies conducted on mathematical models showed a sufficiently good agreement with the calculated data. The modeling error did not exceed 10 %.

Keywords: diamond grinding wheel; profilogram; mathematical expectation; singular decomposition; random signal; recurrent least squares method.

Введение. Процесс электроэрозионного профилирования алмазных шлифовальных кругов достаточно подробно изучен, выявлено влияние технологических режимов обработки на производительность, точность и качество обрабатываемых поверхностей, износ электрода-инстру-

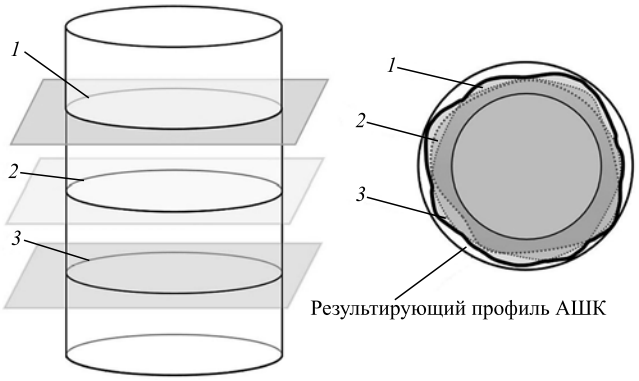


Рис. 1. Формирование результирующего профиля АШК: *1...3* — отдельные профили

мента. Однако ввиду сложности взаимосвязей между режимами процесса профилирования и его технологическими характеристиками рекомендации по выбору параметров разрядных импульсов до сих пор обосновываются в первую очередь практическим опытом и результатами экспериментальных исследований [1, 2].

Основным объектом исследования является результирующий профиль алмазного шлифовального круга (АШК), который представляет собой плоскую кривую, образующуюся в результате наложения отдельных профилей, формирующихся в плоскостях перпендикулярных к оси вращения круга (рис. 1).

Очевидно, что экспериментально определить такой результирующий профиль невозможно. Расчёт результирующего профиля АШК предлагается осуществить методом математического моделирования в следующем порядке:

1. Принимается гипотеза о стационарности и эргодичности случайного процесса распределения микронеровностей по рабочей поверхности АШК.

2. Экспериментально формируются выборки профилограмм поверхности для разных типов АШК.

3. По сформированным выборкам получаются имитационные модели профилограмм.

4. С помощью полученных моделей генерируется достаточно большое число моделей профилограмм (порядка десятков тысяч).

5. Случайным образом изменяются фазы смоделированных модельных профилограмм и находится их результирующий профиль.

6. Вычисляются статистические характеристики результирующего профиля.

Для выявления профилей рабочей поверхности провели сканирование профиля профилографом профилометром «Сейтроник ПШ8-4 (С.С.)» в плоскости, проходящей через ось алмазного круга и перпендикулярной к вектору скорости резания. На рис. 2 приведены характерные профилограммы рабочей поверхности.

Для моделирования рабочих поверхностей АШК предлагается использовать выделение трендовых и периодических составляющих числовых рядов в рамках метода сингулярного разложения. Метод не предусматривает знания параметрической модели ряда и позволяет работать с зашумленными нестационарными временными рядами. Он, в частности, позволяет выделять амплитудно-модулированные гармонические составляющие, что выгодно отличает его от методов, построенных на разложении Фурье [3]. В результате разложения были выявлены гармонические составляющие, трендовых составляющих в профилограммах не обнаружено.

Одним из важных параметров для сингулярного разложения является выбор длины окна L, необходимого для формирования исходной матрицы разложения. Поскольку в исходном числовом ряде экспериментальной профилограммы имеются периодические составляющие, было предложено выбирать длину окна кратной максимальному периоду такой составляющей. Для выделения периодических составляющих использовали метод синхронного накопления. В результате были определены следующие значения длины окна: 906 мкм для АШК с зернистостью 80/63 мкм и 876 мкм для АШК с зернистостью 50/40 мкм.

В результате сингулярного разложения выбрали 10 собственных векторов для АШК с зернистостью 80/63 мкм и 12 собственных векторов для АШК с зернистостью 50/40 мкм. Выбранные собственные векторы содержат более 95 % мощности исходного числового ряда.

Полученные собственные векторы группировали попарно. Сформированные пары

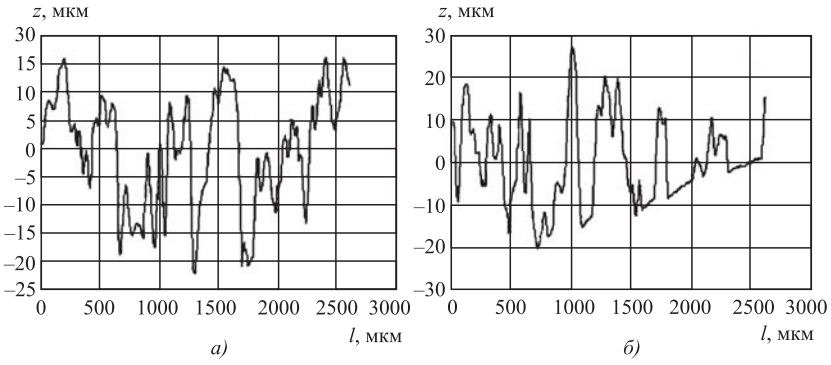


Рис. 2. Профилограммы рабочей поверхности АШК с зернистостью 80/63 мкм (*а*) и 50/40 мкм (*б*)

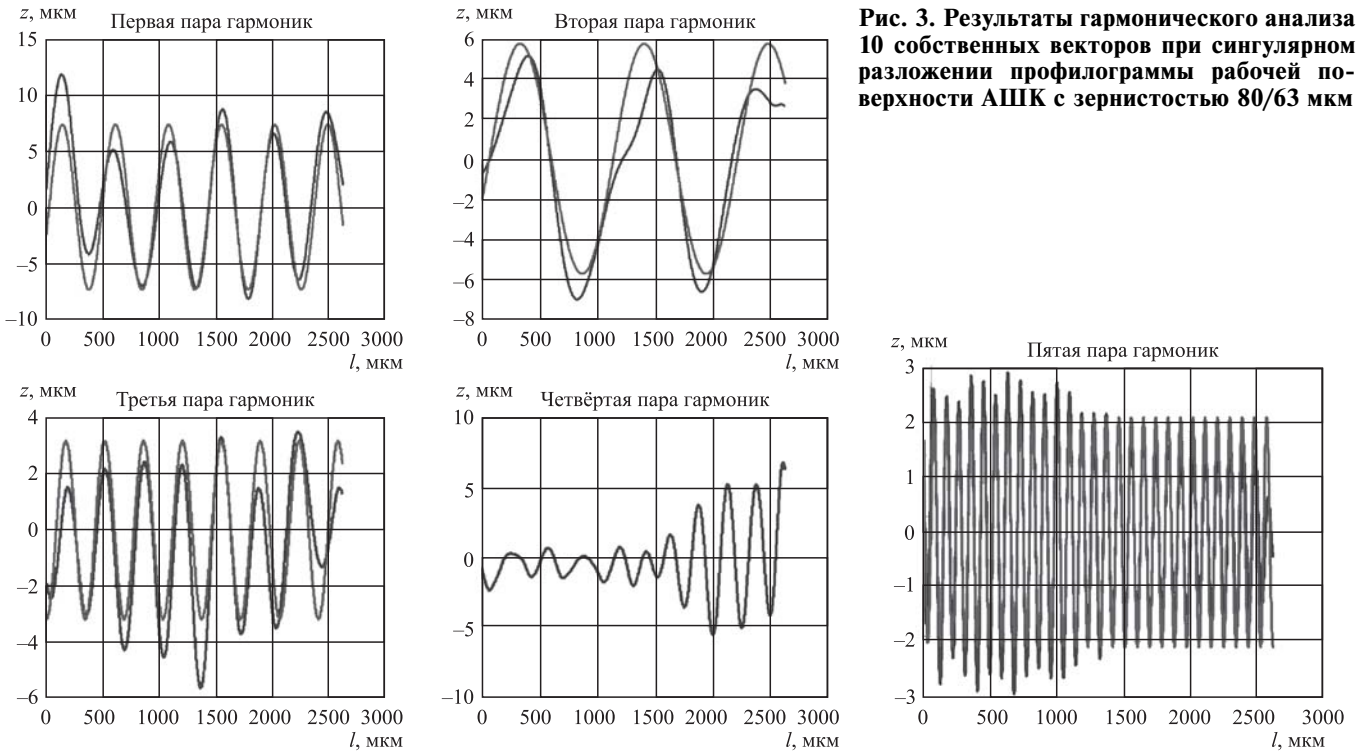


Рис. 3. Результаты гармонического анализа 10 собственных векторов при сингулярном разложении профилограммы рабочей поверхности АШК с зернистостью 80/63 мкм

суммировали и полученные суммы подвергали гармоническому анализу. Числовые результаты анализа приведены в таблице, графические результаты — на рис. 3 и 4.

Как следует из результатов гармонического анализа, четвёртая гармоника исключена из анализа.

На рис. 5 и 6 приведены результаты разложения исходных профилограмм на периодическую и случайную составляющие. Штрих-

Числовые результаты гармонического анализа собственных векторов

Номер пар гармоник	Амплитуда *A*	Период *T*	Фаза φ	СКО ошибки
Зернистость алмазного порошка 80/63 мкм				
1	7,4	470,6	5,94	0,6486
2	5,7	1077,1	5,94	0,8581
3	3,2	344,8	4,64	0,6582
4	—	—	—	—
5	2,1	92,7	2,5	0,0219
Зернистость алмазного порошка 50/40 мкм				
1	7,5	387,5	4,62	0,203
2	5	1000	6,28	0,1068
3	3,8	227	4,24	0,0702
4	-	—	—	—
5	2,2	178,5	3,02	0,009
6	2	115,6	3,4	0,0131

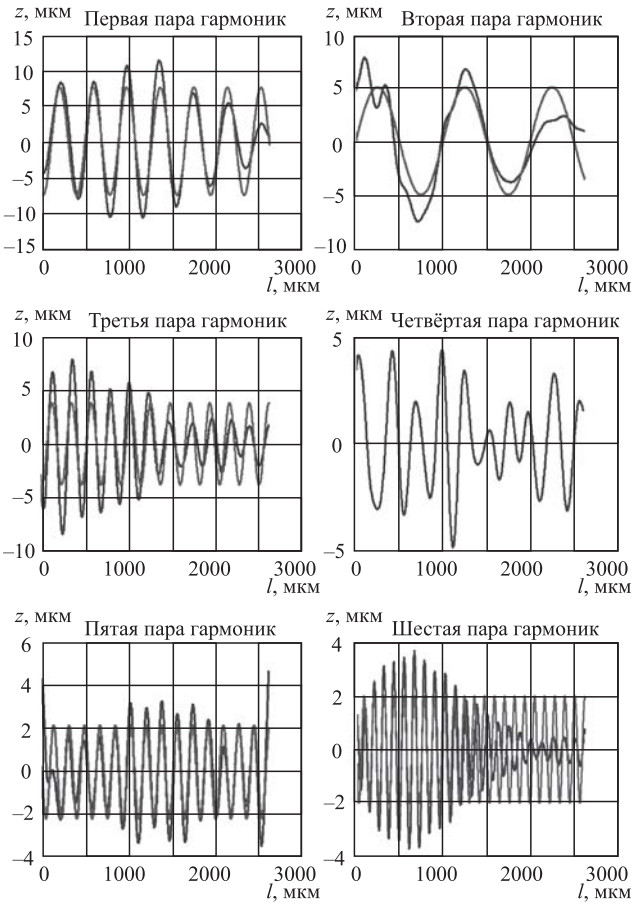


Рис. 4. Результаты гармонического анализа 12 собственных векторов при сингулярном разложении профилограммы рабочей поверхности АШК с зернистостью 50/40 мкм

пунктирной линией выделены экспериментальные профилограммы.

Модель случайной составляющей профилограммы сформирована с использованием моделей стационарного и случайного эргодического процессов, полученных методом формирующего фильтра. Идентификация параметров формирующего фильтра проводилась с помощью рекуррентного метода наименьших квадратов (РМНК) [4].

На рис. 7 представлены рассчитанные коэффициенты моделей авторегрессионного скользящего среднего (АРСС), полученные в результате идентификации, свидетельствующие о сходимости получаемых оценок. На рис. 8 приведены ошибки идентификации случайной составляющей, позволяющие установить, что максимальная ошибка не превышает 10 %.

По полученным АРСС-моделям были рассчитаны передаточные функции формирующих фильтров, воспроизводящих случайную составляющую профилограмм рабочей поверхности:

для АШК зернистостью 80/63 мкм

$$W_1(p) = \frac{32{,}6696(2{,}139p^2 + 2{,}7594p + 1)}{352{,}6908p^2 + 42{,}6904p + 1};$$

для АШК с зернистостью 50/40 мкм

$$W_2(p) = \frac{28{,}107(2{,}45p^2 + 3{,}05p + 1)}{377{,}35p^2 + 32{,}79p + 1}.$$

В результате проведённых исследований получены Simulink-модели поверхностей АШК зернистостью 80/63 мкм и 50/40 мкм (рис. 9).

На рис. 10 представлены фрагменты профилограмм рабочей поверхности АШК, полученные в результате моделирования, для различных зернистостей алмазного инструмента, хорошо совпадающие по своим статистическим характеристикам с полученными в эксперименте профилограммами, представленными на рис. 2.

На рис. 11 показаны фрагменты поверхности алмазных кру-

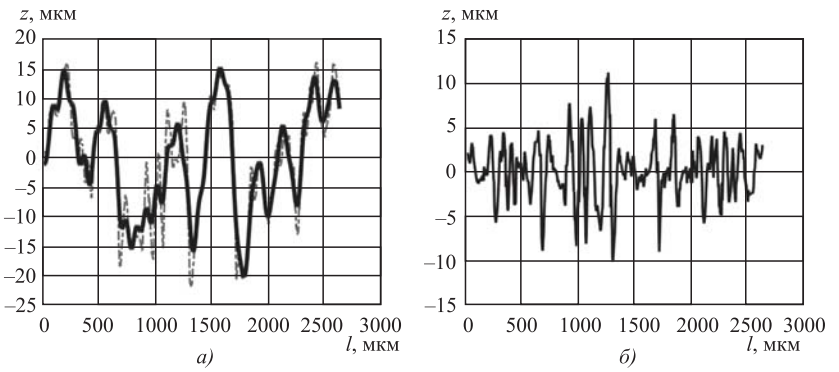


Рис. 5. Периодическая (*а*) и случайная (*б*) составляющие профилограмм для АШК зернистостью 80/63 мкм

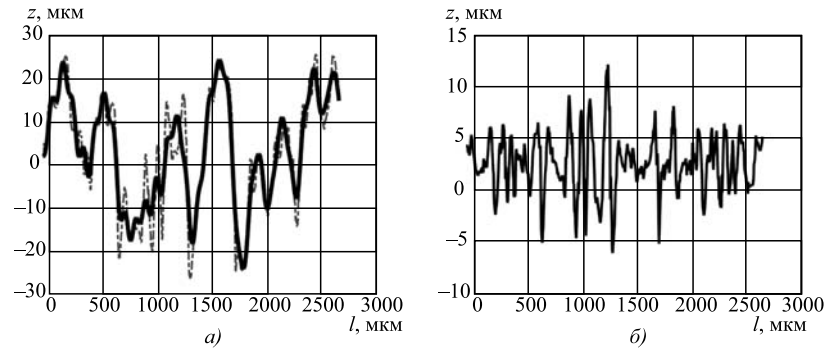


Рис. 6. Периодическая (*а*) и случайная (*б*) составляющие профилограмм для АШК зернистостью 50/40 мкм

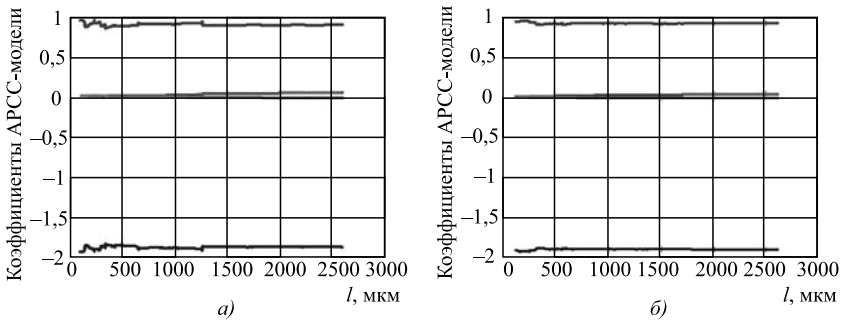


Рис. 7. Коэффициенты АРСС-моделей случайных составляющих профилограмм рабочей поверхности с зернистостью 80/63 мкм (*а*) и 50/40 мкм (*б*)

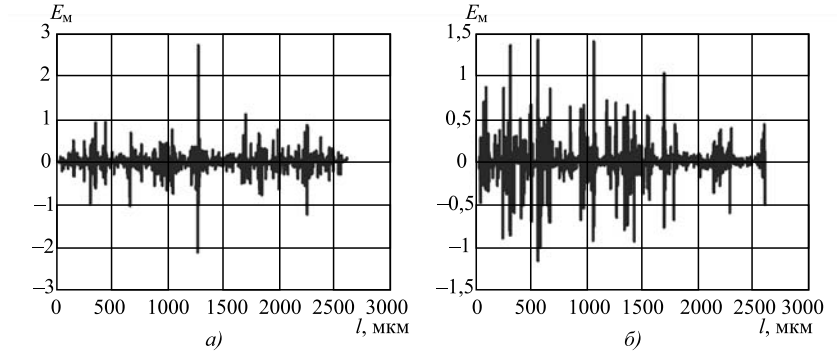


Рис. 8. Ошибка моделирования $E_М$ случайных составляющих профилограмм рабочей поверхности АШК зернистостью 80/63 мкм (*а*) и 50/40 мкм (*б*)

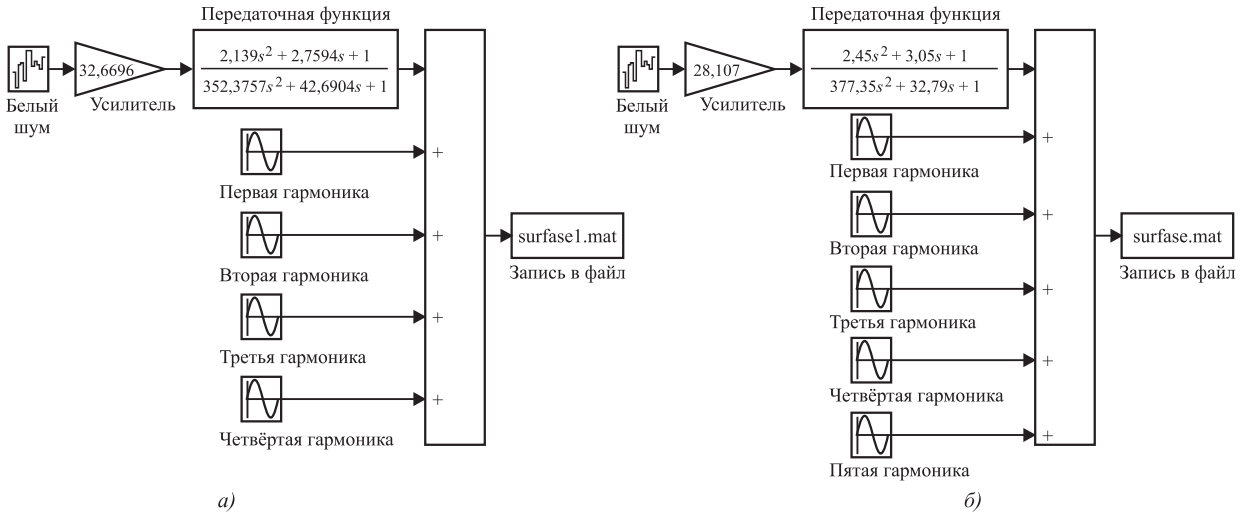


Рис. 9. Simulink-модели поверхностей АШК зернистостью 80/63 мкм (*а*) и 50/40 мкм (*б*)

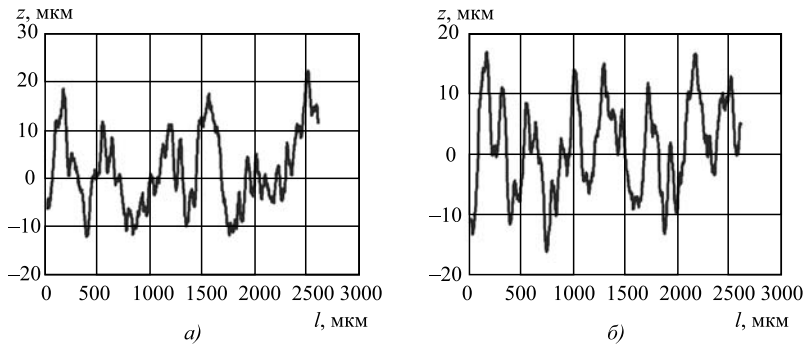


Рис. 10. Результаты моделирования поверхности АШК с зернистостью 80/63 мкм (*а*) и 50/40 мкм (*б*)

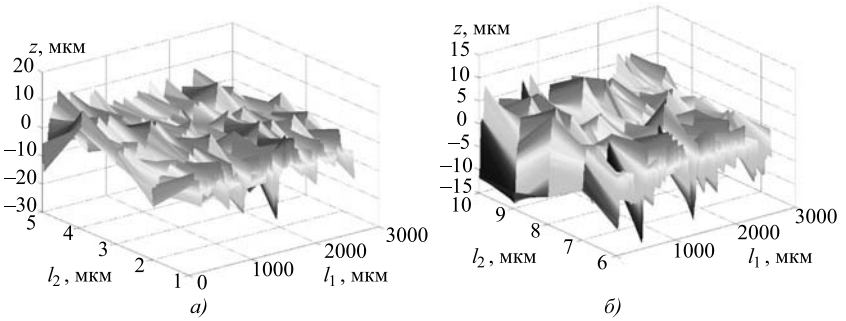


Рис. 11. Фрагменты поверхностей АШК с зернистостью 80/63 мкм (*а*) и 50/40 мкм (*б*)

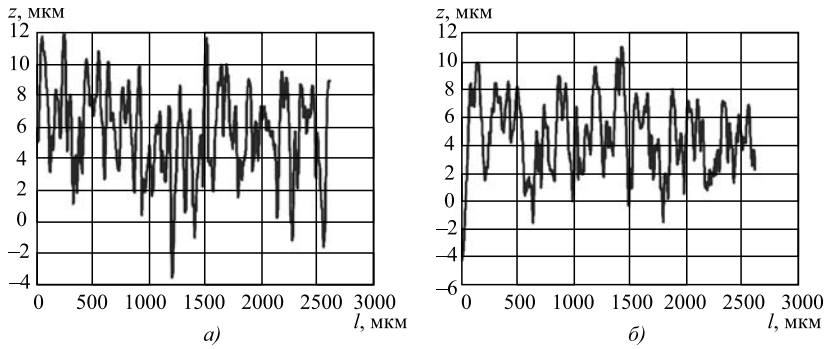


Рис. 12. Результирующие профили поверхностей АШК зернистостью 80/63 мкм (*а*) и 50/40 мкм (*б*)

гов различной зернистости, а на рис. 12 — результирующие профили соответствующих поверхностей, полученных в результате моделирования.

