Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЁТСЯ С 1947 ГОДА

3

2016

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

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

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

УЧРЕДИТЕЛИ:

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

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

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

ООО "Издательство
"Инновационное машиностроение"

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Горшков Б.М., Самохина Н.С., Рубцов М.А., Ремнева О.Ю. Статическая настройка элементов технологической системы координатно-расточного станка при обработке отверстий 3

Мишин А.В. Влияние отказов датчиков на систему безопасности башенных кранов 6

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Абрамов Г.В., Гаврилов А.Н. Автоматизированная система управления синтезом углеродных наноструктур в плазме дугового разряда 10

Лаптев И.В., Семёнов П.А., Дегтярёв С.А. Автоматизация моделирования процесса выгорания заряда твёрдого топлива в системе SOLIDWORKS 14

Воробьёв Е.И., Хатунцев Д.И. Двурукие роботы. Особенности построения алгоритмов управления движением . . . 19

СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Каганов Ю.Т., Мокров А.М., Мокрова Н.В. Алгоритмы реализации методов искусственного интеллекта 24

Кривошеев С.В. Различные стратегии управления бионическим кистевым протезом с учётом определённых параметров 29

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ НАУЧНОЙ И ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Ковалёв А.И. Интеллектуализация управления и оценивание качества деятельности предприятий 34

Тащиян Г.О. Субъекты диалога автоматизированного мониторинга конкурентоспособности наукоёмкой продукции . . 42

Железникова О.Е., Синицына Л.В., Амелькина С.А., Микаева С.А. Исследования и практические рекомендации по применению систем освещения со светодиодными источниками света 45

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION PROCESSES

Gorshkov B.M., Samokhina N.S., Rubtsov M.A., Remneva O. Yu. Element static adjustment of the coordinate boring machine technological system at machining holes 3

Mishin A.V. Sensors failure effect on the security system of the tower cranes 6

MODERN TECHNOLOGY

Abramov G.V., Gavrilov A.N. Automatic control system of the carbon nanostructures synthesis in the arc discharge plasma 10

Laptev I.V., Semenov P.A., Degtyarev S.A. The burning process simulation automation of solid fuel charge in the SOLIDWORKS system 14

Vorob'ev E.I., Khatuntsev D.I. Two-handed robot. Construction features of the movement control algorithms . . 19

MODERN INFORMATION TECHNOLOGY

Kaganov Yu T., Mokrov A.M., Mokrova N.V. The realization algorithms of the artificial intelligence methods . . 24

Krivosheev S.V. Various management strategies of the bionic wrist prosthetic by taking into account the certain parameters 29

ECONOMY AND ORGANIZATION OF SCIENTIFIC AND ECONOMIC ACTIVITIES

Kovalev A.I. The management intellectualization and the enterprises quality estimatio 34

Tashiyan G.O. The subjects of the automated monitoring dialogue of competitive high-tech products 42

Zheleznikova O.E., Sinitsyna L.V., Amelkina S.A., Mikaeva S.A. Research and practice guidelines for use of the lighting systems with LED light source 45

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

Сдано в набор 24.12.2015.
Подписано в печать 24.02.2016.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.

Отпечатано в ООО "Канцлер"
150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.
Оригинал-макет: ООО "Адвансед солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

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

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

УДК 621.9.06

Б.М. Горшков, д-р техн. наук, доц., **Н.С. Самохина,** канд. техн. наук, **М.А. Рубцов**
(Поволжский государственный университет сервиса, г. Тольятти),
О.Ю. Ремнева, канд. техн. наук,
(Тольяттинский государственный университет),
mihail-tlt063@ya.ru

СТАТИЧЕСКАЯ НАСТРОЙКА ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КООРДИНАТНО-РАСТОЧНОГО СТАНКА ПРИ ОБРАБОТКЕ ОТВЕРСТИЙ

Описана опытно-экспериментальная установка, разработанная на базе горизонтального координатно-расточного станка мод. 2А459 АФ4 с составной станиной, оснащённая устройством стабилизации осей обрабатываемого отверстия и инструмента. Устройство позволяет существенно повысить точность обработки станка.

Ключевые слова: опытно-экспериментальная установка; силовые деформации; координатно-расточной станок; составная станина; устройство стабилизации; гидродомкрат.

Experimental setting is described. The device is designed on the basis of the horizontal coordinate boring machine model 2A459 AF4 with a composite bed, equipped with a device axis stabilization of the hole and the tool. The device allows to improve significantly the accuracy of processing machine.

Keywords: research facility; force strain; coordinate boring machine; compound bed; stabilization device; hydraulic jack

Введение. В проблеме жёсткости станка большое значение уделяется станине. Силовые деформации несущих систем прецизионных координатно-расточных станков определяют их выходную точность и, соответственно, точность обработки.

Одним из эффективных способов повышения точности обработки станков является оснащение их системами автоматического регулирования (САР) и управления (САУ) [1—3]. Ниже рассматривается одна из таких САР — устройство стабилизации осей обрабатываемого отверстия и инструмента.

Основные положения. На рис. 1 показан общий вид горизонтального координатно-расточного станка, оснащённого устройством стабилизации положений осей обрабатываемого отверстия и инструмента. Станок состоит из станины *1*, установленной на три жёсткие опоры *2*, *3* и *4* относительно фундамента. Причём опоры *2* и *3* являются регулируемыми по высоте, а опора *4* — фиксированной. По направляющим станины в направлении оси *OZ* на салазках *5* перемещается стойка *6* со шпиндельной бабкой *7*, содержащей шпиндельный узел *8* с закреплённым режущим инструментом, перемещение которого по оси *OY* осуществляется при помощи электродвигателя *9* (М). Обрабатываемая на станке корпусная заготовка *10* закреплена на столе *11* станка. Корпусная заготовка устанавливается на установочные опоры [4].

Опытно-экспериментальная установка оснащена устройством стабилизации положений осей обрабатываемого отверстия и инструмента, которое работает следующим образом. По направляющим станины перемещается стойка (массой до 4,25 т). В результате возмущающего воздействия со стороны веса стойки, воз-

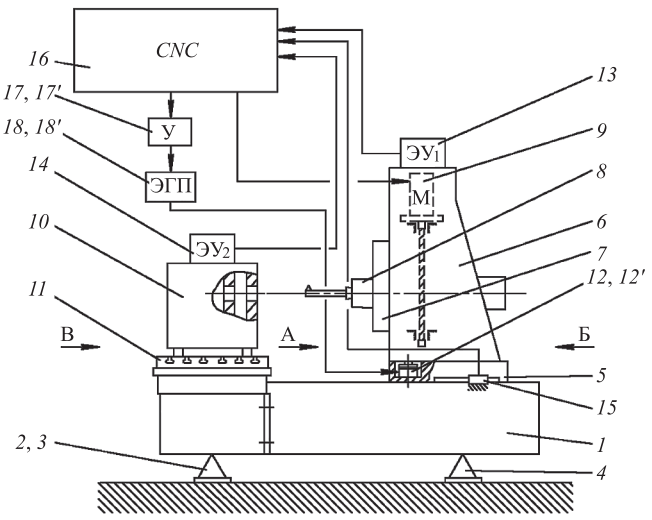


Рис. 1. Опытно-экспериментальная установка на базе станка мод. 2А459 АФ4 с составной станиной

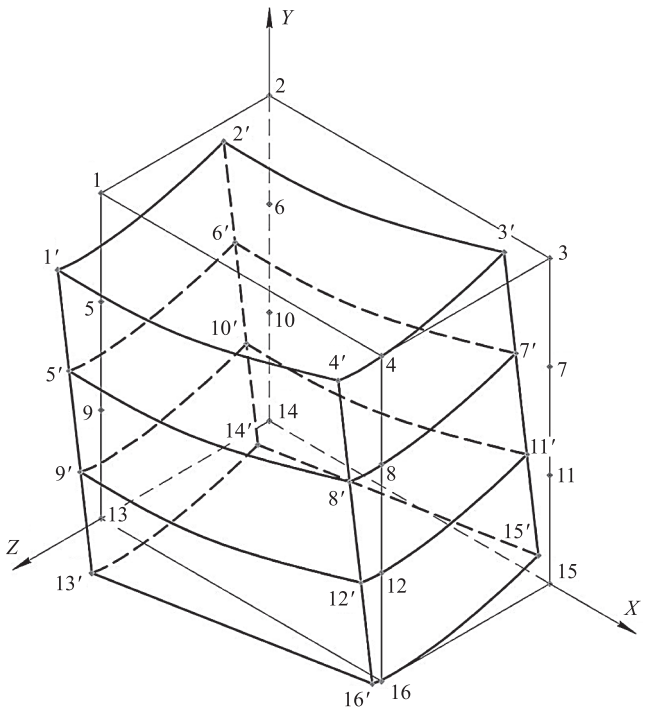


Рис. 2. Рабочее пространство станка в результате действия силовых деформаций станины станка

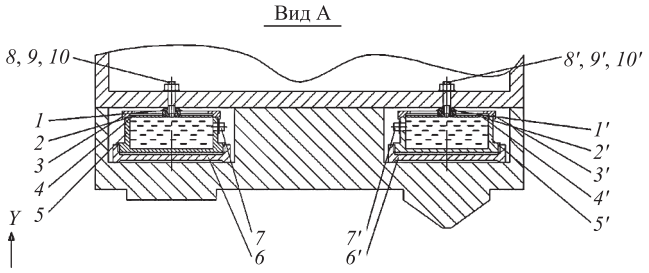


Рис. 3. Устройство и установка гидравлических опор

никают силовые деформации станины, приводящие к искажению рабочего пространства станка (рис. 2), которое объясняется наличием деформаций изгиба и кручения станины.

Устройство содержит механизмы малых перемещений *12* и *12'* (см. рис. 1), выполненных в виде гидравлических опор, и состоит из двухкоординатных электронных уровней *13*, *14*, ($ЭУ_1$, $ЭУ_2$), датчика *15* перемещения салазок со стойкой по направляющим станины, системы ЧПУ *16* (*CNC*), усилителей электрических сигналов *17*, *17'* и электрогидравлических преобразователей *18*, *18'* (ЭГП) (см. рис. 1) [4].

Электронные уровни $ЭУ_1$ и $ЭУ_2$ определяют углы наклона α_1, β_1 стойки и углы наклона обрабатываемой заготовки α_2, β_2 вследствие деформаций изгиба и кручения станины. Выходы с уровней подключаются к системе ЧПУ станка.

Конструктивной особенностью опытно-экспериментальной установки является расположение гидродомкратов. От выбора их установки зависит точность стабилизации осей обрабатываемого отверстия и инструмента.

На рис. 3 представлено устройство двух гидравлических опор, каждая из которых установлена в зоне направляющих станины и расположенных в стыке между салазками и стойкой станка. Стойка устанавливается на салазки, соединяется с толкателем *1* гидравлической опоры и закрепляется шпилькой *8* с гайкой *9* и шайбой *10*. Нижний конец шпильки ввинчивается в резьбовое отверстие толкателя, который неподвижно соединён с жёстким центром *2*.

Гидравлическая опора состоит из корпуса *5*, который по упорной резьбе ввинчивается в основание *6*. Через штуцер *7* в корпус гидравлической опоры подаётся рабочая жидкость, давление которой регулируется электрогидравлическим преобразователем. При помощи эластичной мембраны *4* и изменяемого давления осуществляется поступательное перемещение жёсткого центра *2* и, соответственно, угловое перемещение переднего края стойки. Крышка *3* прикручивается к корпусу крепёжными винтами, прижимает плотно эластичную мембрану и создает герметичное соединение [4].

На рис. 4 и 5 показана геометрия угловых перемещений вследствие деформаций кручения и изгиба станины, возникающих во время движения стойки по направлению к заготовке *3*, которые приводят к потере точности технологической системы станка. Причиной этого служат взаимные отклонения осей растачи-

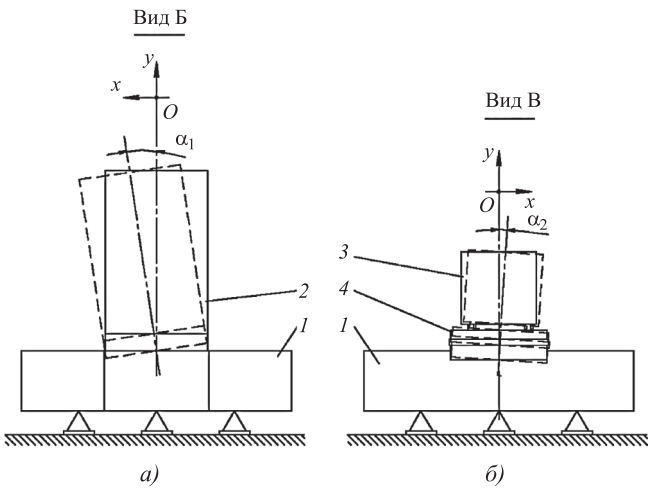


Рис. 4. Геометрия угловых перемещений вследствие деформации кручения

ваемых отверстий и инструмента вследствие угловых перемещений заготовки и стойки.

На рис. 6 и 7 показаны структурные схемы стабилизации положений осей инструмента и обрабатываемого отверстия.

Станина начинает прокручиваться и прогибаться при перемещении салазок со стойкой по направляющим в направлении оси *OZ* (см. рис. 1). Сигналы $y(\alpha_1)$ и $y(\alpha_2)$ (см. рис. 4) двухкоординатных электронных уровней, установленных на стойке и корпусной заготовке, определяют величины угловых перемещений оси стойки α_1 и оси обрабатываемой заготовки α_2 [4].

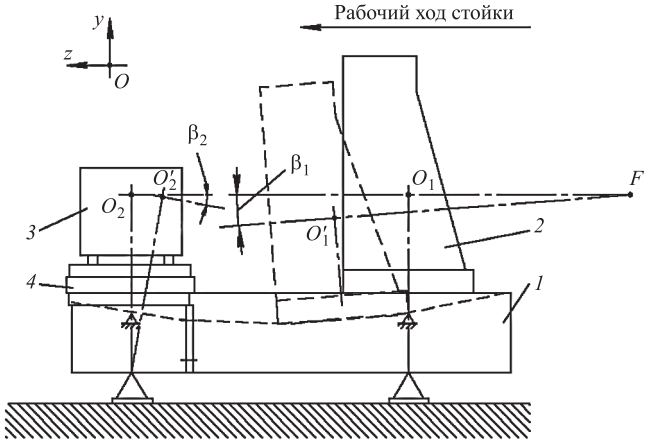


Рис. 5. Геометрия угловых перемещений вследствие деформаций изгиба

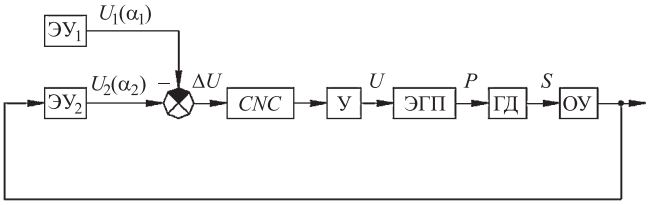


Рис. 6. Структурная схема стабилизации положений осей инструмента и обрабатываемого отверстия при деформациях кручения:

$ЭУ_1$ — уровень электронный, установленный на стойке; $ЭУ_2$ — уровень электронный, установленный на заготовке; U_1 — входной сигнал состояния $ЭУ_1$; U_2 — входной сигнал состояния $ЭУ_2$; U — управляющее воздействие; α_1 — угол наклона оси стойки вследствие деформации кручения; α_2 — угол наклона оси заготовки вследствие деформации кручения; β_1 — угол наклона оси стойки вследствие деформации изгиба; β_2 — угол наклона оси заготовки вследствие деформации изгиба; *CNC* — система числового программного управления (ЧПУ); У — усилитель электрического сигнала; ЭГП — электрогидравлический преобразователь; P — давление; S — перемещение; ГД — гидравлическая опора; ОУ — объект управления (стойка)

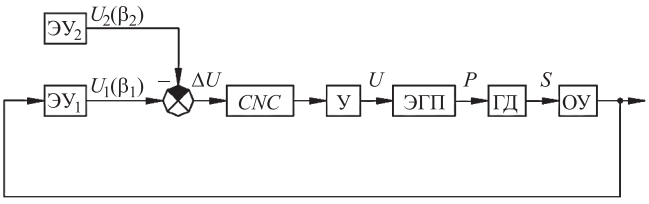


Рис. 7. Структурная схема стабилизации положений осей инструмента и обрабатываемого отверстия при деформациях изгиба

Сигналы $y(\alpha_1)$ и $y(\alpha_2)$ с электронных уровней поступают в систему числового программного управления (*CNC*) (см. рис. 1), где сравниваются между собой и по их разности подаётся команда коррекции (см. рис. 6):

$$\Delta y(\alpha) = y(\alpha_2) - y(\alpha_1).$$

Эта команда поступает на электрогидравлические преобразователи, которые регулируют давление рабочей жидкости в гидравлических опорах (см. рис. 1). Под действием давления рабочей жидкости на толкатели (см. рис. 3) стойка поворачивается на угол $(\alpha_2 - \alpha_1)$ для стабилизации деформации кручения станины (см. рис. 4). После этого повторно сравниваются сигналы $y(\alpha_1)$ и $y(\alpha_2)$ и если $\Delta y(\alpha) \neq 0$, то проводится повторная коррекция.

Выводы. Опытно-экспериментальная установка, оснащённая предлагаемым устройством, позволяет существенно снизить влияние кручения и изгиба станины на точность технологической системы станка за счёт стабилизации положений осей обрабатываемого отверстия и инструмента. Оси обрабатываемого отверстия и инструмента становятся параллельными. С помощью системы ЧПУ станка и штатного оборудования можно провести вертикальную коррекцию шпиндельной бабки в сборе со шпиндельным узлом, что позволяет с высокой точностью совместить ось обрабатываемого отверстия и ось инструмента.

Библиографические ссылки

1. **Базров Б.М.** Технологические основы проектирования самоподнастраивающихся станков. М.: Машиностроение, 1978. 216 с.

2. **Горшков Б.М.** Повышение точности прецизионных станков с составными станинами. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2004. 184 с.

3. **Опытно-экспериментальная** установка для оценки эффективности повышения точности координатно-расточных станков [Б.М. Горшков и др.] // Вектор науки. 2011. № 2 (16). С. 119—122.

4. **Горшков Б.М., Рубцов М.А., Самохина Н.С., Шлегель О.А., Диков Р.А.** Устройство стабилизации положений осей обрабатываемого отверстия и инструмента // Патент России № 136380. 2013. Бюл. № 1.

УДК 621.873.25

А.В. Мишин, канд. техн. наук
(Московский государственный университет путей сообщения)
alexeymishin89@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ОТКАЗОВ ДАТЧИКОВ НА СИСТЕМУ БЕЗОПАСНОСТИ БАШЕННЫХ КРАНОВ

Предложена система безопасности башенных кранов для обеспечения их устойчивости к опрокидыванию от экстремальных ветровых нагрузок. Рассмотрено влияние отказов датчиков на систему безопасности башенных кранов. Предложены пути дальнейшего совершенствования системы безопасности башенных кранов.

Ключевые слова: башенный кран; ветровые нагрузки; система безопасности; датчики; отказ.

Security system of tower cranes is offered for their resistance to rollover from extreme wind loads. Effect of sensor failure on the security tower cranes is reviewed. Ways to further improve the security of tower cranes are offered.

Keywords: tower crane; wind loads; security system; sensors; fail.

В процессе эксплуатации башенные краны подвержены воздействию динамических нагрузок, которые вызваны изменением свойств их конструкции и внешними динамическими ветровыми нагрузками.

Возможны следующие виды аварий вследствие воздействия динамических ветровых нагрузок:

опрокидывание башенного крана из-за экстремальных порывов ветра;

возникновение незатухающих колебаний металлоконструкции башенных кранов на резонансных частотах с последующим опрокидыванием;

возникновение незатухающих колебаний металлоконструкции башенных кранов на резонансных частотах, приводящих к разрушению, до опрокидывания [1].

Расследованием причин падений башенных кранов занимается РОСТЕХНАДЗОР. При определении причины падения башенного крана (например, экстремальный ветер) расследование завершается без какого-либо уточнения (порывы штормовой/ураганной силы, возникновение резонансов, совместное действие двух факторов).

Недостаток штатных систем безопасности башенных кранов, построенных на основе прибора безопасности ОНК-160Б (либо ОГМ-240) — это отсутствие автоматического контроля устойчивости башенных кранов в период экстремальных ветровых нагрузок. Прибор безопасности обеспечивает только сигнализацию об опасных ветровых нагрузках для машиниста. При регистрации опасной скорости ветра и включении сигнализации в кабине машиниста он вправе не прекращать работу, что является несоблюдением требований безопасности, из-за чего увеличивается вероятность опрокидывания башенного крана. При отказе датчика скорости ветра или намеренного его отключения машинистом также невозможно обеспечить устойчивость башенного крана к опрокидыванию.

Актуальным направлением является разработка системы безопасности башенных кранов с автоматическим контролем их устойчивости к опрокидываниям вследствие экстремальных ветровых нагрузок.

Преимущества предложенной системы безопасности:

существующая схема управления башенного крана оснащается дополнительной системой безопасности;

в алгоритме управления башенным краном впервые используется идея прогнозирования ветровых нагрузок [2] на основе искусственных нейронных сетей;

башенный кран минимально оснащается дополнительными аппаратными и программными средствами [3, 4].

Новая система безопасности позволяет:

повысить уровень безопасности, сократить аварии, вызванные сменой ветрового режима;

сократить затраты на ликвидацию последствий от опрокидываний башенных кранов (так как аварии из-за ветровых нагрузок исключаются).

Предложенная система безопасности разработана для стационарных опорных и пере-

движных рельсовых башенных кранов с поворотной и неповоротной башнями с балочной стрелой.

Система безопасности основана на нейросетевом и логическом алгоритмах. Нейросетевой алгоритм используется для прогнозирования значений направления и скорости ветра, а логический алгоритм — для определения опасной скорости ветра (на основе прогнозируемых значений) в порыве и управления приводами в целях заблаговременного перевода башенного крана в безопасное положение.

Система безопасности башенных кранов состоит из подсистемы сбора информации о параметрах ветра и параметрах башенного крана, подсистем нейросетевого прогнозирования и управления приводами. Структурная схема представлена на рис. 1.

Подсистема сбора информации о параметрах ветра и параметрах башенного крана состоит из датчиков, многие из которых имеются в существующем ограничителе грузоподъёмности — датчик скорости ветра, положения стрелы, высоты подъёма крюка, вылета крюка. Дополнительно башенный кран необходимо оснастить датчиком направления ветра.

Подсистема нейросетевого прогнозирования реализуется на основе платы расширения с нейросетевым алгоритмом.

Подсистема управления приводами башенного крана основана на программируемом логическом контроллере (ПЛК).

Условием безопасности является выдача подсистемой нейросетевого прогнозирования сигнала управления и его обработка подсистемой управления для срабатывания приводов до возникновения критического опрокидывающего момента от порывов ветра.

В ПЛК заложен алгоритм заблаговременного управления приводами поворота и/или изменения вылета. Алгоритм предназначен для выдачи сигнала управления на основе нейросетевой модели (программа нейросетевой модели записана в память платы расширения) и регистрируемых значениях датчиков скорости и направления ветра.

