Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издаётся с 1947 г.

Том 72

5
2018

Главный редактор

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Афанасьев В.Н. – д.т.н., проф., МИЭМ НИУ ВШЭ
Ван Мэйлин – д.т.н., проф., Пекинский политехн. ун-т (КНР)
Иванов А.П. – д.э.н., проф., МГУПС (МИИТ)
Кларк Р. – д.т.н., проф., КИУ (г. Ворвик, Великобритания)
Криони Н.К. – д.т.н., проф., УГАТУ (г. Уфа)
Кузнецов А.Е. – д.т.н., проф., РГРТУ (г. Рязань)
Мальцева С.В. – д.т.н., проф., НИУ ВШЭ
Микаева С.А. – д.т.н., проф., МГУПИ
Неусыпин К.А. – д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Нефёдов Е.И. – д.ф.-м.н., ИРЭ РАН
Никифоров В.М. – д.т.н., проф., ФГУП «НПЦАП им. Н.А. Пилюгина»
Пролетарский А.В. – д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Путилов В.Н. – ООО «Изд-во "Инновационное машиностроение"» (заместитель главного редактора)
Румянцева О.Н. – генеральный директор ООО «Изд-во "Инновационное машиностроение"»
Ся Юаньцин – д.т.н., проф., Пекинский политехн. ун-т (КНР)
Фу Ли – д.т.н., проф., Ин-т Бейхан (КНР)
Фёдоров И.Б. – д.т.н., проф., академик РАН, президент МГТУ им. Н.Э. Баумана
Хэ Юн – д.т.н., проф., Нанкинский ун-т науки и технологии (КНР)
Шахнов В.А. – д.т.н., проф., член-кор. РАН, МГТУ им. Н.Э. Баумана
Шибанов Г.П. – д.т.н., проф., Гос. лётно-испытат. центр им. В.П. Чкалова
Янович Е.А. – д.э.н., проф., Кошалинский политехн. ин-т (Польша)

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

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

Учредитель:

ООО «НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО "ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ"»

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

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Ларченко Ю.В., Суборев К.Г., Филипчик А.В., Филипчик В.И., Коваленко М.Н. Предельное быстродействие сканирующих систем на основе оптических гальванометров 195

Курицына В.В., Силуянова М.В., Сильченко О.Б. Автоматизация процедур технологической экспертизы в принятии производственных решений 199

Янишевская А.Г., Дьяконов Н.В. Модель сферической винтовой площадки для обслуживания внутренней поверхности сферических резервуаров 207

Амелькина С.А., Амелькин Э.А., Микаева С.А. Современные проблемы светодиодного освещения 212

Григорьев-Фридман С.Н. Мобильное переговорное устройство на базе твёрдотельного лазера с накачкой лазерным диодом 216

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Неусыпин К.А., Селезнева М.С., Кай Шэнь, Пьо Си Тху. Разработка численного критерия степени идентифицируемости параметров нелинейной модели атмосферных летательных аппаратов 223

Андреев Г.Т., Ершов А.А., Павленко О.В. Комплексный подход к уменьшению шарнирных моментов органов управления летательных аппаратов 227

ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Тимофеева М.С., Семенов В.Н. Компьютерное тестирование как инструмент оценки уровня сформированности пула компетенций обучающихся 232

© Издательство «Инновационное машиностроение», «Автоматизация. Современные технологии», 2018

Automation. Modern Technologies

MONTHLY INTERBRANCH SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

It is published since 1947

Volume 72 5 / 2018

Chief in Editor

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

EDITORIAL COUNCIL:

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

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

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

Founder:

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

The journal was registered in the Roskomnadzor, on May 29, 2014 (PI No. FS77-78102), it is included in the list of publications approved by the Higher Attestation Commission (VAK) of the Russian Ministry of education and science for publication of the works of applicants for academic degrees and the system of the Russian Index scientific citation (RINC)

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION PROCESSES

Larchenko Yu.V., Suborev K.G., Filipchik A.V., Filipchik V.I., Kovalenko M.N. The ultimate operating speed of scanning systems based on optical galvanometers 195

Kuritsyna V.V., Siluyanova M.V., Silchenko O.B. Automation of procedures for technological expertise at production decision-making 199

Yanishevskaya A.G., Dyakonov N.V. Model of a spherical helical platform for servicing the inner surface of spherical tanks 207