Проводили проверку гипотезы о нормальном законе распределения полученных профилей по критерию Колмогорова — Смирнова. Она подтвердилась.

Было установлено, что оценка параметров нормального закона распределения результирующего профиля зависит от числа единичных профилей, участвующих в его формировании, а также от среднего квадратичного отклонения (СКО) единичных профилей.

На рис. 13 приведены эти нормированные зависимости для случая, когда исходное СКО единичных профилей равно 1. При увеличении СКО прямо пропорционально изменяются результирующие оценки (математическое ожидание и СКО).

Сингулярное разложение результирующего профиля выявило трендовую составляющую и отсутствие периодических составляющих в разложении исходного единичного профиля. В качестве примера на рис. 14 приведена трендовая составляющая результирующего профиля АШК с зернистостью 80/63 мкм.

Разработанная модель позволила установить основные свойства поверхности алмазного шлифовального круга.

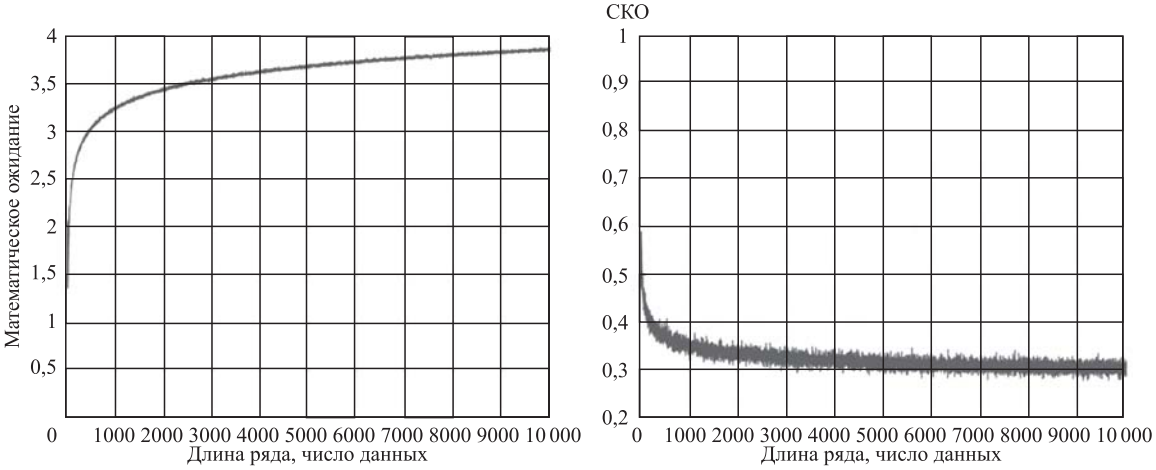


Рис. 13. Нормированное изменение оценок математического ожидания и СКО результирующего профиля

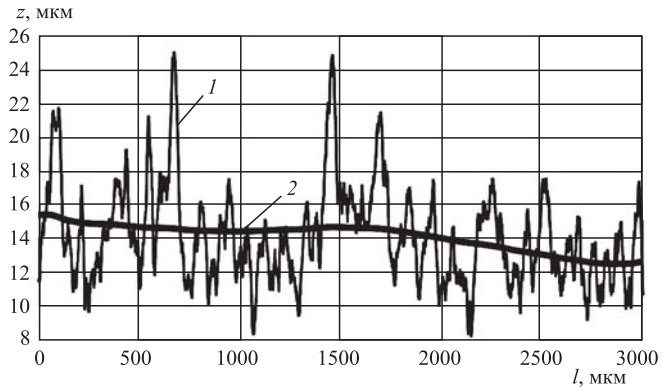


Рис. 14. Результирующий профиль (*1*) поверхности АШК зернистостью 80/63 мкм и его трендовая составляющая (*2*)

Выводы:

1. Анализ профилограмм рабочей поверхности алмазного круга позволяет принять гипотезу о стационарности и эргодичности случайного процесса распределения микронеровностей по его поверхности.

2. В результате сингулярного разложения профилграмм установлено, что собственные векторы разложения не имеют трендовой составляющей, но содержат периодические составляющие, зависящие от марки АШК, и случайную составляющую в рамках принятой гипотезы, хорошо аппроксимирующуюся АРСС-моделью.

3. Проведённый гармонический анализ собственных векторов позволил установить, что для построения модели профилограммы достаточно ограничиться 10...12 собственными векторами, аппроксимируя их соответствующими синусоидальными функциями. Моделирование рабочей поверхности АШК показало достаточно хорошее совпадение с расчётными данными, ошибка моделирования не превысила 10 %.

4. Получена модель результирующего профиля путём наложения друг на друга смоделированных единичных профилей со случайной фазой, имеющей равномерное распределение в диапазоне от 0 до 2π.

5. Гипотеза о нормальном законе распределения полученных результирующих профилей по критерию Колмогорова — Смирнова подтвердилась.

6. Установлено, что оценка параметров нормального закона распределения результирующего профиля зависит от числа единичных профилей, участвующих в его формировании, а также от СКО единичных профилей. При увеличении этого СКО прямо пропорционально изменяются результирующие оценки.

7. Сингулярное разложение результирующего профиля выявило трендовую составляющую и отсутствие периодических составляющих, присутствующих в разложении исходного единичного профиля.

Библиографические ссылки

1. **Елисеев Д.С., Саушкин Б.П.** Электроэрозионная обработка изделий авиационно-космической техники. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 437 с.

2. **Авдеева О.В., Артамонов Д.В., Семенов А.Д., Никиткин А.С.** Автоматизация процесса электроэрозионной обработки с использованием метода экстремального комбинированного управления // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. 2013. № 4 (28). С. 212—224.

3. **Голяндина Н.Э.** Метод Гусеница-SSA: прогноз временных рядов: учеб. пособие. СПб.: Изд-во С.-Петербургского государственного университета, 2004. 52 с.

4. **Семёнов А.Д., Артамонов Д.В., Брюхачев А.В.** Идентификация объектов управления. Пенза, ПГУ, 2005. 211 с.

Ссылка для цитирования

Семенов А.Д., Авдеева О.В. Анализ топологии поверхности алмазного шлифовального круга с использованием сингулярного разложения // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 1. С. 8—13.

УДК 53.089.5

С.Н. Григорьев-Фридман
(АО «Нижегородское НПО им. М.В. Фрунзе»)
sergey-fridman@mail.ru

АВТОМАТИЧЕСКИЙ СПОСОБ РЕГУЛИРОВКИ КОЭФФИЦИЕНТА СТОЯЧЕЙ ВОЛНЫ ПО НАПРЯЖЕНИЮ И НЕРАВНОМЕРНОСТИ ПО АЧХ В СВЧ-АТТЕНЮАТОРАХ

Рассмотрено техническое применение автоматического способа регулировки коэффициента стоячей волны по напряжению ($КСВ_U$) и неравномерности по амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) в СВЧ-аттенюаторах взамен прежних — стационарного и динамичного (ручного) способов регулировки.

Ключевые слова: коэффициент стоячей волны по напряжению; неравномерность по амплитудно-частотной характеристике; СВЧ-аттенюатор; стационарный дискретный, динамичный, непрерывный, ручной, автоматический способы регулировки; электромагнитная волна; электромагнитное поле; волновод; микрополосковая линия; падающая и отражённая волны; индуктивность; ёмкость; резистор.

The technical application of the automatic adjusting method of the standing wave coefficient by voltage (SWC_U) and nonuniformity by the amplitude-frequency characteristic (AFC) in the microwave attenuators instead of the former — stationary and dynamic (manual) adjustment methods is considered.

Keywords: standing wave coefficient by voltage; nonuniformity by amplitude-frequency characteristic; microwave attenuator; stationary discrete, dynamic, continuous, manual, automatic adjustment methods; electromagnetic wave; electromagnetic field; waveguide; microstrip line; incident and reflected waves; inductance; capacitance; resistor.

Введение. Развитие системы автоматизированного проектирования (САПР) радиотехнических устройств СВЧ-диапазона, автоматизация производства СВЧ-элементов, необходимость повышения качественных показателей разрабатываемых устройств, сокращения сроков разработки электронных изделий требуют создания новых точных и высокопроизводительных средств измерений. В настоящее время точность согласованных резисторных СВЧ-аттенюаторов повышенной мощности во многом обеспечивается за счёт использования дорогих высококачественных СВЧ-узлов, которые в последнее время практически достигли своего совершенства, что, видимо, вызвало определённый застой в области развития СВЧ-измерений в первом и втором десятилетиях XXI в.

В течение длительного времени проблеме упрощения СВЧ-тракта автоматических согласованных измерителей больших мощностей уделяется весьма пристальное внимание. Были разработаны методы калибровки СВЧ-тракта, направленные на повышение точности измерений при смягчении требований к качеству узлов. При этом широкое развитие получают методы, позволяющие автоматизировать процесс регулировки коэффициента стоячей волны по напряжению $КСВ_U$ и оптимизировать снижение неравномерности СВЧ-сигнала по амплитудно-частотной характеристике (АЧХ).

До разработки автором статьи цифрового способа регулировки $КСВ_U$ и неравномерности АЧХ сигнала [1, 2] радиоспециалисты и регулировщики радиоэлектронной аппаратуры довольствовались лишь использованием непроизводительного аналогового способа регулировки $КСВ_U$ и неравномерности АЧХ, при котором невозможно говорить о какой-либо цифровой оперативной регулировке и автоматизации самого процесса измерений и обработки данных в СВЧ-приборах.

В настоящее время в России сложилась ситуация, когда находящиеся в эксплуатации согласованные резисторные СВЧ-аттенюаторы повышенной мощности морально и физически устарели, новые образцы, как и зарубежные, серийно не выпускаются, а приборы зарубежного производства по стоимости доступны не для всех отечественных потребителей. В этих условиях актуальной представляется задача создания принципиально нового прибора,

не имеющего в своём составе дорогостоящих СВЧ-компонент, обладающего достаточно широким спектром функциональных возможностей, пригодного для решения большого круга инженерных задач. И, что очень важно, прибор должен быть максимально автоматизирован, оперативно и точно обрабатывать аналоговую информацию, переводя её в данные цифрового формата, и при этом иметь наименьшую вносимую погрешность измерений.

В связи с возросшими метрологическими требованиями к условиям эксплуатации проектируемой конструкции СВЧ-аттенюатора (большая мощность рассеяния и высокое согласование в относительно широком частотном диапазоне) следует применять схему микрополосковой линии (МПЛ) подвешенного типа, находящейся внутри коаксиального тракта, представленного прямоугольным волноводом, стенки которого изготовлены из теплопроводящего металлического сплава. Выход аттенюатора оптимально разделяется на два взаимовлияющих канала, согласованных на нагрузку 50 Ом, — один для измерения частоты сигнала, другой для замеров мощности (рис. 1). В противном случае технологически трудно произвести высокое согласование на входе и выходах, числом более двух, а также при этом возрастают габариты и масса конструкции аттенюатора.

Из рис. 1 следует, что число и толщина нанесённых на поверхность подложек, тонких плёнок резисторов, резисторных (односторонних или двусторонних) плат и общее число резистивных пакетов определяются задаваемой номинальной мощностью СВЧ-аттенюатора, частотным диапазоном, теплопроводностью и толщиной материала подложек.

Ранее разработанные способы калибровки СВЧ-тракта, направленные на повышение точности измерений, при смягчении требований к качеству узлов для согласования и измерения повышенной СВЧ-мощности в настоящее время уже не устраивают потребителей.

Физическая модель СВЧ-аттенюатора. Конструкция аттенюатора представляет собой последовательно соединённые между собой секции МПЛ подвешенного типа, находящейся внутри прямоугольного волновода [2], стенки которого состоят из крышек профиль-радиатора и двух одинаково теплоотводящих частей алюминиевого корпуса, стянутых крепёжными болтами. Сам корпус совмещён с теплорассеивающим радиатором, выполненным из алюминиевого сплава В-95 в виде стандартного профиля. Пакеты из резисторных плат образуют центральную энергетическую жилу СВЧ-тракта, закрепляемую внутри волновода, стенки которого и корпус радиатора посажены на общий провод — землю. Снаружи теплоотводящие части корпуса-основания и рёбра радиатора принудительно обдуваются окружающим воздухом при помощи двух мощных вентиляторов. В конструкции аттенюатора обеспечено минимальное тепловое сопротивление между боковыми гранями резисторных плат и стенками волновода (рис. 2...4).

Принцип работы устройства. В основе предлагаемого устройства лежит принцип плавного (непрерывного) изменения эквивалентной электроёмкости $C_э$ между плоскостью с нанесёнными на подложку резистивными плёнками и верхней внутренней гранью волновода, приводящего к изменению волнового сопротивления СВЧ-тракта Z_0 и модуля $|\Gamma|$ — коэффициента отражения СВЧ-волны в аттенюаторе. Следовательно, в итоге изменяются $КСВ_U$ и степень неравномерности АЧХ в СВЧ-аттенюаторе [1, 2].

Согласно рис. 2 вращательное движение штока по резьбе в отверстии алюминиевого прессованного профиля — радиатора (ПК12293 ГОСТ 8617—81) позволяет соединённым отражательному и поглотительному дискам возвратно-поступательно двигаться в вертикальной плоскости, параллельно плате с напылённым на её

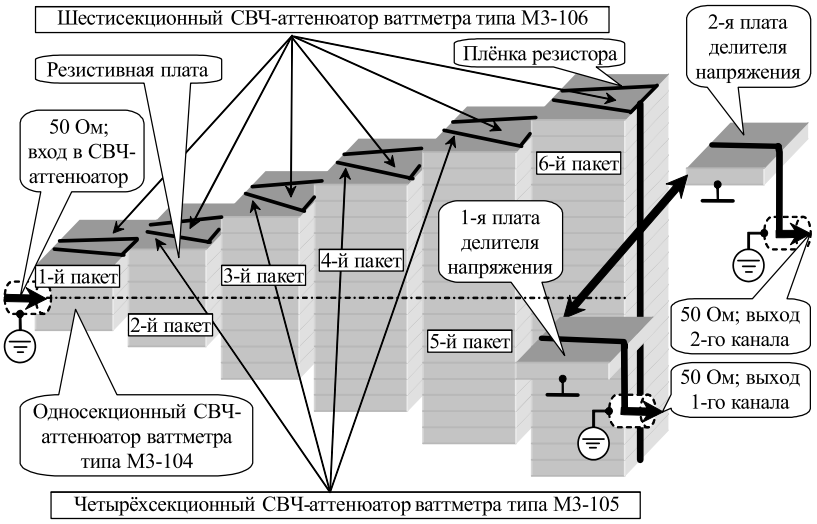


Рис. 1. Структурно-объёмная схема устройства СВЧ резисторных согласованных аттенюаторов в ваттметрах малой мощности типа М3-104 и повышенной мощности типов М3-105, М3-106

поверхность резистором. При этом изменяется расстояние между поверхностью резистивной плёнки и соединёнными поглощающим и отражающим дисками, а значит, изменяются эквивалентная ёмкость $C_э$ и КСВ$_U$. Изменением высоты расположения соединённых поглощающего и отражающего дисков над резистивной плёнкой добиваются одновременного изменения эквивалентной ёмкости $C_э$ и максимального поглощения поглощающим диском пространственных отражённых волн [1—10]. На рис. 2 устройство для регулировки КСВ$_U$ в аттенюаторе монтируется в верхней части (потолке) СВЧ-тракта так, чтобы была возможность регулировать возмущения, вносимые в распределение электромагнитных полей для падающей, отражённой и стоячей волн.

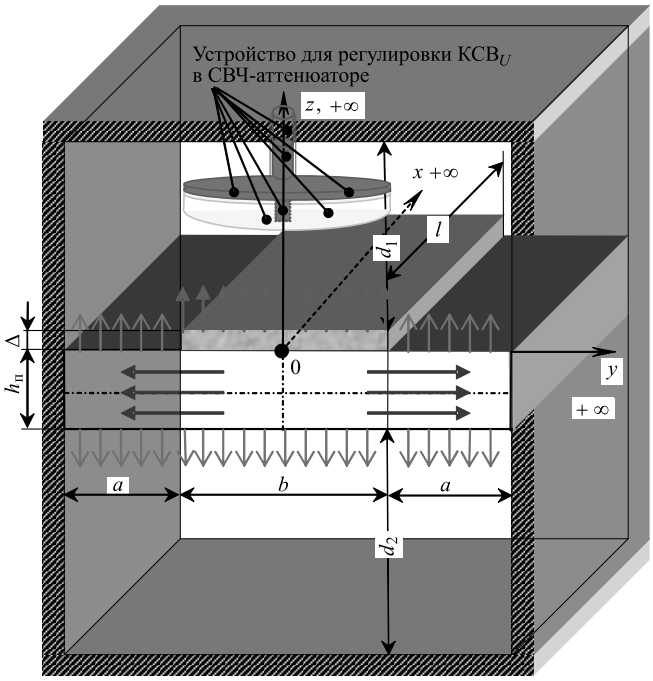


Рис. 2. Поперечный разрез модели прямоугольного волновода, керамической подложки и нанесённого тонкоплёночного резистора при $d_1 > 0$ и $d_2 > 0$ с использованием устройства для регулировки КСВ$_U$ и неравномерности АЧХ сигнала

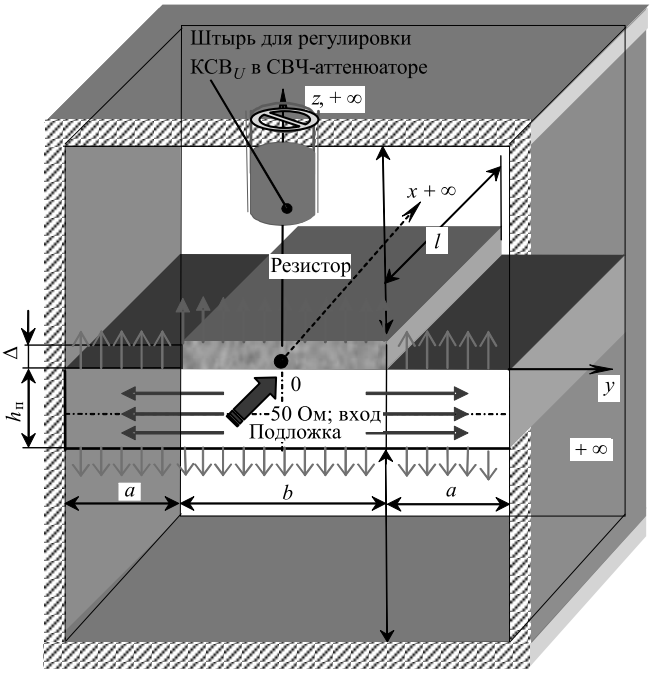


Рис. 3. Поперечный разрез модели прямоугольного волновода, керамической подложки и нанесённого тонкоплёночного резистора при $d_1 > 0$ и $d_2 > 0$ с использованием резьбового штыря или штока в качестве устройства для регулировки КСВ$_U$ и неравномерности АЧХ сигнала

Диаметры отражательного алюминиевого диска и поглощательного неметаллического диска выбираются таким образом, чтобы обеспечивалось максимальное перекрытие площади напылённых резистивных плёнок с центром, проекция которого совпадает с точкой, лежащей на горизонтальной оси симметрии плат и секций СВЧ-аттенюатора в целом, вследствие симметричного нанесения резистивного слоя на подложки и симметрии всей волноводной МПЛ.

При использовании только резьбовых ферроэпоксидных штырей или штоков в качестве устройства для регулировки КСВ$_U$ и неравномерности АЧХ сигнала, изображённых на рис. 3, экспериментальные данные демонстрируют снижение КСВ$_U$ только на 0,5...0,8 %. При применении вертикальных ножей из нихрома, как показано на рис. 4, экспериментальные данные дают снижение КСВ$_U$ до 1 %. Таким образом, не удаётся существенно понизить КСВ$_U$ в СВЧ-тракте аттенюатора. Изменяя глубину погружения пластинчатого ножа в волновод, изменяют мощность СВЧ-сигнала, поглощаемую погружённой нихромовой пластиной и рассеиваемую в ней тепловую энергию.

На рис. 3 штырь или шток для регулировки КСВ$_U$ в аттенюаторе монтируется в верхней части (потолке) СВЧ-тракта. Вертикальными стрелками изображена теплоотдача с поверхностей резистора и подложки в окружающее воздушное пространство. Горизонтальными стрелками показана передача тепла в толще подложки через боковые торцевые поверхности в структуру боковых стенок волноводного корпуса аттенюатора.

Следует отметить, что предельно допустимые значения ослабления сигнала в конструкции исследуемого аттенюатора, достигнутые при помощи резьбового штыря-штока или нихромового ножа [11], равны 20...25 дБ,

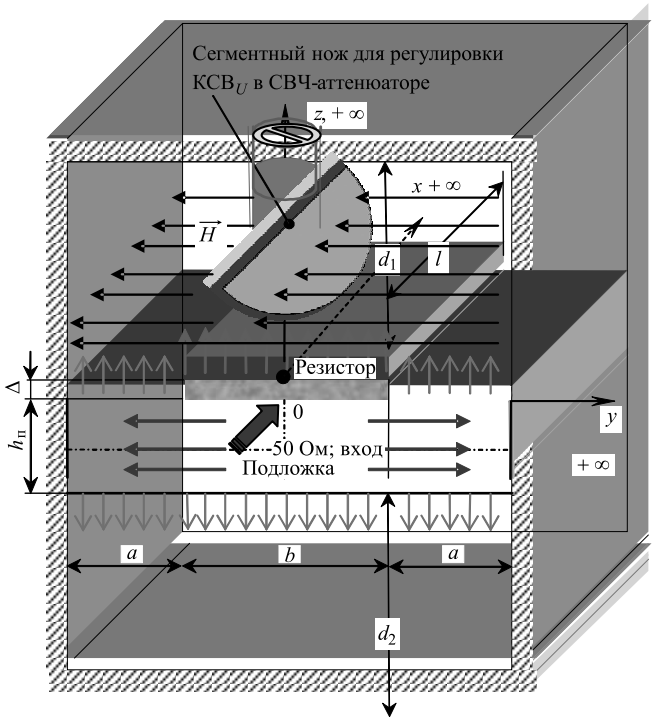


Рис. 4. Поперечный разрез модели прямоугольного волновода, керамической подложки и нанесённого тонкопленочного резистора при $d_1 > 0$ и $d_2 > 0$ с использованием сегментного ножа в качестве устройства для регулировки КСВ$_U$ и неравномерности АЧХ сигнала

тогда как по проектным требованиям, заложенным в техническом задании (ТЗ), необходимо ослабление 40 дБ.