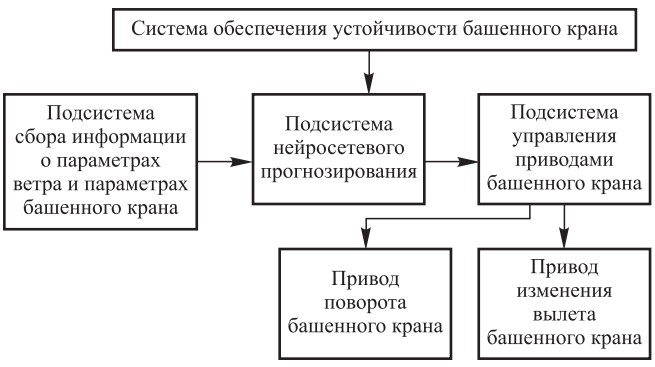


Рис. 1. Структурная схема системы безопасности башенного крана

При прогнозировании опасного порыва и его направления ПЛК формирует сигнал управления, поступающий на привод поворота и/или привод изменения вылета крюка, для разворота поворотной части башенного крана по направлению прогнозируемого порыва ветра.

Если разворот происходит с грузом, то опасных ускорений груза не возникает, так как разворот осуществляется заблаговременно с номинальной угловой скоростью.

В ПЛК предусмотрена блокировка, исключающая возможное столкновение крюковой подвески о возводимый объект при экстренном повороте.

Система безопасности автоматически вмешивается в работу машиниста только при прогнозировании опасной скорости ветра, которая превышает допустимое значение. При эксплуатации башенного крана возможна ситуация, когда прогнозируется опасная скорость ветра в порыве и требуется обеспечить разворот поворотной части башенного крана с грузом. В этом случае нарушается цикл работы. В результате экспериментальных измерений скорости ветра для I ветрового района (по ГОСТ 1451—77) была определена повторяемость опасных скоростей (>12 м/с), равная 10 %. Поэтому опасные скорости ветра редки, но разработанной системой безопасности обеспечивается устойчивость башенных кранов при их возникновении. Нарушение цикла работы в эти моменты практически не влияет на эксплуатационную производительность.

Система разработана для обеспечения устойчивости башенного крана в рабочем состоянии. В нерабочем состоянии башенный кран более устойчив к ветровым нагрузкам за счёт меньшей парусности. В нерабочем состоянии (перерыв между сменами) продолжается сбор информации о параметрах ветра благодаря работе систем безопасности от дополнительного блока питания. Это повышает точность прогноза опасных порывов в рабочем состоянии башенного крана. Возможна корректировка положения башенного крана в нерабочем состоянии при условии подключения его к питающей сети после окончания смены.

Для предотвращения отказа системы безопасности применимы следующие действия:

обучение нейросетевых алгоритмов;

планово-предупредительные проверки нейросетевых алгоритмов;

дополнительное введение в систему безопасности датчика атмосферного давления на этапе проектирования.

Для выполнения первого пункта необходимо создание базы данных параметров ветра местности, где будет эксплуатироваться башенный кран. База данных должна содержать значения параметров ветра за длительный период наблюдения с разными шагами регистрации. Далее проводится обучение нейросетевых алгоритмов в лабораторных условиях до начала эксплуатации башенного крана. Затем плата расширения с обученными алгоритмами подключается к ПЛК, который расположен в шкафу управления башенного крана.

При проведении проверок нейросетевых алгоритмов во время эксплуатации башенного крана возможно его дообучение. Это обусловлено тем, что в процессе работы башенного крана база данных параметров ветра постоянно пополняется и вычислительной мощности архитектуры нейросетевых алгоритмов, заложенной при их обучении, может не хватить.

Введение в состав системы безопасности датчика атмосферного давления обусловлено следующими причинами:

при отказе датчика скорости ветра невозможно обеспечить устойчивость башенного крана, так как подсистема нейросетевого прогнозирования не получает информацию о параметрах ветра;

исключается отказ системы безопасности, так как при отказе датчика скорости ветра (и при исправном датчике атмосферного давления) обеспечивается устойчивость башенного крана.

На рис. 2 представлено взаимодействие датчика скорости ветра, платы расширения, ПЛК и датчика атмосферного давления.

Техническое решение основано на закономерностях атмосферных явлений — перед возникновением порывов ветра происходит резкое изменение атмосферного давления.

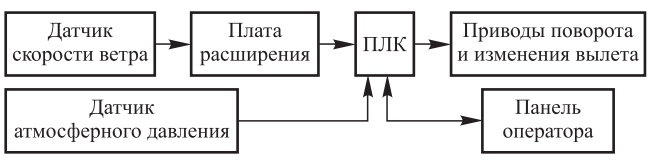


Рис. 2. Схема взаимодействия элементов системы безопасности башенного крана

Влияние отказов датчиков на систему безопасности башенного крана

Номер случая	Датчик		Состояние системы безопасности
	скорости ветра	атмосферного давления	
1	Исправен	Исправен	Работоспособна
2	Отказал	Исправен	Работоспособна
3	Исправен	Отказал	Работоспособна
4	Отказал	Отказал	Неработоспособна

Период между изменением атмосферного давления и возникновением порывов используется в качестве входной дополнительной информации для системы безопасности.

Рассмотрим влияние отказов датчиков на систему безопасности башенного крана (см. таблицу).

Возможны четыре варианта.

Случай 1 — "датчик скорости ветра исправен, датчик атмосферного давления исправен". Это приводит к переводу башенного крана в безопасное положение за время упреждения подсистемы нейросетевого прогнозирования [2].

Случай 2 — "датчик скорости ветра отказал, датчик атмосферного давления исправен". Следует перевод башенного крана в безопасное положение за время, определённое на основе усреднённых данных (период между изменением атмосферного давления и возникновением порывов). Чтобы определить усреднённый интервал времени между изменением атмосферного давления и возникновением порывов, необходимо иметь длительную историю наблюдения данного атмосферного явления.

Случай 3 — "датчик скорости ветра исправен, датчик атмосферного давления отказал". Это приводит к переводу башенного крана в безопасное положение за время упреждения подсистемы нейросетевого прогнозирования [2].

Случай 4 — "датчик скорости ветра отказал, датчик атмосферного давления отказал". При отказе обоих датчиков эксплуатацию башенного крана требуется прекратить.

При регистрации изменения атмосферного давления включается сигнализация в кабине для предварительной готовности машиниста о возможной эвакуации.

При отказе хотя бы одного датчика на панели оператора выводится сигнализация об отказе конкретного датчика.

Регистрация изменения атмосферного давления, включение сигнализации и определение отказа конкретного датчика реализованы в прикладном программном обеспечении ПЛК на языке CFC. Также информация об отказах датчиков отправляется по каналу беспроводной связи в диспетчерский пункт для накопления статистики отказов по всем башенным кранам строительной площадки.

В случае изменения атмосферного давления активируется подпрограмма алгоритма ПЛК.

Дополним рассмотренные ранее случаи.

Случай 1. Прогнозируется опасный порыв или серия опасных порывов ветра с регистрацией изменения атмосферного давления. Это свидетельствует об исправности датчика скорости ветра и датчика атмосферного давления.

Случай 2. Не прогнозируются опасные порывы, но регистрируются изменения атмосферного давления. Это свидетельствует об отказе датчика скорости ветра.

Случай 3. Прогнозируется порыв или серия порывов без регистрации изменения атмосферного давления. Это свидетельствует об отказе датчика атмосферного давления.

Возможны следующие варианты монтажа датчиков скорости, направления ветра и атмосферного давления:

монтаж на наивысшей отметке металлоконструкции, используя метеостанцию с интегрированными датчиками скорости, направления ветра и атмосферного давления;

монтаж датчика скорости ветра с функцией измерения его направления на наивысшей отметке металлоконструкции, а датчика атмосферного давления в месте, удобном для установки, наладки и обслуживания.

В качестве датчиков подходит продукция Gill Instruments, R.M. Young Company или аналоги.

Предложенная система безопасности и её модернизация позволяют обеспечивать устойчивость башенных кранов при экстремальных ветровых нагрузках.

Работа выполнена при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе "УМНИК" в рамках договора № 801ГУ1/2013 от 28.11.2013.

Библиографические ссылки

1. **Мишин А.В., Сорокин П.А.** Исследование устойчивости башенных кранов на основе спектрального анализа ветрового воздействия // Автоматизация и современные технологии. 2014. № 6. С. 3—6.

2. **Мишин А.В., Сорокин П.А.** Нейросетевой алгоритм системы автоматического контроля устойчивости башенных кранов // Автоматизация и современные технологии. 2014. № 4. С. 7—11.

3. **Мишин А.В., Сорокин П.А.** Реализация алгоритма управления приводами башенных кранов при ветровых воздействиях // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 1. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. С. 186—193.

4. **Мишин А.В., Сорокин П.А.** Система контроля устойчивости башенных кранов от опрокидывания // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 7. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. Ч.2. С. 325—332.

Уважаемые авторы и читатели!

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

УДК 533.95

Г.В. Абрамов, д-р техн. наук, проф., **А.Н. Гаврилов,** канд. техн. наук, доц.
(Воронежский государственный университет инженерных технологий)
ganivrn@mail.ru

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СИНТЕЗОМ УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУР В ПЛАЗМЕ ДУГОВОГО РАЗРЯДА

Рассмотрены проблемы управления процессом получения УНС в плазме дугового разряда с использованием среды буферного газа. Показаны возможности автоматизации управления синтезом получения УНС. Предложена автоматизированная информационная система управления электродуговым синтезом УНС, позволяющая повысить качество и эффективность процесса.

Ключевые слова: углеродные наноструктуры; электродуговой синтез; плазма; система управления.

The management problems of the CNS reception process in the arc discharge plasma through the use of the buffer gas medium are considered. The management automation possibilities of the CNS reception synthesis are shown. A management automatic information system of the CNS electrical arc synthesis allowing to raise the quality and efficiency of the process is proposed.

Keywords: carbon nanostructure; electrical arc synthesis; plasma; control system

Открытие нового класса неорганических стабильных соединений углерода — фуллеренов и нанотрубок, обладающих уникальными свойствами, привело к необходимости разработки технологий синтеза наноматериала в промышленном объёме. Только использование их в качестве наполнителей полимерных масс позволяет получать нанокомпозитные материалы с широким спектром новых или улучшенных свойств.

Одним из перспективных методов получения углеродных наноструктур (УНС) высокого качества являются технологии, основанные на термическом распылении графита в плазме дугового разряда с использованием буферного газа (гелия, аргона) [1].

В низкотемпературной анизотропной плазме происходит возгонка графита с анодного электрода с последующим осаждением на охлаждаемый катод. Использование различных условий синтеза в реакционной камере позволяет получать различные УНС. Например, в среде гелия при давлении около 66,7 кПа получаются углеродные нанотрубки, а при давлении 13,3...20 кПа — только фуллерены. В процессе синтеза при определённых оптимальных условиях выход нанотрубок в депозите на катоде может приближаться к 60 % [2].

На стабильность протекания технологического процесса, выход и качество УНС влияет множество факторов. Это напряжение, сила и плотность тока, температура плазмы, общее давление в системе, свойства и скорость подачи инертного газа, размеры реакционной камеры, длительность синтеза, наличие и геометрия охлаждающих устройств, скорость охлаждения электродов, природа и чистота материала электродов, соотношение их геометрических размеров, вертикальное или горизонтальное расположение электродов.

Такое громадное количество управляющих параметров значительно усложняет управление стабильностью процесса, аппаратурное оформление установок синтеза, а также их воспроизводство в масштабах промышленного применения. Однако использование современных автоматических систем управления позволяет решать обозначенные проблемы, поддерживая высокую стабилизацию необходимых параметров синтеза.

Максимальный выход нанотрубок наблюдается при минимально возможном токе дуги, необходимого для её стабильного горения, плотностью около 100 А/см^2, который зависит от межэлектродного расстояния и диаметра электродов в диапазоне 0,5...2,0 мм.

Управление процессом синтеза даже на экспериментальной установке в ручном режиме крайне затруднительно, а в промышленном масштабе — невозможно. В связи с быстротеч-

ностью процесса использование ручного управления силой тока не даёт необходимого качественного уровня поддержания данного параметра. Разброс силы тока при ручном управлении может доходить до 50 % от требуемой величины, что приводит к получению малого выхода наноструктурированного материала низкого качества, с разбросом в широком диапазоне структур и размеров. Поэтому был выполнен пилотный проект автоматизированной информационной системы управления (АИСУ) электродуговым процессом синтеза УНС [3, 4]. Функциональная схема разработанной АИСУ представлена на рис. 1.

Вся информация о ходе процесса поступает через АЦП в персональный компьютер (ЭВМ). В качестве АЦП/ЦАП использовали плату L761 (Россия). Данные, считанные с АЦП, представляли в формате знакового целого двухбайтного числа от −8192 до 8191 (коды АЦП). Частота опроса датчиков системой составляла 200 Гц. Все датчики были подключены к плате по дифференциальной схеме, что обеспечивало подавление шумов, возникающих на соединительных проводах, не менее чем на 60 дБ.

Полученные данные обрабатывает информационная система ПК, и на основе их анализа вырабатывают управляющее воздействие. Управление процессом электродугового синтеза УНС заключается в поддержании заданной силы тока, изменяя расстояние между графитовыми электродами. Для перемещения испаряемого электрода (анода) подаётся управляющий дискретный сигнал через TTL выходы платы АЦП/ЦАП L761 на вход двигателя постоянного тока через понижающий редуктор на шаговый исполнительный механизм, позволяющий вести позиционирование анода с точностью 0,2 мм.

На рис. 2 показаны графики поддержания тока дуги в межэлектродном пространстве при ручном управлении и с использованием АИСУ. Резкие скачки тока при ручном режиме управления (рис. 2, *а*) обусловлены касанием электродов, избежать которые при данном способе ведения синтеза невозможно вследствие человеческого фактора.

Характерным для электродугового процесса синтеза является возрастание тока в течение первых нескольких секунд, что связано с зажиганием дуги, ростом температуры в камере и установлением теплового равновесия по мере заполнения камеры газом. После стабилизации температуры ток перестаёт расти и начинается его снижение из-за увеличения расстояния между электродами. Увеличение в начале процесса межэлектродного расстояния объясняется тем, что прирост катода за счёт депозита меньше, чем расход выгорающего анода. Часть материала покидает дугу и оседает в виде сажи на стенках. При разных условиях синтеза до 90 % массы испарившегося анода может осаждаться на катоде, а остальное — на стенках реакционной камеры.

В дальнейшем происходит рост депозитного осадка, имеющего большую пористость,

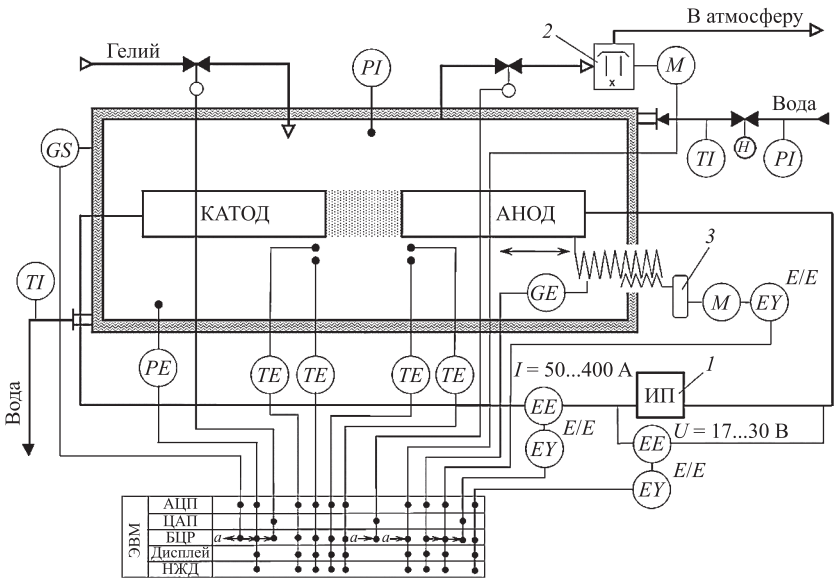


Рис. 1. Автоматизированная система управления электродуговым синтезом УНС:
1 — источник питания; *2* — диффузионный насос; *3* — исполнительное устройство; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; ЦАП — цифроаналоговый преобразователь; БЦР — блок цифрового регулирования; НЖД — накопитель жёсткого диска

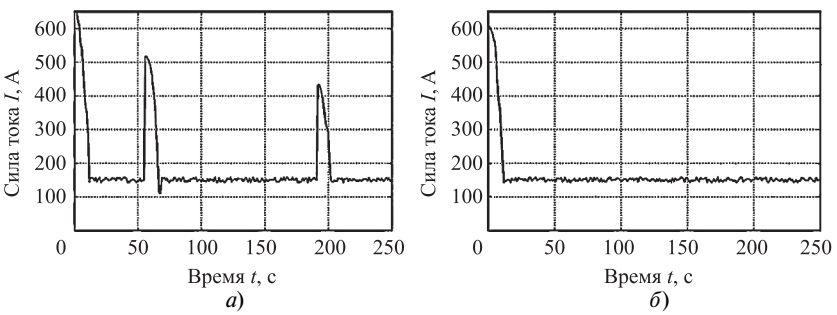


Рис. 2. Зависимость силы тока дуги от времени:
а — ручное управление, *б* — автоматическое управление

чем исходный материал и уменьшение межэлектродного расстояния, что приводит к залипанию электродов. Поэтому для ведения процесса синтеза с поддержанием постоянного тока электроды необходимо разводить-сводить по мере его изменения. Межэлектродное расстояние электродов регулируется током, в зависимости от заданного режима синтеза подводом или отводом анода. В случае возникновения сбоев или ошибок в ходе синтеза происходит остановка процесса, установка обесточивается.

Структурная схема разработанной АИСУ процессом синтеза представлена на рис. 3. АИСУ выполнена в современной программной среде Python [5] в объектно-ориентированном стиле, что даёт возможность гибкого расширения и работе ИС на различных операционных системах.

Основу ИС составляют связанные между собой модули подсистемы, отвечающие за выполнение определённой функциональной нагрузки:

сбор и первичную обработку данных о ходе процесса синтеза;

обработку информации;

авторизацию;

контроль и управление;

расчёт оптимального управления;

расчёт на основе модели параметров синтеза определённых УНС;

системы управления базой данных (СУБД);

формирование и вывод отчётов;

связь с подсистемами;

предоставление пользовательского интерфейса.

На качество и количество депозитных фракций, формирующихся на катоде, влияет температурное распределение в зоне реакции, которое необходимо поддерживать стабильным. Непосредственный контроль температуры на поверхности электродов невозможен, поэтому была использована следующая методика.

На фиксированном расстоянии от электродов попарно расположены термопары (см. рис. 1). Их показания контролируются, а далее обрабатываются с использованием методов экстраполяции, позволяющих рассчитать значение температуры на поверхности электродов в определённой точке с учётом кривых распределения температуры и обеспечить необходимый принудительный отвод тепла от электродов, который на функциональной схеме (см. рис. 1) не показан.

Информация о ходе технологического процесса с датчиков, осуществляющих контроль параметров синтеза через устройство связи с объектом (УСО), поступает в ИС. УСО обеспечивает выполнение ряда промежуточных функций: нормализацию аналогового сигнала, предварительную низкочастотную фильтрацию аналогового сигнала, преобразование цифрового сигнала управления к унифицированному аналоговому, гальваническую изоляцию между источниками сигнала и каналами системы.

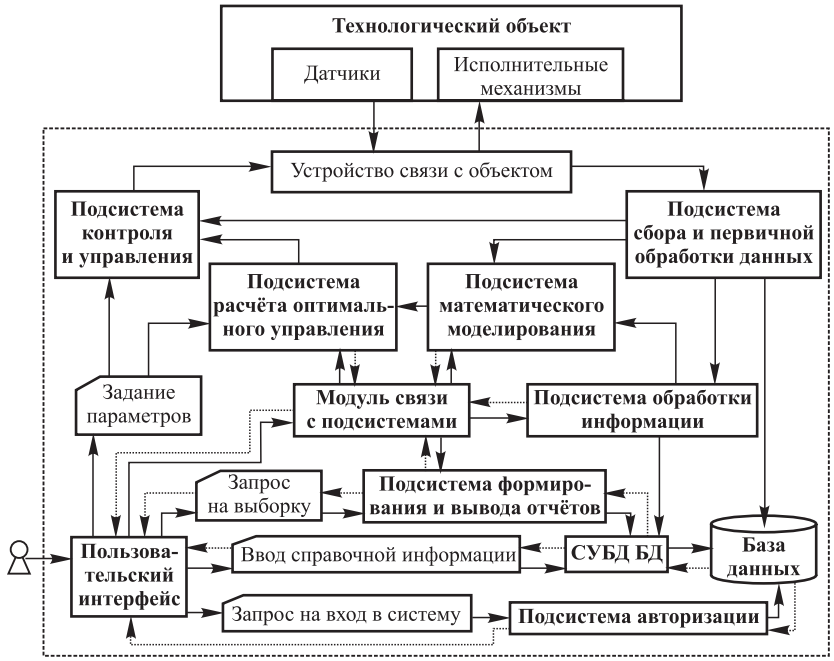


Рис. 3. Структурная схема АИСУ

Модуль сбора и первичной обработки данных с заданной частотой дискретизации осуществляет опрос датчиков, собирает полученную информации с УСО и переводит полученный код АЦП по калибровочной зависимости (код АЦП — показатель) в конечный технологический параметр в необходимых единицах измерения. Для опроса одного отчёта с АЦП используется функция драйвера IoAsync, предназначенного для асинхронных операций ввода/вывода.

Подсистема обработки информации позволяет проводить усреднение полученных данных с использованием фильтра Калмана, рассчитывать математическое ожидание и дисперсию. Модуль также

отвечает за вычисление температуры на поверхности электродов по экстраполяции полученных данных с термопар.

АИСУ процессом электродугового синтеза углеродных наноструктур имеет встроенную систему безопасности, способную максимально защитить разработанную АИСУ от несанкционированного доступа и ошибок оператора. Подсистема авторизации обеспечивает целостность данных и выполняет функции идентификации и аутентификации пользователя.

Подсистема расчёта оптимального управления отвечает за выработку необходимого управляющего воздействия на основе заложенного алгоритма управления в зависимости от ошибки и применения его на технологическом объекте. В процессе синтеза обеспечивается стабилизация необходимого давления в камере, определённой температуры охлаждения камеры и электродов, постоянного напряжения и управление заданной силой тока.

Модуль математического моделирования также участвует в выработке управляющего воздействия и рекомендаций по необходимым условиям проведения процесса синтеза по требуемому качеству и количеству выходного конечного продукта [6]. В основу модуля положены модель движения заряженных частиц в плазме [7], дополненная моделью массотеплопереноса, которые по исходным входным данным позволяют определить необходимые параметры проведения синтеза для выбранного сырья и требуемых УНС.

В системе управления базой данных (СУБД) сохраняют все показатели процесса в файл для последующей их статистической обработки и формирования, хранения справочной информации. В качестве справочной информации выступают постоянные константы процесса (коэффициенты теплопроводности, теплоотдачи и т.д.).

Подсистема формирования и вывода отчётов позволяет представить полную картину о ходе процесса синтеза пользователю. Данный модуль предоставляет программный интерфейс для динамического создания и вывода необходимых графиков изменения того или иного технологического параметра, выработанных управляющих воздействиях, и действий оператора в случае ручного управления. Отчёты формируются по выборке из БД. АИСУ обеспечивает доступ пользователю как к данным, полученным при выполнении текущего эксперимента, так и к информации, накопленной в предыдущих экспериментах.