Amelkina S.A., Amelkin E.A., Mikaeva S.A. Modern problems of LED lighting 212

Grigorev-Fridman S.N. Mobile intercom device based on a solid-state laser pumped by a laser diode 216

MODERN TECHNOLOGIES

Neusypin K.A., Selezneva M.S., Kay Shen, Po Si Tkhu. Development of a numerical criterion of the parameters identifiability degree for a nonlinear model of atmospheric aircraft 223

Andreev G.T., Ershov A.A., Pavlenko O.V. Complex approach to reducing the jointed moments of aircraft control facilities 227

EDUCATIONAL TECHNOLOGIES

Timofeeva M.S., Semenov V.N. Computer testing as a tool for evaluation of the students competencies pool level 232

© Publishing «Innovative machine building», «Automation. Modern technologies», 2018

УДК 621.373

Ю.В. Ларченко, канд. техн. наук, **К.Г. Суборев, А.В. Филипчик, В.И. Филипчик**
(ООО «СИТЕЛА», г. Минск),
М.Н. Коваленко
(Белорусский государственный университет, г. Минск)

kovalenko@bsu.ru

ПРЕДЕЛЬНОЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЕ СКАНИРУЮЩИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКИХ ГАЛЬВАНОМЕТРОВ

Предложена методика оценки предельного быстродействия оптической сканирующей системы на основе гальванометров (дефлекторов), позволяющая на основе известных характеристик элементов системы и требований к уровню переколебаний (качеству переходного процесса) определить предельные значения скорости сканирования. Показано, что для наиболее эффективной работы системы сканирования необходимо ограничить крутизну спада её передаточной функции на уровне 48...52 дБ/дек. в зависимости от допустимого уровня неуправляемого перехода и производительности процесса интерполяции. Это ограничение обеспечивает инвариантность функции перехода системы во всём диапазоне углов сканирования.

Представлены номограммы взаимосвязи указанных параметров и результаты экспериментального исследования, подтверждающие полученные теоретические результаты.

Ключевые слова: оптический дефлектор; оптический гальванометр; оптическая система сканирования.

A method for evaluation the ultimate operating speed of an optical scanning system based on galvanometers (deflectors), which allows determining the ultimate values of the scan rate on the basis of the system elements known characteristics and requirements for the level of over oscillation (the quality of the transient process) is proposed. It is shown that for the most efficient operation of the scanning system, it is necessary to limit its transfer function decay slope at the level of 48...52 dB per a decade depending on the permissible level of the uncontrolled transition and the performance of the interpolation process. This limitation ensures the invariance of the system transition function over the entire range of scanning angles.

Nomograms of the relationship between indicated parameters and the results of an experimental research, which confirm the obtained theoretical results, are presented.

Keywords: optical deflector; optical galvanometer; optical scanning system.

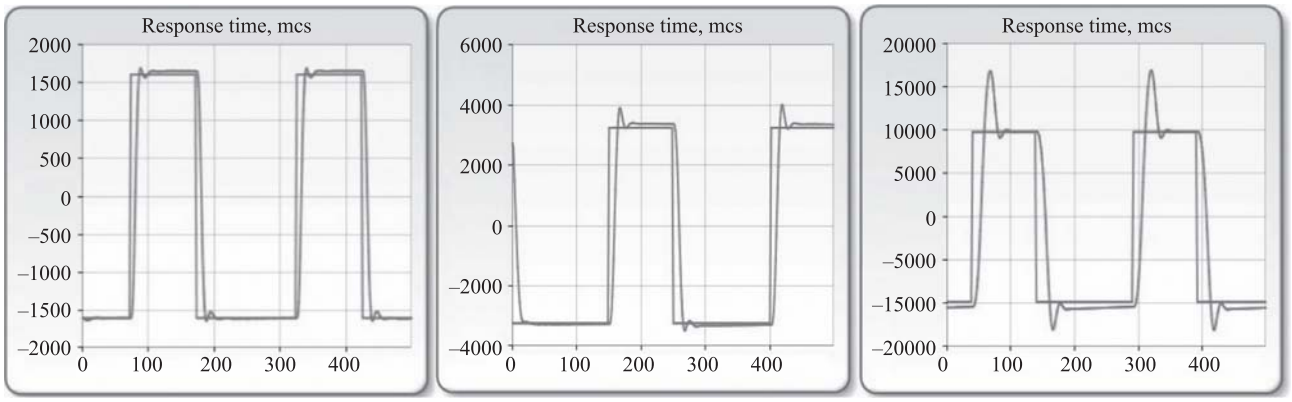
Введение. Реализация практического применения лазерной техники связана, как правило, с решением проблемы управления излучением. Среди устройств управления пространственным положением лазерного пучка наибольшее распространение получили оптические электромеханические дефлекторы (далее — оптические гальванометры), обеспечивающие сканирование пучка по произвольному закону с высоким разрешением и точностью.