На рис. 4 сегментный нож для регулировки КСВ$_U$ в аттенюаторе устанавливается в верхней части (потолке) СВЧ-тракта так, чтобы была возможность регулировать возмущения в распределении магнитных полей для падающей, отражённой и стоячей волн. Плоскость ножа с нанесённым на его поверхность нихромом всегда опускается в глубь волноводной шахты, строго по нормали к линиям напряжённости магнитного поля и одновременно по касательной к линиям напряжённости электрического поля.

Для обеспечения требований по КСВ$_U$, приведённых в таблице [12], необходимо учитывать, что КСВ$_U$ зависит не только от точности выполнения сопротивлений, но и от качества изготовления и свойств многочисленных контактов между подложками в каждом пакете и между пакетами, а также между оконечными платами и основанием корпуса. Каждый из контактов представляет собой неоднородность в СВЧ-тракте, вызывающую частичное отражение волны и существенно ухудшающую согласование входа и выхода аттенюатора.

Необходимо отметить, что центры зон перекрытия отражательным и поглотительным дисками микрополосковых резистивных структур выбираются из условия непопадания в резонансные точки $\left(\lambda, \frac{\lambda}{2}, \frac{\lambda}{4}, \frac{\lambda}{8}, \frac{\lambda}{16}, \frac{\lambda}{32}, \ldots, \frac{\lambda}{2^n}\right.$, где $n = 0, 1, 2, 3, \ldots$), в которых возможно образование различных мод отражённых волн [3—8, 13—18], приводящее к существенному искажению неравномерности АЧХ сигнала, полученного на выходе СВЧ-тракта, а также к резкому увеличению КСВ$_U$ — до 1,25...1,40.

Автоматический способ регулировки КСВ$_U$ и неравномерности АЧХ в СВЧ-аттенюаторе. Задача, решаемая с помощью съёмного испытательного механического стенда для автоматической регулировки КСВ$_U$ и неравномерности по АЧХ в аттенюаторе (рис. 5), направлена в первую очередь на автоматизацию процесса управления и контроля динамичного (ручного) способа регулировки КСВ$_U$ и неравномерности по АЧХ в СВЧ-приборах в соответствии с работой [14]. Технический результат от использования предлагаемого стенда заключается не столько в возможности регулировки КСВ$_U$ в СВЧ-приборах в режиме реальной нагрузки и упрощении самого процесса регулировки, сколько в высокой экономической эффективности, оперативности, многофункциональности и возросшем качестве цифровой обработки полученного сигнала в СВЧ-тракте аттенюатора. Также следует отметить, что контроль и управление процессом измерений

КСВ$_U$ и неравномерность по АЧХ аттенюатора — нагрузки

СВЧ-ваттметры поглощаемой мощности	Неравномерность по АЧХ и КСВ$_U$ в диапазоне частот		
	50 Гц $\leqslant f \leqslant$ 0,8 ГГц	0,8 ГГц $< f \leqslant$ 1,2 ГГц	1,2 ГГц $< f \leqslant$ 1,6 ГГц
М3-104; P_{max} = 0,1 кВт	±0,5 дБ; 1,10	±0,8 дБ; 1,10 (|Г| ≈ 0...4,8 %)	±1,2 дБ; 1,10
М3-105; P_{max} = 0,5 кВт		±0,8 дБ; 1,15 (|Г| ≈ 4,8...7,0 %)	±1,2 дБ; 1,15
М3-106; P_{max} = 1,5 кВт	±0,8 дБ; 1,15	±1,2 дБ; 1,15	—
М3-108; P_{max} = 2,0 кВт	±0,40 дБ; 1,035	±0,50 дБ; 1,040	1,2 ГГц $< f \leqslant$ 2,0 ГГц ± 0,55 дБ; 1,050

и регулировкой КСВ$_U$ и неравномерности по АЧХ в СВЧ-приборах осуществляются с помощью пакета современных компьтерных программ, заложенных в программный комплекс «Прорыв-1» для автоматического управления регулировкой и измерением КСВ$_U$ и неравномерности по АЧХ, с помощью одного или нескольких автономных исполнительных механизмов, выполненных на основе чувствительного микродвигателя и многоступенчатого редуктора, посредством обмена информацией и передачи тактового импульсного сигнала управления от центра управления и контроля — компьютера через интерфейс в преобразовательный блок. Последний преобразует, используя цепи ЦАП—АЦП, цифровой сигнал в аналоговый, понятный для выполнения команды, поступившей из центра управления в исполнительный блок, смонтированный на съёмном экспериментальном стенде. Исполнительный блок настраивает СВЧ-аттенюатор на возможно минимальные значения по КСВ$_U$ и неравномерности АЧХ, заложенные в меню компьютерных программ и предлагаемые в техническом задании (ТЗ) на проектирование и технологию изготовления.

Программный комплекс «Прорыв-1» используется для автоматического управления

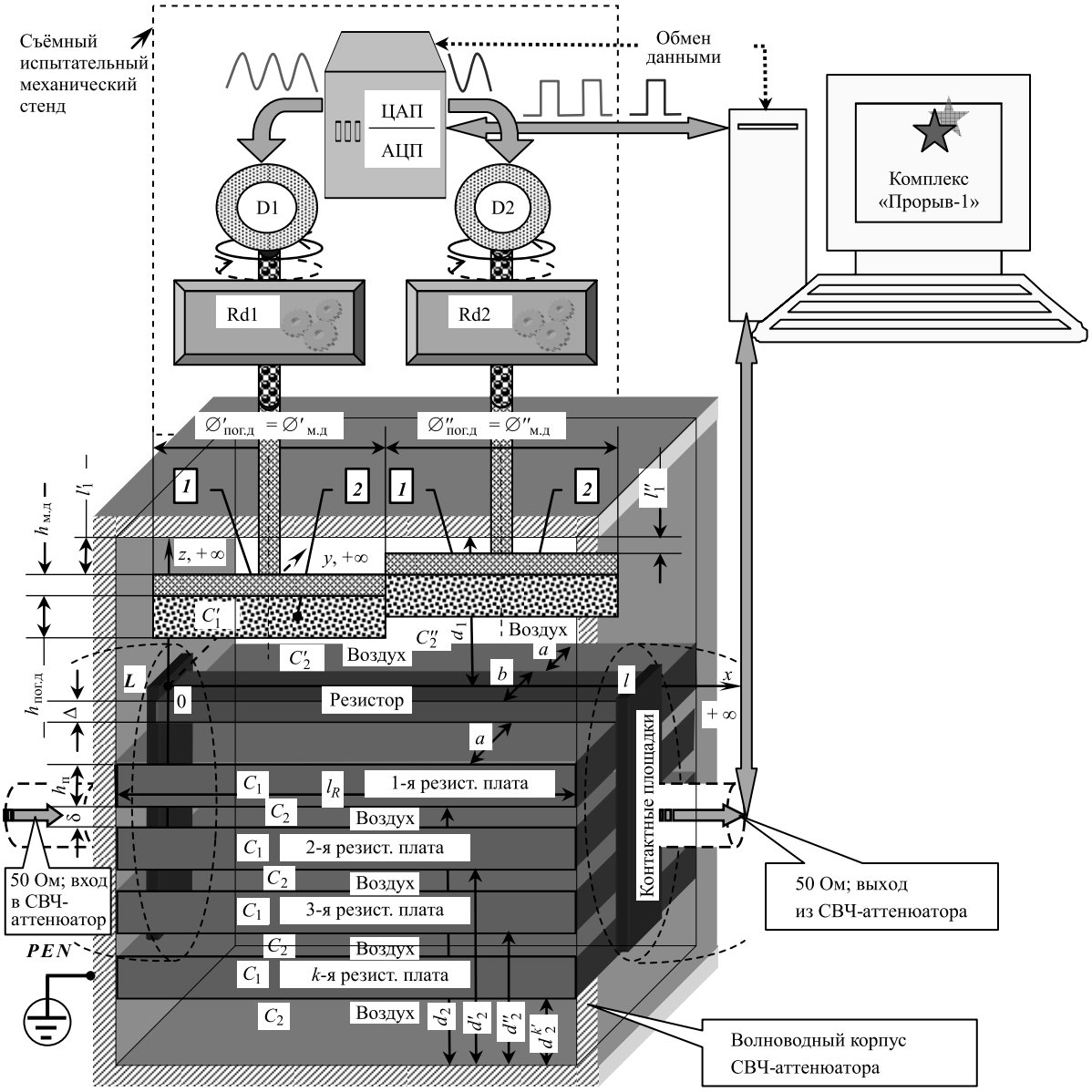


Рис. 5. Продольный разрез модели прямоугольного волновода, керамической подложки и нанесённого тонкоплёночного резистора при $d_1 > 0$ и $d_2 \geqslant 0$ с использованием съёмного испытательного механического стенда для автоматической регулировки КСВ$_U$ и неравномерности по АЧХ в аттенюаторе

регулировкой и измерением КСВ$_U$ и неравномерности по АЧХ с помощью блока ЦАП—АЦП и одного или нескольких автономных исполнительных механизмов, выполненных на основе микродвигателей D1, D2 и редукторов Rd1, Rd2.

На рис. 5 съёмный испытательный механический стенд для автоматической регулировки КСВ$_U$ и неравномерности по АЧХ в аттенюаторе устанавливается в верхней части (потолке) СВЧ-тракта так, чтобы была возможность регулировать эквивалентную ёмкость резистора $C_{1э}$ или $C_{1э} + C_{2э}$ с использованием регулировочного винта(-ов) *1* и поглощающего материала *2*.

Изготавливать СВЧ-аттенюаторы в едином корпусе вместе со стендом экономически нецелесообразно (увеличивается общий вес, внешние габариты и себестоимость). Гораздо лучше использовать съёмный стенд при ремонтно-восстановительных и пусконаладочных работах или разовых испытательных циклах в органах поверки метрологической службы.

Программный комплекс «Прорыв-1» автоматически решает задачу многопараметрической оптимизации измерительных параметров, затрачивая минимально возможное время на регулировку и измерения (несколько минут), в то время как при динамическом, ручном способе для этого требуется больше часа. Экономический эффект от внедрения разработанного автоматического способа контроля и управления регулировкой и измерениями КСВ$_U$ и неравномерности по АЧХ наглядно ощутим при серийном производстве радиоизмерительных приборов (более 100...1000 приборов в год).

Программный комплекс «Прорыв-1» для автоматического управления регулировкой и измерением КСВ$_U$ и неравномерности по АЧХ в СВЧ-приборах был разработан в ФГУП ННИПИ «Кварц» в 2009 г. специально для решения этой технической задачи.

В случае применения устройства для регулировки КСВ$_U$ в СВЧ-аттенюаторе [1, 14] суммарная эквивалентная ёмкость резистора номиналом R_0 определяется собственной и вносимой эквивалентными электроёмкостями резистора (см. рис. 5): $C_{\Sigma э} = C_{э соб} + C_{э вн}$ [3].

Эквивалентная собственная электроёмкость резистора (без применения устройства для регулировки КСВ$_U$ в СВЧ-аттенюаторе) определяется как электрическая ёмкость плоского конденсатора с прямоугольными обкладками [3, 13—18] в соответствии с формулой

$$C_э = C_1 + C_{2-3} = C_1 + \frac{C_2 C_3}{C_2 + C_3} =$$

$$= \varepsilon_0 S \frac{\varepsilon_1}{d_1} + \varepsilon_0 S \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_2 d_2 + \varepsilon_1 h_п} =$$

$$= \varepsilon_0 \underbrace{l_R b}_{S} \varepsilon_1 \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} h_п} \right).$$

При расчётах используются следующие величины: $h_п$ — толщина керамической подложки, мм; Δ — толщина плёнки резистора, $\Delta = 1...5$ мкм, $0 < \Delta \ll h_п$; $\delta = \delta_k(k) = 1$ мм/k — толщина воздушного зазора между резистивными платами, мм; $k \geqslant 1$ — число резистивных плат в пакете, $2 \leqslant k \leqslant \left(\frac{2 l_R}{e(\Delta + h_П + \delta_k)} + 1 \right)$; $e \approx 2{,}718281828...$ — основание натурального логарифма (число Непера); S — площадь резистора, мм^2; $\varepsilon_1 = 1{,}00057$ — диэлектрическая проницаемость первой среды — воздуха (сухого) при $t = +20...25$ °С; $\varepsilon_2 = 9{,}6 \pm 0{,}2$ — диэлектрическая проницаемость второй среды — керамической подложки поликора, $\varepsilon_2 = 9{,}35...10{,}0$ — диэлектрическая проницаемость керамической подложки 22ХС при $t = +20...25$ °С; $l_R = 28{,}5...58{,}5$ мм — длина резистивной плёнки; $l_{плтR} = 30...60$ мм — длина резистивной платы; $d_1 > 0$ — расстояние от потолка (верхней внутренней грани волновода) до плоскости нанесения резистора, мм; $d_2 > 0$ — расстояние от пола (нижней внутренней грани волновода) до плоскости нанесения резистора, мм; $\varnothing'_{пог.д}, \varnothing'_{м.д}$ — диаметры металлического (отражающего) и неметаллического (поглощающего) дисков в первом устройстве для регулировки КСВ$_U$, $\varnothing'_{пог.д} = \varnothing'_{м.д} = 17$ мм; $\varnothing''_{пог.д}, \varnothing''_{м.д}$ — диаметры металлического (отражающего) и неметаллического (поглощающего) дисков во втором устройстве для регулировки КСВ$_U$, $\varnothing''_{пог.д} = \varnothing''_{м.д} = 17 \leqslant 17$ мм; $h_{пог.д} = 1...7$ мм — толщина неметаллического (поглощающего) диска; $\varepsilon_{пог.д}$ — диэлектрическая проницаемость рутила TiO_2 при $t = +20...25$ °С, $\varepsilon_{пог.д} = 40...80$ (обычно 60); $h_{м.д} = 1$ мм — толщина металлического (отражающего) диска; $l'_1(l''_1)$ — глубина завинчивания регулировочного винта(-ов) во внутрь волновода, $l'_1(l''_1) \geqslant 0$, мм; a — теплоизолирующая диэлектрическая зона резистора (исходя из условия симметричности напыления плёнки резистора и всей конструкции СВЧ-аттенюатора в целом как волноводной СВЧ МПЛ), мм.

Вносимая электроёмкость резистора C'_{1-2} в зоне действия первого регулировочного устройства определяется выражением

$$C'_{1-2} = \frac{1}{G'_1} = \frac{C'_1 C'_2}{C'_1 + C'_2} =$$

$$= \frac{\dfrac{\varepsilon_0 \varnothing'_{\text{пог.д,м.д}} b \varepsilon_{\text{пог.д}}}{h_{\text{пог.д}}} \dfrac{\varepsilon_0 \varnothing'_{\text{пог.д,м.д}} b \varepsilon_1}{d_1 - (h_{\text{пог.д}} + h_{\text{м.д}} + l'_1)}}{\dfrac{\varepsilon_0 \varnothing'_{\text{пог.,м.д}} b \varepsilon_{\text{пог.д}}}{h_{\text{пог.д}}} + \dfrac{\varepsilon_0 \varnothing'_{\text{пог.д,м.д}} b \varepsilon_1}{d_1 - (h_{\text{пог.д}} + h_{\text{м.д}} + l'_1)}} =$$

$$= \frac{\varepsilon_0 \varnothing'_{\text{пог.д,м.д}} b \varepsilon_1 \varepsilon_{\text{пог.д}}}{\varepsilon_1 h_{\text{пог.д}} + \varepsilon_{\text{пог.д}} (d_1 - (h_{\text{пог.д}} + h_{\text{м.д}} + l'_1))} =$$

$$= \frac{\varepsilon_0 \varnothing'_{\text{пог.,м.д}} b}{\dfrac{h_{\text{пог.д}}}{\varepsilon_{\text{пог.д}}} + \dfrac{d_1 - (h_{\text{пог.д}} + h_{\text{м.д}} + l'_1)}{\varepsilon_1}}.$$

Для случая, когда применяются два разных, но однотипных устройства для регулировки КСВ$_U$ в СВЧ-аттенюаторе, суммарная эквивалентная ёмкость резистора определяется с помощью выражения

$$C_{\Sigma\text{э}} = C_{\text{э собственная}} + C_{\text{э вносимая}} =$$

$$= C_{1-2-1} + C'_{1-2} + C''_{1-2} =$$

$$= \tilde{C}_1 + \frac{C'_1 C'_2}{C'_1 + C'_2} + \frac{C''_1 C''_2}{C''_1 + C''_2} =$$

$$= \frac{\varepsilon_0 \varnothing'_{\text{пог.д,м.д}} b}{\dfrac{h_{\text{пог.д}}}{\varepsilon_{\text{пог.д}}} + \dfrac{d_1 - (h_{\text{пог.д}} + h_{\text{м.д}} + l'_1)}{\varepsilon_1}} +$$

$$+ \frac{\varepsilon_0 \varnothing''_{\text{пог.д,м.д}} b}{\dfrac{h_{\text{пог.д}}}{\varepsilon_{\text{пог.д}}} + \dfrac{d_1 - (h_{\text{пог.д}} + h_{\text{м.д}} + l''_1)}{\varepsilon_1}} +$$

$$+ \varepsilon_0 l_R b \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_2 d_2 + \varepsilon_1 h_{\text{п}}} =$$

$$= \varepsilon_0 \varepsilon_1 b \left(\frac{\varnothing'_{\text{пог.д,м.д}}}{\dfrac{h_{\text{пог.д}} \varepsilon_1}{\varepsilon_{\text{пог.д}}} + d_1 - (h_{\text{пог.д}} + h_{\text{м.д}} + l'_1)} + \right.$$

$$\left. + \frac{\varnothing''_{\text{пог.д,м.д}}}{\dfrac{h_{\text{пог.д}} \varepsilon_1}{\varepsilon_{\text{пог.д}}} + d_1 - (h_{\text{пог.д}} + h_{\text{м.д}} + l''_1)} + \frac{l_R}{d_2 + \dfrac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} h_{\text{п}}} \right).$$

В этом случае значение общего сопротивления (импеданса) рассматриваемого резистора с номиналом R_0 равно чисто активным потерям $R_{\text{акт}}$, выражающим джоулевые потери на нагревание и частичное переизлучение тепловых волн в ИК-диапазоне, при резонансной частоте $\omega_{\text{рез}} = \dfrac{1}{\sqrt{L_{\Sigma\text{э}} C_{\Sigma\text{э}}}}$:

$$Z_R = R_{\text{акт}} + \underbrace{(X_L - X_C)}_{R_{\text{реакт}}} =$$

$$= \sqrt{R^2_{\text{акт}} + \underbrace{\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}_{0\text{⌟}}} \approx R_{\text{акт}}.$$

Причём при частоте сигнала, стремящейся к бесконечности, имеем также

$$\lim_{\omega \to +\infty} Z_{0R} = \lim_{\omega \to +\infty} \sqrt{\frac{L_{\text{э}R}}{C_{\text{э}R}}} \approx 1.$$

В конечном итоге получаем, что $\lim\limits_{\omega \to \infty} \text{КСВ}_U \approx 1{,}0$. Реально можно таким способом, используя устройство(-а) для регулировки КСВ$_U$ в СВЧ-аттенюаторах, достигнуть значений КСВ$_U \approx 1{,}01 \ldots 1{,}05$.

Подбирая соответствующие толщину неметаллического (поглощающего) диска $h_{\text{пог.д}}$, диаметры металлического (отражающего) $\varnothing'_{\text{м.д}}$ и неметаллического (поглощающего) $\varnothing'_{\text{пог.д}}$ дисков первого устройства для регулировки КСВ$_U$ (или обоих устройств одновременно) [1, 2, 14] и характерные свойства самого материала для поглощающих дисков, можно добиться того, чтобы влияние общей эквивалентной индуктивности резистивной полоски было минимальным и компенсировалось бы возросшим влиянием создаваемой суммарной эквивалентной электроёмкости резистора. При этом следует учитывать, что данный способ помогает одновременно в достаточно широком диапазоне регулировать неравномерность АЧХ выходного сигнала СВЧ-аттенюатора: от ±0,15 до ±0,75 дБ при ослаблении входного сигнала 25...60 дБ.

Экспериментальные данные. В результате контрольных испытаний внедрённой конструкции устройства, для СВЧ-аттенюаторов в режиме реальной нагрузки, например для ваттметра М3-108 ($P_{\text{ном.сигнала}}$ = 2 кВт и 50 Гц $\leqslant f \leqslant$ 2 ГГц), автоматическим способом были достигнуты следующие результаты: КСВ$_U$ = 1,035...1,050 < 1,15 (четырёхсекционный резисторный аттенюатор) и неравномерность АЧХ ± 0,40...0,55 дБ при ослаблении поступающего сигнала 40 дБ.

Выводы. Анализ разработанного устройства [1] для регулировки КСВ$_U$ и неравномерности АЧХ с применением автоматического способа [14] выявил ряд его положительных особенностей и преимуществ по сравнению с ранее используемыми устройствами:

1. Возможность регулировки и измерения КСВ$_U$ в СВЧ-приборах в режиме реального сигнала до максимального значения граничной частоты и номинальной мощности.

2. Впервые достигнута возможность непрерывного и более качественного режима регулировки и измерения КСВ$_U$ и неравномерности АЧХ в СВЧ-приборах автоматическим способом, в отличие от стационарного и динамического (ручного) способов, когда регулировка и измерения указанных параметров производились в режиме обработки аналогового сигнала, а не в цифровом формате.

3. Программный комплекс «Прорыв-1» автоматически решает задачу многопараметрической оптимизации измерительных параметров, затрачивая минимально возможное время на регулировку и измерения (1...10 мин), в то время как при динамическом (ручном) способе для этого потребуется 1...3 ч.