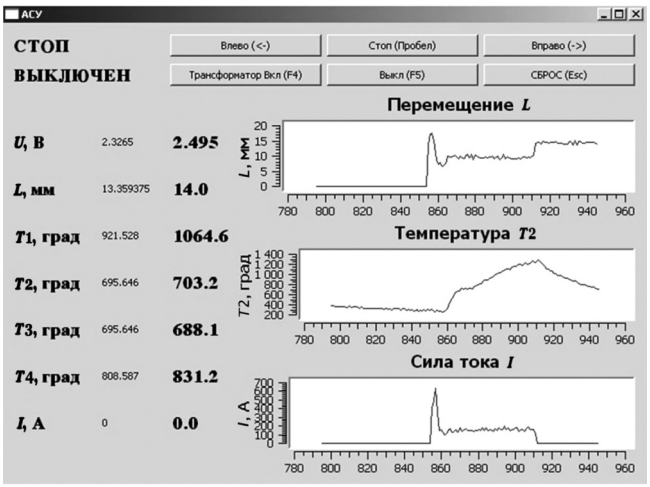


Рис. 4. Основное окно программы

Модуль связи с подсистемами является начальной точкой работы программы. Данный модуль инициализирует все подсистемы и отвечает за связи между ними.

Основное окно программы показано на рис. 4.

Использование понятного, дружественного интерфейса обеспечивает оператору максимально удобное взаимодействие с ИС. Разработанный комплекс программного обеспечения АИСУ позволяет также проводить численные и физические эксперименты при различных режимах работы системы, осуществлять анализ её функционирования и определять области устойчивой работы.

Разработанная АИСУ позволяет вести процесс синтеза по заданным оптимальным параметрам процесса с высокой степенью точности и обеспечивает максимальный выход однородного наноструктурируемого продукта. Ведение мониторинга и управление процессом в режиме реального времени повышает эффективность данного метода в промышленном использовании.

Библиографические ссылки

1. **Гаврилов А.Н., Пологно Е.А., Рязанов А.Н.** Анализ методов синтеза и промышленное производство углеродных нанотрубок // ФЭС: Финансы. Экономика. Стратегия. Серия: Инновационная экономика: человеческое измерение. 2010. № 6. С. 14—19.

2. **Абрамов Г.В., Гаврилов А.Н., Татаркин Е.С.** Влияние газоплазменной струи в процессе электродугового испарения графитового электрода на формирование углеродных нанотрубок // Вестник Воронежской государственной технологической академии. Серия: Информационные технологии, моделирование и управление. 2010. № 2(44). С. 60—63.

3. **Абрамов Г.В., Гаврилов А.Н., Пологно Е.А.** Система управления синтезом углеродных наноструктур методом термического распыления графита в среде инертного газа // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2011. № 1(23). С. 100—104.

4. **Гаврилов А.Н., Абрамов Г.В., Татаркин Е.С.** Архитектура информационной системы управления процессом электродугового синтеза углеродных нанотрубок / Кибернетика и высокие технологии XXI века. XI Междун. науч.-техн. конференция. Т. 1. Воронеж: ВГУ. 2010. С. 404—408.

5. **Программа** "Информационная система управления синтезом наноструктурированного материала методом термического испарения графита". Свидетельство о гос. регистрации прогр. для ЭВМ № 2011613275 Российской Федерации / Г.В. Абрамов, А.Н. Гаврилов, Е.А. Пологно, Е.С. Татаркин. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 27.04.2011.

6. **Абрамов Г.В., Гаврилов А.Н., Татаркин Е.С.** Использование модуля математического моделирования в АИСУ синтезом УНС методом термического испарения графита // Вестник Воронежской государственной технологической академии. Серия: Информационные технологии, моделирование и управление. 2011. № 2(48). С. 29—32.

7. **Абрамов Г.В., Гаврилов А.Н.** Математическое моделирование движения взаимодействующих частиц на основе функций распределения в плазме электродугового синтеза УНС // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. Серия: Информационные технологии, моделирование и управление. 2012. № 2(52). С. 71—75.

УДК 621.454.3; 004.925.83/84

И.В. Лаптев, канд. физ.-мат. наук, **П.А. Семёнов,** канд. физ.-мат. наук,
С.А. Дегтярёв, канд. техн. наук
(ГНЦ ФГУП "Исследовательский центр им. М.В.Келдыша", г. Москва)

igor_laptev@hotbox.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВЫГОРАНИЯ ЗАРЯДА ТВЁРДОГО ТОПЛИВА В СИСТЕМЕ SOLIDWORKS

Предложены алгоритм моделирования выгорания заряда твёрдого топлива и способ его автоматизации в системе проектирования SolidWorks. Отмечены некоторые особенности процесса выгорания заряда и способы их учёта. Представлены результаты тестирования разработанного метода на простейших конфигурациях заряда твёрдого топлива.

Ключевые слова: твёрдое топливо; ракетный двигатель; алгоритм; горение; автоматизация; система автоматизированного проектирования.

A simulation algorithm of the solid fuel charge burning and its automation method in the system of design SolidWorks are proposed. Some features of the charge burning process and its accounting methods are noted. The results of the developed method testing on the simplest configuration of the solid fuel charge are introduced.

Keywords: solid fuel; rocket engine; algorithm; combustion; automation; computer-aided design.

Введение. При проектировании ракетных двигателей на твёрдом топливе одним из важнейших вопросов является определение формы и габаритов заряда, обеспечивающих требуемые тяговые характеристики двигательной установки. Определение таких характеристик — это важная научно-техническая задача, требующая от конструктора умения рассчитывать положение поверхности горения в каждый момент времени.

Тривиальные формы зарядов, образованные набором цилиндрических и/или конических поверхностей, поддаются аналитическому анализу. Для более сложных геометрических объектов можно использовать упрощённые методы, основанные на построении эквидистантных линий в различных сечениях заряда с последующей их интерполяцией. Такой подход довольно трудоёмок и даёт большую погрешность определения величины площади поверхности горения. Некоторые специалисты используют собственные реализации геометрических алгоритмов, позволяющих моделировать процесс выгорания заряда твёрдого топлива [1]. Стоит отметить сложность реализации подобных алгоритмов в общем случае, а также необходимость выполнения импорта исходной конфигурации из используемой системы проектирования.

В последнее время широко распространён подход, в рамках которого построение экви-

дистантных поверхностей горения проводится непосредственно в рабочей среде системы автоматизированного проектирования с использованием имеющихся инструментов геометрического преобразования объектов. Одной из таких систем является система SolidWorks, позволяющая формировать набор тел, часть граней которых эквидистанта граням исходного тела. Такой подход существенно упрощает моделирование выгорания заряда, хотя нет значительного сокращения времени, поскольку основные операции по смещению поверхностей элементов заряда проводятся "вручную". Процесс автоматизации данного подхода требует знаний внутренней реализации системы проектирования SolidWorks, а также разработки алгоритма, учитывающего особенности выгорания заряда твёрдого топлива. Результат — автоматизированный метод расчёта эволюции формы заряда — оправдывает усилия, так как время, затрачиваемое на расчёт варианта заряда, сокращается от нескольких раз до нескольких порядков в зависимости от сложности исходной конфигурации.

Ниже представлено описание одного из возможных способов автоматизации моделирования выгорания заряда, реализованного в системе автоматизированного проектирования SolidWorks [2].

Требования к методу и особенности реализации. При разработке метода моделирования процесса выгорания заряда необходимо учитывать ряд требований, которые возникают при его проектировании. Во-первых, необходимо учитывать, что заряд твёрдого топлива может состоять из нескольких частей, которые могут появляться в процессе эволюции заряда (рис. 1, *а*) или присутствовать изначально. Во-вторых, поверхность заряда может быть образована несколькими односвязными зонами (рис. 1, *б*). В процессе изменения конфигурации заряда эти зоны могут сливаться или оставаться изолированными друг от друга. Кроме того, геометрия заряда зачастую имеет плоскость и/или ось симметрии, что требует предусмотреть возможность моделирования горения части заряда с последующим пересчётом геометрических характеристик всего заряда.

Инструменты геометрического преобразования системы SolidWorks не позволяют сравнительно простыми средствами учесть неравномерность скорости горения, а значит, и смещения поверхности горения по пространству. Поэтому в рамках разрабатываемого метода считается, что скорость горения топлива

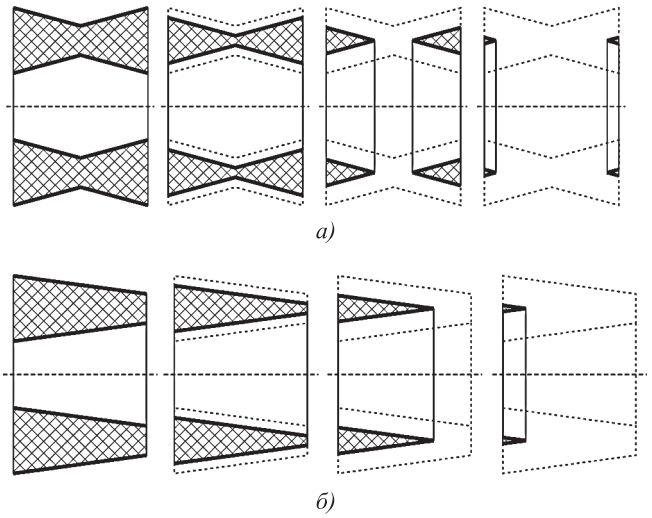


Рис. 1. Некоторые особенности геометрии заряда, возникающие при его выгорании (жирной линией отмечены поверхности горения):
а — заряд из нескольких частей; *б* — поверхность заряда образована двумя односвязными областями

одинакова по всей поверхности горения. Данное допущение накладывает некоторые ограничения на применимость метода для точных (поверочных) расчётов, но несущественно на этапе проектной проработки, выбора и/или оптимизации формы заряда.

Ключевой процедурой метода является построение параметризованной модели выгорания заряда в системе SolidWorks. Изменяя значение параметра модели выгорания — величину смещения поверхности относительно начального положения — можно получить конфигурацию заряда в каждый момент времени. Модель выгорания заряда строится с использованием трёх инструментов преобразования объектов системы SolidWorks [3]:

зеркальное отражение твёрдого тела;

создание тонкостенной оболочки;

создание комбинированного объекта ("вычитание" одного твёрдого тела из другого).

Рассмотрим процесс построения более подробно. Пусть в начальный момент времени имеется твёрдотельный элемент, моделирующий геометрию заряда, содержащий N односвязных зон горения (рис. 2, состояние *1*). Выполним преобразование отражения элемента N раз относительно плоскости α (операция *2*). Для каждого отражённого элемента построим тонкостенную оболочку на основе одной из N односвязных областей горения (операция *3*). Выполним обратное зеркальное отражение всех N тонкостенных оболочек относительно плоскости α (операция *4*). Проведём последовательную комбинацию вычитания каждой оболочки

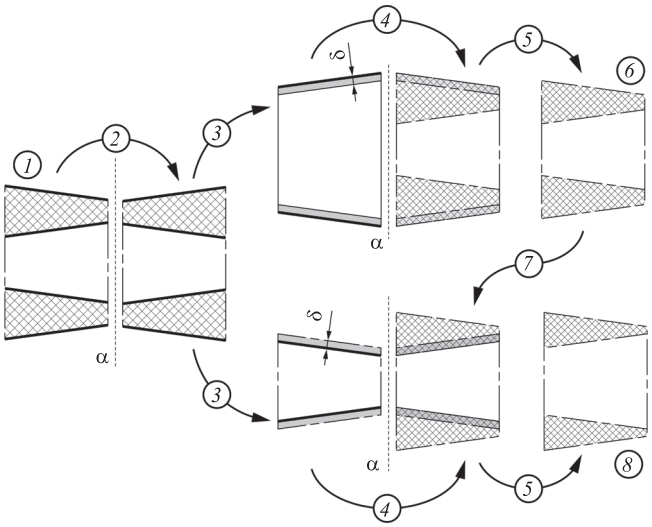


Рис. 2. Процесс построения модели выгорания заряда: *1* — начальная конфигурация; *2* — преобразование "зеркальное отражение"; *3* — построение тонкостенной оболочки для односвязной области поверхности горения; *4* — преобразование "обратное зеркальное отражение"; *5* — комбинирование вычитания текущей конфигурации заряда и тонкостенной оболочки; *6* — промежуточная конфигурация заряда; *7* — использование промежуточной конфигурации в качестве текущей; *8* — конечная конфигурация; δ — параметр модели выгорания (жирная линия — односвязная зона горения)

из текущей конфигурации заряда (операция *5*). Результат каждой операции комбинирования — промежуточная конфигурация заряда (состояние *6*) — используется, как текущая конфигурация для последующего преобразования вычитания (операция *7*). Результат последней комбинации — конечная конфигурация заряда (состояние *8*). Следует отметить, что в качестве плоскости отражения α может выступать любая плоскость, но для простоты выбирается одна из координатных плоскостей. Параметризация модели выгорания достигается за счёт введения переменной величины толщины тонкостенной оболочки. При первоначальной генерации модели выгорания данный параметр принимает минимальное значение. В системе SolidWorks данное минимальное значение $\delta_{min} = 0{,}0001$ мм.

Имитация горения заряда сводится к последовательному увеличению параметра и обновлению всех преобразований модели выгорания.

Построенная модель выгорания используется до тех пор, пока топология геометрии заряда остаётся неизменной. Если, например, тело заряда после преобразования комбинирования распалось на несколько частей, то строится новая модель выгорания, учитывающая появление новых частей заряда.

Алгоритм моделирования эволюции формы заряда. Предположим, что в начальный момент времени имеется конфигурация заряда, образованная T твёрдыми телами системы SolidWorks. Некоторые (или все) грани каждого тела отмечены как поверхности горения. Опишем последовательность действий, необходимых для моделирования процесса выгорания заряда:

1. Определяются начальные характеристики геометрии заряда (общая площадь поверхности горения, объёмы каждой части заряда).

2. Формируется массив частей заряда.

3. Проводится маркировка граней, образующих поверхность горения, присвоением им соответствующего идентификатора.

4. Проводится поиск односвязных зон горения для каждой части заряда (R_i — количество зон горения для i-й части заряда, где $i = 1, ..., T$).

5. Для каждой части заряда строится своя модель выгорания способом, описанным выше (значение параметра $\delta = 0{,}0001$ мм).

6. Проверяется, изменилось ли количество частей заряда. Если "да", то переход к п. 7. Если "нет", то переход к п. 10.

7. Проводится коррекция массива частей заряда: часть, распавшаяся на несколько, удаляется из массива, новые части добавляются в массив.

8. Проверяется количество частей заряда в массиве. Если количество частей больше 0, то переход к п. 9. Если количество частей равно 0, то переход к п. 16.

9. Выделяются грани, образующие поверхность горения, каждой части заряда. Переход к п. 3.

10. Формируется массив потенциальных значений смещения поверхности горения в приоритетном порядке (первый элемент массива — требуемая величина смещения, последняя — δ_{min}).

11. Проводится смещение поверхности горения присвоением параметру δ моделей выгорания каждой части заряда последовательных значений из массива потенциальных смещений.

12. Проверяется, изменилось ли количество частей заряда. Если "да", то переход к п. 13. Если "нет", то переход к п. 14.

13. Проверяется равенство параметра моделей выгорания минимальному смещению δ_{min}. Если "нет", то переход к п. 11. Если "да", то переход к п. 7.

14. Определяются текущие характеристики геометрии заряда (площадь поверхности горения, объём каждой части) и рабочие параметры двигательной установки по формулам [4].

15. Проводится поиск частей заряда, объём которых стал меньше наперёд заданной вели-

чины. Если такие части найдены, то они удаляются и осуществляется переход к п. 7. Если таких частей нет, то переход к п. 10.

16. Процесс моделирования выгорания заряда закончен.

Схема алгоритма представлена на рис. 3. Цифровые обозначения действий и условных элементов соответствуют пунктам описанного выше алгоритма.

Верификация разработанного метода и демонстрация его применения. В качестве тестовых примеров рассмотрим процесс выгорания двух осесимметричных зарядов, конфигурации которых представлены на рис. 4, *а* и рис. 5, *а* (жирная линия соответствует поверхности горения). Каждая из этих конфигураций поддаётся аналитическому расчёту.

Для конфигурации № 1 (см. рис. 4) легко показать, что площадь поверхности горения изменяется по закону

$$S = 2\pi L(R_1 + \delta),\ 0 \leqslant \delta < R_2 - R_1, \qquad (1)$$

где L, R_1, R_2 — геометрические характеристики заряда (см. рис. 4, *а*).

Значения геометрических характеристик зарядов тестовых примеров

Геометрический размер, мм	Конфигурация № 1	Конфигурация № 2
$R1$	15	20
$R2$	50	50
$R3$	—	30
$R4$	—	40
L	150	80

Расчётная зависимость площади горения от смещения, полученная с использованием предложенного метода, и кривая, соответствующая выражению (1), представлены на рис. 4, *б*. Геометрические размеры конфигурации № 1 представлены в таблице.

Аналогично для заряда конфигурации № 2 (см. рис. 5) можно получить аналитиче-

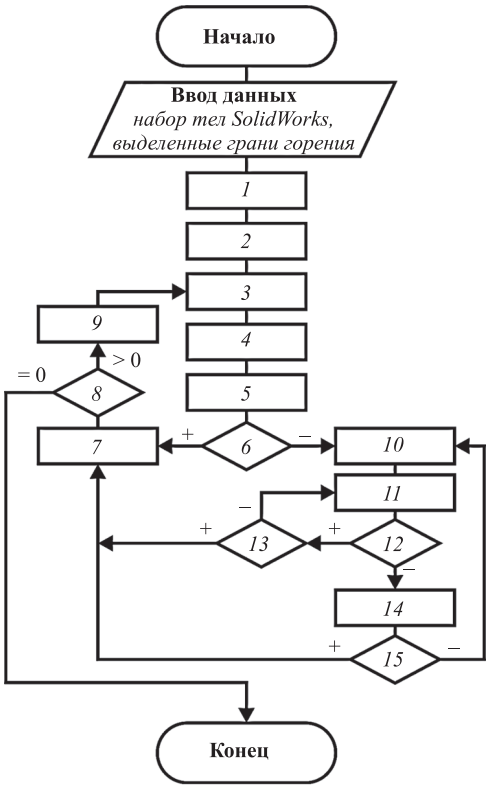
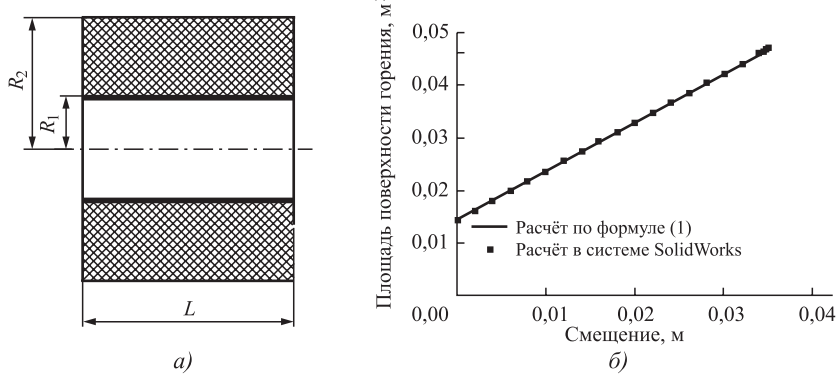
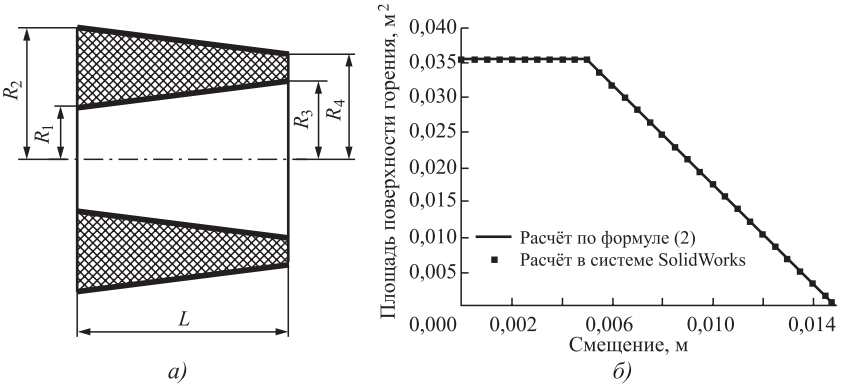


Рис. 3. Алгоритм выгорания заряда



а) *б)*

Рис. 4. Моделирование выгорания заряда (конфигурация № 1):
а — начальная конфигурация заряда; *б* — сравнение расчётного и аналитического решений



а) *б)*

Рис. 5. Моделирование выгорания заряда (конфигурация № 2):
а — начальная конфигурация заряда; *б* — сравнение расчётного и аналитического решений

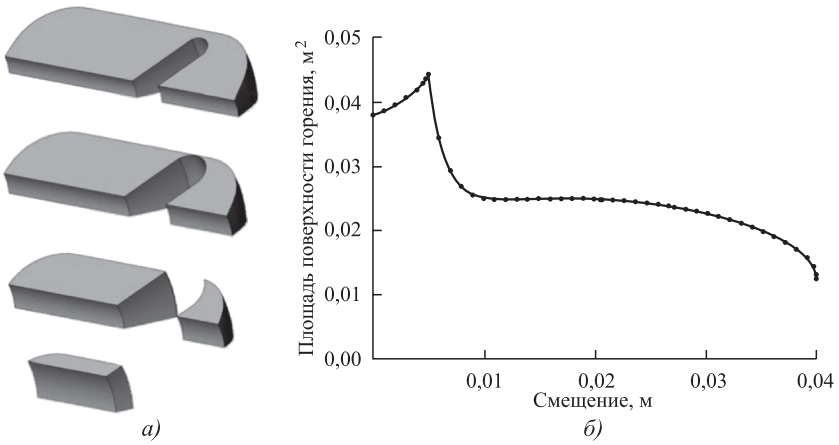


Рис. 6. Моделирование горения заряда сложной формы:
а — эволюция поверхности горения заряда; *б* — зависимость площади поверхности горения от смещения

ский закон изменения площади поверхности горения в виде

$$S = \begin{cases} \pi l \left(R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \right), \\ 0 \leqslant \delta < \dfrac{R_4 - R_3}{2} \dfrac{L}{l}; \\ \pi l \dfrac{R_2 - R_1}{R_2 - R_4} \left(R_2 - R_1 - \dfrac{2\delta L}{l} \right), \\ \dfrac{R_4 - R_3}{2} \dfrac{L}{l} < \delta < \dfrac{R_2 - R_1}{2} \dfrac{L}{l}; \end{cases} \qquad (2)$$

$$l = \sqrt{L^2 + \left(R_2 - R_4 \right)^2},$$

где L, R_1, R_2, R_3, R_4 — геометрические характеристики заряда (см. рис. 5, *а*).

Следует отметить, что формула (2) получена в предположении, что $R_2 - R_4 = R_3 - R_1$. Геометрические размеры конфигурации № 2 также представлены в таблице.

На рис. 5, *б* представлено сравнение зависимостей площади поверхности горения заряда конфигурации № 2 от величины смещения рассчитанных по формуле (2) и с помощью описанного метода.

Более сложные конфигурации, форма которых приближена к реальности, поддаются лишь качественному сравнению или требуют привлечения экспериментальных данных. В последнем случае верификация может проводиться лишь по значениям физических величин, что выходит за рамки данной статьи. Демонстрация эволюции заряда более сложной формы представлена на рис. 6, *а*, а на рис. 6, *б* представлена и рассчитанная зависимость площади горения от смещения. Следует отметить, что в данном случае для расчётов использовался сектор заряда в 30°, что возможно в силу осесимметричности исходной конфигурации. Геометрические характеристики полного заряда определяются умножением геометрической характеристики, полученной для сектора, на величину доли этого сектора относительно всей конфигурации (в данном случае на 12).

Также стоит отметить периодическое сгущение расчётных точек на приведённых графиках (см. рис. 4—6), связанных с автоматическим выбором расчётным алгоритмом величины текущего смещения (пункты 10—13 алгоритма). Каждый момент сгущения, как правило, заканчивается перестроением модели выгорания заряда (переход из п. 13 к п. 7 алгоритма).