Однако практическое достижение потенциальных возможностей оптических сканирующих систем (ОСС) по критерию «скорость/качество» возможно только при оптимальном сочетании параметров системы формирования команд управления и сканирующего модуля, включающего драйвер с оптическим гальванометром (АЧХ, ФЧХ) [1].

Существует множество эмпирически полученных рекомендаций по применению ОСС [2—4], однако до настоящего времени не разработана методика оценки предельного быстродействия ОСС при достижении необходимого критерия «скорость/качество». Именно решение указанной задачи и является целью данной работы.

ОСС в общем случае представляет собой комплекс технических и программных средств, предназначенных для формирования модели, интерполяции, взаимосвязи с компьютером, управления сканированием и собственно элементов сканирования (оптических гальванометров).

Рабочая угловая скорость сканирования лазерного луча Ω в такой системе определяется количеством промежуточных точек N,



а) *б)* *в)*

Рис. 1. Импульсные передаточные функции системы сканирования для дефлектора Д-710 с зеркалом (рабочая апертура 10 мм) и амплитудой сканирования:
а — 5 %; *б* — 10 %; *в* — 30 %

необходимых для формирования вектора определённой длины, и временем подготовки команды управления τ_0:

$$\Omega = \psi(N\tau_0)^{-1} = \left(\sum_{i=1}^{N} \Delta\psi_i\right)(N\tau_0)^{-1}, \qquad (1)$$

где ψ — угловая длина вектора; $\Delta\psi_i$ — угловая длина отрезка между двумя точками i и $i + 1$.

Следует отметить, что угловая длина отрезка $\Delta\psi_i$ является одним из важнейших параметров, характеризующих качество ОСС. Предельное значение Ω определяется максимально возможным значением ψ_i, при котором уровень переколебаний ОСС не превышает некое допустимое значение $\varphi_{доп}$. При этом величина $\varphi_{доп}$ должна быть постоянна во всем диапазоне углов сканирования.

На рис. 1 представлены типовые переходные характеристики современной ОСС (на примере оптического гальванометра Д-710), настроенной на время отклика (response time) 250 мкс.

Максимальное значение скорости сканирования определяется временем отклика ОСС на управляющий сигнал в виде функции Хевисайда ($N = 1$).

Из рис. 1 видно, что характер переходного процесса зависит от уровня действующего сигнала. Причём на достаточно больших углах сканирования вообще невозможна устойчивая работа системы [5]. Это объясняется тем, что АЧХ современных оптических гальванометров (а следовательно, и ОСС) имеет ярко выраженную нелинейную зависимость на участке затухания (рис. 2, график *1*). В диапазоне от ω_1 до ω_2 крутизна спада АЧХ монотонно меняется от 20 до 120 дБ/дек. и более.

Точка $\omega_2 = (2\tau_{откл})^{-1}$, где $\tau_{откл}$ — время отклика (response time), что соответствует уменьшению полного угла сканирования ψ_{max} на 80...84 дБ и соотношению «сигнал/шум» аналогового датчика обратной связи, близкому к единице. Следовательно, вблизи данной точки коэффициент усиления ОСС также должен быть равен единице, причём возбуждение ОСС $\omega_в$ должно быть существенно выше ω_2. Именно поэтому разработчики стремятся расширить полосу рабочих частот сканирующего модуля, не ухудшая его устойчивость, за счёт увеличения крутизны затухания на высоких частотах, близких к возбуждению. В частности, для этой цели используются статоры из цельного куска электротехнической стали [6].

Однако расширение полосы частот приводит к необходимости ограничения АЧХ функцией, имеющей постоянное значение крутизны в полосе затухания ($N > 1$ при $\psi/\Delta\psi_i > 1$), причём данная функция должна удовлетворять условию эквидистантности $\Delta\psi_i$ = const.