4. Экономический эффект от внедрения разработанного автоматического способа контроля и управления регулировкой и измерениями КСВ$_U$ и неравномерностью по АЧХ наглядно ощутим при крупносерийном производстве радиоизмерительных приборов.

5. Простота конструкции, технологичность изготовления при серийном производстве и эргономичность разработанного устройства позволяют обслуживающему персоналу оперативно и безопасно выполнять ремонтно-восстановительные и регулировочные работы в ваттметрах типов М3-104, М3-105, М3-106 и М3-108, дают возможность быстро провести радиоизмерения и точную коррекцию КСВ$_U$ в СВЧ-аттенюаторе, что позволяет резко повысить производительность труда при снижении нормативного времени.

Библиографические ссылки

1. **Григорьев С.Н.** Устройство для регулировки коэффициента стоячей волны по напряжению в СВЧ-приборах // Патент РФ № 2346362. 2009. Бюл. ФИПС РФ № 4.

2. **Григорьев С.Н.** Устройство для регулировки коэффициента стоячей волны по напряжению в СВЧ-аттенюаторах // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2009. Т. 12. № 4. С. 52—55.

3. **Неганов В.А., Осипов О.В., Раевский С.Б., Яровой Г.П.** Электродинамика и распространение радиоволн / под ред. проф. В.А. Неганова и С.Б. Раевского: учеб. для вузов. М.: Радиотехника, 2009. 744 с.

4. **Горячев Ю.А.** Исследование широкополосных аттенюаторов на основе тонкоплёночных резистивных линий: Дис. ... канд. техн. наук. Горький, ГНИПИ, 1970. С. 15—195.

5. **Шутенко М.С.** Элементы волноводных трактов. Сер. Радиолокационная техника. М.: Воениздат, 1972. С. 5—48, 79—105, 109—131.

6. **Изюмова Т.И., Свиридов В.Т.** Волноводы, коаксиальные и полосковые линии. Сер. Массовая радиобиблиотека. Вып. 876. М.: Энергия, 1975. С. 4—110.

7. **Меркулов В.В., Синёва И.С.** О многократных отражениях в неоднородной линии передачи // Радиоэлектроника. № 5. 2000. С. 1—8.

8. **Иванов А.Е.** О расчёте тонкоплёночной волноводной согласованной нагрузки с учётом энергетического баланса // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 1998. Т. 1. № 2—3. С. 44—46.

9. **Сычёв А.Н.** Приближенный аналитический метод для анализа многопроводных, связанных, экранированных МПЛ на слоистой подложке // Радиоэлектроника. 2001. № 7. С. 8.

10. **Семёнов В.С., Дыбовский В.Г., Неведомский А.В.** Электромагнитное поле линейного переменного тока в плоскослоистой среде // Радиоэлектроника. 2000. № 6. С. 20—35.

11. **Клич С.М.** Проектирование СВЧ-устройств радиолокационных приёмников. М.: Советское радио, 1973. С. 267—279.

12. **Асташов О.К., Балло В.Л., Копытин Е.В., Григорьев С.Н.** Ваттметр поглощаемой мощности М3-104, М3-105, М3-106 ИЛГШ.411151.001 ТУ. Н. Новгород, Фрунзенец, ФГУП «Нижегородский завод им. М.В. Фрунзе», 2004. С. 12—20.

13. **Григорьев С.Н.** Методика расчёта и моделирование тонкоплёночного резистора // Обработка сигналов в системах наземной радиосвязи и оповещения (по материалам 15-й межрегиональной НТК Московского и Нижегородского отд. РНТОРЭС им. А.С. Попова. М.: МТУСИ, 2007. С. 251—266.

14. **Григорьев С.Н.** Способ автоматической регулировки технических характеристик в СВЧ-приборах и комплекс средств для его осуществления // Патент РФ № 2617150, 2017. Бюл. ФИПС РФ № 12.

15. **Рубанович М.Г., Горбачёв А.П., Востряков Ю.В., Разинкин В.П.** Математическая модель электромагнитных процессов в планарных плёночных резисторах // Известия вузов России. Сер. Радиоэлектроника. 2003. Вып. 3. С. 61—70.

16. **Бахарев С.В., Вольман В.И., Либ Ю.Н.** и др. Справочник по расчёту и конструированию СВЧ полосковых устройств. М.: Советское радио, 1982. 328 с.

17. **Кузнецов В.А., Долгов В.А., Коневских В.М.** и др. Измерения в электронике / под ред. В.А. Кузнецова: справочник. М.: Энергоатом, 1987. С. 124—161, 169—232.

18. **Билько М.И., Томашевский А.К.** Измерение мощности на СВЧ. М.: Радио и связь, 1986. С. 13—86, 112—127, 131—159.

Ссылка для цитирования

Григорьев-Фридман С.Н. Автоматический способ регулировки коэффициента стоячей волны по напряжению и неравномерности по АЧХ в СВЧ-аттенюаторах // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 1. С. 14—21.

УДК 007:159.955

А.Ф. Резчиков, д-р техн. наук, проф., чл.-кор. РАН
(Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва),
В.А. Кушников, д-р техн. наук, проф.
(Саратовский научный центр РАН, г. Саратов),
В.А. Иващенко, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., **Д.С. Фоминых,** канд. техн. наук,
А.С. Богомолов, канд. физ.-мат. наук, доц., **Л.Ю. Филимонюк,** канд. техн. наук
(Институт проблем точной механики и управления РАН, г. Саратов)

dm_fominyh@mail.ru

СНИЖЕНИЕ УЩЕРБА ОТ КРИТИЧЕСКИХ СОЧЕТАНИЙ СОБЫТИЙ ПРИ СВАРКЕ РОБОТИЗИРОВАННЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ

Рассмотрена задача по снижению ущерба от критических сочетаний событий, которые могут привести к выпуску бракованной продукции при сварке роботизированными технологическими комплексами. Сформулирована задача, предложены модели и алгоритмы, необходимые для её решения. Внедрение данного математического обеспечения на машиностроительных предприятиях позволит повысить точность и качество выполняемых операций при сварке роботизированными комплексами и снизить ущерб от выпуска бракованной продукции.

Ключевые слова: роботизированный технологический комплекс; управление процессом сварки; критическое сочетание событий; математическая модель; программно-технические средства.

The task of reducing damage from critical combinations of events that may lead to the release of defective products during welding by robotic technological systems is considered. The task is formulated; the models and algorithms necessary for its solution are proposed. The implementation of this mathematical support at machine-building enterprises allows to improve the accuracy and quality of the operations performed during welding by robotic complexes and to reduce the waste from the production of defective products.

Keywords: robotic technological complex; welding process control; critical combination of events; mathematical model; software and hardware.

Введение. Сокращение потерь от выпуска некачественной продукции при выполнении сварочных операций является одной из важных задач, стоящих перед машиностроительными предприятиями. Эффективным способом решения этой проблемы является внедрение роботизированных технологических комплексов (РТК).

В настоящее время разработаны и прошли апробацию различные системы для оптимизации работы РТК. Анализ их функционального назначения показывает, что основное внимание в них уделяется совершенствованию алгоритмов работы манипуляторов или сварочного оборудования [1—4]. При этом в используемых системах, как правило, отсутствует решение задачи предотвращения критических сочетаний событий, приводящих к выпуску некачественной продукции при сварке изделий.

Данные соображения определяют актуальность и практическую значимость статьи, посвящённой разработке моделей и алгоритмов управления процессом сварки изделий в РТК по критерию, позволяющему минимизировать ущерб от выпуска некачественной продукции при неблагоприятных стечениях обстоятельств.

Постановка задачи. При любых допустимых значениях вектора состояний среды $\mathbf{x}(t) \in \mathbf{X}$ необходимо разработать алгоритм поиска вектора управляющих воздействий $\mathbf{u}^*(t) \in \mathbf{U}$, позволяющих минимизировать на временном отрезке $[t_{\text{Н}};\ t_{\text{К}}]$ по критерию, характеризующему ущерб от выпуска некачественной продукции при неблагоприятном стечении обстоятельств:

$$K = \int_{t_{\text{Н}}}^{t_{\text{К}}} D(t, \mathbf{x}, \mathbf{x}', \mathbf{u}, \mathbf{u}')dt \to \min \qquad (1)$$

при ограничениях

$$F_k(t, \mathbf{x}, \mathbf{x}', \mathbf{u}, \mathbf{u}') \geqslant 0, k = 1, \ldots, n_1;$$

$$F_k(t, \mathbf{x}, \mathbf{x}', \mathbf{u}, \mathbf{u}') < 0,\ k = n_1 + 1, \ldots, n_2$$

и граничных условиях

$$F_k^{(t_н)}(\mathbf{x}, \mathbf{x}', \mathbf{u}, \mathbf{u}') = 0, k = n_3, \ldots, n_4;$$

$$F_k^{(t_К)}(\mathbf{x}, \mathbf{x}', \mathbf{u}, \mathbf{u}') = 0, \quad k = n_4 + 1, \ldots, n_5,$$

где K — целевая функция, характеризующая ущерб от выпуска некачественной продукции на временном отрезке $[t_Н; t_К]$, вызванный критическим сочетанием событий; D — подынтегральная функция ущерба; $\mathbf{X}$, $\mathbf{U}$ — множества допустимых значений векторов $\mathbf{x}(t)$ и $\mathbf{u}(t)$ соответственно; t — текущее время; $n_1, \ldots, n_5$ — известные константы.

Подход к решению задачи. Применение методов вариационного исчисления для решения задачи (1) влечёт за собой известные трудности, связанные с необходимостью разработки сложной динамической модели, учитывающей многочисленные количественные и качественные характеристики технологического процесса, а также с неопределённостью параметров модели на значительном временном отрезке. В связи с этим для решения задачи (1) предлагается эвристический алгоритм, в основу которого положено подтвержденное практикой утверждение о том, что для минимизации ущерба от выпуска бракованной продукции достаточно разработать и реализовать соответствующий план мероприятий [1, 5].

Тогда решение задачи (1) можно свести к минимизации вероятности невыполнения данного плана на временном отрезке $[t_Н; t_К]$:

$$P(t, \mathbf{x}, \mathbf{x}', \mathbf{u}, \mathbf{u}') \to \min.$$

На основе опыта эксплуатации роботизированных комплексов Kawasaki FA-10L на ОАО «Трансмаш» (г. Энгельс) был разработан типовой план мероприятий по предотвращению выпуска бракованной продукции. Этот план представлен в виде графа, в котором вершины — действия плана, а линии показывают последовательность их реализации и взаимосвязи. Фрагмент графа (верхние 5 уровней) плана мероприятий приведён на рис. 1.

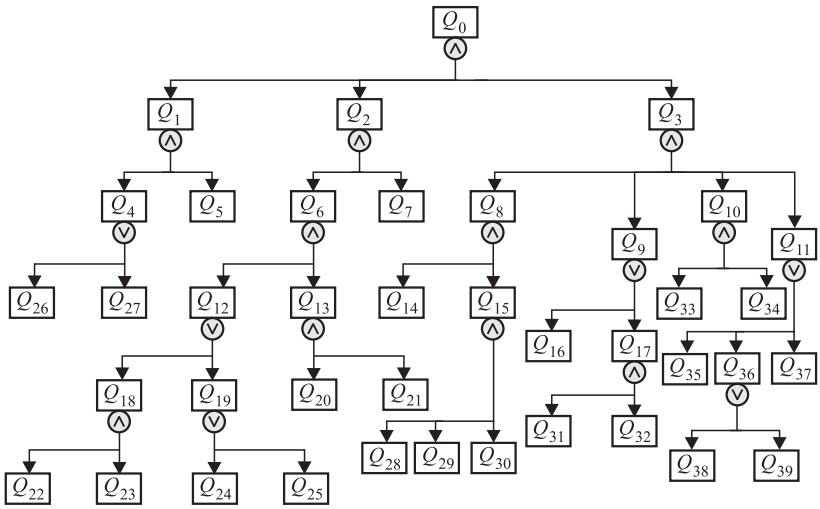


Рис. 1. План мероприятий по предотвращению брака при сварке в РТК: Q_0 — предотвращение возникновения брака при сварке в РТК; Q_1 — контроль ОТК сваренного изделия; Q_2 — контроль оператором качества сварного шва в ходе сварки; Q_3 — периодический контроль работы программного обеспечения программистом в ходе сварки; Q_4 — обеспечение наличия актуальной технологической документации на рабочих местах; Q_5 — контроль качества сваренного изделия; Q_6 — промежуточный контроль со стороны оператора качества сварного шва; Q_7 — контроль давления защитного газа на входе РТК с помощью редуктора на ресивере; Q_8 — контроль работы системы тактильного отслеживания «TouchSensing»; Q_9 — контроль стабильности тока на двигателе подающего блока VR-1500; Q_{10} — контроль работы программы очистки сопла сварочной горелки; Q_{11} — контроль сварочных параметров в реальном времени; Q_{12} — контроль со стороны оператора очистки сопла сварочной горелки; Q_{13} — контроль стабильности сварочной дуги; Q_{14}, Q_{16} — визуальный контроль качества сварного шва; Q_{15} — контроль отклонений сварочного тока от номинального; Q_{17} — контроль значений тока двигателя подающего механизма на индикаторах источника питания TPS5000; Q_{18} — контроль оператором состояния сопла горелки после очистки; Q_{19} — контроль оператором работы фрезы станции очистки BRS-LC; Q_{20} — визуальный контроль сварочной дуги на наличие искр, брызг и т. д.; Q_{21} — контроль со стороны оператора стабильности сварочных параметров на индикаторах источника питания TPS5000; Q_{22} — проведение очистки вручную в случае необходимости; Q_{23} — вызов наладчиков при недостаточной очистке сварочной горелки; Q_{24} — контроль давления сжатого воздуха на станции очистки; Q_{25} — вызов наладчиков при недостаточном давлении сжатого воздуха на станции очистки BRS-LC; Q_{26} — периодическая проверка документации цеховым технологом; Q_{27} — контроль актуальности документации мастерами; Q_{28} — мониторинг значений сварочного тока с помощью функции RTMON; Q_{29} — мониторинг значений сварочного тока по индикаторам источника питания TPS5000; Q_{30} — контроль порогового значения отклонений сварочного тока в функции RTPM; Q_{31} — выбор индикации тока двигателя подающего механизма с помощью функции F1 в меню источника питания TPS5000; Q_{32} — остановка процесса сварки в случае отклонения тока двигателя более чем на 10А; Q_{33} — визуальный контроль сопла горелки после очистки; Q_{34} — контроль уровня противоадгезивной жидкости; Q_{35} — контроль скорости сварки; Q_{36} — контроль напряжения на сварочной дуге; Q_{37} — контроль параметров горизонтального и вертикального смещения RTBIAS; Q_{38} — остановка процесса сварки в случае колебания напряжения более чем на 3В в режиме «Pulse»; Q_{39} — остановка процесса сварки в случае превышения напряжения более чем на 2В в режиме «Linear»; Λ — символ конъюнкции; V — символ дизъюнкции

Выполнение мероприятий разработанного плана обеспечит выпуск качественной продукции. Таким образом, задача (1) сводится к поиску таких действий персонала РТК, при которых вероятность невыполнения плана будет сведена к минимуму.

Математическая модель. Для оценки вероятности невыполнения плана определяются минимальные сечения [4, 5] графа мероприятий (см. рис. 1). Минимальные сечения классифицируются по количеству элементов, входящих в их состав, на двух-, трёхэлементные и т. д. Каждое сечение соответствует критическому сочетанию событий, приводящих к невыполнению плана, и значит, к выпуску бракованной продукции. Для графа мероприятий (см. рис. 1) минимальные сечения приведены в табл. 1.

Для каждого сечения строится граф состояний, в соответствии с которым составляется система дифференциальных уравнений Колмогорова—Чепмена [4, 5]. Из решения этой системы определяется вероятность невыполнения плана мероприятий, т. е. возникновения брака при сварке из-за критических сочетаний событий. На рис. 2 приведён пример графа состояний для трёхэлементного сечения $Q_{18}—Q_{24}—Q_{25}$.

Таблица 1

Минимальные сечения графа плана мероприятий

Сечения	События
Одно-элементные	Q_1; Q_2; Q_3; Q_4; Q_5; Q_6; Q_7; Q_8; Q_9; Q_{10}; Q_{11}; Q_{14}; Q_{15}; Q_{20}; Q_{21}; Q_{34}
Двух-элементные	$Q_{16}—Q_{17}$; $Q_{18}—Q_{19}$; $Q_{26}—Q_{27}$; $Q_{16}—Q_{31}$; $Q_{16}—Q_{32}$
Трёх-элементные	$Q_{18}—Q_{24}—Q_{25}$; $Q_{22}—Q_{24}—Q_{25}$; $Q_{23}—Q_{24}—Q_{25}$; $Q_{28}—Q_{29}—Q_{30}$; $Q_{35}—Q_{36}—Q_{37}$
Четырёх-элементные	$Q_{35}—Q_{37}—Q_{38}—Q_{39}$

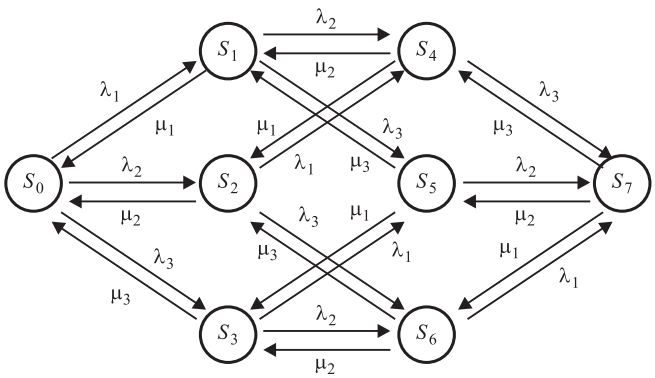


Рис. 2. Граф состояний для трёхэлементного сечения $Q_{18}—Q_{24}—Q_{25}$:
состояние S_0 — выполняются все мероприятия; S_1 — выполняются все мероприятия, кроме Q_{18}; S_2 — выполняются все мероприятия, кроме Q_{24}; S_3 — выполняются все мероприятия, кроме Q_{25}; S_4 — не выполняются мероприятия Q_{18}, Q_{24}; S_5 — не выполняются мероприятия Q_{18}, Q_{25}; S_6 — не выполняются мероприятия Q_{25}, Q_{24}; S_7 — не выполняется ни одно из мероприятий сечения

Для трёхэлементного сечения задача (1) сводится к выбору такой интенсивности действий по восстановлению $\mu_i^*(t)$, $i = 1, 2, 3$, при которой на заданном временном интервале $[t_Н; t_К]$

$$P_7(P_0, P_1, P_2, P_3, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \mu_1, \mu_2, \mu_3, t) \to \min.$$

Ограничения сформированы на основе системы дифференциальных уравнений Колмогорова—Чепмена и имеют следующий вид:

$$\begin{cases} dP_0(t)/dt = -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)P_0(t) + \mu_1 P_1(t) + \\ + \mu_2 P_2(t) + \mu_3 P_3(t); \\ dP_1(t)/dt = \lambda_1 P_0(t) - (\mu_1 + \lambda_2 + \lambda_3)P_1(t) + \\ + \mu_2 P_4(t) + \mu_3 P_5(t); \\ dP_2(t)/dt = \lambda_2 P_0(t) - (\mu_2 + \lambda_1 + \lambda_3)P_2(t) + \\ + \mu_1 P_4(t) + \mu_3 P_6(t); \\ dP_3(t)/dt = \lambda_3 P_0(t) - (\mu_3 + \lambda_1 + \lambda_2)P_3(t) + \\ + \mu_1 P_5(t) + \mu_2 P_6(t); \\ dP_4(t)/dt = \lambda_2 P_1(t) + \lambda_1 P_2(t) - \\ - (\mu_2 + \mu_1 + \lambda_3)P_4(t) + \mu_3 P_7(t); \\ dP_5(t)/dt = \lambda_3 P_1(t) + \lambda_1 P_3(t) - \\ - (\mu_3 + \mu_1 + \lambda_2)P_5(t) + \mu_2 P_7(t); \\ dP_6(t)/dt = \lambda_2 P_1(t) + \lambda_1 P_2(t) - \\ - (\mu_2 + \mu_1 + \lambda_3)P_4(t) + \mu_1 P_7(t); \\ dP_7(t)/dt = \lambda_3 P_4(t) + \lambda_2 P_5(t) + \lambda_1 P_6(t) - \\ - (\mu_1 + \mu_2 + \mu_3)P_7(t), \end{cases} \quad (2)$$

где P_i — вероятность перехода объекта управления в состояние S_i, $i = 0, 1, ..., 7$.

Начальные условия:

$$P_0(0) = 1,\ P_i(0) = 0,\ i = 1, 2, \ldots, 7.$$

Аналитическое решение системы (2) затруднительно, поэтому она решена численно. При конкретных значениях числовых коэффициентов и переменных λ_i, μ_i, $i = 1, 2, 3$ в конкретный момент времени получим вероятность невыполнения плана из-за сочетания событий, соответствующих сечению $Q_{18}—Q_{24}—Q_{25}$.

Аналогичным образом рассчитываются вероятности невыполнения плана для осталь-

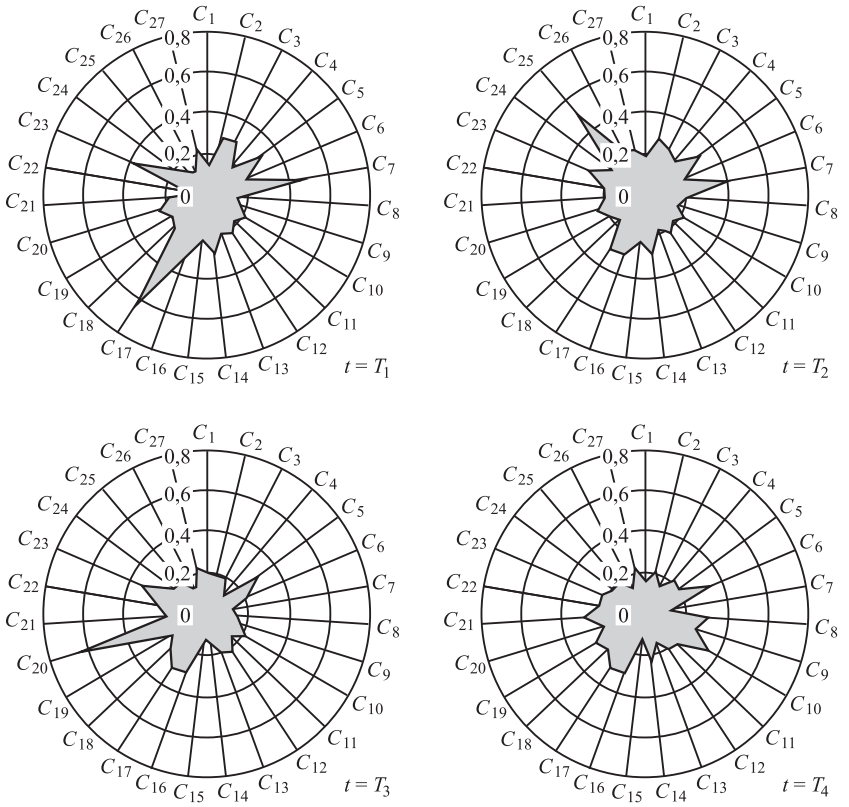


Рис. 3. Изменение вероятности возникновения критических сочетаний событий, приводящих к возникновению брака при сварке в РТК

ных сечений. Результаты расчёта в разное время показаны на рис. 3.