Заключение. Автоматизация моделирования выгорания заряда твёрдого топлива в системах автоматизированного проектирования представляется наиболее перспективным методом описания данного процесса.

Для построения поверхности горения в системе SolidWorks достаточно использовать три модификатора: зеркальное отражение, тонкостенную оболочку и комбинирование вычитанием.

Описанный алгоритм выгорания заряда твёрдого топлива может быть реализован на любом высокоуровневом языке программирования и оформлен в виде расширения какой-либо системы автоматизированного проектирования. Программа для ЭВМ "GrainMaster" [2] является одним из примеров такой реализации в среде SolidWorks.

Проведена верификация предложенного метода моделирования выгорания заряда на двух тестовых задачах, поддающихся аналитическому анализу. Погрешность определения величины поверхности горения не превосходит 1 %.

Библиографические ссылки

1. **Внутренняя** баллистика РДТТ / А.В. Алиев [и др.]. М.: Машиностроение. 2007. 504 с.

2. **Дегтярёв С.А., Лаптев И.В., Семёнов П.А.** Программа для ЭВМ "GrainMaster". Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015610482 от 12.01.2015.

3. **SolidWorks** API Fundamentals. Dassault Systemes SolidWorks Corporation. 2012. 336 p.

4. **Алемасов В.Е., Дрегалин А.Ф., Тишин А.П.** Теория ракетных двигателей. М.: Машиностроение. 1989. 533 с.

УДК 621.757

Е.И. Воробьёв, д-р техн. наук, проф., **Д.И. Хатунцев**
(Институт Машиноведения РАН, г. Москва)

khatountsev@mail.ru

ДВУРУКИЕ РОБОТЫ. ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ

Отмечены особенности построения алгоритмов управления двурукими роботами, работающими в пересекающихся рабочих зонах. Получены условия отсутствия пересечений звеньев манипуляторов. Построен алгоритм управления двуруким роботом при условии недопустимости пересечения звеньев на основе решения прямой и обратной задачи кинематики.

Ключевые слова: двурукий робот; условие недопустимости пересечения звеньев; алгоритм управления.

The construction features of the two-handed robot control algorithms working in intersecting work areas are noted. The absence conditions of manipulators links intersection are derived. A control algorithm for two-handed robot provided inadmissibility links intersection from a direct and inverse kinematics problem decision is constructed.

Keywords: two-handed robot; inadmissibility links intersection condition; control algorithm.

Двурукие роботы имеют определённые преимущества и особенности функционирования по сравнению с однорукими.

Манипуляторы двуруких роботов функционируют в пересекающейся зоне манипулирования, что необходимо учитывать при построении алгоритмов управления.

Двурукие роботы. Двурукие роботы используются при выполнении сложных рабочих операций в космосе, океане, при работе с радиоктивными материалами и в медицине.

В последнее время двурукие роботы рассматриваются как одно из направлений развития робототехники. Инновационный двурукий робот YuMi с расширенной функциональностью для реализации сложных движений и операций является одним из примеров двуруких роботов (рис. 1).

Может использоваться, например, при сборке мелких деталей, где человек и робот работают вместе. Безопасность совместного функционирования робота и человека заложена в систему управления робота.

Манипуляционные возможности двуруких роботов. Большинство рабочих операций человек выполняет, используя обе руки. Это обусловлено несколькими причинами. Одна из них связана с возможностью обеспечения относительного движения рабочих звеньев с бóльшим числом степеней свободы при помощи двух разных манипуляторов, использующих меньшее число степеней свободы каждого. Например, шесть степеней свободы рабочих звеньев (φ, ψ, θ, Δx, Δy, Δz) при относительном движении рабочих звеньев можно обеспечить, задействуя оба манипулятора с тремя степе-

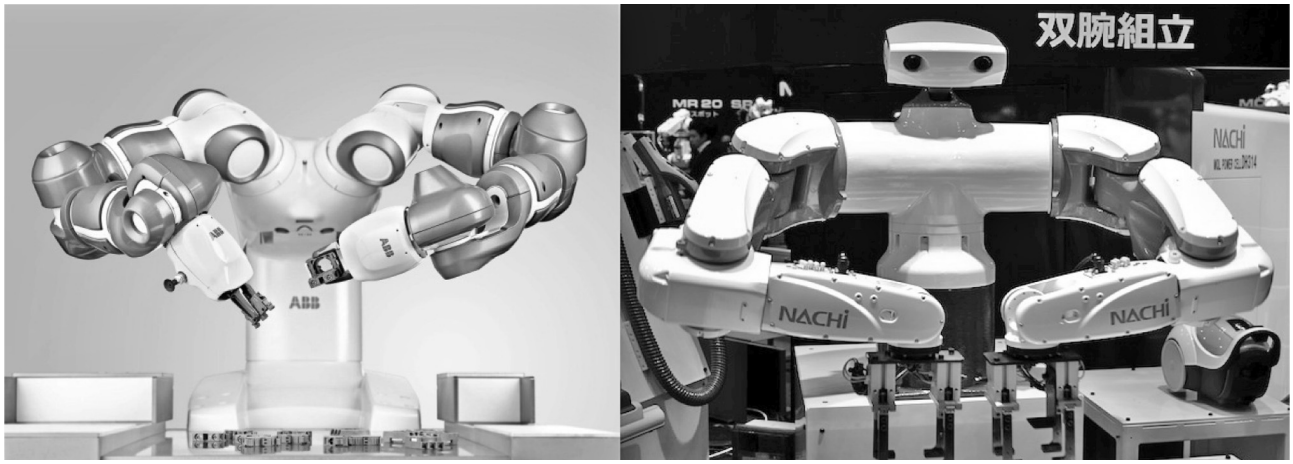


Рис. 1. Двурукие роботы

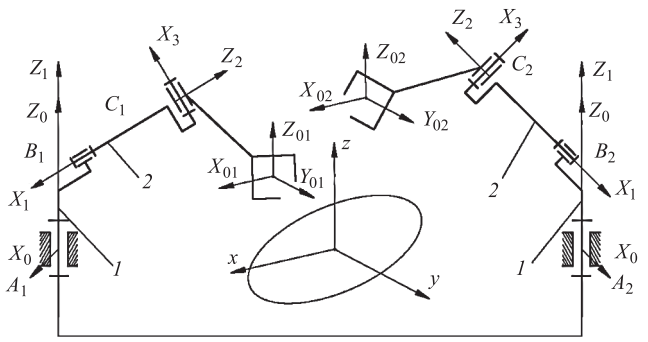


Рис. 2. Две трёхзвенные подвижные части манипуляторов:
1, 2 — звенья манипуляторов; A_i, B_i, C_i — кинематические пары манипуляторов; i = 1, 2, 3

нями свободы каждого (рис. 2), что позволяет значительно повысить точность относительного манипулирования [1].

Другая причина связана с необходимостью совершения относительного манипулирования рабочих звеньев при выполнении сложных операций двумя руками и удерживании объекта. Действие двух рук на объект одновременно при переносе объекта позволяет также снизить нагрузку на каждую руку.

Задача построения движений. При построении движений двуруких роботов возникают специфические задачи, связанные с контролем взаимного расположения звеньев во избежание их столкновения и относительного положения схватов обоих манипуляторов при одновременном воздействии на объект.

В двуруких роботах манипуляторы функционируют в пересекающихся рабочих зонах.

Будем считать, что оба манипулятора имеют антропоморфную схему с парами пятого класса, обладают каждый шестью степенями свободы, имеют общее звено и единую систему управления (рис. 3).

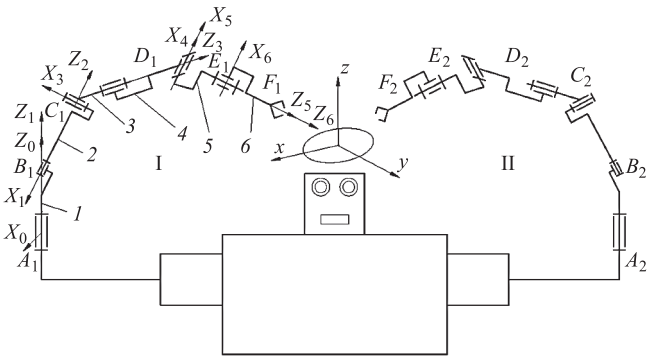


Рис. 3. Манипулирование объектом в пространстве двуруким роботом:
1—6 — звенья манипуляторов; A_i, B_i, C_i, D_i, E_i, F_i — кинематические пары манипуляторов; i = 1, 2, 3, 4, 5, 6; x_i, y_i, z_i — системы координат

Подвижность робота при захвате объекта типа "твёрдое тело" двумя манипуляторами. При захвате объекта обоими захватными механизмами звено *6* (см. рис. 3) манипулятора I, объект и звено *6* манипулятора II образуют одно звено, следовательно, общее число звеньев системы n = 11. Число пар пятого класса всей системы равно 12.

Таким образом, число степеней свободы всей системы при одновременном захвате объекта обоими манипуляторами равно шести:

$$W = n - 5p_5 = 6 \cdot 11 - 5 \cdot 12 = 6. \qquad (1)$$

Это означает, что управляемыми приводами в этом случае могут быть только шесть приводов.

Относительные положения звеньев каждого манипулятора. Относительные положения звеньев каждого манипулятора определяются решением обратной задачи о положениях, считая положение выходного звена известным, которое обычно задаётся при выполнении операции. Решению обратных задач о положениях манипуляторов (обратная задача кинематики) посвящено значительное количество работ, например, [2]. Поэтому эта задача считается решённой.

Абсолютные положения звеньев манипуляторов. При известных углах относительного поворота соседних звеньев в каждом манипуляторе абсолютные положения звеньев в общей системе координат можно определять методом матриц [3].

Будем считать, что оба манипулятора имеют одинаковую структуру и содержат только вращательные кинематические пары. Со звеньями манипулятора I (см. рис. 3) свяжем системы координат следующим образом.

Систему координат $Bx_1y_1z_1$ свяжем со звеном *1*, направив ось z_1 по оси вращательной пары *A*, а ось x_1 — по оси вращательной пары *B*.

Систему координат $Bx_2y_2z_2$ свяжем со звеном *2*, направив ось Bx_2 по оси пары *B*, а ось Bz_2 — вдоль оси звена *2*.

Систему координат $Cx_3y_3z_3$ свяжем со звеном *3*, направив ось Cz_3 по оси пары *D*, а ось Cx_3 — по оси пары *C*.

Систему координат $Ex_4y_4z_4$ свяжем со звеном *4*, направив ось Ez_4 по оси пары *D*, а ось Ex_4 — по оси пары *E*.

Систему координат $Ex_5y_5z_5$ свяжем со звеном *5*, направив ось Ez_5 по оси пары *F*, а ось x_5 — по оси пары *E*.

Систему координат $Fx_6y_6z_6$ свяжем со звеном, направив ось Fz_6 по оси пары F, а ось x_6 — перпендикулярно плоскости движения губок схвата, жёстко соединённого со звеном *6*.

Матрицы четвёртого порядка, определяющие относительные положения звеньев в каждом манипуляторе и связанных с ними систем координат, имеют вид:

$$M_{01} = \begin{bmatrix} \cos\varphi_1 & -\sin\varphi_1 & 0 & 0 \\ \sin\varphi_1 & \cos\varphi_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$M_{12} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi_2 & -\sin\varphi_2 & 0 \\ 0 & \sin\varphi_2 & \cos\varphi_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$M_{23} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi_3 & -\sin\varphi_3 & 0 \\ 0 & \sin\varphi_3 & \cos\varphi_3 & l_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$M_{34} = \begin{bmatrix} \cos\varphi_4 & -\sin\varphi_4 & 0 & 0 \\ \sin\varphi_4 & \cos\varphi_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$M_{45} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi_5 & -\sin\varphi_5 & 0 \\ 0 & \sin\varphi_5 & \cos\varphi_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$M_{56} = \begin{bmatrix} \cos\varphi_6 & -\sin\varphi_6 & 0 & 0 \\ \sin\varphi_6 & \cos\varphi_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \qquad (2)$$

где φ_i = (1, 2, ..., 6) — угол относительного положения звеньев; l_i — постоянные размеры; i = 1, 2, ..., 6.

Абсолютные положения звеньев первого манипулятора I относительно неподвижной системы координат определяются перемножением соответствующих матриц из выражения (2):

$$\begin{aligned} M_{02} &= M_{01}M_{12}; \\ M_{03} &= M_{01}M_{12}M_{23}; \\ M_{04} &= M_{01}M_{12}M_{23}M_{34}; \\ M_{05} &= M_{01}M_{12}M_{23}M_{34}M_{45}; \\ M_{06} &= M_{01}M_{12}M_{23}M_{34}M_{45}M_{56}. \end{aligned} \qquad (3)$$

Абсолютные положения звеньев манипулятора II определяются аналогично, так как их структуры одинаковы.

Положения рабочих звеньев обоих манипуляторов, работающих с одним объектом, известны в системе координат объекта и задаются выполняемой операцией.

Положение объекта в абсолютной системе координат считаем также заданным. Таким образом, можно считать известным положение рабочих звеньев каждого манипулятора в абсолютной системе координат:

$$M_0^{(1)} = \begin{bmatrix} \alpha_{11}^{(1)} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & a^{(1)} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & b \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$M_0^{(2)} = \begin{bmatrix} \alpha_{11}^{(2)} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & a^{(2)} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & b \\ \alpha_{31} & \alpha_{23} & \alpha_{33} & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \qquad (4)$$

Здесь индексы (1) и (2) во всех элементах матриц, кроме (α_{11}) и (*a*), опущены.

Относительное положение рабочих звеньев разных манипуляторов. Относительное положение рабочих звеньев манипуляторов будем определять углом между осями рабочих инструментов и расстоянием между характерными точками рабочих звеньев (рис. 4).

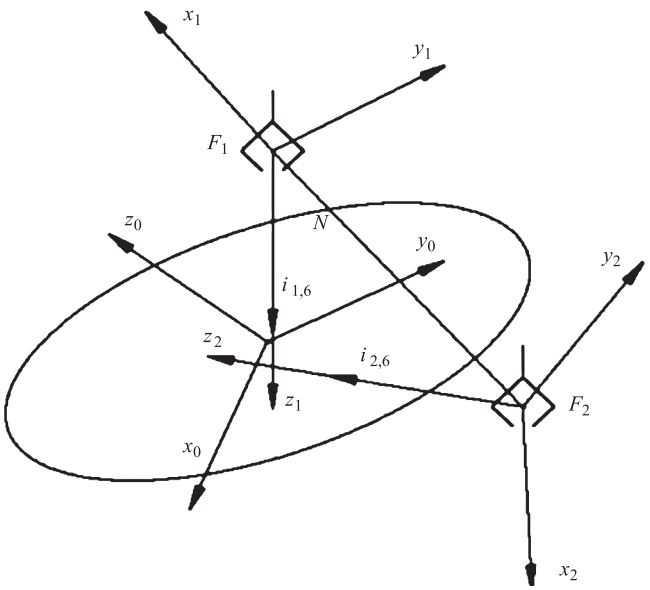


Рис. 4. Схема относительного положения выходных звеньев манипулятора

Сначала определим углы между осями систем координат, связанных со звеньями различных манипуляторов.

Рассмотрим элементы матриц $M_0^{(1)}$ и $M_0^{(2)}$. Элементы первой строки матрицы $M_0^{(1)}$ представляют собой направляющие косинусы единичного вектора $\overline{i_6^{(1)}}$ системы координат, связанной с инструментом и со звеном *6* в абсолютной системе координат $x_0y_0z_0$.

Эти элементы являются также проекциями этого вектора на неподвижные оси, т.е.:

$$\overline{i_6^{(1)}} = (\alpha_{11}^{(1)}, \alpha_{12}^{(1)}, \alpha_{13}^{(1)}). \quad (5)$$

Аналогично единичный вектор $\overline{i_6^{(2)}}$ системы, связанной со звеном *6* второго манипулятора, имеет проекции:

$$\overline{i_6^{(2)}} = (\alpha_{11}^{(2)}, \alpha_{12}^{(2)}, \alpha_{13}^{(2)}). \quad (6)$$

Тогда по свойству скалярного произведения векторов можно записать выражение для угла между векторами $\overline{i_6^{(1)}}$ и $\overline{i_6^{(2)}}$:

$$\cos\alpha_{12} = \alpha_{11}^{(1)}\alpha_{11}^{(2)} + \alpha_{12}^{(1)}\alpha_{12}^{(2)} + \alpha_{13}^{(1)}\alpha_{13}^{(2)}. \quad (7)$$

Аналогично находятся углы между любыми сочетаниями орт систем координат, связанных со звеньями первого и второго манипуляторов, т.е. можно построить матрицы относительного углового положения звеньев, входящих в разные манипуляторы.

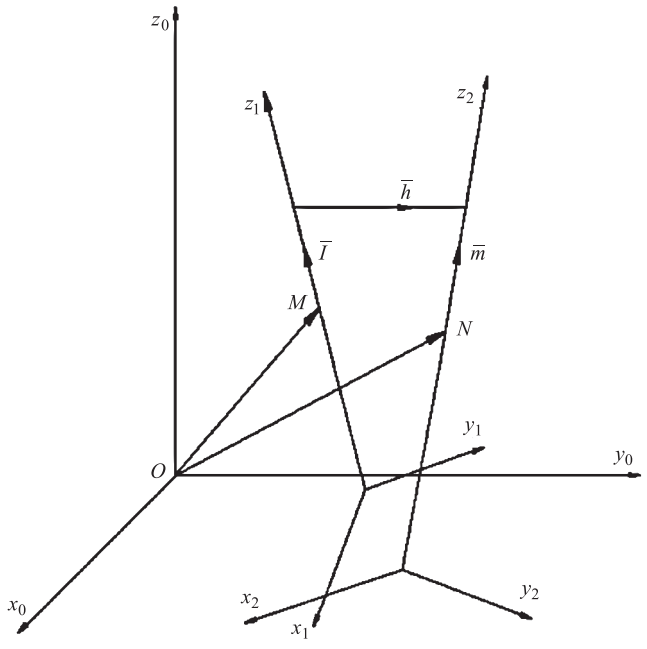


Рис. 5. Положение осей звеньев манипуляторов

Определим расстояние между звеньями манипуляторов. Будем считать, что звенья манипулятора представляют собой стержни. При построении рабочих движений двух манипуляторов в одной рабочей зоне необходимо избежать пересечения звеньев [4].

Расстояние между точками рабочих звеньев манипуляторов I и II, например F_1 и F_2, можно определить по формуле:

$$d = \left[(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 - (z_1 - z_2)^2\right]^{1/2}, \quad (8)$$

где x_i, y_i, z_i; i = 1, 2 — координаты точек.

Определим кратчайшее расстояние между осями звеньев манипуляторов (рис. 5).

При решении задачи об определении абсолютных положений звеньев положение их осей будем считать известным.

Положение осей определим координатами точек *M* и *N*, лежащих на осях, и направляющими векторами этих осей $\overline{l}(l_1, l_2, l_3)$; $\overline{n}(n_1, n_2, n_3)$.

Тогда уравнение осей в неподвижной системе координат имеет вид:

$$\frac{(x - x_m)}{l_1} = \frac{(y - y_m)}{l_2} = \frac{(z - z_m)}{l_3};$$
$$\frac{(x - x_n)}{n_1} = \frac{(y - y_n)}{n_2} = \frac{(z - z_n)}{n_3}, \quad (9)$$

где x_i, y_i, z_i; $i = m$, n — координаты точек *m* и *n*.

Направляющий вектор $\overline{h}$ прямой, направленной по линии кратчайшего расстояния между отрезками, может быть найден как векторное произведение векторов $\overline{l}$ и $\overline{n}$:

$$\overline{h} = \overline{l} \times \overline{n}. \quad (10)$$

Проекции этого вектора запишем в виде:

$$h_x = \begin{vmatrix} l_2 & n_1 \\ n_2 & n_3 \end{vmatrix}; h_y = \begin{vmatrix} l_3 & l_2 \\ n_3 & n_1 \end{vmatrix}; h_z = \begin{vmatrix} l_1 & l_2 \\ n_1 & n_2 \end{vmatrix}. \quad (11)$$

Кратчайшее расстояние между осями звеньев может быть определено как проекция вектора $(l - l_n)$ на направление $\overline{n}$:

$$h = \left\| \overline{l_m} - \overline{l_n} \right| \overline{n} \Big|, \quad (12)$$

где $\overline{l_m}$ и $\overline{l_n}$ — соответственно радиусы векторов точек *M* и *N*, лежащих на осях звеньев.

Рис. 6. Алгоритм построения движения двурукого робота

Условие отсутствия пересечения звеньев в пространстве имеет вид:

$$\left|\left(\overline{l_m} - \overline{l_n}\right)\overline{n}\right| \geqslant d, \qquad (13)$$

где d — расстояние безопасности сближения звеньев.

Алгоритм управления двуруким роботом. На основе математической модели построен алгоритм управления координации движения двурукого робота, особенностью которого является учёт возможности пересечения звеньев и его устранения (рис. 6).

Таким образом, отмечены особенности функционирования двуруких роботов. Показана необходимость учёта возможности пересечения звеньев манипулятора двурукого робота при построении алгоритмов управления.

Получены соотношения, позволяющие избежать пересечения звеньев при функционировании робота.

Построен алгоритм управления двуруким роботом с учётом обеспечения непересекающихся траекторий звеньев

Библиографические ссылки:

1. **Воробьёв Е.И., Хатунцев Д.И.** Прямая и обратная задача кинематической точности промышленных роботов // Автоматизация и современные технологии. 2014. № 9. С. 7—10.

2. **Воробьёв Е.И., Попов С.А., Шевелева Г.И.** Механика промышленных роботов. Кинематика и динамика [под ред. К.В. Фролова, Е.И. Воробьева]. М.: Высшая школа, 1988. 304 с.

3. **Воробьёв Е.И., Козырев Ю.П., Царенко В.М.** Промышленные роботы агрегатно-модульного типа. М.: Машиностроение, 1988. 240 с.

4. **Коренев Г.В.** Целенаправленная механика управляемых манипуляторов. М.: Наука, 1979. 448 с.

Уважаемые читатели!

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении,
а также непосредственно на сайте издательства (www.mashin.ru)
ООО "Инновационное машиностроение".

УДК 004.89; 004.048

Ю.Т. Каганов, канд. техн. наук, доц., **А.М. Мокров,**
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана),
Н.В. Мокрова, д-р техн. наук, доц.
(Академия социального управления, г. Москва)
amokrov@zoho.com

АЛГОРИТМЫ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Приведены примеры практической реализации алгоритмов на основе нейронных сетей для распознавания мимики лица и скоринговой оценки данных. Проанализирована эффективность работы нейронных сетей различных структур. Сделан вывод о необходимости выбора типа сети для разных видов поставленных задач.

Ключевые слова: нейронная сеть; распознавание мимики; скоринговые системы.

Examples of practical implementation of algorithms based on neural networks for recognition of facial expressions and scoring evaluation of the data are presented. The effectiveness of the various structures of neural networks is considered. The conclusion about the need to select the type of the network for different types of tasks is made.

Keywords: neural network; mimic recognition; scoring systems.

Введение. Искусственные нейронные сети широко используются при решении самых разных практических задач, позволяют по-новому решать задачу вычислений и имеют преимущества по сравнению с традиционными алгоритмическими решениями. В числе задач, успешно решаемых с применением искусственных нейронных сетей, можно отметить следующие: распознавание текстов, игра на бирже, контекстная реклама в Интернете, фильтрация спама, проверка проведения подозрительных операций по банковским картам, системы безопасности и видеонаблюдения и т.д.