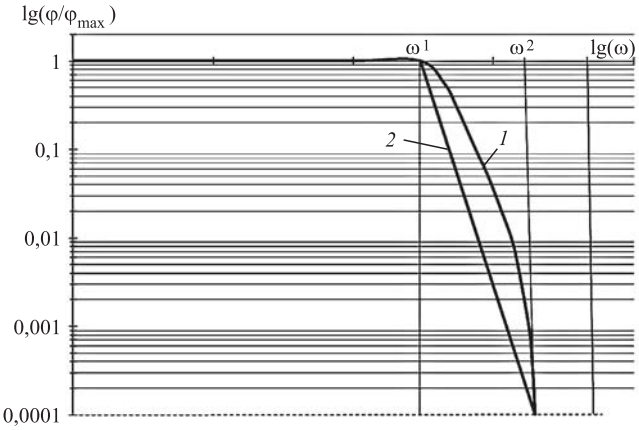


Рис. 2. Типовая АЧХ современных систем сканирования

Предельно возможная крутизна АЧХ, удовлетворяющая указанным условиям, может быть определена на основе тождественности времени формирования N точек в управляющем устройстве $T_1 = N\tau_0$ и половины периода частоты ω_1 (рис. 2, график *2*).

Тогда крутизна спада определяется по формуле

$$S = \psi_{\max}/D = \text{const} = \psi_{\max}[\lg(\omega_2/\omega_1)]^{-1} = \\ = \psi_{\max}[\lg(N\tau_0\tau_{\text{откл}}^{-1})]^{-1} = \\ = 84[\lg(\psi_{\max}\psi_i^{-1}\tau_0\tau_{\text{откл}}^{-1})]^{-1}, \quad (2)$$

где $D = \lg(\omega_2/\omega_1)$ — количество декад в диапазоне частот $\omega_1...\omega_2$; $\psi_{\max}$ — предельный рабочий угол сканирования ОСС.

Соответственно, минимальное время сканирования полного угла составит

$$T_1 = \tau_{\text{откл}}10^{(84/S)}. \quad (3)$$

Следует отметить, что расчётное время T_1 справедливо для полного угла сканирования гальванометра $\psi_{\max}$, в то время как его рабочий угол ψ в ОСС всегда меньше. Соответственно, реальное время $T_{\text{тек}}$ будет пропорционально рабочему углу сканирования:

$$T_{\text{тек}} = (\psi/\psi_{\max})T_1. \quad (4)$$

В частности, для оптических гальванометров $\psi_{\max}$ определяется механическим ограничителем угла, а рабочий угол ψ всегда несколько меньше.

Взаимосвязь параметров сканирующей системы, рассчитанная по формуле (2), представлена на номограмме (рис. 3).

На рис. 4 представлены кривые функции (3) для различных типовых значений $\tau_{\text{откл.}}$

Значение $(\psi_i/\psi_{\max})100$ % определяется требованиями к качеству конечного результата (например, процесса маркировки) и конструктивными особенностями оптического гальванометра. Для подавляющего большинства случаев его практического применения достаточно иметь $(\psi_i/\psi_{\max})100$ % = 0,4...0,5 %, а производительность процессора адаптера 20...50 мкс на точку [7, 8]. При этом максимальная крутизна затухания АЧХ системы сканирования должна быть ограничена значением 48...52 дБ/дек.

Применение данных результатов при настройке системы сканирования на основе оптического гальванометра Д-710 позволило получить вполне приемлемый уровень переколебаний, постоянный во всем диапазоне углов сканирования (рис. 5).

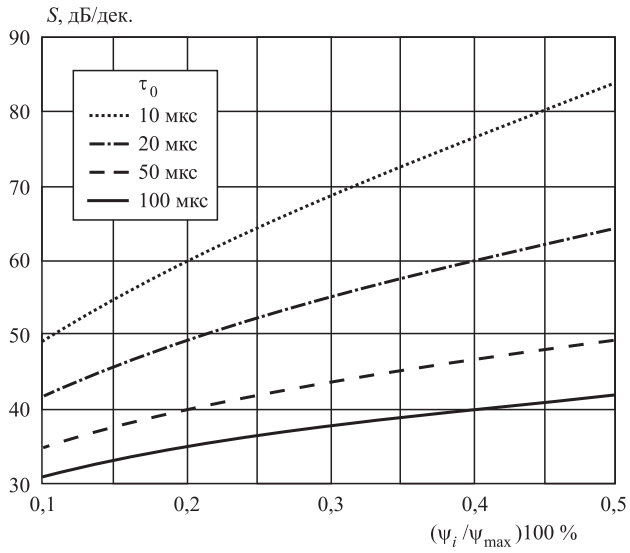


Рис. 3. Номограмма взаимосвязи крутизны передаточной функции системы сканирования, минимального относительного угла перехода и производительности адаптера