Как видно из рис. 3, в момент времени T_1 наиболее вероятным является сочетание событий, соответствующее сечению C_{17} (Q_{16}—Q_{17}), в момент времени T_2 — сочетание, соответствующее сечению C_{25} (Q_{28}—Q_{29}—Q_{30}), в момент времени T_3 — сечению C_{24} (Q_{23}—Q_{24}—Q_{25}). В момент времени T_4 вероятность различных критических сочетаний событий не превышает 0,35.

Решая систему дифференциальных уравнений (2) для всех минимальных сечений в разное время, можно предотвратить наступление критических сочетаний событий, приводящих к возникновению брака.

Модельный пример. Определим значения числовых коэффициентов λ_i, μ_i, $i = 1, 2, 3$, используемых при расчёте вероятности P_7. Исходя из опыта эксплуатации РТК с манипуляторами Kawasaki FA-10L, контроллерами C40 и сопря-

Таблица 2

Неисправности, не позволяющие осуществить мероприятия плана, и действия по их устранению

Неисправности		Действия по устранению неисправностей		
Описание	Частота возникновения, $ч^{-1}$	Описание		Интенсивность восстановления, $ч^{-1}$
Ошибка «no|IGn» (превышение времени готовности к зажиганию)	$\lambda_1 = 0{,}017$	$Д_1$	Отрезать конец проволоки, нажать кнопку горелки, в настройках увеличить лимит подачи проволоки без зажигания дуги	$\mu_2 = 2{,}9$
Неисправность в системе подачи проволоки (слишком высокий ток в приводе блока подачи)	$\lambda_2 = 0{,}008$	$Д_2^1$	Выровнять шланговый пакет, проверить направляющий канал на изгиб или загрязнение, проверить прижимное давление роликов блока подачи проволоки	$\mu_2^1 = 2{,}2$
		$Д_2^2$	Заменить двигатель подающего блока и прижимные ролики	$\mu_2^2 = 0{,}86$
Ошибка «no|Arc» на дисплее источника питания (обрыв дуги)	$\lambda_3 = 0{,}114$	$Д_3$	Укоротить свободный конец проволоки, проверить наконечник, очистить поверхность изделия	$\mu_3 = 1{,}5$
Неравномерная скорость подачи проволоки. Проволока образует петлю между приводными роликами и входным соплом, через которое она входит в шланговый пакет	$\lambda_4 = 0{,}035$	$Д_4^1$	Заменить блок подачи проволоки	$\mu_4^1 = 1{,}85$
		$Д_4^2$	Ослабить тормоз, выбрать подходящий контактный наконечник, проверить направляющий канал на изгиб или загрязнение	$\mu_4^2 = 3{,}1$

Таблица 3

Выбор действий по устранению отказов при реализации плана мероприятий

Последовательность действий	P_7
$Д_1$; $Д_2^1$; $Д_3$; $Д_4^1$	0,384
$Д_1$; $Д_2^2$; $Д_3$; $Д_4^1$	0,278
$Д_1$; $Д_2^1$; $Д_3$; $Д_4^2$	0,170
$Д_1$; $Д_2^2$; $Д_3$; $Д_4^2$	0,263

жённым сварочным оборудованием Fronius, определены неисправности, не позволяющие осуществить мероприятия плана. Данные неисправности, а также действия по их устранению приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, неисправности можно устранить разными способами с разной интенсивностью восстановления. Оценим вероятность невыполнения плана при различных сочетаниях μ_i. Результаты вычислений приведены в табл. 3.

Как следует из табл. 3, минимальная вероятность критического сочетания, приводящего к остановке РТК, достигается при выполнении последовательности действий: $Д_1$ — отрезать конец проволоки, нажать кнопку горелки, в настройках увеличить лимит подачи проволоки без зажигания дуги; $Д_2^1$ — выровнять шланговый пакет, проверить направляющий канал на изгиб или загрязнение, проверить прижимное давление роликов блока подачи проволоки; $Д_3$ — укоротить свободный конец проволоки, проверить наконечник, очистить поверхность изделия; $Д_4^2$ — ослабить тормоз, выбрать подходящий контактный наконечник, проверить направляющий канал на изгиб или загрязнение.

Заключение. В статье рассмотрены модели и алгоритмы решения задачи минимизации возникновения критических сочетаний событий, которые могут привести к выпуску бракованной продукции. Внедрение разработанного математического обеспечения планируется осуществить в структурных подразделениях ОАО «Трансмаш» (г. Энгельс) по методикам [4—9]. Предлагаемые модели и алгоритмы позволят существенно снизить ущерб от простоев РТК, повысить качество сварки и стабильность технологического процесса.

Библиографические ссылки

1. **Резчиков А.Ф., Кушников В.А., Иващенко В.А., Фоминых Д.С., Богомолов А.С., Филимонюк Л.Ю.** Минимизация ущерба от нарушения технологического процесса в сварочных роботизированных технологических комплексах // Мехатроника. Автоматизация. Управление. 2017. № 5. С. 328—333.

2. **Резчиков А.Ф., Кушников В.А., Иващенко В.А., Фоминых Д.С., Богомолов А.С., Филимонюк Л.Ю.** Управление процессом сварки в роботизированных технологических комплексах по критерию качества продукции в условиях риска возникновения нестабильных состояний // Системы управления и информационные технологии. 2017. Т. 69. № 3. С. 65—72.

3. **Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А., Зуев А.В., Губанков А.С.** Разработка новых методов управления мехатронными объектами в условиях неопределённости // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2016. № 4 (188). С. 108—115.

4. **Rezchikov A.F., Kushnikov V.A., Ivashchenko V.A., Fominykh D.S., Bogomolov A.S., Filimonyuk L.Yu.** Prevention of critical events combination in robotic welding // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2017. Т. 46. № 4. P. 370—379.

5. **Яндыбаева Н.В., Кушников В.А.** Математические модели, алгоритмы и комплексы программ для мониторинга эффективности образовательной деятельности вуза // Проблемы управления. 2015. № 1. С. 53—62.

6. **Kushnikov V.A., Rezchikov A.F., Tsvirkun A.D.** Control in man-computer systems with computer-aided goal correction // Automation and Remote Control. 1998. Vol. 59. № 7. Part 2. P. 1040—1046.

7. **Фоминых Д.С., Шлычков Е.И., Кушников В.А., Резчиков А.Ф., Санькова А.Б.** Модели и алгоритмы системы оперативного управления процессом производства листового стекла // Автоматизация и современные технологии. 2007. № 12. С. 16—23.

8. **Шлычков Е.И., Фоминых Д.С., Кушников В.А., Резчиков А.Ф.** Автоматизированная система ситуационного управления процессом формования листового стекла // Автоматизация и современные технологии. 2006. № 8. С. 3—11.

9. **Яндыбаева Н.В., Кушников В.А.** Оценка качества образовательного процесса в вузе на основе модели Форрестера // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. Т. 2. № 1 (55). С. 176—181.

Ссылка для цитирования

Резчиков А.Ф., Кушников В.А., Иващенко В.А., Фоминых Д.С., Богомолов А.С., Филимонюк Л.Ю. Снижение ущерба от критических сочетаний событий при сварке роботизированными технологическими комплексами // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 1. С. 22—26.

УДК 675.03.031.81:577.15

В.Г. Козлов, д-р техн. наук, **А.В. Скрыпников,** д-р техн. наук, проф.,
Е.В. Чернышова, Е.Ю. Микова, Д.В. Ломакин
(Воронежский государственный университет инженерных технологий)
elenabok@mail

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ УРОВНИ УПРАВЛЕНИЯ ЛЕСОВОЗНОЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНОЙ СИСТЕМОЙ

Рассмотрены модели функционирования комплекса «водитель — автомобиль — дорога — среда» (ВАДС) и управления в системе «дорожные условия — транспортные потоки» (ДУ—ТП) как единый процесс управления движением, развитием и функционированием автомобильной системы на примере лесовозных автомобильных дорог. Сформулирована задача управления движением на автомобильных дорогах и предложен алгоритм её решения.

Ключевые слова: «водитель — автомобиль — дорога — среда»; информационное обеспечение; транспорт; автоматизированные системы управления.

The models of the «driver-car-road-environment» complex (DCRE) functioning and management in the system «road conditions — traffic flows» (RC—TF) as a single process control traffic, development and functioning of the automobile system on the example of timber-carrying motor-car roads are considered. The task of traffic control on motor-car roads is formulated and an algorithm for its solution is proposed.

Keywords: «driver-car-road-environment»; information support; transport; automated control systems.

В настоящее время не существует строго определённых понятий «управление дорожным движением», «организация движения» и «регулирование движения», поскольку сама наука о дорожном движении ещё находится в стадии становления. Использование кибернетики даёт возможность предложить обобщённые формулировки основных определений. Управление развитием и функционированием автомобильно-дорожной системы следует понимать как комплекс целенаправленных воздействий на систему в целом и на отдельные подсистемы для достижения конечной цели — обеспечение потребности общества и государства в автомобильных перевозках материалов и пассажиров с высокой экономичностью, удобством и безопасностью движения.

Управляющие воздействия включают в себя большое число планово-экономических, организационных, инженерно-технических, законодательных и других мероприятий, которые могут применяться на разных уровнях управления и производственной деятельности.

Управление функционированием лесовозной автомобильной дороги является составной частью автомобильно-дорожной системы и включает комплекс целенаправленных воздействий на технические параметры и транспортно-эксплуатационные характеристики дороги в процессе проектирования и эксплуатации, на формы, методы и организацию работ по ремонту, содержанию и управлению дорожным движением в целях обеспечения минимальных затрат на реализацию транспортного потока по заданному направлению.

Управление дорожным движением включает комплекс целенаправленных воздействий на водителей, дорожные условия, транспортные потоки и режимы движения, основанных на анализе информации об условиях движения на дорогах в целях достижения высокой пропускной и провозной способности, экономической эффективности перевозок, удобства и безопасности движения. К числу управляющих воздействий относятся технические, технологические, организационные мероприятия и решения. Параметры воздействия дают возможность изменять характеристики процесса обслуживания и обеспечивать режимы в определённый момент времени, исходя из принятых критериев оптимальности. Такое определение соответствует основным понятиям технической кибернетики, где управление в организационных системах рассматривается как процесс преобразования исходной информации в соответствии с той или иной целью в управляющие воздействия для перевода объекта из одного состояния в другое [1]. В этом

плане дорога, её состояние, транспортный поток и метеорологические условия являются главными источниками информации, определяющими действия водителей и режим движения транспортных потоков.

Необходимо отметить особенность использования информации в системе управления дорожным движением. Для оперативного (тактического) управления собирается и используется большой объём текущей информации о состоянии дороги, транспортном потоке, метеорологических условиях и режимах движения, поэтому часто складывается ошибочное мнение, что управление движением основывается только на переработке текущей информации. На самом деле, в процессе управления дорожным движением не меньшее значение имеют накопленная за многие годы информация, используемая при управлении движением, опыт работы дорог в различных условиях, закономерности движения транспортных потоков, эффективность различных технических и организационных мероприятий по обеспечению удобства и безопасности движения. Именно эта информация, вошедшая в нормативно-технические документы, служит основой прогнозов и выработки стратегических, дополнительных мероприятий, технических и организационных решений по обеспечению нормальной работы лесовозных автомобильных дорог и лесовозного автомобильного транспорта в различных условиях эксплуатации.

Неотъемлемой частью управления дорожным движением является организация движения транспортных потоков по сети лесовозных автомобильных дорог и на отдельных участках дорог.

Организация дорожного движения — это комплекс инженерно-технических и организационных мероприятий, направленных на наиболее эффективное распределение траектории движения автомобилей, транспортных потоков и пешеходов в поперечном профиле и по длине дороги. Организация движения заключается в массивном использовании возможностей, предоставляемых геометрическими параметрами дороги, её состояния и включает указания направления движения транспортных потоков, разделение потоков на группы автомобилей, следующие с разными скоростями, распределение траекторий движения на сложных участках дорог, минимизацию числа пересечений траекторией движения, обеспечение возможности плавного перехода с одной полосы движения на другую, с одной дороги на другую и т. д. [2, 3]. К организации движения также относятся информация о наиболее целесообразных маршрутах движения и особенности дорожных условий, т. е. установка дорожных знаков и указателей, разметка дорог, применение различных разграничительных, ориентирующих и направляющих устройств, помогающих водителю определить местоположение своего автомобиля и путь дальнейшего движения. Организация дорожного движения является первой и самой необходимой частью управления дорожным движением, без которой немыслимо само управление. Однако она не обеспечивает оптимальный режим движения в отличие от управления дорожным движением.

Регулирование дорожного движения — один из способов управления движением транспортных потоков на ограниченном участке дороги. Это определение соответствует понятию регулирования в кибернетике, под которым понимается способ управления, когда управляющий орган не оценивает каждое случайное воздействие на систему, а задаёт режим её работы только на основании какого-то главного показателя.

Эффективность дорожного движения как конечного результата функционирования автомобильно-дорожной системы определяется эффективностью управляющих воздействий, применяемых на разных уровнях деятельности государственных и общественных органов, министерств и ведомств, автотранспортных, дорожных и коммунальных организаций, органов ГИБДД и др. Разработанная автором схема уровней управления [3] учитывает предложенную ранее зарубежными учёными схему деятельности по организации дорожного движения на различных уровнях, но значительно от неё отличается.

По своему значению все управляющие воздействия могут быть разделены на воздействия стратегического, программного характера и воздействия оперативного или текущего характера. При этом некоторые воздействия на разных уровнях деятельности могут переходить из оперативных в стратегические. Основу управления всей автомобильно-дорожной системой составляют мероприятия стратегического характера. Наибольшее значение из них имеют анализ состояния и прогноз развития грузовых и пассажирских перевозок, уровня автомобилизации, перспектив развития сети лесовозных автомобильных дорог. На уровне управления дорожным движе-

нием стратегический характер несут распределение транспортных потоков по дорожной сети, организация перевозок массовых грузов и пассажиров в отдельные периоды года, запрещение или ограничение движения по отдельных маршрутам, разработки методов и технических средств организации и управления движением и их внедрение.

Важную роль играет оперативное управление путём использования целого комплекса воздействий текущего характера. Именно мероприятия оперативного, текущего уровня управления движением находят самое широкое применение на практике и чаще всего понимаются как управление дорожным движением. На этом уровне управления занято наибольшее количество людей и ресурсов, используется бóльшая часть технических средств. Здесь наиболее целесообразно внедрять современные методы автоматизации процессов управления движением.

Организация и управление движением являются составными частями функционирования дороги и не могут быть оторваны от других задач по эксплуатации дороги как транспортного сооружения. Эффективная организация и управление движением возможны только на основе глубокого знания состояния дороги, особенностей её работы в различные периоды года и в сложных погодных условиях, ресурсов и возможностей дорожно-эксплуатационной службы. Исходя из этого, организация и управление дорожным движением должны осуществляться службой в контакте с автотранспортными организациями, органами ГИБДД и метеорологической службой.

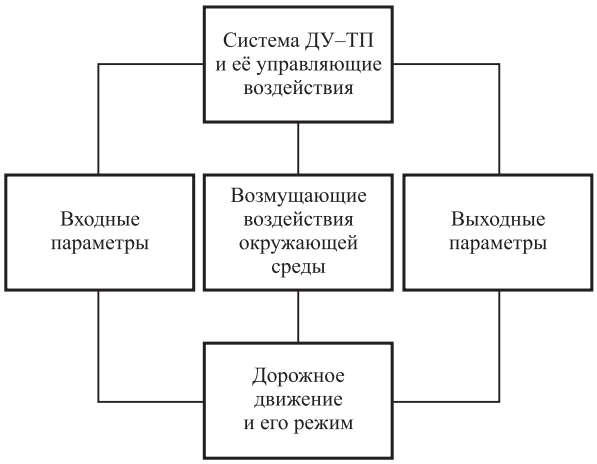
Техническое совершенствование дороги и повышение уровня содержания значительно сокращают колебания транспортно-эксплуатационных качеств дорог по времени под действием погодно-климатических факторов, но не могут исключить их полностью. Эти колебания вместе с изменениями интенсивности движения и метеорологических условий приводят к корректированию режимов движения, образованию заторов и повышению аварийности в отдельные периоды года и суток. Следовательно, для обеспечения удобного и безопасного движения достаточно иметь автомобильную дорогу с заданными техническими параметрами, оборудованную дорожной информацией, заданный постоянный режим движения. Необходимо иметь гибкую систему управления движением, позволяющую чутко реагировать на изменения условий движения, прогнозировать возможные режимы движения и задавать оптимальные критерии управления. Решение этих вопросов возможно только на основе изучения внутренних процессов дорожного движения.

Сущность управления дорожным движением заключается в том, что от систем «дорожные условия», «окружающая среда» и «транспортные потоки» поступают сигналы и возмущения, которые воспринимаются и реализуются водителями лесовозов в зависимости от индивидуальных особенностей, типа и состояния автомобиля и условий движения.

С точки зрения теории управления процесс управления движением на лесовозной автомобильной дороге формально можно считать разомкнутой системой, в которой нет очевидной связи между входами и выходами [4]. Однако входные управляющие воздействия на дороги (инженерное оборудование, организация движения, знаки и сигналы) определяют транспортные потоки, т. е. источник выходных характеристик. Другими словами, водители, исходя из реальных условий движения, указаний дорожных знаков и сигналов, выбирают режим движения автомобилей, тем самым формируют соответствующие изменения в транспортном потоке, т. е. выходные величины, которые вновь воздействуют на процесс управления движением.

Реакция водителей на воздействия со стороны входных характеристик формирует исходные параметры и таким образом играет роль обратной связи, превращая процесс управления дорожным движением в замкнутую систему (рисунок), где замыкающим элементом является режим движения транспортного потока.

В формировании процесса движения особенно велика роль водителей, которые соб-



Процесс управления движением как замкнутая система

ственно и формируют стохастический характер дорожного движения. Поэтому одной из главных задач управления является обеспечение водителей чёткой и достоверной информацией об условиях и рекомендуемых режимах движения.

Главной особенностью системы ДУ—ТП является способность переходить в разные состояния под влиянием различных управляющих воздействий, причём всегда существует некоторое множество состояний, из которых необходимо выбрать оптимальное.

Дорожное движение характеризуется многомерностью его выходных параметров, которая затрудняет выбор параметра обратной связи, особенно при оперативном управлении. Возникает необходимость создать обратную связь по нескольким параметрам (скорость, интенсивность, плотность, безопасность и др.) и ориентироваться на их осреднённые или критические значения, чтобы в зависимости от конкретной задачи управления в данный момент контролировать соответствующий параметр.

Ещё одной особенностью дорожного движения является то, что этот процесс происходит в постоянно изменяющихся условиях [5]. Наиболее часто причинами изменения условий движения являются метеорологические условия и интенсивность движения. Следовательно, необходимость оперативного управления дорожным движением является неизбежной, причём управление должно быть тем более широким и гибким, чем выше интенсивность движения и больше размах колебаний метеорологический условий. В основе управления дорожным движением лежит управление параметрами транспортного потока и режима движения, геометрическими параметрами, транспортно-эксплуатационными характеристиками дорог и их состоянием, т. е. постоянными и временными (сезонными) параметрами и характеристиками, которые определяют фактические режимы движения.

Управление дорожным движением является составной частью управления функционированием автомобильно-дорожной системой в целом и может осуществляться как единое целое на уровне управления дорожным движением в сети существующих дорог, на отдельно взятой дороге или отдельном участке дороги. В зависимости от уровня управления в рамках целевого функционала могут быть сформированы конкретные задачи и пути управления, а также дано общее математическое описание поставленной задачи. На основании проведённых исследований на уровне управления дорожным движением сети автомобильных дорог задача управления формулируется следующим образом: для заданной сети дорог $\alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_n$, соединяющих корреспондирующие точки $Z_1, Z_2, ..., Z_n$, с объёмами грузо- и пассажироперевозок $q_1, q_2, ..., q_n$, изменяющихся во времени по каждому маршруту $q_{ij} = f(t)$, с учётом выделенных ресурсов на содержание и ремонт существующей сети дорог и их распределения по дорогам $\Phi_r(\alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_n)c_r$, где r — отдельный ресурс ($r = 1, 2, ..., n$), с учётом метеорологических характеристик района $x_1, x_2, ..., x_n$, заданных законами распределения вероятностей ожидания $P_i = f_i(x_i)$ и зависимостей изменения состояния дорог, режима и безопасности движения от метеорологических условий $\beta_1, \beta_2, ..., \beta_n = f_1(x_1, x_2, ..., x_n)$ определить наиболее целесообразное распределение транспортных потоков по сети автомобильных дорог в разные сезоны года, стратегию и тактику управления движением по каждому маршруту, обеспечивающие заданные показатели функционирования дорог различных категорий, определённых из условий обеспечения минимума дорожно-транспортных затрат на перемещение грузов и пассажиров.

На уровне управления дорожным движением на отдельной дороге задача управлением в общем виде может быть сформулирована следующим образом: для заданных характеристик транспортного потока $\alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_n$, аппарата обслуживания (постоянных и переменных параметров дороги) $\beta_1, \beta_2, ..., \beta_n$, процесса обслуживания (характеристик уровня содержания дороги и организации движения) $\gamma_1, \gamma_2, ..., \gamma_n$ и ресурсов на ремонт и содержание дороги $\Phi_r(x_1, x_2, ..., x_n) = c_r$, где $r = 1, 2, ..., n$, с учётом метеорологических условий $x_1, x_2, ..., x_n$, определяемых законами распределения вероятностей ожидания $P_i = f_i(x_i)$, зависимостей состояния дорог от метеорологических условий $\gamma_i = f(x_1, x_2, ..., x_n)$ обеспечить требуемые показатели функционирования дороги различных категорий, определённые из условия обеспечения минимума дорожно-транспортных затрат на перемещение грузов и пассажиров.