С одной стороны, область применения нейронных сетей отчасти совпадает с кругом задач, решаемых традиционными статистическими методами. В то же время нейронные сети позволяют эффективно строить нелинейные зависимости, более точно описывающие наборы данных. Нейронная сеть не требует повторного построения модели при решении прямой и обратной задач. Алгоритмы построения растущих нейронных сетей не требуют первоначального задания размера сети. При описании нелинейных моделей нейронные сети можно сравнивать лишь с методом группового учёта аргументов. Использование робастных критериев при обучении нейронной сети вместо критерия качества в виде наименьших квадратов позволяет дополнительно оптимизировать свойства сети, например, добавляя требования регуляризации решения, оптимизации структуры или приведения значений адаптивных параметров к заданным величинам.

Приведём практические задачи, в которых применяются нейронные сети: прогнозирование курсов валют и объёмов продаж, автоматический трейдинг на бирже, оценка рисков невозврата кредитов, предсказание банкротств, оценка стоимости недвижимости и т.п.;

постановка медицинского диагноза, мониторинг состояния пациента, анализ эффективности лечения;

обучение автопилота и адаптивное пилотирование, распознавание сигналов радаров;

ассоциативный поиск информации в Интернете, фильтрация и блокировка спама, автоматическая рубрикация сообщений, сжатие, кодирование и декодирование данных, распознавание рукописных текстов и других документов;

оптимизация режимов производственного процесса, контроль качества продукции, мониторинг и визуализация автоматизированных производств, предупреждение аварийных ситуаций, управление манипуляторами;

распознавание лиц, идентификация личности, распознавание автомобильных номеров, анализ аэрокосмических снимков, гео-

логоразведка, мониторинг информационных потоков в компьютерной сети и др. [1].

Использование нейронных сетей в задачах распознавания эмоционального состояния. Для примера рассмотрим систему распознавания лиц и мимики, которая применяется в криминалистике, нейрофизиологии, компьютерной технике для организации визуального интерфейса взаимодействия пользователей и других областях. Основным критерием эффективности методов распознавания является оптимальность с точки зрения соотношения скорости и эффективности работы программного обеспечения в ходе анализа изображения и последующей обработки данных. Методы и алгоритмы на основе нейронных сетей помогают решать проблему скорости обработки и категоризации данных в связи с возможностями самообучения, адаптации и корректировки выходных данных.

При решении задачи распознавания образов и оценки эмоционального состояния человека предложен алгоритм и программное обеспечение на основе методов искусственного интеллекта. Для обнаружения лиц использован алгоритм, предложенный Виолой и Джонсом (Viola—Jones) [2]. В основе алгоритма — принцип сканирующего окна, согласно которому на вход поступает представление изображения в виде двумерной матрицы, каждый элемент которой хранит информацию о соответствующей единице изображения. Окно сканирования применимо ко всем участкам и к разным масштабам анализируемого изображения с последующим использованием функции Хаара и классификатора на каждой итерации. После адаптации соответствующих функций и создания новых примитивов функции Хаара данный алгоритм может быть применим для обнаружения любых других объектов. Алгоритм Виолы—Джонса реализован на основе библиотеки OpenCV. Для выбора требуемых функций Хаара и установления пороговых значений перепада по яркости использован метод машинного обучения AdaBoost [2], представляющий собой процедуру усиления "слабых" моделей классификации посредством их композиции и объединения в более сильные классы.

Представление параметров лица формируется с помощью активных моделей внешнего вида. Для характеристики формы модель обучается набором изображений с уже размеченными реперными точками. Применение двух типов деформации в активных моделях внешнего вида одновременно позволяет учитывать смещение, масштаб, угол поворота и другие параметры изображения. После получения матрицы главных векторов и базовой формы происходит обучение компонентов внешнего вида, выполняется извлечение текстур из обучающей выборки, которые лучшим образом соответствуют базовой форме, посредством триангуляции меток выборки и меток обучающего набора изображений. Затем выполняется отображение триангулированных участков обучающего набора в соответствующие участки текстуры. На последнем шаге из совокупности полученных текстур формируется матрица, каждый столбец которой содержит значения пикселей соответствующей текстуры. После поиска главных компонент матрицы текстур получено выражение, однозначно определяющее конкретную структуру, $t = t_0 + \Phi_t b_t$, где t_0 — базовая текстура, полученная усреднением по всем текстурам обучающей выборки; Φ_t — матрица текстур; b_t — вектор параметров модели внешнего вида.

В классической активной модели внешнего вида для процесса адаптации алгоритма к процессу распознавания используется вектор комбинированных параметров как функция матрицы текстур и диагональной матрицы весовых значений, которая уравновешивает расстояния между интенсивностью пикселов и самими пикселами. Для каждой пары текстура — форма задаётся матрица главных компонент объединённых параметров. После удаления шумовых элементов определяется матрица предсказания R, удовлетворяющая минимуму квадратичной ошибки зависимости $\delta p = R\delta t$, где $\delta t = t_{i\text{mage}} - t_{\text{model}}$ — вектор ошибки как отклонение от модельного значения; δp — возмущение вектора положения и комбинированных параметров внешнего вида.

Алгоритм процесса адаптации активной модели внешнего вида к анализируемому изображению состоит из вычисления всех параметров модели; преобразования формы на основе начального приближения; вычисления вектора ошибки δt; построения текстуры посредством кусочных деформаций изображения; вычисления вектора возмущений δp; модификации вектора комбинированных параметров и преобразований (суммирование с вектором возмущений); обновления параметров формы и текстуры до достижения сходимости.

Для повышения скорости анализа изображений использован алгоритм адаптации на основе активной модели внешнего вида обрат-

ной композиции, предложенной Мэтьюсом и Бейкером. Процесс вычислений основан на алгоритме Лукаса—Канаде [3], который выполняет задачу поиска локального минимума, с помощью аффинной деформации шаблона, задаваемой вектором параметров *P*. Предполагается, что начальное значение деформации *P* известно, а вычисление приращения параметров *dp* — итерационное. Во время обучения активной модели внешнего вида обратной композиции определяем изображения наискорейшим спуском и их гессиан, что значительно увеличивает эффективность обучения.

Субъективность задачи анализа эмоциональных состояний человека обусловлена огромным количеством как самих эмоциональных состояний, так и субъектов, выражающих эти состояния. При исследовании эмоционального состояния человека рассмотрено четыре условных состояния: нормальное, радость, злость, страх. За базовое принято нормальное состояние, на основе которого можно описать мимику лица для каждого рассматриваемого эмоционального состояния. Будем считать, что радость характеризуется вытянутыми в сторону губами и поднятыми вверх уголками рта; страх — поднятыми бровями; злость — сильно сжатыми губами и сдвинутыми бровями. Для анализа координат лица выбраны три точки на каждую бровь (две по краям и одна по середине) и четыре точки вокруг рта (две по краям и по одной по середине на нижнюю и верхнюю губы). В результирующий набор добавлены две точки, определяющие положение внешних уголков глаз. Предложенная методика анализа позволила определить точное положение в пространстве выбранных точек, а также деформацию изображения. Этап выбора реперных точек может быть детализирован до сколь угодной глубины, при этом нельзя доподлинно утверждать, что выбраны правильные точки.

Процесс адаптации алгоритмов на основе активной модели внешнего вида с обратной композицией основан на применении ряда последовательных операций, заключающихся в устранении компонентов сдвига, равномерного масштабирования и поворота. Дальнейший ход алгоритма на основе Прокрустова анализа включает сравнение формы объектов посредством нейронной сети.

Наиболее используемыми сетями для задач классификации и аппроксимации являются сети, построенные на основе перцептронов [4], содержащие хотя бы один скрытый слой и построенные на прямом распространении сигнала. Для корректной работы таких сетей требуется обучение с учителем, что подразумевает наличие больших объёмов эталонных данных. Следует отметить, что классические сети обладают недостаточно быстрой сходимостью, и в то же время могут быть переучены. При этом вследствие переобучения из-за неправильно сформированного обучающего набора сеть может перестать выдавать верный результат.

При решении задачи распознавания мимики лица для строгой категоризации данных использована сеть Кохонена—Гроссберга [4]. Такая структура принципиально отличается от классических сетей отсутствием эталонных значений, что подразумевает самообучение. Сеть распознаёт наиболее близкий кластер данных и в процессе обучения корректирует весовые коэффициенты таким образом, чтобы выбранный класс обобщился на данные, подобные текущему входному значению. На выходе наибольшему значению присваивается единица, остальным — ноль. Сеть Кохонена представляет собой однослойную решётку с нейронами. Звезда Гроссберга является обучаемой, но выполняет только функцию вывода вектора значений весовых коэффициентов, соответствующих победителю в карте Кохонена. Для определения эмоционального состояния человека нет необходимости получать значения данных весовых коэффициентов, так как каждое состояние характеризуется только победой определённого класса. Как следствие, выполняется модификация процесса обучения карты Кохонена посредством изначальной категоризации данных, т.е. перед началом обучения выставляются соответствующие изображению категории весовых коэффициентов, которые равны нормализованным значениям входных векторов. После этого выполняется предложенный процесс обучения.

Применение нейронных сетей для скорингового анализа данных. Перейдём к практической реализации задачи расстановки приоритетов в выборе кредитной организации, ускоряющей процесс получения банковской услуги минимизацией количества банков, в которые будет отправлена заявка на основе анализа вероятности получения кредита.

Методы, лежащие в основе скоринговых систем, весьма разнообразны [5], в их числе: линейный дискриминантный анализ; многофакторная логистическая регрессия; кластерный анализ; деревья решений; метод минимизации структурного риска В. Вапника,

заложенный в основе широко известной на российском рынке системы скоринга KXEN [6] и нейронные сети. Использование нейронных сетей для скорингового анализа данных позволяет по обучающей выборке, т. е. массиву данных о клиентах с закрытыми кредитными договорами и с известным результатом погашения кредита конструировать структуру, состоящую из нейронов и связей и предназначенную для отнесения объекта к одному из двух рассматриваемых классов: согласие на выдачу кредита или отказ.

Простейшая сеть состоит из группы нейронов, образующих слой, выход слоя нейронной сети представляет собой взвешенную сумму входов. Для нормализации выходного значения нейронов используется функция активации, которая представлена сигмоидой. Более крупные и сложные нейронные сети обладают, как правило, большим вычислительным потенциалом. Многослойные сети образуются каскадами слоёв, выход одного слоя является входом для последующего, что может привести к увеличению вычислительной мощности по сравнению с однослойной сетью лишь в том случае, если активационная функция между слоями не будет линейной.

Для нейронных сетей такого типа наиболее эффективным алгоритмом обучения является обучение с учителем методом обратного распространения ошибки, который заключается в распространении сигналов ошибки от выходов нейронной сети к её входам, что абсолютно противоположно процессу передаче сигналов в режиме подсчёта выходных значений.

В рассматриваемом случае минимизируемой целевой функцией ошибки нейронной сети является функция

$$E = \frac{1}{2}\sum_p \sum_j \left(y_{jp} - d_{jp}\right)^2,$$

где y_{jp} — текущее выходное состояние j-го нейрона выходного слоя; d_{jp} — желаемое (эталонное) выходное состояние этого нейрона при подаче на входы сети p-го образа из обучающего набора.

При этом суммирование осуществлено по всем обучающим образам p и всем j нейронам выходного слоя. Минимизация ошибки выполнена методом градиентного спуска, что представляет собой изменение весовых коэффициентов по правилу

$$\Delta w_{ij} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{ij}},$$

где w_{ij} — весовой коэффициент синапса, соединяющего выход i-го нейрона предыдущего слоя с j-м нейроном текущего слоя; η — коэффициент скорости обучения сети.

Проанализировав производную функции E, можно записать формулу получения весовых коэффициентов нейронов n-го слоя:

$$\Delta w_{ij} = -\eta \delta_{jn} y_i,$$

где y_i — выход нейрона $(n-1)$-го слоя;

$$\delta_{jn} = \left(\sum_k \delta_{k(n+1)} w_{jk}\right) \frac{dy_j}{ds_j},$$

где y_j — выход j-го нейрона; s_j — взвешенная сумма его входных сигналов.

Соответственно, для выходного слоя получим

$$\delta_{jn} = \left(y_j - d_j\right) \frac{dy_j}{ds_j},$$

где d_j — желаемый выходной сигнал нейронной сети.

Система анализа данных предоставляет возможность выбора одной из трёх услуг, предлагаемых банками: банковская гарантия; тендерная гарантия; тендерный кредит. В зависимости от выбранной услуги требуются разные параметры, влияющие на вероятность одобрения заявки банком. Контроль корректности вводимых значений проводится на этапе отправки заявки, осуществляется контроль наличия данных во всех полях, за исключением необязательного поля "Гарантийный срок по контракту". В предложенную скоринговую систему поступают исходные данные при заполнении окна заявки и параметры нейронных сетей для требуемого вида услуги. Программа после получения результатов вычислений нейронной сети сохраняет их в файл формата Excel. Для данной задачи использована нейронная сеть, построенная на перцептроне, ориентированная на чёткую категоризацию входных данных. Данные, передаваемые в нейронную сеть, нормализованы.

Заявка пользователя содержит исчерпывающую информацию о клиенте, необходимую для выполнения анализа его кредитоспособности. Для анализа банковской и тендерной гарантии выбраны 18 показателей, в числе которых: срок существования организации; срок работы в отрасли; период безубыточной ра-

боты; объём выручки за последний отчётный период; отсутствие просроченной задолженности перед бюджетом, банками, фондом заработной платы; отсутствие негативной истории в НБКИ; опыт выполнения контрактов; наличие положительных чистых активов на последнюю отчётную дату; победа в аукционе на дату заполнения; сумма запрашиваемой гарантии согласно контракта; гарантийный срок по контракту. Для тендерного кредита предложены подобные показатели, в которые включена комфортная процентная ставка. Данные выбраны согласно анализу условий предоставления кредитных услуг банками Российской Федерации [7].

Каждый банк устанавливает свои условия предоставления услуги. С целью повышения эффективности оценки для каждой услуги каждого банка создаётся отдельная нейронная сеть. Данные нейронной сети хранятся в бинарных файлах, а информация о принадлежности конкретной услуге и банку — в общем xml-файле. Использование других способов хранения информации, таких как база данных, является неоптимальным в связи с достаточно небольшим количеством банков в Российской Федерации. Даже при общем количестве банков, равном 7000, максимально возможное количество файлов не превышает 21000, что вполне отвечает возможностям современных компьютерных систем.

Обучение нейронной сети проводится согласно предложенному методу обратного распространения ошибки, в качестве начального коэффициента обучения выбрано значение 0,7, что отвечает общепринятым стандартам [4]. Для обучения использован набор накопленных данных по обработанным вручную банковскими аналитиками заявкам и ответам банков на них. Учитывая конфиденциальность информации и большой объём обучающего набора, требуемого для обучения сети, часть исходных данных сгенерирована в автоматическом режиме. Выходной табличный файл содержит информацию о клиенте и вероятностные оценки одобрения заявки каждым банком, рассчитанные нейронной сетью. Тестирование осуществлено при условии, что оценка вероятности предоставления услуги более или равно 50 % равнозначна одобрению заявки, ниже 50 % — отказу. Размер обучающего набора — 4000 рассмотренных банками заявок. Тестирование осуществлено на оборудовании Intel Core i7-4500U 1.8 GHz, 8GB RAM, Windows 8 x64, Visual Studio 2013 Professional.

Анализ эффективности работы разных типов нейронных сетей

Нейронная сеть	Ошибка первого рода, %	Ошибка второго рода, %	Время обучения, с
Однослойная	9,76	0,50	16,1
Двухслойная	9,55	0,50	28,0
Трёхслойная	9,83	0,54	40,3

В процессе выполнения работы построено и проанализировано несколько видов сетей, основанных на перцептроне: сеть без скрытых слоёв (однослойная); с одним скрытым слоем (двухслойная); с двумя скрытыми слоями (трёхслойная) (см. таблицу).

Получен вывод о наибольшей оптимальности для выполнения данной задачи многослойной сети с перцептроном с одним скрытым слоем. При повышении количества скрытых слоёв эффективность обучения понижается, так как происходит недообучение, что в свою очередь приводит к повышению количества ошибочных результатов работы скоринговой системы в целом.

Заключение. Искусственные нейронные сети используются во многих областях от задач распознавания образов при организации интерфейса взаимодействия человека и компьютера до анализа эффективности услуг в сфере кредитования.

В работе проанализированы основные этапы процесса идентификации образов, предложен алгоритм адаптации и обучения искусственных нейронных сетей для анализа эмоционального состояния человека. Сделан вывод о возможности обеспечения безотказной работы системы распознавания мимики при использовании самообучающихся нейронных сетей. Построенная нейронная сеть в отличие от описанных стандартных методов позволяет решать проблемы выбора аспектов поведения системы распознавания при возникновении незапрограммированных ситуаций, а использование неклассического типа сети — решать эти задачи. При применении предложенных алгоритмов в системах видеоконтроля можно эффективно выявлять чрезвычайные ситуации, анализ и распознавание которых невозможно при использовании статических систем.

Подход к разработке скоринговых систем с использованием нейронных сетей имеет пре-

имущества в скорости анализа данных, позволяет экспериментировать и реализовывать новые возможности двух новых отраслей в целом. Аналитические данные показали, что использование нейронных сетей для скоринговой обработки данных, спрос на которую постоянно растёт не только у юридических лиц, но и у физических, достаточно эффективно и позволяет упростить процесс анализа данных.

Приведённые примеры подтверждают эффективность использования методов искусственного интеллекта, а в частности, нейронных сетей в достаточно широком практическом диапазоне.

Библиографические ссылки

1. **Ежов А.А., Шумский С.А.** Нейрокомпьютинг и его применение в экономике и бизнесе. М.: МИФИ, 1998. 224 с.

2. **Viola P., Jones M.J.** "Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features", proceedings IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2001), 2001. P. 511—518.

3. **Lucas B.D., Kanade T.** An iterative image registration technique with an application to stereo vision // 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence, 1981. P. 674—679.

4. **Хайкин С.** Нейронные сети: полный курс. 2-е изд. Пер. с англ. М.: Издательский дом "Вильямс", 2006. 1104 с.

5. **Мальцев Э.В.** Скоринговые системы в кредитовании физических лиц // Банковский ритейл. № 1, 2006. 112 с.

6. **Дискриминантный** анализ в банковском скоринге. Методический журнал "Риск-менеджмент в кредитной организации" [Электронный ресурс]. URL: http://www.reglament.net/bank/r/2011_4_article_5.htm, (дата обращения: 25.11.2015).

7. **Банки.ру** информационный портал: банки, вклады, кредиты, ипотека, рейтинги банков России [Электронный ресурс]. URL: http://www.banki.ru/, (дата обращения: 24.09.2015).

УДК 617.57-77 + 004.5

С.В. Кривошеев
(Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики)

krivosheev.sergey89@gmail.com

РАЗЛИЧНЫЕ СТРАТЕГИИ УПРАВЛЕНИЯ БИОНИЧЕСКИМ КИСТЕВЫМ ПРОТЕЗОМ С УЧЁТОМ ОПРЕДЕЛЁННЫХ ПАРАМЕТРОВ

Приведено краткое описание полученных результатов по разработке различных стратегий управления электромеханическим протезом кисти. Необходимость в нескольких стратегиях управления была обусловлена условиями установки протеза, такими как количество используемых электродов, высота ампутации и т.д. Приведены результаты, полученные при работе здоровой руки человека с применением различных методик размещения электродов, симулирующих те или иные условия. Показаны результаты обработки данных и получения сигнала управления, необходимого для корректной работы системы управления протезом.

Ключевые слова: электромиография; обработка сигналов; управление; протезирование.

A brief description of the results at the various management strategies development of the electromechanical hand prosthetic is adduced. The need for multiple management strategies is caused by prosthesis installation conditions, such as the number of utilized electrodes, the height of the amputation, etc. The results obtained with the work of the healthy human hand by using variety methods of electrodes placing simulating certain conditions are adduced. The results of data processing and a control signal receiving required for correct operation of the prosthesis control system are shown.

Keywords: electromyography; signal processing; control; prosthetics.

Введение. При современном уровне развития технологий, бионические протезы давно должны были стать обыденным явлением. Однако их высокая стоимость, не интуитивность системы управления, отсутствие обратной связи, ограниченная функциональность, ограниченный ресурс батареи — все эти критерии ограничивают и тормозят широкое рас-

пространение данных изделий. В работе большинства бионических протезов используется поверхностная электромиография (ЭМГ) как способ получения сигналов от мышечных групп на руке пациента, однако их интерпретация до сих пор вызывает трудности и далека от совершенства. Различные рабочие группы проводят исследования в области интерпретации сигналов, но, как показывают наблюдения за исследованиями, лишь малая часть полученных результатов находит применение в реальных устройствах, которые использовались бы пациентами с ампутациями руки.

Целью работы является формирование набора различных стратегий управления бионическим протезом, созданием которого занимается научная группа университета ИТМО, и дальнейшая их реализация с помощью ЭМГ датчиков и прямого их подключения к среде MatLab с возможностью обработки и использования для управления кистевым протезом. После этого этапа будет проведена оценка эффективности по ключевым параметрам и отобраны наиболее подходящие для различных случаев стратегии.

Необходимо выделить несколько наиболее критичных параметров, по которым будет происходить формирование стратегий и дальнейшая их оценка. Были выбраны такие параметры, как: количество используемых электродов; зоны снятия сигналов; высота ампутации; скорость обработки данных; интуитивность системы управления; количество запрограммированных схватов.

Исследовательские группы во всём мире используют разное количество электродов для снятия данных с поверхности руки. В частности, встречаются варианты с 2-мя [4], 4-мя [2, 3], 10-ю [1], 14-ю [6] электродами, вследствие чего увеличивается объём обрабатываемых данных, что сказывается на скорости обработки данных, а следовательно, и на удобстве для пользователя, так как возникающая задержка может быть критичной в некоторых ситуациях использования протеза. Кроме того, различаются и варианты расположения электродов на руке исследуемого объекта, в зависимости от количества электродов и высоты ампутации.

Основная часть. Были выделены следующие стратегии управления по признаку количества электродов: с одним, двумя, тремя и с *n*-м количеством электродов. Ко всем сигналам, снимаемым с помощью электромиографии, предъявляли определённые требования: сигналу необходимо было преодолеть входное пороговое значение в 1 мВ, чтобы исключить непроизвольный тремор мышц. Остановимся на каждой из стратегий подробнее и опишем суть стратегий управления и применимость к каждому отдельному случаю с учётом других параметров.

Были предложены несколько стратегий управления с помощью одного электрода управления. Первая из стратегий заключается в простом снятии сигнала, т.е. с электрода, расположенного на мышечной группе, поступает сигнал, происходит программная обработка сигнала в среде MatLab, и протез кисти совершает простейшее действие — складывается в силовой схват. Причём сила схвата может регулироваться в зависимости от длительности мышечного сокращения, т.е. по сути длительностью мышечного сокращения регулируются положения пальцев между начальным и крайним положением.

Для разгибания пациенту необходимо повторить мышечное сокращение. В данном случае не имело значения, на какой мышечной группе размещать электроды, поэтому была выбрана мышца сгибателя пальцев (flexor digitorum profundus). Результат после первичной фильтрации и обработки в среде MatLab представлен на рис. 1.

Суть второй стратегии с использованием одного электрода заключается в снятии опре-

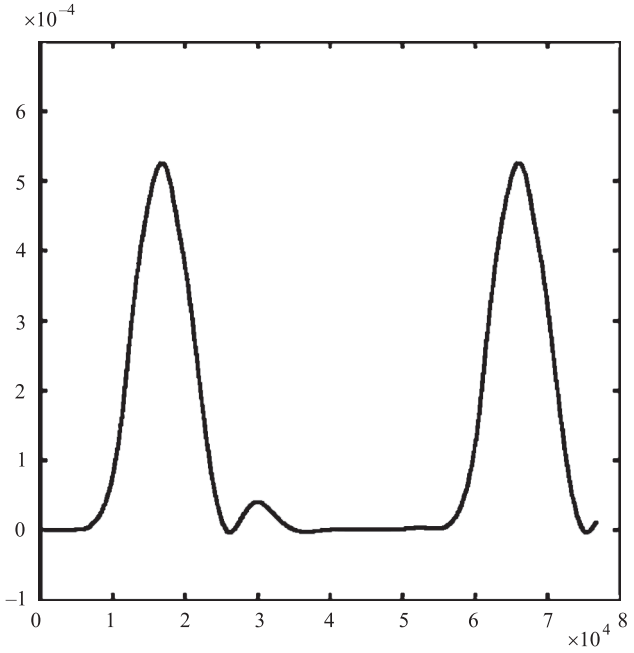


Рис. 1. Снятие единичного сигнала на сгибание и разгибание после первичной обработки

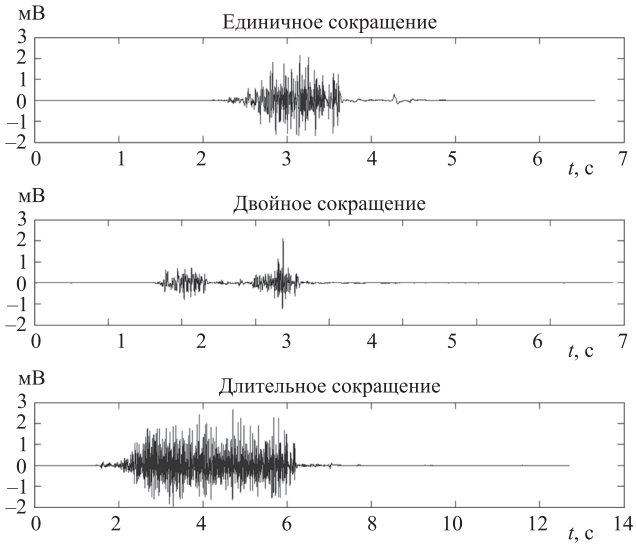


Рис. 2. Пример необработанных сигналов из второй стратегии с одним электродом

делённого набора команд. Подробнее о командах идёт речь в работе [5]. В данном случае необходимо было получать определённые команды-сигналы, причём пациент должен был с высокой скоростью сокращать/расслаблять мышечную группу. Была предложена следующая система сигналов — единичное мышечное сокращение, длительное единичное мышечное сокращение, двойное мышечное сокращение с интервалом между иннервацией менее 2 с, отображение которых в среде MatLab приводится на рис. 2. Здесь выбор делается минимум из трёх, предварительно сохранённых схватов, которые человек может применять в зависимости от посылаемых команд. Чтобы кисть пришла в щипковый схват, человек посылает двойное мышечное сокращение с интервалом между пороговыми значениями менее 2 с, а для силового схвата — единичное мышечное сокращение. Приведение протеза в начальное положение осуществляется с помощью повторного командного мышечного сокращения. Для выхода из рабочего режима и возвращения в начальное положение пациенту необходимо повторить мышечное сокращение, также был допустим переход между режимами различных схватов при использовании другого запрограммированного мышечного сокращения. В данном случае также был выбран глубокий сгибатель пальцев (flexor digitorum profundus).

В случае с двумя электродами было предложено тоже несколько стратегий управления. Общая концепция заключалась в том, что электроды размещали на мышцах антагонистах, в нашем случае разгибатели и сгибатели пальцев (extensor & flexor digitorium). Предлагалось реализовать стратегию, аналогичную первой, с одним электродом, когда человек посылал сигнал системе управления протеза, и механизм приходил в один из заранее запрограммированных схватов. Различие заключается в том, что для того, чтобы переключиться в начальный режим, человеку необходимо произвести сокращение мышцы антагониста. Этот вариант похож на реализованный природой подход, в том виде, что в работе кисти используются и мышцы, относящиеся к группе пронаторов, и мышцы, относящиеся к группе супинаторов.

Вторая стратегия в некоторой степени является развитием первой стратегии с двумя электродами, но с тем отличием, что она позволяет использовать большее количество разнообразных схватов. Это достигалось использованием обоих электродов для переключения между схватами. Для переключения человеку необходимо было всего лишь произвести одновременное сокращение мышц антагонистов, а затем повторить алгоритм, описанный в первой стратегии для двух электродов. В этом варианте использовались те же самые мышечные группы — extensor & flexor digitorium.

Третья стратегия с двумя электродами развивает вторую стратегию с одним электродом, т.е. система должна распознать, какое именно мышечное сокращение было произведено пациентом мышцей — сгибателем или разгибателем. Причём, имелась дифференциация в алгоритмах управления, был реализован как вариант, в котором пронатор и супинатор считывались отдельно, а также реализован был подход, в котором антагонисты работали в связке. Данный подход позволил увеличить количество предварительно запрограммированных схватов минимум до шести.

Стратегия управления с тремя электродами приближает нас к тому вопросу, который ранее не затрагивался в предлагаемых стратегиях — управление не всей кистью одновременно, а раздельное управление каждым из пальцев. В данной стратегии были позволены некоторые допущения. Авторы разделили работу пальцев кисти на три группы: I — большой палец, II — средний и указательный пальцы, III — безымянный палец и мизинец. Методом пальпации и наблюдением за движением руки было определено, что необходимо разместить электроды следующим образом (рис. 3): данные были получены с плечелучевой мышцы (musculus brachioradialis); квадратного прона-

тора (musculus pronator quadratus); глубокого сгибателя пальцев (musculus flexor digitorum profundus). В результате были проанализированы несколько видов схватов и определено, что данные сигналы можно использовать для управления протезом в простейшем варианте, т.е. человек осуществляет мышечные сокращения и группы пальцев будут сгибаться в соответствии с желанием пациента.

Данная стратегия является достаточно простой для реализации, так как необходимо распознавать мышечные сокращения, которые напрямую управляют обозначенными пальцами. Алгоритм построен на анализе трёх каналов электромиографа, в случае превышения порогового значения система понимает, что необходимо произвести сгибание связанных с каналом пальцев. Пример такого сигнала с I группы приведен на рис. 4, где видно, что при выполнении схвата возникает возмущение, которое может быть однозначно интерпретировано.

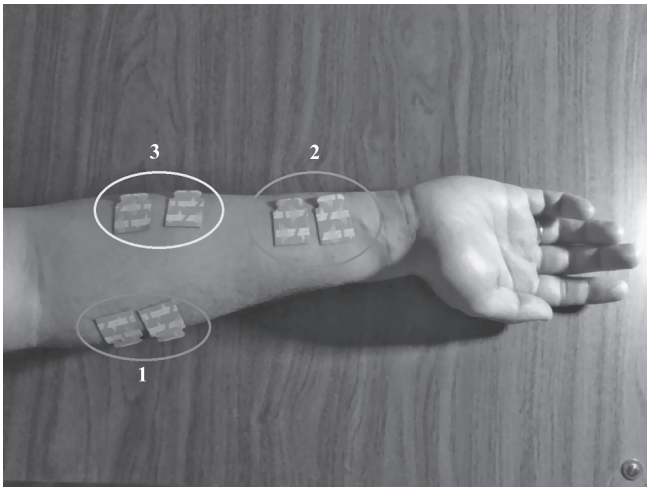


Рис. 3. Расположение электродов в стратегии с тремя электродами:
1 — плечелучевая мышца (musculus brachioradialis); *2* — квадратный пронатор (musculus pronator quadratus); *3* — глубокий сгибатель пальцев (musculus flexor digitorum profundus)

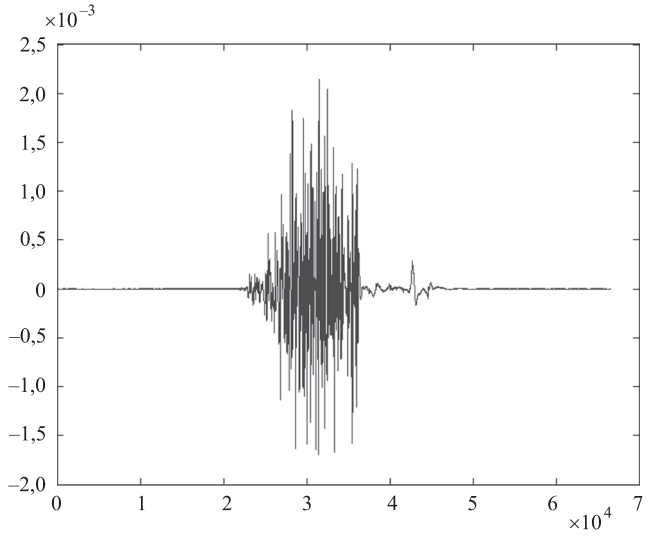


Рис. 4. Пример сигнала, полученного с I группы при использовании трёх электродов

Метод с применением *n* количества электродов требует применения нейронных сетей или подобных технологий для точного определения намерения пациента, с одной стороны, раскрывает дополнительные возможности в плане увеличения количества схватов и чисто теоретически доводит их значение до функционала реальной руки, с другой стороны, ограничивает исследователей поверхностью культи и быстродействием системы. Увеличение количества электродов на поверхности культи неизбежно приводит к задержкам, связанным с обработкой большого количества данных, поступающих с *n*-го количества электродов. Например, немецкая научная группа [7] с помощью примерно 10 электродов выявила движения кисти с очень высокой точностью. Несмотря на определённые трудности, научная группа университета ИТМО планирует реализовать данный подход либо с помощью большого количества электродов, расположенных на руке, либо с использованием миобраслетов.

Заключение. В результате проведённых теоретической, практической и аналитической работ были предложены и частично реализованы стратегии управления для одного, двух, трёх электродов и сформирован план работы по направлению с *n*-м количеством электродов. Основывая свои рассуждения на анализе отечественной и зарубежной литературы, можно говорить о том, что заявленные подходы являются оригинальными.

Обобщённый анализ полученных данных приводится в таблице. Основываясь на критериях, приведённых в начале статьи, можно говорить о том, что наиболее привлекательными по скорости обработки данных и унификации процесса установления протеза являются стратегии с одним и двумя электродами, так как они требуют минимального времени обработки сигнала, могут быть использованы вне зависимости от высоты ампутации у пациента, а также занимают минимальное количество места в культеприёмной гильзе. С точки зрения количества схватов наиболее эффективными являются стратегии с тремя и двумя электродами, работающими в режиме переключения.

Анализ полученных стратегий управления

Стратегия	Скорость обработки	Универсальность	Различные схваты	Интуитивность
Один электрод I вариант	+	+	-	+
Один электрод II вариант	+	+	+/–	–
Два электрода I вариант	+	+	–	+
Два электрода II вариант	+/–	+	+	–
Два электрода III вариант	+/–	+	+/–	–
Три электрода I вариант	+	–	+/–	+

Наиболее удачным с точки зрения интуитивности (один из наиболее важных параметров, так как он напрямую влияет на время привыкания пациента к протезу) оказался подход с тремя и двумя электродами, работающими в режиме переключения и режиме с простым захватом.

Данные алгоритмы будут в ближайшем времени апробированы на здоровых испытуемых, а также на испытуемых с ампутациями. Кроме того, необходимо проработать подходы с применением нейронных сетей и других алгоритмов, позволяющих создавать паттерны в зависимости от получаемых сигналов, что позволит увеличить количество схватов и повысить ловкость кистевого протеза.

Библиографические ссылки

1. **Al. Balbinot, Ad. Schuck Júnior, G. Winkler Favieiro.** Decoding Arm Movements by Myoelectric Signal and Artificial Neural Networks // Intelligent Control and Automation. 2013. № 4. P. 87—93.

2. **Wojtczak P. et al.** Hand movement recognition based on biosignal analysis// Engineering Applications of Artificial Intelligence (2009), doi:10.1016/j.engappai.2008.12.004.

3. **Eldin Henry Shroffe D., Manimegalai P.** Hand gesture recognition based on EMG signals using ANN // International Journal of Computer Application. 2013. № 2. P. 31—39.

4. **Lucas L., DiCicco M., Matsuoka Y.** An EMG-Controlled Hand Exoskeleton for Natural Pinching // Journal of Robotics and Mechatronics. Vol. 16 No. 5. 2004. P. 1—7.

5. **Кривошеев С.В., Орманов Д.Р.** Управление моделью многозвенного манипулятора с помощью значения электрических токов, снятых с поверхности руки // Автоматизация и современные технологии. 2014. № 2. С. 41—44

6. **Jiang et al.** EMG-based simultaneous and proportional estimation of wrist/hand kinematics in uni-lateral trans-radial amputees // Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation 2012, 9:42 http://www.jneuroengrehab.com/content/9/42

7. **Maier S., van der Smagt P.** Surface EMG suffices to classify the motion of each finger independently // Proceedings of MOVIC 2008: 9th International Conference on Motion and Vibration Control. 15—18 September, 2008. Technische Universitét München, 2008.

Вниманию авторов!

Требования к оформлению статей,
присылаемых для публикации,
можно найти на сайте www.mashin.ru

УДК 658.5 + 005.6 + 006

А.И. Ковалёв, канд. техн. наук
(ПАО "Хмельницкоблэнерго", г. Хмельницкий, Украина)
polyfitt@gmail.com

ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ И ОЦЕНИВАНИЕ КАЧЕСТВА ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ

Описана и эмпирически обоснована методология обработки и распределения первичной информации о качестве деятельности предприятий, полученной в результате информатизации, и последующей её передачи для формирования вариантов интеллектуальных управленческих решений.

Ключевые слова: управление; оценивание; качество деятельности; информатизация; интеллектуализация.

The methodology of processing and the initial information distribution about the enterprises activities quality, received as a result of informatization, and its subsequent transfer for forming of the intellectual management decisions version is described and empirically substantiated.

Keywords: management; assessment; activities quality; informatization; intellectualization.

Введение. Увеличение уровня информатизации повышает системность управления и, соответственно, качество принятия управленческих решений, что отвечает современным требованиям, предъявляемым к управлению предприятиями. Рост объёма разноаспектной информации создаёт трудности персоналу с точки зрения её анализа. В этой связи стала доминирующей тенденция повышения уровня интеллектуализации управленческих процессов. С точки зрения предприятия как эргатической системы, интеллектуализация зависит от способности извлекать информацию, манипулировать ею, анализировать и интерпретировать её с тем, чтобы выстраивать, умозаключать, обучаться и генерировать новые знания [1].

В управлении предприятием поэтому преобладает убеждение, что достаточно провести тщательный анализ, получить соответствующую информацию и можно сделать выводы, основанные на опыте. Системный и процессный подходы дополнительно ставят на обсуждение вопрос, как предприятие само осуществляет наблюдение, как воспроизводится действительность и вырабатывается знание о предприятии как системы коммуникаций и решений [2]. Речь идёт об интеллектуальном предприятии.

Целью настоящей работы является формирование подхода к интеллектуализации управления предприятиями — активного восприятия информации и обощённого опыта, а также целенаправленное поведение на основе оценивания качества деятельности.

Результаты исследования. Оценивание качества — особый тип функции управления, направленный на формирование ценностных суждений об объекте оценки. В соответствии с ISO 9000 качество — степень, с которой совокупность собственных характеристик выполняет требования, т.е. качество — не совокупность свойств объекта и их характеристик, но есть самостоятельная характеристика сущности объекта, для которой существует уровень (степень) требуемого качества. Этот уровень оценивается по отношению к эталону качества. Определение качества даёт возможность количественного оценивания через степень соответствия.

Качество проявляется вовне через свойства. *Свойство* — внешнее проявление качества как внутренней сущности объекта оценивания (состояния предприятия). Это отличительная особенность (атрибут) качества, выражение данного качества в отношении к другим качествам [3]. Свойство выражает такую сторону объекта, которая обусловливает его различие или общность с другими объектами и обнаруживается в его отношении к ним. *Характеристика* — отличительное свойство; может быть собственной или присвоенной, качественной или количественной. Существуют разные классы характеристик: физические, этические, временные, эргономические, функциональные. *Характеристика качества* — собственная характеристика (продукции, процесса, системы), вытекающая из требований. Состояние

предприятия — это множество существенных свойств (характеристик), которыми оно обладает на данный момент его функционирования.

Предприятие характеризуется множеством свойств, каждое из которых может быть выражено в большей или меньшей степени, т.е. иметь свою оценку. Свойства предприятия операционализируются с помощью процедур измерения, когда предприятию ставятся в соответствие некоторые значения, уровни, градации устойчивой совокупности присущих ему особенностей (признаков), выражающих данное свойство. Любое свойство может рассматриваться лишь в том случае, если оно проявляется. В то же время различные проявления одного и того же свойства необходимо сравнивать между собой.

Как правило, заранее не известно, какие свойства или выражающие их признаки должны быть включены в рассмотрение, а какие — нет. Метрология занимается определением количественных характеристик объектов, не связывая их с обоснованием управляющих решений, как это принято в квалиметрии. В квалиметрии свойством называется качество объекта, для которого установлена мера. *Величина* — значение, количественная характеристика меры. *Показатель* — это численное значение меры, по которому можно судить о состоянии, изменении или развитии чего-либо (явления, процесса, объекта).

Показатель часто определяют как количественную характеристику одного или нескольких свойств объектов, рассматриваемую при определённых параметрах. Таким образом, параметр характеризует состояние предприятия, его структуру, а показатель — свойства предприятия [4]. Смена состояний предприятия определяется изменениями показателей и параметрами. Параметры могут быть неизменными или медленно меняющимися по сравнению с основными процессами. Параметры указывают, чем данное предприятие отличается от других. Таким образом, будем считать показателями переменные, описывающие свойства, отражающие целевые устремления, а параметрами — характеристики состояния, отражающие качество деятельности предприятия. Процессные стандарты управления, например ISO серии 9000, предлагают рассматривать такие параметры, как результативность, эффективность, устойчивость деятельности (устойчивый успех).

Преобразование одного или нескольких параметров предприятия может быть охарактеризовано как результат деятельности, в ходе которой предприятие переходит из одного состояния в другое ("смещается" в пространстве состояний). Целенаправленная деятельность предприятия может происходить в двух основных режимах: функционирование и развитие.

Функционированием называется деятельность предприятия без смены главной цели деятельности. *Развитие* — деятельность предприятия со сменой главной цели. *Главная цель* призвана реализовать сущность деятельности, соответствующую миссии предприятия и его политике в области качества. Функционирование, в процессе которого происходит улучшение показателей, есть *рост*.

Для процесса роста характерно лишь количественное изменение показателей. В то же время основной особенностью развития является качественное изменение во времени параметров, характеризующих состояние предприятия, причём это изменение носит необратимый, направленный, закономерный характер.

Понятие роста для процессов — это увеличение определённых показателей, при которых внутренняя структура этих процессов и их взаимодействия остаются неизменными. Но как только подходим к границам, за пределами которых в рамках данной фазы развития процессов количественное увеличение невозможно или неэффективно, — рост переходит в развитие. Развитие есть переход от одного качественного состояния в другое; каждая фаза имеет набор индивидуальных показателей. Все это можно наблюдать в органическом мире на примере роста клетки, которая не может расти бесконечно и в определённый момент времени делится на две клетки, каждая из которых также может расти до определённых размеров.

Для того чтобы выразить состояния, нужно определить значения, принимаемые параметрами в рассматриваемый момент, т.е. значения результативности, эффективности, устойчивости деятельности предприятия. Номенклатура показателей, оцениваемых при определении свойств и состояния предприятия, должна полно и адекватно отражать реальный уровень результативности, эффективности и устойчивости. Поэтому выбор рациональной номенклатуры оцениваемых показателей осуществляют на основе изучения и моделирования свойств и состояния предприятия. Установление номенклатуры показателей — это не разовая, пусть и обоснованная научными методами операция, а процесс постоянной корректировки. Он зависит от стратегии развития предприятия.

Меры качества определяются шкалированием и свертыванием. Наличие меры означает, что имеется качественная или количественная шкала, в соответствии с которой атрибуту приписывается значение (величина), а также определён порядок соотнесения атрибута с этой шкалой (порядок измерения). *Шкалирование* — приписывание числовых форм объектам или событиям в соответствии с определёнными правилами; оно вводит упорядочивающие отношения на оцениваемом множестве свойств. Посредством шкалирования сложных объектов в силу их многогранности получают многомерные, векторные показатели.

Сложности векторной оптимизации привели к тому, что значительное распространение получили приёмы линеаризации показателей. Эти приёмы предусматривают переход от векторной формы показателя к одномерной линейной. *Свертыванием* показателей качества называется их объединение, осуществляемое по тому или иному закону. Операционное свёртывание качества — это объединение показателей, построенных на разнородных простых или сложных свойствах. На основе операционного свёртывания формируется понятие комплексных показателей качества. Статистическое свёртывание — это объединение показателей, построенных на однородных свойствах.

На основе статистического свёртывания формируется понятие обобщённых показателей качества. Показатель качества Y обычно определяется с помощью так называемой функции свёртки φ отдельных показателей свойств: $Y = \varphi(y_1, y_2, ..., y_n)$. Практически универсальная применимость метода свёртывания показателей связана с укоренённостью общей идеи скаляризации векторных оценок сложных объектов в различных отраслях науки.

Система оценки качества деятельности основана на различении групп показателей. Наиболее распространённой является трёхуровневая классификация показателей деятельности предприятий: на уровне предприятия, процессов и структурных подразделений [5].

В нашем исследовании кроме главной цели деятельности предприятия рассматриваются *основные цели* аспектов деятельности. Аспекты деятельности относятся к атрибутам — информационному отображению свойств предприятия. Аспекты отображают сложные свойства, которые одновременно учитывают все свойства, входящие в соответствующую группу. Например, ресурсный, операционный, потребительский, финансовый и инновационный аспекты.

Основные аспектные цели призваны сформулировать стратегию действий; достижение определённой их совокупности осуществляется вследствие выполнения процессов. Процессы — объекты управления верхнего уровня — характеризуют последовательную смену состояний функционирующего предприятия. Идентификация процессов — это установление их тождества тем взаимодействующим во времени бизнес-функциям, представителем (образом) которых они (процессы) являются

На основе проведённого анализа и принятого выше представления целей выделяем следующие три категории показателей.

На уровне главной цели предприятия:

ключевые показатели результата (*Key Results Indicators, KRIs*) — эффективности/результативности предприятия: каково положение дел в целом, достигнута ли главная цель?

На уровне основных аспектных целей процессов:

операционные показатели исполнения (*Operational Performance Indicators, OPIs*) — эффективности/результативности процессов: что следует сделать, чтобы достичь соответствия основным целям?

Ключевые показатели исполнения (*Key Performance Indicators, KPIs*): что необходимо сделать, чтобы резко интенсифицировать исполнение процессов для достижения наиболее важных основных целей?

Предприятие обладает выраженными системными свойствами, т.е. свойствами, которые не имеет ни одна из частей при любом способе членения и не выводимыми из свойств частей. Следовательно, для оценивания предприятия необходимо идентифицировать и оценивать некоторые системные свойства. Иными словами, нельзя ограничиться обобщённым показателем результата, составленным из частных показателей исполнения процессов. Требуется показатели деятельности предприятия комплектовать самостоятельными ключевыми показателями результата *KRIs*, не выводимыми из операционных показателей исполнения процессов *OPIs*. Исходя из этого вывода, разработаны следующие четыре основополагающих принципа построения набора релевантных показателей (обеспечивающих смысловое соответствие между информационным запросом субъекта оценивания и получаемыми сообщениями).