Исходя из этого, разрабатываются стратегия и тактика управления дорожного движения для достижения поставленных целей.

Заключение. Разработка и реализация методов и технических средств управления дорожным движением является одной из составных частей стратегии и тактики управления функционированием автомобильно-дорожной системы. Таким образом, можно сделать

вывод, что дорожное движение как объект управления не может рассматриваться только как взаимодействие множества автомобилей в транспортном потоке. Оно должно рассматриваться как результат функционирования системы ДУ—ТП, системы управления дорожным движением и как составная часть системы управления всем процессом функционирования комплекса ВАДС.

Библиографические ссылки

1. **Скрыпников А.В., Козлов В.Г., Кондрашова Е.В., Арутюнян А.Ю.** Проходимость комплексных трелёвочно-транспортных систем на трелёвочных волоках // Вестник Московского государственного ун-та леса — Лесной вестник. 2016. Т. 20. № 2. С. 159—166.

2. **Скрыпников А.В., Бурмистров Д.В., Козлов В.Г., Чернышова Е.В.** Математическое моделирование оптимизации и управления транспортным потоком посредством применения датчиков регистрации проходящих автомобилей и информационных устройств // Вестник Воронежского государственного ун-та инженерных технологий. 2016. № 2. С. 102—109.

3. **Козлов В.Г., Скрыпников А.В., Гусев Ю.В., Капустин В.П.** Проектирование структуры информационного обеспечения лесовозного автомобильного транспорта // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии — Санкт-Петербургского государственного лесотехнического ун-та им. С.М. Кирова. 2016. № 217. С. 131—141.

4. **Skrypnikov A.V., Chernyshova E.V., Zemlyanukhin M.Yu.** Firewall as a tool of implementation of security policy. Science and education: materials of the VIII international research and practice conference, Munich, march 19—20th, 2015. P. 345—350.

5. **Skrypnikov A.V., Dorokhin S.V., Kozlov V.G., Chernyshova E.V.** Mathematical Model of Statistical Identification of Car Transport Informational Provision // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. Vol. 12. No. 2. P. 511—515.

Ссылка для цитирования

Козлов В.Г., Скрыпников А.В., Чернышова Е.В., Микова Е.Ю., Ломакин Д.В. Автоматизированные уровни управления лесовозной автомобильно-дорожной системой // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 1. С. 27—31.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»

СПРАВОЧНИК Технолога-Машиностроителя

в 2-х томах

Под ред. *А.С. Васильева, А.А. Кутина*

Издание 6-е, переработанное и дополненное. 2018 г. 1574 с.

В справочнике использованы стандарты, действующие на 1 января 2018 г.

Цена 15 000 руб.

Том 1. Приведены сведения по управлению качеством и точности изготовления деталей машин, рекомендации по выбору заготовок, припуски на механическую обработку, сведения по разработке различных технологических процессов изготовления деталей, по обработке деталей на станках с ЧПУ и агрегатных станках, даны рекомендации по оформлению технической документации.

Том 2. Приведены сведения о металлорежущих станках и инструментах, станочных приспособлениях, режимах резания, методах и средствах измерения, обработке поверхностей пластическим деформированием, электрофизико-химическим методам обработки и технологии сборки. Также дан технико-экономический расчет вариантов технологических процессов.

Шестое издание (5-е изд. 2003 г. под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова и др.) переработано и дополнено в соответствии с новыми достижениями технологической науки и практики и действующими стандартами.

Для инженерно-технических работников всех отраслей машиностроения, может быть полезен преподавателям, аспирантам и студентам вузов.

ПРИОБРЕСТИ КНИГУ ПО ЦЕНЕ ИЗДАТЕЛЯ МОЖНО, ПРИСЛАВ ЗАЯВКУ

по e-mail: realiz@mashin.ru

Дополнительная информация по телефону (495) 785-60-69 и на сайте WWW.MASHIN.RU

УДК 519.248:681.518.5

В.Н. Клячкин, д-р техн. наук, проф., **Ю.Е. Кувайскова,** канд. техн. наук, доц., **Д.А. Жуков**
(Ульяновский государственный технический университет)

v_kl@mail.ru

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ОТБОРА ЗНАЧИМЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НА КАЧЕСТВО ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

Исправность технического объекта может быть оценена по показателям его функционирования с помощью методов машинного обучения. При этом качество диагностики зависит от многих факторов, в том числе от выбора значимых показателей. Рассмотрены способы отбора значимых показателей на примере системы водоочистки и показано их влияние на качество диагностики.

Ключевые слова: исправное состояние; показатели функционирования; машинное обучение; качество диагностики.

The operability of a technical object can be evaluated in terms of its functioning indices by using machine learning methods. At the same time, the quality of diagnostics depends on many factors, including the choice of significant indicators. Methods for the selection of significant indicators as an example of a water cleaning system are considered and their effects on the quality of diagnostics are shown.

Keywords: correct condition; performance indicators; machine learning; quality of diagnosis.

Постановка задачи. Для повышения надёжности технического объекта проводится распознавание (диагностика) его состояния. Под распознаванием понимают отнесение состояния объекта к одному из классов — диагнозов [1]. Как правило, решение задачи сводится к разделению состояний объекта на исправные, т. е. способные выполнять заданные функции, или неисправные (задача бинарной классификации).

Диагностика проводится по результатам измерений косвенных показателей функционирования, как правило, в условиях ограниченной информации в процессе эксплуатации. Получение информации в этой ситуации обычно затруднено, и для принятия решения могут использоваться различные методы распознавания. При этом всегда имеется риск ложной тревоги (исправный объект будет признан неисправным) или, наоборот, когда неисправность объекта не выявлена (пропуск цели).

В качестве исходных данных рассматриваются известные результаты оценки состояния объекта (при заданных значениях контролируемых показателей техническая система исправна или неисправна). Таким образом, имеется множество вариантов с заданными показателями и множество возможных состояний системы. Существует некоторая неизвестная зависимость между показателями функционирования объекта и его состояниями. Исходная выборка данных представляет конечную совокупность пар «набор показателей, состояние». На основе этих данных требуется восстановить зависимость, т. е. построить алгоритм, способный для заданного набора показателей функционирования объекта выдать довольно точный ответ о его состоянии. Это задача машинного обучения, или обучения по прецедентам (с учителем): бинарная классификация — частный случай этой задачи [2—4].

Важным является выбор показателей, характеризующих состояние объекта. Таких показателей обычно довольно много, и их влияние на состояние объекта может существенно отличаться. Использование при классификации малозначимых показателей может усложнить расчёт и привести к некорректным результатам. Стандартная процедура сокращения размерности задачи сводится к методу главных компонент [5, 6], однако при этом усложняется интерпретация преобразованных показателей, что в технических задачах нежелательно. Тем не менее при наличии нескольких десятков показателей, по-видимому, без этой процедуры не обойтись.

Цель исследования — изучить влияние способа отбора значимых факторов на эф-

фективность машинного обучения при анализе исправности технического объекта.

Применение методов машинного обучения для диагностики функционирования технических объектов. Исходные данные для диагностики: матрица X показателей функционирования системы, элементы которой x_{ij} — результат i-го наблюдения по j-му показателю; $i = 1, ..., l, j = 1, ..., p$ (l — количество строк или число наблюдений, p — количество столбцов или число показателей) и вектор-столбец ответов Y, состоящий из 1 (для тех опытов, в которых объект исправен) и 0 при неисправном объекте. Каждой строке x_i матрицы X соответствует определённое значение y_i вектора Y. Совокупность пар (x_i, y_i) образует выборку исходных данных — прецедентов.

Задача состоит в построении функции (модели алгоритма) a: $X \to Y$, которая спрогнозирует ответ Y для любого заданного X [4]. При числовых признаках x_i часто используют линейные модели с вектором параметров $w = (w_0\ w_1\ ...\ w_p)$:

$$a(x, w) = w_0 + w_1 x_1 + \ldots + w_p x_p, \qquad (1)$$

при этом в задачах бинарной классификации обычно вместо нуля и единицы используют множество ответов $Y = \{-1; +1\}$. В этом случае модель алгоритма примет вид

$$a(x, w) = \operatorname{sign} \sum_{j=0}^{p} w_j x_j \ (x_0 = 1). \qquad (2)$$

Параметры w_j подбираются по исходным данным; процесс подбора оптимальных параметров называется обучением алгоритма. Найденные параметры должны обеспечить оптимальное значение функционала качества. В рассматриваемой задаче минимизируется функционал ошибок — это среднее количество несовпадений, где $L(a, x_i)$ называют функцией потерь:

$$Q(a, X) = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^{l} L(a, x_i) = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^{l} [a(x_i) - y_i] \to \min. \qquad (3)$$

Алгоритм a, который минимизирует функционал (3), может не обеспечивать хорошее прогнозирование исправности объекта. Ситуация, когда качество работы алгоритма на новых объектах значительно хуже, чем на исходной выборке, свидетельствует о переобучении: алгоритм слишком хорошо подогнан под обучающую выборку и не способен к обобщению на другие выборки. Таким образом, построенный алгоритм не сможет предсказывать состояние исследуемого объекта при новых параметрах функционирования.

Для оценки качества модели с точки зрения возможности прогнозирования исходную выборку из l опытов разбивают на два непересекающихся подмножества: собственно обучающую выборку объёма $l_о$, с помощью которой и решается задача обучения (3), и контрольную (или тестовую) объёма $l_к = l - l_о$, не используемую для обучения. При использовании кросс-валидации выборка разбивается на N частей (на практике обычно принимают $N = 5$ или 10). Часть ($N - 1$) используется для обучения, а оставшаяся — для контроля. Последовательно перебираются все варианты. Для каждого разбиения решается задача обучения по выборке $l_о$ и вычисляется функция ошибок $Q(a, X)$ на контрольной выборке $l_к$. Среднее значение этой функции по всем вариантам разбиения и характеризует обобщающую способность алгоритма.

Качество классификации можно оценить и по дисперсии ошибок — среднему квадрату отклонения истинной вероятности $P(Y_i)$ исправности объекта для i-го объекта контрольной выборки от её прогнозируемого значения $\tilde{P}(Y_i)$:

$$\sigma^2 = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^{l} \left[P(Y_i) - \tilde{P}(Y_i) \right]^2. \qquad (4)$$

Для исправного объекта $P(Y_i) = 1$, для неисправного $P(Y_i) = 0$.

Методы машинного обучения активно применяют в самых разных областях деятельности. Используется множество различных подходов к классификации. Это и классические статистические методы (байесовские классификаторы, дискриминантный анализ, логистическая регрессия), и методы, специально ориентированные на машинное обучение (метод опорных векторов, нейронные сети), композиционные методы (бэггинг, бустинг), агрегированный подход [7, 8] и др.

Проблема состоит в том, что нельзя заранее определить, какой из выбранных методов обеспечит корректное решение задачи [9], поэтому часто используется множество различных методов или их комбинации, а решение о применении принимается по результатам исследования функционала качества для контрольной выборки.

Например, как один из методов бинарной классификации может использоваться логистическая регрессия: по заданной обучающей

выборке (x_i, y_i) оцениваются параметры этой регрессии; характеристики исследуемого объекта подставляются в уравнение модели:

$$y = \frac{1}{1 + \exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \ldots + \beta_p x_p)}. \qquad (5)$$

Для оценки параметров здесь обычно применяют метод максимального правдоподобия. Логарифм функции правдоподобия максимизируется, например, методом градиентного спуска.

Найденное по формуле (5) значение y для объектов контрольной выборки рассматривается как прогнозируемая вероятность в формуле (4) нахождения объекта в исправном состоянии $\tilde{P}(Y_i)$ при заданном наборе параметров функционирования. При $y > 0{,}5$ объект исправен, в противном случае — неисправен (при необходимости граничное значение 0,5 может быть изменено).

Иногда строят композиции алгоритмов [4]. При этом часто погрешности отдельных алгоритмов взаимно компенсируются. Опыт показывает, что два главных метода построения композиции (бэггинг и бустинг) дают более точный результат, чем применение отдельного алгоритма на конкретном наборе данных.

Бэггинг используют при наличии небольших обучающих выборок: из имеющейся выборки исходных данных случайным образом с возвратом формируется несколько подмножеств такого же объёма, как и исходная выборка. На основе каждого подмножества строится классификатор, а результаты комбинируются путём голосования или усреднения. Часто в качестве базовых алгоритмов используются деревья решений.

Эффективным методом машинного обучения является и бустинг. Итоговое правило в бустинге определяется путём взвешенного голосования композиции базовых правил. При этом используется информация об ошибках предыдущих правил: веса объектов выбирают таким образом, чтобы новое правило точнее работало на тех объектах, на которых с предыдущими правилами чаще возникали ошибки. В различных модификациях используются разные аппроксимации функции потерь в формуле (3): в наиболее распространённом методе AdaBoost — экспонента, в методе LogitBoost (используется при наличии шумовых данных) — аппроксимация, основанная на логистической регрессии, и др.

Отбор значимых показателей по корреляционной матрице. Как уже отмечалось, показатели функционирования объекта могут существенно отличаться по их влиянию на его исправность. Для отбора наиболее значимых факторов могут использоваться различные подходы. Один из них — анализ корреляционной матрицы.

Исследование проводилось на конкретном примере — системе водоочистки [9]. Исправность системы Y оценивалась по показателям качества питьевой воды в зависимости от физико-химических показателей водоисточника: X_1 — температуры, X_2 — цветности, X_3 — мутности, X_4 — значения pH, X_5 — щёлочности, X_6 — окисляемости и доз добавляемых реагентов: X_7 — коагулянта и X_8 — флокулянта. Получены результаты 348 наблюдений за показателями функционирования (8 показателей), в 102 случаях состояние системы признано неисправным (хотя бы один из показателей качества питьевой воды вышел за допустимые пределы).

Таблица 1

Корреляционная матрица

Показатель	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	Y
X_1	1,000	−0,545	0,226	0,220	−0,328	0,270	−0,561	−0,964	−0,566
X_2	−0,545	1,000	−0,057	−0,024	0,318	0,069	0,999	0,578	0,224
X_3	0,226	−0,057	1,000	0,190	−0,128	0,078	−0,061	−0,045	−0,071
X_4	0,220	−0,024	0,190	1,000	−0,097	0,273	−0,035	−0,189	−0,009
X_5	−0,328	0,318	−0,128	−0,097	1,000	−0,022	0,320	0,287	0,222
X_6	0,270	0,069	0,078	0,273	−0,022	1,000	0,062	−0,245	−0,144
X_7	−0,561	**0,999**	−0,061	−0,035	0,320	0,062	1,000	0,594	0,236
X_8	**−0,964**	0,578	−0,045	−0,189	0,287	−0,245	0,594	1,000	0,563
Y	−0,566	0,224	**−0,071**	**−0,009**	0,222	−0,144	0,236	0,563	1,000

В табл. 1 показана корреляционная матрица, характеризующая степень тесноты линейной связи как между самими показателями функционирования X_1 — X_8, так между ними и состоянием

системы Y. Анализ этой матрицы показывает, что показатели X_3 (мутность) и X_4 (значение pH) практически не оказывают влияния на исправность системы: соответствующие значения коэффициентов корреляции $r(X_3, Y) = -0{,}071$ и $r(X_4, Y) = -0{,}009$ (выделены жирным шрифтом).

Ещё одна особенность — практически линейная связь показателя X_1 (температуры) с X_8 (дозой флокулянта): коэффициент корреляции $r(X_1, X_8) = -0{,}964$, а также показателя X_2 (цветности) с X_7 (дозой коагулянта): коэффициент корреляции $r(X_2, X_7) = 0{,}999$. Действительно, начальная доза коагулянта определяется по цветности, а начальная доза флокулянта подбирается с учётом температуры воды.

Отбор значимых показателей по регрессионной модели. Ещё один подход к оценке значимости показателей заключается в использовании критерия Стьюдента для оценки значимости регрессоров в регрессионном анализе [6]. Рассматривая показатели X_1—X_8 как регрессоры, а Y — как отклик, можно построить регрессионную модель и оценить значимость регрессоров. На рисунке представлены результаты расчёта, полученные в системе Statistica. Видно, что наименее значимыми в модели являются показатели X_3 (мутность), для которого p-значение составило 0,90, и X_6 (окисляемость) — его p-значение 0,88: с позиций регрессионного анализа эти факторы не оказывают значимого влияния на отклик Y (исправность системы).

При проведении машинного обучения сопоставим результаты оценки исправности системы как по всей совокупности показателей функционирования, так и при частичном или полном удалении рассмотренных показателей.

Результаты испытаний. Для проведения расчётов использовался пакет Matlab [10], в котором реализованы все рассмотренные методы обучения (и множество других). Контрольная выборка формировалась случайным образом в объёме 10 % от исходной. Прогнозируемые по полученной модели вероятности исправного состояния объекта для контрольной выборки сравнивали с опытными значениями и рассчитывали дисперсию ошибок, значения которой приведены в табл. 2—4. Это значение и характеризует качество диагностики: чем меньше дисперсия, тем качественнее проведена диагностика объекта.

Regression Summary for Dependent Variable: Var9 (348)
R= ,60223681 R?= ,36268918 Adjusted R?= ,34764939
F(8,339)=24,115 p<0,0000 Std.Error of estimate: ,36817

N=348	b*	Std.Err. of b*	b	Std.Err. of b	t(339)	p-value
Intercept			-9,72953	4,912543	-1,98055	0,048450
Var1	-0,29027	0,231398	-0,02006	0,015993	-1,25443	0,210551
Var2	-1,49252	1,182069	-0,14666	0,116151	-1,26263	0,207590
Var3	-0,00791	0,062264	-0,00151	0,011870	-0,12702	0,899002
Var4	0,14294	0,045897	0,62994	0,202265	3,11443	0,002000
Var5	0,08618	0,047443	1,04414	0,574785	1,81657	0,070166
Var6	-0,00682	0,044844	-0,00061	0,004029	-0,15204	0,879246
Var7	1,32890	1,198312	1,34293	1,210965	1,10898	0,268226
Var8	0,35794	0,232992	5,51432	3,589385	1,53629	0,125401

Результаты регрессионного анализа

В табл. 2—4 приведены значения дисперсии ошибок при расчётах с использованием различных методов машинного обучения как с участием всех факторов, так и при удалении некоторых из них.

Из табл. 2 видно, что при использовании всей совокупности показателей лучшие результаты показал бэггинг деревьев решений. Видно также, что эффект от удаления рассмотренных факторов не получен: в некоторых случаях при удалении рассматриваемых показателей дисперсия ошибок увеличилась. Однако есть исключения: методы бустинга

Таблица 2

Результаты исследования (дисперсия ошибок) с исключением факторов, слабо коррелированных с состоянием системы

Метод	Все факторы	Без X_3	Без X_4	Без X_3 и X_4
Логистическая регрессия	0,19	0,20	0,21	0,25
Дискриминантный анализ	0,21	0,26	0,25	0,26
Байесовский классификатор	0,21	0,26	0,24	0,27
Нейронные сети	0,20	0,26	0,24	0,25
Метод опорных векторов	0,18	0,17	0,22	0,24
Бэггинг деревьев решений	0,17	0,17	0,20	0,19
AdaBoost	0,19	0,18	0,21	0,20
LogitBoost	0,20	0,19	0,23	0,21
GentleBoost	0,21	0,22	0,23	0,24
RusBoost	0,23	0,23	0,24	0,26

Таблица 3

Результаты исследования (дисперсия ошибок) с исключением сильно коррелированных факторов

Метод	Все факторы	Без X_7	Без X_8	Без X_7 и X_8
Логистическая регрессия	0,19	0,21	0,23	0,21
Дискриминантный анализ	0,21	0,25	0,25	0,24
Байесовский классификатор	0,21	0,25	0,25	0,23
Нейронные сети	0,20	0,20	0,22	0,22
Метод опорных векторов	0,18	0,19	0,21	0,21
Бэггинг деревьев решений	0,17	0,19	0,19	0,19
AdaBoost	0,19	0,19	0,21	0,21
LogitBoost	0,20	0,21	0,23	0,21
GentleBoost	0,21	0,23	0,25	0,22
RusBoost	0,23	0,24	0,23	0,23

Таблица 4

Результаты исследования (дисперсия ошибок) с исключением факторов, незначимых по критерию Стьюдента

Метод	Все факторы	Без X_3 и X_6
Логистическая регрессия	0,19	0,19
Дискриминантный анализ	0,21	0,25
Байесовский классификатор	0,21	0,25
Нейронные сети	0,20	0,24
Метод опорных векторов	0,18	0,19
Бэггинг деревьев решений	0,17	0,14
AdaBoost	0,19	0,17
LogitBoost	0,20	0,19
GentleBoost	0,21	0,20
RusBoost	0,23	0,25

AdaBoost и LogitBoost при удалении показателя X_3 показали снижение дисперсии ошибок с 0,19 до 0,18 (на 5,6 %) и с 0,20 до 0,19 (на 5,3 %) соответственно.

Из табл. 3 видно, что эффект от удаления рассмотренных факторов, как и в большинстве методов в предыдущем случае, приводит к увеличению дисперсии ошибки.

Из табл. 4 видно, что для бэггинга деревьев решений произошло снижение дисперсии ошибок с 0,17 до 0,14 (на 18 %), а удаление рассмотренных факторов приводит к некоторому улучшению результатов методов бустинга: AdaBoost, LogitBoost и GentleBoost.

Заключение. Опираясь на результаты проведённого исследования, можно сделать вывод о том, что удаление незначимых факторов оказывает неоднозначное влияние на эффективность машинного обучения, и для каждого метода подбор значимых факторов индивидуален. В системе диагностики состояния технического объекта необходимо предусмотреть подсистему поиска метода машинного обучения и отбора значимых показателей, обеспечивающую минимальную погрешность.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект 18-48-730001).

Библиографические ссылки

1. **Биргер И.А.** Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978. 240 с.

2. **Witten I.H., Frank E.** Data mining: practical machine learning tools and techniques. 2nd ed. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2005. 525 p.

3. **Мерков А.Б.** Распознавание образов. Введение в методы статистического обучения. М.: Едиториал УРСС, 2011. 256 с.

4. **Воронцов К.В.** Машинное обучение. Композиция классификаторов. Режим доступа: https://yadi.sk/i/FItIu6V0beBmF (дата обращения: 24.07.2018).

5. **Клячкин В.Н.** Статистические методы в управлении качеством: компьютерные технологии. М.: Финансы и статистика, ИНФРА-М, 2009. 304 с.