Главная цель деятельности предприятия подразделяется на основные цели, которые,

в свою очередь, делятся на *критерии* их достижения — краткие утверждения, описывающие конкретные действия, которые необходимо выполнить, чтобы достичь целей. Критерии — средства определения достоверности чего-либо, например, того, что цели предприятия достигнуты.

Для оценки достижения (качественных) целей необходимо разработать количественные показатели, позволяющие оценить степень достижения: главной цели деятельности предприятия — ключевые показатели результата (*KRIs*); всех основных целей — операционные (*OPIs*) и ключевые (*KPIs*) показатели исполнения процессов.

Для ключевых показателей результата *KRIs* и операционных показателей процессов *OPIs* должны быть определены нормативные (целевые) значения, которые необходимо достичь, чтобы считать, что, соответственно, главная цель деятельности предприятия и основные цели процессов достигнуты.

Для достижения наиболее значимых основных целей необходимо определить критерии резкой интенсификации их исполнения и, соответственно, ключевые показатели исполнения процессов *KPIs*, а также нормативные значения этих показателей.

Итак, состояния предприятия как сложной системы могут быть описаны матрицей данных $Y = \left\| y_i^{(j)} \right\|_m^n$. Многомерный показатель $y = (y^{(1)}, ..., y^{(n)})^T$ в совокупности характеризует многокритериальное качество деятельности предприятия. Показатели качества деятельности определены в различных функциональных пространствах и разноразмерные; они могут отражать как результативность, так и эффективность предприятия. В исследовании оценивание результативности (*Effectiveness*) и эффективности (*Efficiency*) объединено в общую процедуру, которая может быть описана и решена как задача распознавания образов [6].

Рассматривают два класса состояния: C_g, $g = 1, 2$; C_1 — *E&E*-деятельность (результативная и эффективная — с предписанными показателями качества), C_2 — не *E&E*-деятельность (нерезультативная, неэффективная — с показателями качества, не достигающими предписанных нормативных значений). Эффективные и результативные предприятия удовлетворяют соответствующим ограничениям, а результаты их деятельности достигают множественных целей или превышают эти цели.

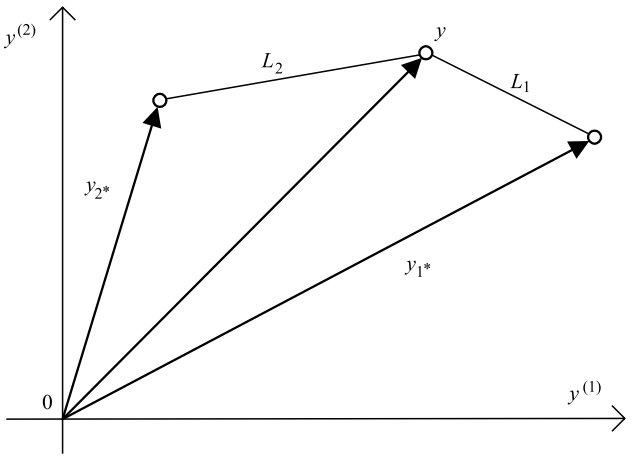
Ограничения — это условия или требования, которые следует выполнить — ресурсы, политика и процедуры, установленные заранее. Они направляют решения и поведение руководителей и персонала. Цели формулируются в виде желаемого конечного состояния. Ограничения должны выполняться, если предприятие хочет быть эффективным. Но соблюдение ограничений не означает результативности. Результативностью является достижение цели на вершине ограничений — это и есть *E&E*-деятельность.

Задача оценки многомерного качества деятельности предприятия заключается в достоверном распознавании исследуемого качества и определении степени *E&E* с учётом идентифицированных аспектов деятельности. Классификационная мера расстояния может быть принята в виде

$$L_g\left(y, y_{g*}\right) = \sum_{s=1}^{N} \sum_{j=1}^{n_s} w_s^2 \left(y^{(j)} - y_{g*}^{(j)}\right)^2; \quad g = 1, 2, \qquad (1)$$

где N — число идентифицированных аспектов деятельности; n_s — количество идентифицированных показателей по s-му аспекту; w_s — весовые коэффициенты частных показателей s-го аспекта; y_{g*} — эталонные векторы в пространстве показателей.

Использование квадратичной меры более резко подчёркивает класс с наименьшим расстоянием. Для вектора $y_{1*} = \left(y_{1*}^{(1)}, \ldots, y_{1*}^{(n)}\right)^T$ устанавливаем заданные (нормативные) значения показателей с точки зрения краткосрочных задач предприятия (годовых плановых заданий). Для вектора $y_{2*} = \left(y_{2*}^{(1)}, \ldots, y_{2*}^{(n)}\right)^T$ устанавливаем значения, уже достигнутые в



Классификация по расстоянию до эталона

прошлом году. Для отнесения классифицируемого вектора y к одному из двух классов определяются расстояния L_g до эталонных векторов y_{1*}, y_{2*} (см. рисунок). Образ y относят к классу C_g при условии $L_g < L_k$ ($k = 1, 2$; $k \neq g$). Классификационная ценность показателей (1) одинакова для различных классов, но в то же время зависит от расстояния точки $y^{(j)}$ до точки $y_{g*}^{(j)}$, принадлежащей классу C_g.

В этом случае пространство показателей называется изотропным (единицы измерения в разных направлениях одинаковы) и неоднородным (показатели имеют различную физическую природу). Изотропным пространством является, в частности, система безмерного (нормированного) относительного исчисления. Решающее правило $y \in C_g \Leftrightarrow L_g = \min L_k$, $k = 1, 2$ является только необходимым условием. Дополнительным условием для изотропного неоднородного пространства показателей принимается следующее: $y \in C_g$, если $\delta_{g1}^{(j)} < y^{(j)} - y_{g*}^{(j)} < \delta_{g2}^{(j)}$, где $\delta_{g1}^{(j)}$, $\delta_{g2}^{(j)}$ — границы области принятия решения для класса C_g и показателя $y^{(j)}$. Это условие определяет n-мерный параллелепипед, внутри которого должна находиться точка y для принятия решения $y \in C_g$. Такие области для различных классов могут перекрываться. Однако в нашей задаче исключены случаи, когда расстояние L_g минимально, но точка y настолько удалена от области C_g, что решение $y \in C_g$ неправдоподобно. Это объясняется тем, что невозможны существенные отличия состояний предприятия от эталонных — базового y_{2*} (уже достигнутого) и перспективного y_{1*} (которое предстоит достигнуть) в связи с эволюционным характером функционирования/роста и в большинстве случаев также и развития предприятия.

Другой путь оценки качества деятельности предприятия — это расчёт *глобальной оценки* (количественной, в терминах квалиметрии — сводного комплексного показателя). Она состоит в построении в пространстве показателей скалярной функции, сопоставляющей каждому объекту i оценку его обобщённого "качества":

$$y_i^o = L(y_i, y_{\max}) = \sum_{s=1}^{N} \sum_{j=1}^{n_s} w_s^2 \left(y_i^{(j)} - y_{\max}^{(j)} \right)^2; \quad (2)$$

$$i \in (1, \ldots, m),$$

где $y_{\max}$ — вектор, характеризующий гранично допустимые максимальные значения *E&E*.

Для удобства сравнения различных вариантов объектов предлагаем устанавливать в качестве граничных значений показателей $y_{\max}^{(j)}$ заданные (нормативные) значения с точки зрения основных аспектных целей предприятия или значения показателей предприятия, выбранного для бенчмаркинга (эталонного тестирования, основанного на лучшем опыте партнёров и конкурентов). При сравнении исходим из допущения о равноважности всех объектов наблюдения. Поэтому, если в число исследуемых предприятий включены объекты заведомо разного значения, т.е. резко различных по численности, необходимо провести их взвешивание, учитывающее отношение численности населения области (региона) и численности работников предприятия. Это позволяет уменьшить дисперсию показателей (связанную с численностью работников) и сосредоточить внимание на других влияниях.

Рассмотрим эмпирическое обоснование предложенного подхода, ограничив ключевые показатели исполнения (*KPIs*), набор которых для различных аспектов, характеризующих в совокупности *E&E*-деятельность исследуемого *электроснабжающего* предприятия, является общим, ситуативным и в оцениваемом периоде он был установлен таким:

$x^{(1)}$ — относительная величина материальных затрат в себестоимости полезно отпущенной потребителям электроэнергии, определённая к общей себестоимости (издержкам) производства (%); $x^{(2)}$ — дополнительный доход от выполнения нетарифных видов услуг/работ (за период, тыс. руб.); $x^{(3)}$ — средняя продолжительность перерывов в электроснабжении в системе (за период, мин); $x^{(4)}$ — общий коэффициент удовлетворённости потребителей качеством обслуживания — на основе анкетирования (отн. ед.); $x^{(5)}$ — суммарный доход за отчётный период (тыс. руб.); $x^{(6)}$ — рентабельность собственного (акционерного) капитала (%); $x^{(7)}$ — снижение потерь электроэнергии благодаря замене перегруженных, а также установке и вводу в эксплуатацию дополнительных силовых трансформаторов на действующих подстанциях (за период, кВт·ч).

Чтобы накопить исходные данные использовали индивидуальные оценки пяти привлечённых экспертов. В табл. 1 представлены целевые ($x_+^{(j)}$) и неприемлемые ($x_-^{(j)}$) экспертные оценки показателей (размах), а также средние значения.

Эксперты оценивали $x^{(4)}$ по порядковой шкале с установленным размахом [−1, +1], разделённой на пять уровней (табл. 2).

В табл. 1 указаны медианы $\tilde{x}_+^{(4)}=0,5$; $\tilde{x}_-^{(4)}=0,0$ для установленных значений $x_+^{(4)}$: 0,35; 0,40; 0,50; 0,60; 0,70 и $x_-^{(4)}$: −0,2; −0,15; 0,0; 0,1; 0,2 (приведены в порядке возрастания). Если допустить, что распределение экспертных оценок показателей описывается бета-распределением, можно рассчитать по формулам (3) их ожидаемые значения $x_{\text{ож}}^{(j)}$ на основании усреднённых данных табл. 1 (табл. 3):

$$x_{\text{ож}}^{(j)} = \frac{3\bar{x}_+^{(j)} + 2\bar{x}_-^{(j)}}{5}; \sigma_j^2 = \frac{\left(\bar{x}_-^{(j)} - \bar{x}_+^{(j)}\right)^2}{25}, \quad (3)$$

где $\bar{x}_+^{(j)}$, $\bar{x}_-^{(j)}$ — средние значения, рассчитанные по экспертным оценкам.

Таблица 1

Исходные экспертные данные для анализа ключевых показателей исполнения

Показатель	Целевое значение		Неприемлемое значение	
	$x_+^{(j)}$	$\bar{x}_+^{(j)}$	$x_-^{(j)}$	$\bar{x}_-^{(j)}$
$x^{(1)}$, %	57	65	82	75
$x^{(2)}$, тыс. руб.	23	20	13,5	15
$x^{(3)}$, мин	650	750	1050	950
$x^{(4)}$, отн. ед.	0,7	0,5	−0,2	0,0
$x^{(5)}$, тыс. руб.	1000	800	480	600
$x^{(6)}$, %	8,5	7,5	2,0	3,5
$x^{(7)}$, тыс. кВт·ч	50	40	18	25

Таблица 2

Уровни удовлетворённости потребителей

Удовлетворённость потребителей	Диапазон значений $x^{(4)}$	Центр диапазона	Нормированные величины $y^{(4)}$
Очень низкая	−1,0...−0,6	−0,8	0,00
Низкая	−0,6...−0,2	−0,4	0,25
Средняя	−0,2...0,2	0,0	0,50
Высокая	0,2...0,6	0,4	0,75
Очень высокая	0,6...1,0	0,8	1,00

Таблица 3

Рассчитанные ожидаемые значения показателей

Ожидаемые значения	Номер показателя (j)						
	1	2	3	4	5	6	7
$x_{\text{ож}}^{(j)}$	69	18	830	0,30	720	5,9	34
$y_{\text{ож}}^{(j)}$	0,52	0,47	0,55	0,65	0,46	0,60	0,50

При этом осуществляем квантификацию — приведение к одному порядку величин в интервале [0,1] количественных показателей посредством нормирующих функций $y^{(j)} = \phi^{(j)}(x^{(j)})$; $j=\overline{1,7}$; $y^{(j)} \in [0,1]$.

Решение о степени *E&E* принимается на основе вычисления некоторой функции расстояния многомерного показателя $y = (y^{(1)}, y^{(2)}, ..., y^{(7)})^T$, характеризующего качество деятельности предприятия за период, до эталонных классов в пространстве измеряемых показателей. Классификационная мера расстояния:

$$L_{\text{g}} = w_1^2 \sum_{j=1}^{n_1} \left(y^{(j)} - y_{\text{g}*}^{(j)}\right)^2 + \\ + w_2^2 \sum_{j=n_1+1}^{n_2} \left(y^{(j)} - y_{\text{g}*}^{(j)}\right)^2 + \ldots \\ \ldots + w_5^2 \sum_{j=n_4+1}^{n_5} \left(y^{(j)} - y_{\text{g}*}^{(j)}\right)^2,$$

где n_1, n_2, ..., n_5 — количество идентифицированных показателей по каждому из пяти аспектов деятельности (см. формулу 1).

Результаты расчётов приведены в табл. 4, 5. Весовые коэффициенты аспектов определяли на основе оценок менеджеров предприятия.

Здесь $y_{1*}^{(j)} = \bar{y}_+^{(j)}$, $y_{2*}^{(j)} = \bar{y}_-^{(j)}$, в частности $y_{2*}^{(1)} = \bar{y}_+^{(1)} = \dfrac{x_-^{(1)} - \bar{x}_+^{(1)}}{x_-^{(1)} - x_+^{(1)}} = \dfrac{82-65}{82-57} = 0,68$. Если относительная величина материальных затрат в себестоимости полезно отпущенной потребителям электроэнергии, определённая к общей себестоимости производства $x^{(1)} = 68,62$ % в год, то её соответствующая оценка равна $y^{(1)} = 0,54$, что означает степень достижения целевого значения.

Также:

$$y_{1*}^{(2)} = \bar{y}_-^{(2)} = \frac{\bar{x}_-^{(2)} - x_-^{(2)}}{x_+^{(2)} - x_-^{(2)}} = \frac{15-13,5}{23-13,5} = 0,16;$$

$$y_{2*}^{(2)} = \bar{y}_+^{(2)} = \frac{\bar{x}_+^{(2)} - x_-^{(2)}}{x_+^{(2)} - x_-^{(2)}} = \frac{20-13,5}{23-13,5} = 0,68.$$

Таблица 4

Исходные данные для анализа

S	Аспект деятельности	Весовой коэффициент w_s	j	Значения показателей			
				нормативные $y_{g*}^{(j)}$		нового объекта	
				g		$x^{(j)}$	$y^{(j)}$
				1	2		
1	Ресурсный	0,10	1	0,68	0,28	68,62	0,54
			2	0,68	0,16	17,399	0,41
2	Операционный	0,34	3	0,75	0,25	793,40	0,64
3	Потребительский	0,21	4	0,91	0,54	−0,06	0,50
4	Финансовый	0,23	5	0,62	0,23	792,276	0,60
			6	0,85	0,23	7,23	0,80
5	Инновационный	0,12	7	0,69	0,22	34,6	0,52

Таблица 5

Классификация качества деятельности предприятия

g	$w_s^2\left(y^{(j)} - y_{g*}^{(j)}\right)^2$							L_g
	s							
	1		2	3	4		5	
	j							
	1	2	3	4	5	6	7	
1	0,0002	0,0007	0,0014	0,0074	0,0000	0,0001	0,0004	0,010
2	0,0007	0,0006	0,0176	0,0000	0,0072	0,0172	0,0013	0,045

Аналогично рассчитываем нормативные значения остальных показателей. Исключение — коэффициент удовлетворённости потребителей: $y_{+}^{(4)} = 0{,}75;\ 0{,}75;\ 0{,}75;\ 0{,}75;\ 1{,}00$ и $y_{-}^{(4)} = 0{,}25;\ 0{,}25;\ 0{,}5;\ 0{,}5;\ 0{,}5$. Для него определены медианы:

$$\tilde{y}^{(4)} = v + \frac{K}{f}\left(\frac{n}{2} - \Sigma\right),$$

где $n = 5$ — общее число данных.

В каждой последовательности два класса данных с одинаковым классовым промежутком $K = 0{,}25$; $v = 0{,}75$ (0,5) — начало класса, в котором находится медиана; $\Sigma = 0$ (2) — сумма частот оценок, предшествующих медианному классу; $f = 4$ (3) — частота медианного класса. В табл. 4 указаны медианы $y_{1*}^{(4)} = \tilde{y}_{+}^{(4)} = 0{,}91$; $y_{2*}^{(4)} = \tilde{y}_{-}^{(4)} = 0{,}54$.

На основании приведённых расчётов, в связи с тем, что $L_1 < L_2$, делаем вывод о том, что предприятие достигло заданных годовых значений показателей (состояние относится к классу C_1). Приведённая оценка *E&E* непосредственного результата получена распознаванием принадлежности многомерного векторного показателя к одному из классов.

Для количественной оценки *конечного результата* рассчитываем в соответствии с формулой (2) классификационную меру расстояния, аналогично приведённому выше. Отличие в расчёте по сравнению с формулой (1) состоит в значениях вектора $y_{\max}$, которые устанавливаются в соответствии с основными стратегическими целями предприятия.

Выводы. Оценивание качества деятельности предприятия — это измерение упорядоченной совокупности показателей, определяющих ход процессов на предприятии. Такое оценивание предполагает разработку интел-

лектуальной методологии сбора, обработки и использования технико-экономических показателей качества деятельности предприятия, так как просто хорошей работы на оперативном уровне недостаточно. Операционные системы и данные должны быть, но они не сообщают, что следует делать в стратегической перспективе. Работники и управленцы должны иметь инструменты, при помощи которых они смогут выполнять наблюдение внутри предприятия и осуществлять поведение — исполнять свою работу в соответствии со стратегией. Эти инструменты — правильно выбранные системы показателей результативности, эффективности, устойчивого успеха — позволяют превратить стратегию в дело каждого сотрудника.

Без релевантного набора инструментов оценивания трудно понять, что происходит, интерпретировать значение происходящего и составить план дальнейших действий. Требуется совершенствовать систему оценок предприятия. Векторный показатель можно использовать как ориентационный для решения оперативных задач, например, для динамической оценки качества деятельности предприятия. На основании скалярного показателя целесообразно вырабатывать требования. Сведение многомерного описания задачи к одномерному всегда имеет место в любых схемах принятии решения, поскольку количественная шкала обладает естественным и однозначным отношением порядка.

Эти выводы следует иметь в виду при исследовании эргатических интеллектуальных систем — промышленных предприятий, неотъемлемым элементом которых является человек. Никакое сколь угодно глубокое детальное и научно обоснованное планирование и управление не в состоянии изменить вероятностную сущность взаимодействия процессов предприятия между собой и со средой.

Практическая реализация результатов настоящей работы выполнена в виде нормативно-методического документа — положения об области деятельности "Оценивание деятельности предприятия" — интегрированной системы управления ПАО "Хмельницкоблэнерго". Цель документа — обеспечение результативности и эффективности управления на основе системного подхода с оценкой всех идентифицированных аспектов деятельности предприятия с помощью сбалансированных наборов показателей. Область применения: совершенствование системы управления предприятием, поддержка принятия управленческих решений руководителями различных уровней.

Проведённое исследование позволяет поставить новые задачи по оцениванию качества деятельности, в том числе формализовать связь понятия релевантности с выбором множества показателей, разработать теоретические и математические основы количественного формализма релевантности. При этом релевантность должна трактоваться как переменная величина. Можно сформулировать аксиоматические требования необходимости и достаточности множества показателей для оценивания качества деятельности. Решение этих задач позволило бы оказать существенную методическую помощь руководителям предприятий и другим заинтересованным сторонам в оценивании деятельности и интеллектуализации управления.

Библиографические ссылки

1. **Шемакин Ю.И.** Семантика самоорганизующих систем. М.: Академический проект, 2003. 176 с.

2. **Рюэгг-Штюрм Й.** Новая системная теория и внутрифирменные изменения // Проблемы теории и практики управления. 1998. № 5. С. 72—79.

3. **Бондаревский А.С.** Аксиоматика точности информационных операций // Фундаментальные исследования. 2008. № 6. С. 11—25.

4. **Цибульский В.Р., Заруба О.В.** Модели экономического пространства: основные понятия и определения // Вестник кибернетики. 2008. № 7. С. 96—101.

5. **Parmenter D.** Key Performance Indicators (KPI): Developing, Implementing, and Using Winning KPIs. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons (US), 2010. 320 p.

6. **Kovalev A.I.** Information Support of the Performance Quality of an Enterprise // Scientific and Technical Information Processing. 2013. Vol. 40, No 2. P. 109—118.

УДК 331.875.4

Г.О. Тащиян, канд. техн. наук, доц.
(Юргинский технологический институт Томского политехнического университета)
gtashiyan@mail.ru

СУБЪЕКТЫ ДИАЛОГА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОНИТОРИНГА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ НАУКОЁМКОЙ ПРОДУКЦИИ

При создании автоматизированного мониторинга конкурентоспособности наукоёмкой продукции на машиностроительном производстве в качестве субъектов диалога предложено привлекать прогрессивного предпринимателя, профессионального менеджера, независимого эксперта и потенциального потребителя.

Ключевые слова: субъекты диалога; мониторинг; конкурентоспособность; наукоёмкая продукция.

When automated monitoring creating of competitive high-tech products in the machine-building industry as dialogue subjects is proposed to involve progressive entrepreneur, professional manager, independent expert and potential consumer.

Key words: dialogue subjects; monitoring; competitiveness; high-tech products.

Одним из условий нормального функционирования современной российской экономики является выпуск конкурентоспособной наукоёмкой продукции (НП). Эффективное экономическое развитие предполагает производство и реализацию продукции на рынке, по цене и качеству удовлетворяющим как производителя, так и потребителя.

Вопросам конкурентоспособности мировое сообщество уделяет серьёзное внимание, поскольку без конкурентоспособной НП предприятиям долго не продержаться "на плаву". В некоторых работах предлагались пути решения вопросов конкурентоспособности НП и предприятия в целом.

В результате разработана система автоматизированного мониторинга конкурентоспособности наукоёмкой продукции (АМК НП) [1].

Данная система была апробирована в ООО "ПО "Юрмаш", этапы внедрения которой представлены в работе [2].

При создании АМК НП и последующей оценке продукции по показателям конкурентоспособности в качестве субъектов диалога привлекались специалисты, обладающие теоретическими знаниями и практическими навыками решения проблем в рассматриваемой предметной области. Условно субъектов диалога можно разделить на четыре основные группы: прогрессивный предприниматель, профессиональный менеджер, независимый эксперт и потенциальный потребитель.

Прогрессивный предприниматель наиболее активно участвует на начальных и заключительных этапах исследования. В процессе диалога он выделяет основные направления разработки и оценки нововведения. После получения результатов либо соглашается с ними, либо предлагает доработать используемые критерии оценки и продолжить диалог.

Профессиональный менеджер участвует на всех этапах и во всех процедурах создания АМК НП и её оценки. В его обязанности входит управление процессами сбора и обработки информации, принятия решения о целесообразности продолжения исследований, нахождение компромисса между субъектами диалога, формирование отчёта о результатах оценки конкурентоспособности.

При организации диалога АМК НП комплектуют группы *независимых экспертов* [3]. Независимый эксперт предлагает к рассмотрению, на основе анализа мнения прогрессивного предпринимателя, наиболее важные критерии оценки конкурентоспособности и во взаимодействии с профессиональным менеджером формирует справочные таблицы по результатам маркетинговых исследований. К экспертизе привлекаются преимущественно руководители и ведущие специалисты производственных, планово-экономических и маркетинговых подразделений предприятия в зависимости от показателей оценки. К экспертным процедурам также можно привлекать и потенциальных потребителей, имеющих соответствующий уровень компетенции в рассматриваемой области. Доля их участия в маркетинговых мероприятиях может со-

ставить 20...30 %. Для крупных предприятий, выпускающих стандартную продукцию, характерно увеличение количества экспертов, поскольку это повышает репрезентативность экспертной группы генеральной совокупности потребителей.

Потенциальный потребитель акцентирует внимание на наиболее значимых параметрах показателей конкурентоспособности определенной НП, осуществляет ранжирование параметров и присваивает им рейтинги. Полученную информацию систематизируют, обрабатывают и направляют независимому эксперту. В ходе независимой экспертизы устанавливают экспертные оценки конкурентоспособности НП по показателям "значимость технического решения" $З_{т.р}$, "значимость экономического события" $З_{э.с}$, "значимость экологического решения" $З_{э.р}$ и "значимость социального эффекта" $З_{с.э}$ [4]. Полученную экспертную информацию направляют в систему АМК НП.

Наиболее высокие требования из всех субъектов диалога предъявляют к *профессиональному менеджеру.* Он должен продуктивно использовать свой личный опыт, знания и интуицию, которую невозможно получить из каких-либо источников, а также предоставлять информацию в соответствии с языком и регламентом диалога в организованном виде.

При разработке и оценке критериев процесс извлечения знаний у субъектов диалога отличается высокой трудоёмкостью и значительной интеллектуальной нагрузкой. Это связано с генерацией большого объёма справочной информации для поддержки принимаемых решений, что и определяет необходимость применения компьютерных средств.

У субъектов диалога при разработке показателей АМК НП выделяют различные этапы извлечения знаний. К ним относятся: идентификация, концептуализация, формализация, реализация, тестирование.

Этап *идентификации* выявляет и формулирует проблему, а также основные входящие задачи по оценке конкурентоспособности конкретного вида продукции; определяет потенциал и полезность разработки конкретного критерия конкурентоспособности; выявляет кандидатов на роль прогрессивного предпринимателя, независимого эксперта, профессионального менеджера; определяет возможных пользователей результатов исследований, критерии эффективности и достоверность результатов.

На этапе *концептуализации* осуществляют наиболее трудоёмкие и сложные виды деятельности по извлечению основного объёма знаний, используемых специалистом при решении исследуемой проблемы. Именно на этом этапе разрабатывают критерии (коэффициенты) для каждого показателя, детализируют критерии на уровни, присваивают исходные баллы каждому уровню. При этом субъектами диалога используются структурные, стратегические и дополнительные типы знаний. К структурным знаниям относятся объекты и понятия различного уровня абстракции, а также отношения между ними. Стратегические знания включают в себя процедуры, эвристики, решающие правила и стратегии, "применяемые" субъектом к структурным знаниям для решения проблемы. К дополнительным типам знаний относятся различного рода объяснения и обоснования связей и условий [5].

На этапе концептуализации извлечение знаний не является однородным процессом. Если объём привлечённой информации очень мал, то вначале преобладает аналитическая компонента, которая связана с сопоставлением основных требований внешней среды и тенденций НТП. По мере того, как будет поступать информация, большая роль отводится синтетической компоненте, которая связана с формированием критериев оценки конкурентоспособности НП, существенно влияющая на последующее извлечение знаний. При этом процесс извлечения знаний и присвоения исходных баллов в оценочных таблицах приобретает разъясняющий характер, поскольку содержание критериев становится более чётким.

На этапе *формализации* главные функции субъектов диалога сводятся к выбору конкретного метода оценки альтернатив и способа свёртывания критериев, созданию по установленной форме алгоритма оценки, а также к разработке предложений для программиста системы.

На этапе *реализации* используются несущественные знания, которые сводятся к конкретизации и изменению алгоритма в диалоговом процессе между профессиональным менеджером и программистом. Знания, полученные на предыдущих этапах, превращаются в элементы подсистем управления моделями и данными АМК НП.

На этапе *тестирования* частота получения информации от субъектов диалога существенно увеличивается. Основная цель извлечения знаний — контроль соответствия выбранных методов и показателей оценки конкурентоспособности НП, а также устранение неполадок в процессе работы компьютерной программы.

Характерной особенностью процесса разработки АМК НП является полнота и непротиворечивость представления знаний субъектов диалога в системе. Однако на различных уровнях извлечения знаний (когнитивный, лингвистический и операциональный) могут возникать проблемы.

На когнитивном уровне знания субъектов отражают их квалификацию в проблемной области. Они могут оказаться неполными и иметь ошибочные представления о реальности. На лингвистическом уровне возможны ошибки неточности и неоднозначности естественного профессионального языка субъектов, а также вербализации его неверных представлений. Кроме того, проецирование знаний когнитивного уровня на лингвистический уровень может оказаться невозможным вследствие принципиального несоответствия вербализации. На операциональном уровне могут также возникать проблемы уменьшения точности и полноты описания реальности в связи с объективной неадекватностью программных средств языку диалога.

Субъекты диалога обмениваются информацией, качество которой зависит от формы её получения. Если субъект использует при оценке альтернатив привычные для него единицы измерения по определённому критерию, то серьёзных проблем не возникает. Например, эксперты на основе своего опыта в технических задачах с высокой точностью могут оценивать физические характеристики объектов. Однако эксперты в АМК НП проставляют оценку в баллах по критериям показателей $З_{т.р}$, $З_{э.с}$, $З_{э.р}$ и $З_{с.э}$. Это приводит к затруднениям, потому что для них такая форма информации немного непривычна, и новая шкала оценок может снизить точность принимаемой информации и согласованность оценок.

Обработка информации субъектами диалога зависит не только от их индивидуальных особенностей, но и от структуры организации человеческой памяти, характерной для всех людей. Ошибочно предполагать, что "человеку всё по силам", "эксперт способен дать любую информацию", "экспертная информация высоконадёжна в любой форме и при любых обстоятельствах". При использовании АМК НП не менее важными вопросами являются ранжирование весомости и балльных оценок критериев конкурентоспособности.

Ранжирование *критериев* является достаточно сложной задачей, поскольку при определении весов эксперт должен принять во внимание среднестатистические балльные оценки критериев, диапазон шкалы критерия и т.д. Исследования показали значительные различия между весами критериев, которые, с одной стороны, назначает сам человек, а с другой — выявляемые его действиями. Нередко наблюдается занижение весомости значимых критериев и завышение несущественных. Причём отклонения могут не зависеть от квалификации субъекта. Они характерны и для предпринимателей, и для экспертов, и для менеджеров.

Проанализировав *результаты* балльной оценки критериев показателей в АМК НП, было выявлено, что субъекты диалога часто бывают нелогичны в своих оценках. Проявлялось это при соизмерении результатов прямой балльной оценки и попарных сравнений альтернатив.

Это вовсе не означает, что поставленные задачи перед субъектами диалога не могут быть решены. Основным принципом является изменение и облегчение сложной ситуации с помощью разных эвристик. И всё же одной из значимых проблем остаётся диагностирование допускаемой нагрузки на человека. Она может быть определена количеством точных критериев *конкурентоспособности* НП. Эксперты надёжны и непротиворечивы, когда число объектов анализа не более 10. Превышая этот предел, эксперты резко меняют своё поведение, вследствие чего увеличивается количество ошибок и противоречий. Это связано с тем, что увеличивающийся объём перерабатываемой информации заставляет людей отсеивать её до управляемого количества с существенным искажением. Таким образом, были выявлены ограничения возможностей человека в рассматриваемых операциях получения информации, которые учтены при разработке АМК НП. В частности, в многочисленных процедурах число критериев и их уровней установлено от 5 до 9.

Важным условием разработки алгоритма принятия решения о конкурентоспособности НП является соответствие способов поступления информации фактическому шансу получения от экспертов точной информации. Этому требованию удовлетворяют методы, используемые в АМК НП. Обусловлено это стандартными процедурами АМК НП и простотой обучения экспертов технологиям работы с критериями оценки конкурентоспособности. Помимо этого, в разработанной системе учитывается тип субъекта диалога, пользующегося рекомендациями системы (предприниматель, эксперт, менеджер, потребитель).

Библиографические ссылки

1. **Тащиян Г.О.** Автоматизированный мониторинг конкурентоспособности наукоёмкой машиностроительной продукции // Автоматизация и современные технологии. 2004. № 8. С. 38—40.

2. **Тащиян Г.О.** Мониторинг конкурентоспособности наукоёмкой машиностроительной продукции как основа оценки конкурентоспособности предприятия (на примере ООО "ПО "Юрмаш") // Автореферат дис. ... канд. техн. наук. Томск: 2004, 20 с.

3. **Tashchiyan G.O.** Organizing automated Ted dialogue on the competitiveness of science-intensive products // Applied Mechanics and Materials. 2013. Vol. 379. P. 240—243.

4. **Григорьева А.А, Тащиян Г.О., Григорьева А.А.** Автоматизированный мониторинг конкурентоспособности инновационной машиностроительной продукции: монография. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. 231 с.

5. **Быков С.Н., Нестерук Д.Н.** Принцип диалогичности извлечения экспертных знаний при оценке инноваций // Известия Томского политехнического университета. 2003. Т. 306. № 3. С. 140—143.

УДК 621.744.37

О.Е. Железникова, канд. техн. наук, доц., **Л.В. Синицына,** канд. техн. наук доц.,
С.А. Амелькина, канд. техн. наук, доц.
(Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва)
С.А. Микаева, д-р техн. наук, проф.
(Московский государственный университет приборостроения и информатики)
mikaeva@npo.lit.ru

ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ СИСТЕМ ОСВЕЩЕНИЯ СО СВЕТОДИОДНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ СВЕТА

Представлены практические результаты экспериментальных исследований гигиенической эффективности светодиодного освещения. В экспериментах использована комплексная методика психофизиологической и гигиенической оценки эффективности осветительных установок со светодиодами, разработанная авторами. Показана практическая значимость полученного экспериментального материала при реализации освещения со светодиодными источниками света.

Ключевые слова: светодиоды; освещение; комплексная методика; экспериментальные исследования; зрительные функции; утомление; эффективность; психофизиологический портрет; области применения; рекомендации.

The experimental studies practical results of the light-emitting diodes (LED) lighting hygienic efficiency are represented. The complex methodology of psycho-physiological and hygienic valuation of lighting systems with LEDs efficiency developed by the authors is used in the experiments. The practical importance of the obtained experimental results at the implementation of lighting with LED light sources is shown.

Keywords: light-emitting diodes (LED); lighting; complex methodology; experimental studies; visual function; fatigue; efficiency; psychophysiological portrait; application areas of use; recommendations.

Важной задачей освещения является создание благоприятной светоцветовой среды, предполагающей использование света для удовлетворения комплекса потребностей человека — эргономических, психофизиологических, психологических, экологических. В то же время актуальными являются вопросы экономии расходуемой на освещение электроэнергии. Решение этих задач возможно при использовании светодиодов (СД), которые на сегодняшний день являются, несомненно, самыми эффективными и перспективными источниками света (ИС).

Однако если экономия электроэнергии в осветительных установках (ОУ) при эксплуатации СД с учётом их высокой световой отдачи очевидна [1, 2], то возможность использования их для создания благоприятных условий освещения требует серьёзного подтверждения [3—5], что может быть получено всесторонним изучением воздействия излучения СД на функциональные показатели работоспособности организма человека.

На основе анализа теоретического и экспериментального материала по воздействию на зрительную работоспособность и утомление

Рекомендуемые области применения СД для общественных, административных, жилых и производственных помещений

Помещения	Рабочая поверхность, плоскость нормирования освещённости (Г — горизонтальная, В — вертикальная) и высота плоскости над полом, м	Освещённость рабочих поверхностей при общем освещении, лк
Административные здания (министерства, ведомства, комитеты, научно-исследовательские учреждения и т.п.)		
Проектные залы и комнаты, конструкторские и чертёжные бюро	Г-0,8	500
Машинописные бюро, читальные залы	Г-0,8	400
Помещения для посетителей, записи и регистрации читателей, тематических выставок, экспедиции	Г-0,8	300
Читательские каталоги	В-1,0	200
Переплётно-брошюровочные помещения; ремонтные мастерские	Г-0,8	300
Помещения для работы с дисплеями и видеотерминалами, залы ЭВМ	Г-0,8 Экран монитора: В-1,2	400 200
Лаборатории научно-технические (кроме медицинских учреждений)	Г-0,8	400
Банковские и страховые учреждения		
Операционный и кассовый залы, кредитная группа, помещения пересчёта денег; серверная, помещения аппаратуры криптозащиты	Г-0,8	400
Помещения отдела инкассации и обслуживания физических лиц	Г-0,8	300
Учреждения высшего профессионального образования		
Аудитории, учебные кабинеты, лаборатории	Г-0,8	400
Кабинеты информатики и вычислительной техники	Г-0, Экран дисплея: В-1	400 200
Кабинеты и комнаты преподавателей	Г-0,8	300
Гостиницы		
Бюро обслуживания, гостиные; помещения дежурного обслуживающего персонала	Г-0,8	200
Номера	Г-0,0	150
Вокзалы		
Операционные, кассовые залы, билетные и багажные кассы, отделение связи, операторская, диспетчерская	Г-0,8	300
Вычислительный центр	Г-0,8	400
Жилые здания		
Жилые комнаты, гостиные	Г-0,0	150[1)]
Жилые комнаты общежитий	Г-0,0	150
Кабинеты, рабочие комнаты, офисы, представительства	Г-0,8	300

[1)] в жилых домах и квартирах приведённые значения освещённости являются рекомендуемыми

факторов, связанных с условиями освещения, разработана комплексная методика психофизиологической и гигиенической оценки эффективности осветительных установок со СД [6].

В экспериментах участвовала группа студентов-добровольцев в возрасте 20—25 лет, которые прошли предварительное клиническое обследование.

Для исследований была разработана и смонтирована экспериментальная исследовательская установка общего освещения, реализующая варианты освещения СД и люминесцентными лампами (ЛЛ) [7]. Варианты с ЛЛ при сравнении приняты базовыми. Исследования проводили при уровнях освещённости 200, 400 и 1000 лк и значениях коррелированной цветовой температуры (Тц) ИС 3000, 4000 и 5000 К.

В ходе экспериментальных исследований установлено, что освещение СД не вызывает вредного действия на орган зрения и организм человека в целом. Имеющие место в ходе эксперимента изменения функциональных показателей органа зрения и состояния организма входят в соответствующие границы физиологических колебаний и имеют обратимый характер.

На основании полученного экспериментального материала разработан перечень областей применения СД для помещений различного функционального назначения — общественных, административных, образовательных, жилых и производственных (см. таблицу). Разработанные предложения относятся к тем видам работ, которые выполнялись в лабораторном эксперименте или близким к ним по зрительным задачам − работа умственного и корректорского типа разряда А-2 [8].

Выбор уровня освещённости при выполнении зрительных задач, указанных в таблице, осуществлялся в соответствии с требованиями [8]. Говорить о снижении уровня нормируемой освещённо-

сти в ОУ со СД преждевременно, поскольку при исследовании зрительной работоспособности в ряде вариантов люминесцентного и светодиодного освещения получены недостоверные изменения этого показателя. Кроме того, различия в качестве работы (коэффициент точности по методу корректурных проб) при различном спектральном составе излучения во всех исследованных вариантах освещения также оказались незначительными.

Необходимость применения светодиодного освещения оправдана при выполнении зрительных работ, требующих ограничения коэффициента пульсации светового потока (освещённости), при работах, связанных с цветоразличением при невысоких требованиях.

Применение в ОУ светодиодных светильников может быть рекомендовано при необходимости создания достаточно высокого уровня освещённости на рабочих поверхностях (работы разряда А-2, III глава).

Нижнюю границу диапазона яркости рабочей поверхности следует принимать 100... 150 кд/м^2. При таких уровнях яркости поверхности для предотвращения возникновения иррадиации необходимо использовать отрицательный контраст объекта с фоном при соотношении яркостей примерно 1:3 (тёмный объект на светлом фоне).

Для обеспечения концентрации внимания на объектах яркость окружающего пространства должна быть ниже яркости рабочей поверхности, а перепад яркостей между ними, обеспечивающий благоприятное распределение в поле зрения, должен быть меньше, чем максимальный перепад (т. е. $L_ф/L_o = 3$ — соотношение яркости фона и объекта). Следует оптимизировать распределение яркости на рабочей поверхности, так как большая неравномерность яркости (свыше 3...5) вызывает необходимость постоянной переадаптации глаза при работе.

Неравномерность яркости (освещённости) на рабочей поверхности при светодиодном освещении рекомендуется на уровне 1 : 3.

Для исключения прямой и отражённой блёскости необходимо, чтобы объединённый показатель дискомфорта UGR не превышал 21, а максимальная яркость рабочей поверхности должна быть ограничена 500 кд/м^2. Для ограничения слепящего действия светодиодных светильников необходимо использовать в осветительных устройствах рассеиватели, исключающие возможность попадания прямых лучей в поле зрения работающих. Эффективно использовать для снижения отражённой блёскости матовую отделку рабочей поверхности и поверхностей активного наблюдения.

При выборе светодиодных светильников, изготовленных по технологии "удалённого люминофора", при проектировании освещения необходимо осуществлять их входной контроль на наличие ультрафиолетового излучения. Интенсивность ультрафиолетового излучения в диапазоне длин волн 320...400 нм не должна превышать 0,03 Вт/м^2 [8].

Минимально допустимые значения коэффициента мощности модулей светодиодных источников в составе светильника мощностью до 25 Вт должны быть не менее 0,7; более 25 Вт — не менее 0,85.

При проектировании систем освещения со СД, безопасных для зрительной системы человека, необходимо:

выбрать оптимальную схему размещения СД светильников, обеспечивающую регламентированную неравномерность распределения яркости (освещённости) по рабочей поверхности;

определить (рассчитать) объединённый показатель дискомфорта UGR, который не должен превышать регламентированных значений [9].

обеспечить значение коэффициента пульсации освещённости не более 5 %;

для выполнения требований стандартов, принятых Международной электротехнической комиссией CIE S009/IEC 62471, следует использовать светодиодные светильники, имеющие значения коррелированной цветовой температуры до 5000 К, что подтверждено результатами проведённых исследований;

использовать для освещения помещений, где выполняются зрительные работы А — В разрядов при достаточно высоких требованиях к цветоразличению светильники со СД с общим индексом цветопередачи R_a не менее 80.

При этом выбор светильников должен осуществляться в соответствии с требованиями [10]:

неравномерность распределения яркости по выходному отверстию СД светильников должна быть $L_{max}/L_{min} \leqslant 5{:}1$;

яркость используемых в светильниках СД не должна превышать 104 кд/м^2, что гарантирует абсолютную безопасность их применения в соответствии с IEC62471—2008;

единичная мощность отдельных СД (при CMD монтаже) в светильниках не должна превышать 1 Вт (для достижения нормируемых показателей по ограничению UGR и выполнению требований по ограничению габаритной яркости СД светильников);

единичная мощность отдельных СД в светильниках, изготовленных по технологии "удалённого люминофора", не должна превышать 2 Вт.

Так как светодиодные светильники обеспечивают пульсацию светового потока не более 2,5 %, то предлагается ужесточить в нормативных документах требования к этому качественному показателю освещения. Значения цветовой температуры предложено устанавливать в зависимости от характера зрительных задач, выполняемых в общественно-административных, жилых и производственных помещениях, и в соответствии с требованиями стандартов CIE S009/IEC 62471.

В ходе экспериментальных исследований установлено, что освещение светодиодами не вызывает вредного воздействия на орган зрения и организм человека в целом. Материалы экспериментальных исследований дают обоснования для внесения изменений в нормативные документы в части определения областей применения СД в ОУ различного функционального назначения.

Проведённый комплекс исследований эффективности светодиодного освещения позволяет:

использовать разработанную комплексную (всестороннюю) методику психофизиологической и гигиенической оценки влияния освещения на состояние органа зрения и организм человека в целом как для исследования освещения, создаваемого СД, так и любыми другими ИС, а также при изучении воздействия освещения на разные возрастные и гендерные группы;

осуществлять разработку проектов освещения с обоснованным применением светодиодных светильников как во вновь строящихся зданиях, так и при реконструкции ОУ;

снизить потребление электроэнергии на освещение при замене люминесцентных светильников на светодиодные не менее чем на 30 %;

достичь дополнительного энергосбережения при внедрении гибких систем регулирования светового потока светодиодных светильников. В зависимости от уровня автоматизации освещения возможная дополнительная экономия электроэнергии составит 20...25 % при включении и отключении освещения дискретно в зависимости от зонного распределения естественной освещённости; 30...40 % — при плавном управлении мощностью и световым потоком светильников в зависимости от распределения естественной освещённости;

создавать условия для повышения эффективности зрительной работы и снижения зрительного утомления при выполнении зрительно-напряжённых работ.

Полученные результаты являются основанием для продолжения работы по исследованию эффективности освещения СД в различных отраслях промышленности в условиях натурного эксперимента.

Работа выполнена при финансовой поддержке со стороны Минобрнауки России в рамках базовой части госзадания по проекту "Проведение теоретических и экспериментальных исследований по разработке перспективных энергоэффективных светодиодных источников оптического излучения и оценка эффективности осветительных установок на их основе".

Библиографические ссылки

1. **Vegter Klaas.** The future of lighting: beyond saving energy / Conference on Optics for Solar Energy (SOLAR) at the Renewable Energy and the Environment Congress, Eindhoven, 11—14 Nov., Washington (D.C.). 2012. P. 83.

2. **Kawasaki S., Horikoshi Y., Yainazaki A., Kasahara K.** Impact of two competing energy transfer mechanisms on spectra in organic light emitting diodes / Conference on Optics for Solar Energy (SOLAR) at the Renewable Energy and the Environment Congress, Eindhoven, 11—14 Nov., Washington (D.C.), 2012. P. 64—65.

3. **Zak P.P., Ostrovsky M.A**. Potential Danger of Light Emitting Diode Illumination to the Eye, in Children and Teenagers // Light & Engineering. 2012. № 3. P. 5—8.

4. **Aladov A.V., Zakgeim A.L., Mizerov M.N., Chernyakov A.E.** Concerning biological equivalent of radiation of lightemitting diode and lamp light sources with correlated colour temperature from 1800 K up to 10000 K // Light & Engineering. 2012. № 3. P. 9—14.

5. **Wright M**. Debate continues over the impact of light on human health // LEDs magazine. 2010. V. 46. P. 25.

6. **Амелькина С.А., Железникова О.Е., Кирюхина С.В., Синицына Л.В.** Разработка комплексной методики оценки влияния условий светодиодного освещения на состояние органа зрения и организма человека в целом // Естественные и технические науки. 2013. № 5 (67). С. 249—257.

7. **Амелькина С.А., Железникова О.Е., Микаева С.А., Амелькин Э.А**. Разработка и сборка экспериментальной исследовательской установки со светодиодными источниками света //Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 10. С. 11—14.

8. **СП 52. 13330.2011** "Естественное и искусственное освещение". URL: http://docs.cntd.ru/document/1200084092 (дата обращения: 20.10.2014).

9. **ГОСТ Р 54943—2012**. Метод определения показателя дискомфорта при искусственном освещении помещений. URL: http://www.cntd.ru/assets/files/upload/050213/54943-2012.pdf (дата обращения: 17.10.2014).

10. **ГОСТ Р 54350—2011** "Приборы осветительные. Светотехнические требования и методы испытаний". URL: http://docs.cntd.ru/document/gost-r-54350-2011 (дата обращения: 13.10.2014).