6. **Клячкин В.Н., Кувайскова Ю.Е., Алексеева В.А.** Статистические методы анализа данных. М.: Финансы и статистика, 2016. 240 с.

7. **Шунина Ю.С., Клячкин В.Н.** Прогнозирование платежеспособности клиентов банка на основе методов машинного обучения и марковских цепей // Программные продукты и системы. 2016. № 2. С. 105—112.

8. **Klyachkin V.N., Kuvayskova Yu.E., Zhukov D.A.** The use of aggregate classifiers in technical diagnostics, based on machine learning // CEUR Workshop Proceeding. Vol. 1903. Data Science. Information Technology and Nanotechnology. 2017. P. 32—35.

9. **Бубырь Д.С., Клячкин В.Н., Кувайскова Ю.Е.** и др. Прогнозирование физико-химических показателей источника водоснабжения // Автоматизация. Современные технологии. 2015. № 5. С. 14—17.

10. **Жуков Д.А., Клячкин В.Н.** Задачи обеспечения эффективности машинного обучения при диагностике технических объектов // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем. 2016. № 1 (10). С. 172—174.

Ссылка для цитирования

Клячкин В.Н., Кувайскова Ю.Е., Жуков Д.А. Влияние способа отбора значимых показателей на качество диагностики состояния технического объекта // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 1. С. 32—36.

УДК 004.89

В.Э. Мирзаханов
(Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, г. Баку)
mirzakhanv@inbox.ru

СИНТЕЗ ГРАФИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ УЧАСТКОВ ЧЕЛОВЕЧЕСКОЙ КОЖИ ПОСРЕДСТВОМ ЛИНГВИСТИЧЕСКОГО РЕФЕРИРОВАНИЯ

Синтезирована графическая система распознавания участков человеческой кожи, представляющая собой организованную совокупность двух подсистем: подсистемы логического вывода на основе лингвистического реферирования и генетического алгоритма и подсистемы кластеризации. Синтезированная система успешно протестирована путём обработки ряда фотографий с элементами человеческих тел.

Ключевые слова: лингвистическое реферирование; метод Wu-Mendel; анализ изображений; распознавание образов; генетический алгоритм; кластеризация; алгоритм DBSCAN.

A graphical human skin detection system is synthesized, which consists of two subsystems: linguistic summarization and genetic algorithm based inference subsystem and clustering subsystem. The synthesized system has been successfully put through the testing performed by processing several photos containing human body parts.

Keywords: linguistic summarization; Wu-Mendel approach; image analysis; pattern recognition; genetic algorithm; clustering; DBSCAN algorithm.

Введение. Распознавание образов (англ. *pattern recognition*) — интенсивно развивающаяся научная область, тесно сопряжённая с машинным обучением (англ. *machine learning*) и интеллектуальным анализом данных (англ. *Data Mining*). В данной статье рассматривается распознавание образов в наборах графических данных и решается задача синтеза графической системы распознавания участков человеческой кожи на фотографиях. В качестве методов синтеза системы распознавания используются лингвистическое реферирование Wu-Mendel (основной метод), алгоритм кластеризации DBSCAN и генетический алгоритм (вспомогательные методы).

Лингвистическое реферирование и метод Wu-Mendel. Лингвистическое реферирование (ЛР) является областью интеллектуального анализа данных и предназначено для извлечения явно обозначенных элементов информации/знаний из данных [1, 2]. Большинство современных методов ЛР оперирует элементами нечёткой логики Заде, использование которой в лингвистическом реферировании было впервые осуществлено и впоследствии популяризовано американским учёным Yager [3]. Одним из современных нечётких методов ЛР является используемый в данной статье метод Wu-Mendel [4], предназначенный для лингвистического реферирования наборов/баз данных путём генерации лингвистических правил типа ЕСЛИ-ТО. Особенностью метода Wu-Mendel является возможность оперирования нечёткой логикой разных типов: в частности, нечёткой логикой первого порядка (англ. *type-1 fuzzy logic*) и интервальной нечёткой логикой второго порядка (англ. *interval type-2 fuzzy logic*). Далее представлено краткое описание метода Wu-Mendel на основе нечёткой логики первого порядка.

Обозначим набор данных, подвергаемый лингвистическому реферированию, как D:

$$D = \{d_j^i | i = 1, \ldots, I; j = 1, \ldots, J\},$$

где d_j^i — значение j-го атрибута в i-й записи; I и J — количество записей и атрибутов в наборе данных D соответственно.

Целью имплементации метода Wu-Mendel является генерация продукционных правил, описывающих данные D, следующей формы:

$$\begin{aligned} &\textbf{ЕСЛИ}\ A_1 \text{ есть } S_1 \text{ и} \ldots \text{и } A_m \text{ есть } S_m, \\ &\textbf{ТО}\ A_{m+1} \text{ есть } S_{m+1} \text{ и} \ldots \text{и } A_{m+n} \text{ есть } S_{m+n}\,[Q], \end{aligned} \quad (1)$$

где A_j (j = 1, ..., $m + n$) — атрибут D; S_j (j = 1, ..., $m + n$) — задаваемый пользователем и описываемый нечётким множеством первого порядка лингвистический терм A_j; $Q \in [0, 1]$ — качественная мера правила.

Метод Wu-Mendel предусматривает предварительное составление полного набора всевозможных правил типа ЕСЛИ-ТО, описывающих данные D, и последующее вычисление значения Q для каждого сгенерированного правила. В статье [4] предложено пять качественных мер Q, каждая из которых описывает некоторое качество правила:

мера T — степень истинности правила (англ. *degree of truth*);

мера C — степень полноты охвата правила (англ. *degree of sufficient coverage*);

мера R — степень надёжности правила (англ. *degree of reliability*);

мера U — степень отчуждённости правила (англ. *degree of outlier*);

мера S — степень простоты правила (англ. *degree of simplicity*).

В методе Wu-Mendel основной качественной мерой является R, представленная как функция от T и C. Расчёт T, C и R осуществляется по формулам

$$T = \frac{\sum_{i=1}^{I} \min[\mu_{S_1}(d_1^i), \ldots, \mu_{S_{m+n}}(d_{m+n}^i)]}{\sum_{i=1}^{I} \min[\mu_{S_1}(d_1^i), \ldots, \mu_{S_m}(d_m^i)]};$$

$$C = \begin{cases} 0, & r_c \leqslant r_c^{\min}; \\ 2\left(\dfrac{r_c - r_c^{\min}}{r_c^{\max} - r_c^{\min}}\right)^2, & r_c^{\min} < r_c < \dfrac{r_c^{\min} + r_c^{\max}}{2}; \\ 1 - 2\left(\dfrac{r_c^{\max} - r_c}{r_c^{\max} - r_c^{\min}}\right)^2, & \dfrac{r_c^{\min} + r_c^{\max}}{2} \leqslant r_c < r_c^{\max}; \\ 1, & r_c \geqslant r_c^{\max}, \end{cases}$$

где r_c — относительное число охватываемых правилом записей D; $r_c^{\min}$ и $r_c^{\max}$ — задаваемые пользователем граничные значения r_c (если $r_c \leqslant r_c^{\min}$, то $C = 0$ и если $r_c \geqslant r_c^{\max}$, то $C = 1$);

$$r_c = \frac{\sum_{i=1}^{I} t_i}{I},$$

где $t_i = \begin{cases} 1 & \mu_{S_1}(d_1^i) > 0 \text{ и} \ldots \text{и } \mu_{S_{m+n}}(d_{m+n}^i) > 0; \\ 0 & \text{в противном случае}, \end{cases}$

$R = \min(T, C)$.

Задача синтеза системы распознавания участков человеческой кожи и её решение. Задача синтеза заключается в разработке системы, которая путём графической обработки фотографий выявляла бы на них участки человеческой кожи. Исходным набором данных, используемым для синтеза системы распознавания, являются данные [5] размерностью 245057 × 4 (табл. 1), содержащие совокупность цветов в формате RGB, соответствующих или не соответствующих цвету человеческой кожи. Синтезируемая система распознавания состоит из двух подсистем: логического вывода и кластеризации.

Таблица 1

Информация об атрибутах набора данных

№ п/п	Имя	Тип	Область значений	Описание
1	Red	ант.	[0, 255]	R (Red) в RGB
2	Green	ант.	[0, 255]	G (Green) в RGB
3	Blue	ант.	[0, 255]	B (Blue) в RGB
4	Class	кон.	{1, 2}	1 — цвет кожи, 2 — не цвет кожи

Подсистема логического вывода представляет собой систему нечёткого логического вывода (НЛВ) Мамдани, синтезированную на основе лингвистического реферирования и генетического алгоритма, и предназначена для пиксельного распознавания человеческой кожи на фотографиях: каждый пиксель подаваемого на вход изображения формата RGB подвергается анализу на предмет соответствия цвету кожи, и на выходе подсистемы выдаётся фотография с удалёнными несоответствующими цвету кожи пикселями.

Подсистема кластеризации осуществляет сегментирование человеческой кожи на фотографиях путём кластеризации соответствующих цвету кожи пикселей. В качестве алгоритма кластеризации используется DBSCAN [9] по следующим причинам:

участки человеческой кожи на фотографиях в общем случае имеют произвольную форму, а алгоритм DBSCAN довольно эффективен при выделении кластеров произвольной формы;

фотографии, обработанные подсистемой логического вывода, зашумляются пикселями, находящимися в отдалении от кожных участков и распознанными как соответствующие цвету кожи, что создаёт потребность в использовании распознающего шумы алгоритма кластеризации;

количество участков человеческой кожи на фотографиях не является фиксированной ве-

личиной, что создаёт потребность в использовании алгоритма кластеризации, автономно определяющего количество кластеров.

Процедура синтеза системы распознавания участков человеческой кожи состоит из шести этапов.

Этап 1. Подготовка набора данных. На данном этапе набор данных [5] разбивается на обучающую и тестовую выборки. Синтез системы распознавания осуществляется на обучающей выборке *D*, и его результаты проверяются на тестовой выборке.

Этап 2. Фаззификация атрибутов D. В данном случае под фаззификацией понимается представление каждого атрибута обучающей выборки набора данных [5] в виде лингвистической переменной, описываемой нечёткой логикой первого порядка. В статье [4] фаззификация производится вручную пользователем/экспертом.

Этап 3. Лингвистическое реферирование. На основе результатов фаззификации атрибутов *D* составляется список всевозможных правил типа (1) с вычисленными значениями *R*.

Этап 4. Синтез системы НЛВ Мамдани. Из синтезированных на предыдущем этапе правил отбираются правила с $R \geqslant R^*$, где R^* — задаваемое пользователем критическое значение. При этом если существует более одного правила с $R \geqslant R^*$, и с одинаковой антецедентной и различной консеквентной частями, то эти правила считаются конфликтными и из них отбирается лишь одно правило с максимальным значением *R*. Отобранные правила формируют базу правил системы НЛВ Мамдани, причём вес каждого правила приравнивается к соответствующему значению *R*.

Этап 5. Оптимизация системы НЛВ Мамдани. Нечёткие множества, описывающие входы системы НЛВ Мамдани и определённые на этапе 2, подвергаются подстройке генетическим алгоритмом.

Этап 6. Подбор параметров DBSCAN. Параметры DBSCAN (*Eps*, *MinPrs*) подбираются пользователем/экспертом под определённый размер и тип фотографии. Отметим, что математический смысл параметров *Eps* и *MinPts* заключается в следующем: каждому элементу *p* кластера *Cl*, полученного посредством DBSCAN, должен соответствовать некоторый элемент *q* кластера *Cl* так, что расстояние (в нашем случае, евклидово) между *p* и *q* не превышает *Eps*, и круг (в общем случае, гипершар) с радиусом *Eps* и центром *q* содержит не менее *MinPts* элементов кластера *Cl*.

Моделирование системы распознавания участков человеческой кожи в среде MATLAB. Моделирование системы распознавания проведено в соответствии с представленной ранее поэтапной процедурой синтеза, и его результаты доступны по ссылке [7].

Этап 1. Набор данных [5] рандомно разбит на обучающую (70 %) и тестовую (30 %) выборки. В лингвистическом реферировании и, соответственно, в создании подсистемы логического вывода в качестве реферируемых данных *D* использована обучающая выборка.

Этап 2. Осуществлена пользовательская фаззификация атрибутов R, G, B обучающей выборки набора данных [5] (рис. 1). Фаззификация атрибута Class не произведена по причине того, что этот атрибут является категориальным.

Этап 3. Осуществлено лингвистическое реферирование *D* и получен список из 686 (7 × 7 × 7 × 2) правил с вычисленными значениями *R*.

Этап 4. Из правил, синтезированных на предыдущем этапе, отобраны правила с $R \geqslant 0{,}57$ и составлена база 147 правил системы НЛВ Мамдани, часть которой показана в табл. 2. Для справки: среднеквадратическая ошибка вывода (англ. *root-mean-square error*) син-

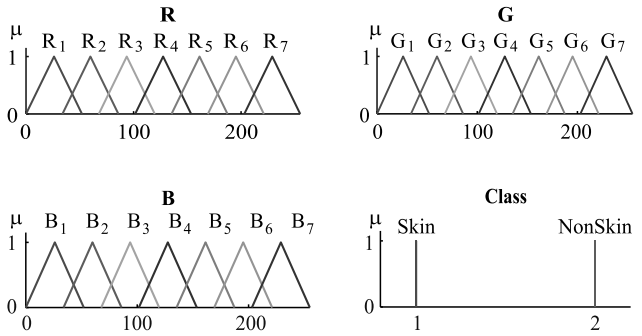


Рис. 1. Заданные пользователем лингвистические переменные R, G, B и Class

Таблица 2

Часть базы правил системы НЛВ

№ п/п	Правило
145	ЕСЛИ R есть R_4 и G есть G_5 и B есть B_3, ТО Class есть NonSkin [R = 0,58]
146	ЕСЛИ R есть R_3 и G есть G_5 и B есть B_3, ТО Class есть NonSkin [R = 0,57]
147	ЕСЛИ R есть R_7 и G есть G_2 и B есть B_1, ТО Class есть NonSkin [R = 0,57]

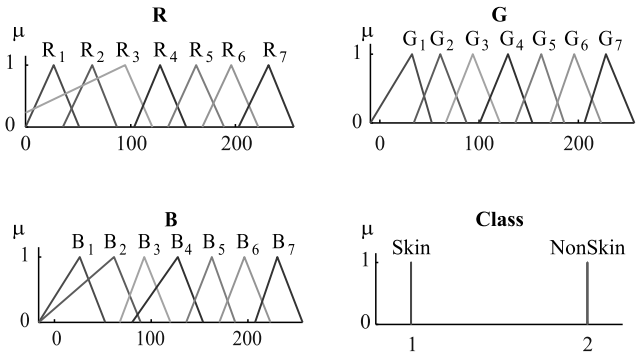


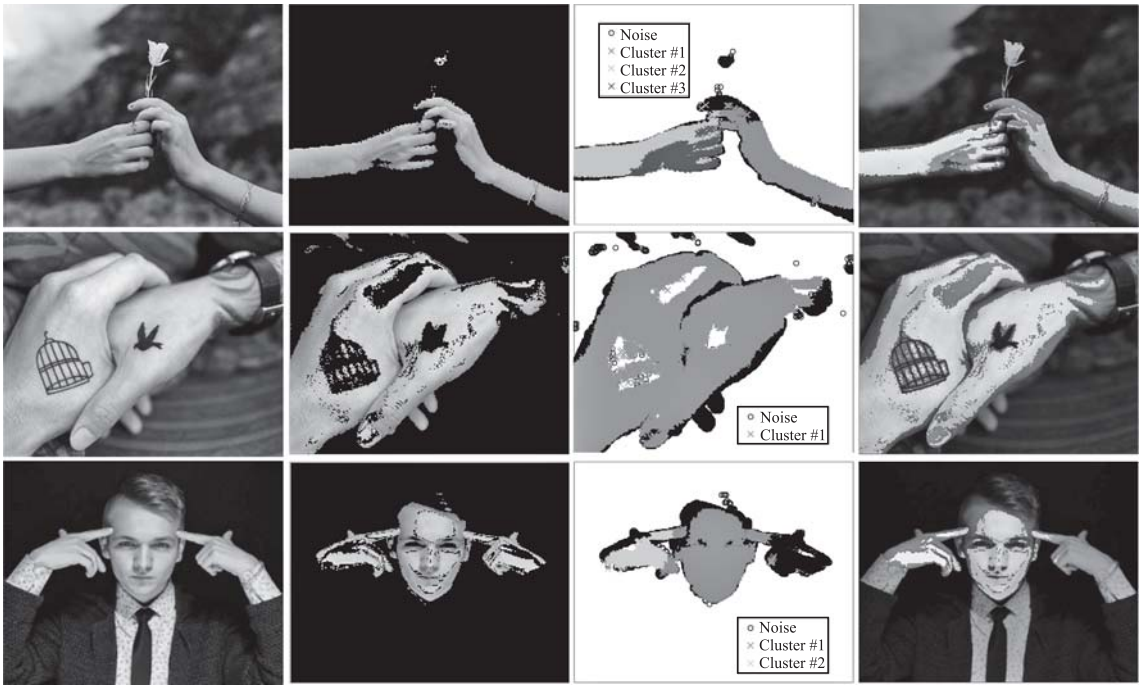
Рис. 2. Оптимизированные лингвистические переменные R, G, B и Class

тезированной системы НЛВ составляет 0,158 на обеих (обучающей и тестовой) выборках.

Этап 5. Синтезированная система НЛВ Мамдани подвергнута оптимизации нечётких множеств, описывающих атрибуты R, G, B, являющиеся входами системы НЛВ. Для оптимизации использован генетический алгоритм, представленный в MATLAB. Подробный список использованных параметров данного алгоритма доступен по ссылке [7]. Входы и выход оптимизированной системы НЛВ показаны на рис. 2. Для справки: среднеквадратическая ошибка вывода оптимизированной системы НЛВ составляет 0,104 и 0,103 на обучающей и тестовой выборках соответственно.

Этап 6. С учётом разрешения обрабатываемых фотографий (250 × 200) и предполагаемых площадей кожных участков экспериментальным путём получены следующие параметры DBSCAN: *Eps* = 30, *MinPts* = 400. Отметим, что вопрос о методе подбора параметров DBSCAN для распознавания участков кожи в общем случае остаётся открытым, так как параметры находятся в сильной зависимости от разрешения обрабатываемых фотографий, площадей и количества кожных участков на фотографии.

Тестирование синтезированной системы распознавания на фотоматериале. В качестве тестового материала используются три фотографии, исходники которых доступны на https://pixabay.com по лицензии Creative Commons CC0. Каждая из фотографий сначала обрабатывается подсистемой логического вывода, которая распознаёт соответствующие цвету кожи пиксели и удаляет остальные, а затем в обработанной форме подаётся на вход подсистемы кластеризации, которая выделяет участки человеческой кожи (рис. 3). Как видно из рис. 3, система распознавания демонстрирует высокое качество распознавания цвета человеческой кожи (рис. 3, *б*) и приемлемое качество кластеризации соответствующих цвету кожи пикселей (рис. 3, *в*).



а) *б)* *в)* *г)*

Рис. 3. Тестирование синтезированной системы распознавания:
а — исходные изображения; *б* — вывод подсистемы логического вывода; *в* — кластеризация посредством DBSCAN; *г* — вывод подсистемы кластеризации

Заключение. Синтезирована нечёткая графическая система распознавания участков человеческой кожи посредством использования метода лингвистического реферирования Wu-Mendel, генетического алгоритма и алгоритма кластеризации DBSCAN. Синтезированная система распознавания успешно прошла тестирование на соответствующем фотоматериале, продемонстрировав практическую применимость в графическом распознавании и сегментировании человеческой кожи.

Библиографические ссылки

1. **Boran F.E., Akay D., Yager R.R.** An overview of methods for linguistic summarization with fuzzy sets // Expert Systems with Applications. 2016. Vol. 61. P. 356—377.

2. **Dijkman R., Wilbik A.** Linguistic summarization of event logs — A practical approach // Information Systems. 2017. Vol. 67. P. 114—125.

3. **Yager R.R.** A new approach to the summarization of data // Information Sciences. 1982. Vol. 28. № 1. P. 69—86.

4. **Wu D., Mendel J.** Linguistic Summarization Using IF-THEN Rules and Interval Type-2 Fuzzy Sets // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 2011. Vol. 19. № 1. P. 136—151.

5. **Bhatt R., Dhall A.** Skin Segmentation Dataset [Электронный ресурс] // UCI Machine Learning Repository. 2012. URL: https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Skin + Segmentation (дата обращения: 06.03.2018).

6. **Ester M., Kriegel H., Sander J., Xu X.** A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise // KDD-96 Proceedings. 1996. P. 226—231.

7. **Mirzakhanov V.** Human skin detection system [Электронный ресурс]. 2018. URL: https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/66321-human-skin-detection-system (дата обращения: 05.03.2018).

Ссылка для цитирования

Мирзаханов В.Э. Синтез графической системы распознавания участков человеческой кожи посредством лингвистического реферирования // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 1. С. 37—41.

Уважаемые авторы и читатели!

Редакция и редакционная коллегия сообщают:
межотраслевой научно-технический журнал «Автоматизация. Современные технологии»
успешно прошёл аккредитацию в ВАК при Минобрнауки России
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 007

Ю.Н. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.
(Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва)
jkondr@yandex.ru

ХРАНИЛИЩЕ ДАННЫХ ДЛЯ АНАЛИЗА БЮДЖЕТНОГО ПРОЦЕССА

Обосновывается необходимость использования современных аналитических информационных технологий для повышения эффективности принятия решений в процессе планирования и исполнения бюджета в Российской Федерации. Анализируется использование методов Data Mining в прикладных задачах управления бюджетным процессом. Рассмотрены архитектура и реализации хранилища данных для анализа бюджетных данных на платформе MS SQL Server. Приводятся логическая структура измерений и показателей хранилища, прикладные OLAP-кубы, примеры и алгоритмы использования методов Data Mining в прикладных задачах, в частности, для прогнозирования параметров бюджета.

Ключевые слова: бюджетный процесс; принятие решений; хранилище данных; OLAP-анализ; прогнозирование; методы Data Mining.

The necessity of using modern analytical information technologies to improve the efficiency of decision-making in the process of planning and implementing the budget in the Russian Federation is substantiated. The application of Data Mining methods in applied tasks of budget management is analyzed. The architecture and implementations of data storage for analyzing budget data on MS SQL Server platform are considered. The logical structure of measurements and indicators of the storage, applied OLAP cubes, examples and algorithms for using Data Mining methods in applied tasks, in particular, for prediction budget parameters, are given.

Keywords: budget process; making decisions; data store; OLAP analysis; prediction; Data mining methods.

Бюджетная система Российской Федерации представляет собой совокупность бюджетов государства, его административно-территориальных образований, самостоятельных в бюджетном отношении государственных учреждений и фондов [1]. В соответствии с Конституцией и Бюджетным кодексом Российской Федерации бюджетная система нашей страны имеет три уровня: федеральный, региональный и местный.

Федеральная компонента представлена двумя составляющими: федеральным бюджетом и федеральными внебюджетными фондами. Через федеральный бюджет происходит перераспределение денежных средств между всеми уровнями бюджетной системы.

Федеральные внебюджетные фонды являются централизованными фондами денежных средств, которые образуются вне федерального бюджета и бюджетов субъектов Российской Федерации.

Региональный бюджет (бюджет субъекта Российской Федерации) и свод местных бюджетов данного региона составляют консолидированный бюджет субъекта Российской Федерации. Консолидированные бюджеты субъектов федерации включают территориальные внебюджетные фонды, региональные бюджеты (бюджеты субъектов Российской Федерации) и бюджеты муниципальных образований (местные бюджеты, к которым относятся бюджеты муниципальных районов и городов).

Бюджет любого уровня состоит из доходной и расходной частей, которые должны быть согласованы между собой.

Доходная часть показывает, откуда поступают средства на финансирование деятельности государства. Структура доходов непостоянна и зависит от конкретных экономических условий развития страны, рыночной конъюнктуры и осуществляемой экономической политики. Расходная часть показывает, на какие цели направляются аккумулированные государством средства.

В бюджетном процессе на всех уровнях от руководителей финансовых органов требуется принятие решений по корректировке хода бюджетного процесса в целях обеспечения исполнения утвержденного бюджета. Решения принимаются на основе анализа хода испол-

нения бюджета, соответствия фактических и плановых показателей по доходам и расходам, согласованности доходов и расходов, а также тенденций изменения ситуации.

Для целей анализа требуется представление данных с различной степенью детализации, что вызвано высокой сложностью и многоаспектностью информации, описывающей состояние бюджетного процесса. Так, анализ доходной и расходной частей бюджета требует использования стандартных бюджетных классификаторов на разных уровнях бюджетной системы по временному распределению и группированию по территориальному признаку, отраслям, видам деятельности, форме собственности и организационно-правовой форме. Основой для группирования в различных и сложных комбинациях являются стандартные общероссийские классификаторы.

Кроме того, параметры доходной и расходной частей бюджета зависят от экономических показателей страны и территорий, отраслей и бюджетообразующих предприятий, которые в свою очередь также зависят от параметров бюджета. Необходимы как прямой факторный анализ влияния общеэкономических показателей на параметры доходной и расходной частей бюджета, так и обратный анализ влияния показателей бюджета на общеэкономические показатели. Такой анализ требует соответствующего информационного обеспечения и развитой функциональности автоматизированных систем поддержки принятия решений в бюджетном процессе, в частности, возможности гибкой постановки и решения аналитических задач.

Повышение эффективности принятия решений в процессе исполнения бюджета определяется комплексным использованием таких современных аналитических технологий, как хранилище данных, оперативная аналитическая обработка (OnLine Analytical Processing — OLAP) и добыча знаний (Data Mining). Наиболее глубокий и качественный анализ обеспечивает технология Data Mining, которая показывает высокую эффективность в различных областях (маркетинг, банковское дело, торговля и др.).

В настоящее время сложился устойчивый набор стандартных методов, которые включают в состав технологии Data Mining. Такими методами являются классификация, кластеризация, ассоциация, анализ последовательности, прогнозирование, определение отклонений или выбросов, анализ взаимосвязей, нейронные сети, визуализация многомерных данных [2]. В таблице приведены результаты анализа возможности использования таких стандартных методов в реальных задачах управления бюджетным процессом.

Применение технологии Data Mining в бюджетном процессе

Стандартные методы Data Mining	Применение в процессе принятия решений в бюджетном процессе
Классификация	Выделение кластерной структуры публично-правовых образований (ППО)
Кластеризация	Выделение кластерной структуры ППО
Анализ последовательности	Предсказание наступления кризиса и прогноз его развития
Прогнозирование	Прогнозирование доходов и расходов бюджета, остатков на счетах и др. Прогнозирование экономической эффективности финансирования целевых программ
Определение отклонений или выбросов	Контроль за целевым использованием бюджетных средств
Анализ связей	Обнаружение связей параметров бюджета с результатами деятельности ППО
Нейронные сети	Прогнозирование доходов и расходов бюджета, остатков на счетах и др. Анализ динамики расходных и доходных статей. Прогнозирование экономической эффективности финансирования целевых программ
Визуализация многомерных данных	Выделение кластерной структуры ППО

Можно сделать вывод, что методы Data Mining могут использоваться для широкого спектра задач при управлении бюджетным процессом.

Архитектура аналитической системы, использующей указанные технологии, уже стала канонической и включает компоненты для извлечения информации из источников данных, её преобразования и загрузки в хранилище, структурированное хранилище информации, предметно-ориентированные на конкретный анализ витрины данных (многомерные кубы), средства доступа и работы с многомерными кубами (OLAP-клиенты с удобными средства-

ми представления числовой и графической информации), а также средства гибкого формирования структур данных и аналитических моделей соответственно поставленным прикладным задачам с использованием методов Data Mining [3].

Для реализации такой архитектуры ведущие мировые производители СУБД (Microsoft, Oracle, IBM и др.) представляют специальные программные средства, которые имеют примерно равнозначную функциональность.

Реализация хранилища данных для анализа бюджетного процесса выполнена на Microsoft SQL Server 2008 [4]. Службы анализа от Microsoft включают набор служб в SQL Server, связанных с бизнес-анализом и хранением данных — службы интеграции (Integration Services) и службы анализа (Analysis Services). Службы Integration Services представляют собой платформу для построения высокопроизводительных решений интеграции данных, включая операции извлечения, преобразования и загрузки (ETL) для хранилищ данных. Analysis Services в свою очередь включают в себя набор средств для работы с OLAP-кубами и интеллектуальным анализом данных.

Предварительный анализ показал, что структура хранилища данных должна содержать кубы доходов, расходов, источников финансирования и объединённый куб для итоговых показателей доходов, расходов и источников финансирования дефицитов бюджетов. Для такой структуры необходимы следующие измерения:

Общероссийский классификатор объектов административно-территориального деления (ОКАТО);

Общероссийский классификатор территорий муниципальных образований (ОКТМО);

Общероссийский классификатор видов экономической деятельности (ОКВЭД);

уровень бюджета;

классификатор доходов;

классификатор расходов;

классификатор источников финансирования дефицитов бюджета;

время.

ОКАТО входит в состав Единой системы классификации и кодирования технико-экономической и социальной информации Российской Федерации (ЕСКК) и предназначен для обеспечения достоверности, сопоставимости и автоматизированной обработки информации в разрезах административно-территориального деления. Объектами классификации в ОКАТО являются республики, края, области, города федерального значения, автономные области и округа, районы, города, внутригородские районы, округа города, посёлки городского типа, сельсоветы и сельские населённые пункты. В классификаторе принята иерархическая система классификации. Все объекты административно-территориального деления подразделяются на группы согласно территориальному делению, и эти группы располагаются по трём уровням классификации в соответствии с административной подчинённостью, причём в каждый уровень включаются объекты, непосредственно подчинённые объектам предыдущего уровня. Таблица измерения ОКАТО поддерживает такую иерархическую структуру записей.

ОКТМО предназначен для обеспечения систематизации и однозначной идентификации на всей территории Российской Федерации муниципальных образований с отражением структуры и уровней территориальной организации местного самоуправления для решения задач сбора, автоматизированной обработки, представления и анализа информации в разрезе муниципальных образований. В классификаторе также используется иерархический метод классификации и объекты классификации подразделяются на группы, располагаемые на трёх ступенях классификации. Таблица измерения ОКТМО поддерживает такую иерархическую структуру записей.

В ОКВЭД также используется иерархический метод классификации со структурой: класс, подкласс, группа, подгруппа, вид.

Измерение «Уровень бюджета» определяется тремя уровнями бюджетной системы Российской Федерации (федеральный, региональный и местный) и имеет поле для записи используемой функции агрегации.

Измерение «Классификатор доходов» определяется группировкой доходных источников бюджетов всех уровней бюджетной системы Российской Федерации. Измерение основывается на структуре двадцатизначного кода классификации доходов бюджетов, который имеет четыре составные части:

главный администратор доходов бюджета; вид доходов по группам, подгруппам, статьям, подстатьям, элементам;

подвид доходов;

классификация операций сектора государственного управления (КОСГУ).

Соответственно, иерархия измерения включает уровни: группа, подгруппа, статья, подстатья, элемент, подвид доходов, статья по КОСГУ.

Измерение «Классификатор расходов» определяется группировкой расходов бюджетов всех уровней и отражает направление бюджетных средств на выполнение подразделениями сектора государственного управления и местного самоуправления основных функций, а также на решение социально-экономических задач. Измерение основывается на структуре двадцатизначного кода классификации, который имеет следующие составные части:

главный распорядитель бюджетных средств;

раздел;

подраздел;

целевая статья и вид расходов;

операции сектора государственного управления, относящиеся к расходам бюджетов.

Иерархия измерения включает уровни: раздел, подраздел, целевая статья, вид расходов, статья по КОСГУ.

Измерение «Классификатор источников финансирования дефицитов бюджета» основывается на структуре двадцатизначного кода классификации, который имеет следующие составные части:

код главного администратора источников финансирования дефицитов бюджетов;

код группы, подгруппы, статьи и вида источника финансирования дефицитов бюджетов;

код КОСГУ, относящихся к источникам финансирования дефицитов бюджетов.

Измерение «Время» имеет иерархию — месяц, квартал, полугодие, год. Измерение строится на основе последовательности значений даты в таблице Exel с помощью специального алгоритма.

Измерения связаны в отношении «один ко многим» с таблицей фактов. Таблица фактов содержит значения доходов бюджета, расходов бюджета и значения для источников финансирования дефицитов бюджетов. На основе этих хранимых данных вычисляются такие показатели, как нарастающие итоги по поступлениям доходов бюджета, расходов бюджета и др. Используются также индикаторы производительности для наиболее важных параметров бюджета.

Хранилище реализовано по схеме «звезда». Исходные данные могут загружаться из учётных систем поддержки бюджетного процесса. Для тестирования системы использовались данные по отчётности исполнения бюджетов Российской Федерации с сайта Казначейства Российской Федерации.

Рассмотренная структура хранилища данных позволяет построить варианты многомерных OLAP-кубов для анализа бюджетов. Такими реализованными вариантами являются куб для анализа доходов бюджета, куб для анализа расходов бюджета и куб для совместного анализа доходов и расходов, позволяющие проводить анализ бюджетных данных соответствующими специалистами в предметной области. Набор прикладных OLAP-кубов может расширяться.

В частности, куб для анализа доходов бюджета использует измерения ОКАТО, ОКВЭД, классификатор доходов, время и подмножество показателей таблицы фактов, относящихся к доходам бюджета.

Для анализа при работе с кубами используется MS Excel как OLAP-клиент. Обеспечивается довольно эффективный анализ бюджетных данных с гибким формированием отчётных форм и графиков. Можно анализировать как детальные, так и агрегированные данные.

В процессе анализа и принятия решений при управлении бюджетным процессом важную роль играет прогнозирование. Например, на основе прогнозов доходов бюджета формируется бюджетная политика на следующий финансовый год. Бюджетные показатели, накопленные за достаточный период времени, составляют фактографические (исторические) данные, которые могут использоваться при планировании и прогнозировании.

Рассмотренная иерархическая структура измерений хранилища данных позволяет удобно строить прогнозы показателей бюджета. Объект прогноза может гибко формироваться по иерархиям измерений. Например, можно строить прогноз для налога на прибыль в целом или по компонентам налога на прибыль организаций, налога на прибыль организаций с доходов, полученных в виде процентов по государственным и муниципальным ценным бумагам и др. Аналогично можно строить прогноз по федеральному округу, области, городу и т. д. При этом прогноз для какого-либо объекта также может формироваться на основе прогнозов элементов следующего уровня иерархии агрегированием прогнозных значений аналогично агрегированию показателей. Можно строить отдельные прогнозы по региону и уточняющие прогнозы для крупных налогоплательщиков или бюджетообразующих предприятий.

Программные средства для работы с хранилищем обеспечивают как построение прогнозных моделей, так и их использование для прогнозирования. После выбора объекта прогноза и построения прогнозной модели она «привязывается» к этому объекту и может использоваться для прогнозирования. Результаты прогнозов также записываются в специальную таблицу хранилища, структура которой совпадает с таблицей фактов. В структуре хранилища предусмотрены специальные «флаги», показывающие наличие прогнозных моделей для объектов прогноза и выполненных прогнозов. При анализе бюджетных данных в OLAP-клиенте значение прогноза может использоваться так же, как и значение показателя из таблицы фактов.

Приведённая структура хранилища данных позволяет решать задачи прогнозирования показателей бюджета на основе временных рядов с использованием таких методов Data Mining из Analysis Services Microsoft, как прогнозирование и нейронная сеть. При использовании этих методов исходные данные представляются в виде последовательности значений прогнозируемого показателя (например, значения доходов бюджета) в разное время.

Применение методов прогнозирования на основе временных рядов требует выборки данных из хранилища и представления в соответствующей канонической форме (структура данных для анализа в Analysis Services). При выборе задаётся прогнозируемый показатель (из таблицы фактов) и объект прогноза (значения по всем измерениям, которые индексируют выбранный показатель). При выборе показателя дохода бюджета объект прогноза определяется выборкой значений измерений классификатор доходов, ОКАТО, ОКВЭД, уровень бюджета (например, налоги на прибыль, Тульская область, все виды экономической деятельности, федеральный бюджет). Временной ряд может формироваться по разным уровням иерархии измерения «Время» (например, по месяцам).

Разработанные программные средства включают специальные мастера (визарды) для задания прогнозируемого показателя и объекта прогноза, уровня иерархии измерения «Время», временного интервала для отбора исторических данных и выбора данных из хранилища для формирования соответствующего временного ряда. Имеется возможность отобразить сформированный временной ряд и произвести очистку данных (устранение аномальных и пропущенных значений).

При использовании метода прогнозирования из Analysis Services Microsoft сформированный ряд соответствует требуемой структуре для анализа. Для формирования прогноза задаётся только количество прогнозируемых периодов. Результаты прогноза выдаются сразу после обращения к методу.

При использовании метода нейронной сети из Analysis Services Microsoft полученный временной ряд является исходным для формирования структуры анализа. Такая структура будет определяться заданием количества предпрогнозных периодов исторических данных, на основе которых обучается нейронная сеть и рассчитывается прогноз. Можно обучать сеть и строить прогноз на основе одного, двух, трёх и т. д. предпрогнозных периодов временного ряда. Цель такого варьирования — получение более точного прогноза. В каждом из этих случаев структура для анализа различна (изменяется количество входов нейронной сети) и требует преобразования исходного временного ряда. Такое преобразование осуществляется программно на основе задаваемого количества предпрогнозных периодов временного ряда с созданием соответствующей структуры анализа в Analysis Services. При таком подходе необходимо учитывать, что имеется взаимосвязь увеличения количества входов нейронной сети, количества нейронов промежуточного слоя и объёмом ретроспективных данных для обучения сети. Чем сложнее нейронная сеть, тем больше ретроспективных данных необходимо для обучения. Если данных недостаточно, то возможно переобучение сети, снижающее качество прогноза.

При прогнозировании бюджетных данных нельзя заранее рекомендовать использование того или иного метода. Точность прогноза будет определяться выборкой конкретного объекта прогноза, объёмом ретроспективных данных, алгоритмами устранения аномалий и задаваемыми параметрами метода прогнозирования. В каждом конкретном случае необходим анализ качества полученных прогнозных моделей при различном сочетании влияющих факторов. То есть необходим целенаправленный эксперимент с различными методами и моделями, что требует соответствующего программного и информационного обеспечения.

В Analysis Services Microsoft реализована базовая структура для работы с методами Data Mining, включающая систему «структура

анализа» — «модель», в которой для каждой структуры можно создать несколько моделей. В данном проекте реализована расширенная по сравнению с базовой структура хранения и обработки информации. Структура включает следующие уровни: объект прогноза, доступная ретроспективная информация, выбранный и очищенный временные ряды, структура анализа, модель, параметры модели, оценка точности прогноза. Такая структура более адекватна реальному процессу построения, оценки качества прогнозных моделей бюджетных данных и даёт возможность удобного проведения экспериментов с сохранением промежуточных вариантов и выбора наилучшей. Такая модель для рассматриваемого объекта прогноза фиксируется в хранилище и может использоваться для построения прогноза.

Использование методов Data Mining в других прикладных задачах при анализе бюджетного процесса и, в частности, для указанного факторного анализа влияния общеэкономических показателей на доходную и расходную части бюджета обусловливает развитие структуры и функциональности хранилища данных.

На бюджет влияют уровень экономического развития, денежно-финансовая политика, отраслевая структура и хозяйственная специализация, рынок труда, состояние социальной сферы, природно-сырьевые ресурсы и др. Эти факторы для различных уровней объектов анализа (страна, регион, отрасль, предприятие) описываются наборами параметров, значения которых можно накапливать в хранилище и использовать совместно с показателями доходов и расходов бюджета. В качестве примера можно привести построение и использование для прогнозирования доходов бюджета факторной модели [5]. Были выявлены значимые факторы (экспорт товаров, индекс потребительских цен, цена на нефть) и построена регрессионная модель, обеспечивающая достаточное качество прогноза.

Измерения хранилища данных ОКАТО, ОКТМО, ОКВЭД поддерживают территориальную и отраслевую иерархию и могут индексировать параметры объектов анализа. Примерами таких параметров на уровне региона могут быть среднегодовая численность населения, удельный вес экономически активного населения, уровень производительности труда в регионе и др. Значения этих параметров можно хранить аналогично рассмотренной таблице фактов и использовать совместно с параметрами бюджета при обращении к методам Data Mining.

Для приведённой задачи «Выделение кластерной структуры ППО» с использованием метода кластеризация алгоритм построения модели включает фиксацию времени, применение фильтра для выбора подмножества объектов, применение фильтра для выбора подмножества параметров описания объектов, выборку значений параметров для объектов, анализ выборки (удаление пропущенных значений, балансировка и переразметка данных), построение структуры анализа, выбор алгоритма кластеризации, задание параметров алгоритма, получение и анализ результатов с использованием таблиц и графиков. Этот алгоритм должен поддерживаться соответствующей иерархической информационной структурой для хранения альтернативных вариантов.

Результат анализа — выбранное количество кластеров и их характеристики (полученная модель). Для объектов (выбранное подмножество объектов) фиксируется их принадлежность к кластерам с записью информации в хранилище.

Полученная модель записывается в хранилище данных. Следует отметить, что в рассмотренном примере модель не привязывается к объекту (она строится для множества объектов), как это было при построении прогнозных моделей. Для моделей необходима специальная структура хранения. Описание модели в хранилище содержит полное её описание в соответствии с последовательностью работы алгоритма построения модели.

При обращении к модели (определении, к какой группе или кластеру относится конкретное ППО) производятся выборка или ввод параметров ППО, проверка соответствия набора параметров ППО структуре анализа, на которой построена модель, и вызов модели. В хранилище прописывается принадлежность ППО конкретному кластеру (результат вызова модели).

Рассмотренный пример построения модели кластеризации обусловливает сложность необходимого программного и информационного обеспечения хранилища данных. Кроме того, если при реализации рассмотренных методов прогнозирования бюджетных данных алгоритмы работы с хранилищем и структуры данных в значительной степени были подобны, то для других методов Data Mining такого относительного единообразия получить не удаётся. Для разных задач может потребовать-

ся разработка соответствующего программного и информационного обеспечения.

Реализация таких многофункциональных хранилищ для анализа бюджетных данных должна строится поэтапно, с оценкой сложности и результативности полученных решений. Вместе с тем многофункциональное хранилище позволит проводить более качественный анализ бюджетных данных и повысит качество принятия решений при управлении бюджетным процессом.

Библиографические ссылки

1. **Александров И.М.** Бюджетная система Российской Федерации. М.: Дашков и К, 2007. 166 с.

2. **Барсегян А.А.** и др. Анализ данных и процессов: учеб. пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2009. 512 с.

3. **Кондрашов Ю.Н.** Инвариантная информационная архитектура для организации системных исследований в экономике. Материалы III междунар. науч.-практ. конф. «Системный анализ в экономике-2014». Т. 1. М.: ЦЭМИ РАН, 2015. С. 179—181.

4. **Макленнен Дж., Танг Чж., Криват Б.** Microsoft SQL Server 2008: Data Mining — интеллектуальный анализ данных. Пер. с англ. СПб.: БХВ-Петербург, 2009. 720 с.

5. **Кондрашов Ю.Н., Катков И.Л.** Принципы создания системы планирования и прогнозирования бюджетных данных с использованием аналитических технологий MS SQL Server // Финансовый журнал. 2009. № 2.

Ссылка для цитирования

Кондрашов Ю.Н. Хранилище данных для анализа бюджетного процесса // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 1. С. 42—48.

Требования по оформлению библиографических ссылок

Список литературных источников, на которые делаются ссылки в тексте статьи, составляется в порядке цитирования и оформляется в соответствии с ГОСТ 7.1—2003 и ГОСТ Р 7.0.5—2008 (указываются фамилии и инициалы авторов, точное название книги или сборника, издательство, год и место издания, количество страниц в книге, а для журнальных статей — фамилии и инициалы авторов, название статьи, название, год выхода и номер журнала, страницы размещения статьи). При ссылке на электронные ресурсы обязательно указывать дату обращения, например, 26.06.2017. Ссылки на иностранную литературу даются на языке первоисточника без сокращений. Согласно требованиям зарубежных баз данных, список литературных источников необходимо также транслитерировать на латинский шрифт (фамилия и инициалы авторов, название источника публикации и место издания), при этом технические сокращения должны быть переведены с использованием общепринятых обозначений (номер — No, том — Vol., страницы — P. и т. п.). Для транслитерации русскоязычных наименований можно воспользоваться сервисом http://translit.ru/

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу «Пресса России» — 27838) 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); телефон для справок: (495) 785-60-69

Сдано в набор 25.11.2018.	Отпечатано в ООО «Канцлер»
Подписано в печать 17.12.2018.	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