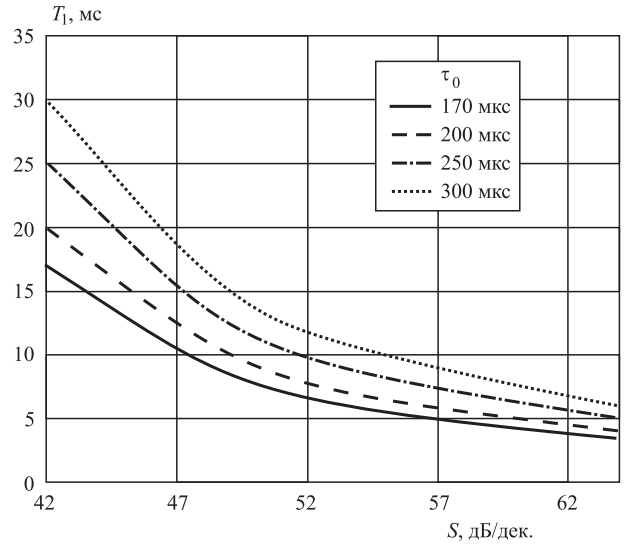
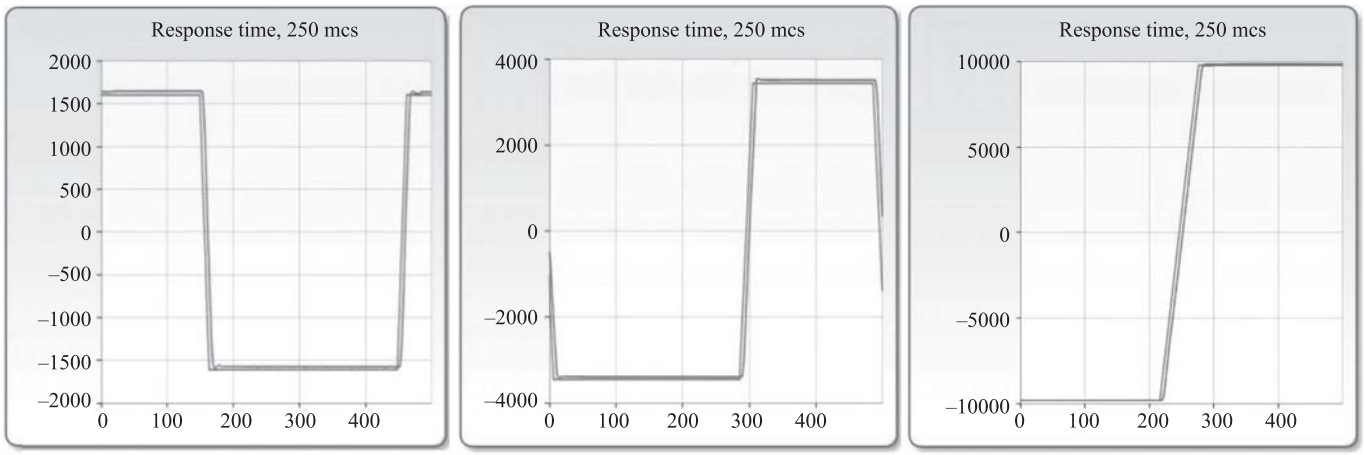


Рис. 4. Номограмма взаимосвязи времени сканирования полного угла, крутизны передаточной функции системы сканирования и времени отклика системы

Заключение. Предлагаемый подход к анализу системы сканирования позволил выявить совокупность определяющих факторов, необходимых для достижения производительности, соответствующей мировому уровню. В результате удалось установить количественную взаимосвязь между параметрами программно-аппаратной среды формирования команд управления, настройками регулятора и характеристиками оптического гальванометра. Показано, что выявленные взаимосвязи являются общими для всего класса си-



а) *б)* *в)*

Рис. 5. Импульсные передаточные функции системы сканирования для дефлектора Д-710 с зеркалом (рабочая апертура 10 мм) и амплитудой сканирования:
а — 5 %; *б* — 10 %; *в* — 30 %

стем углового сканирования и необходимыми для оптимизации функционирования системы по критерию максимальной производительности инвариантности динамических и статических показателей во всем диапазоне углов сканирования.

Результаты эксперимента в полной мере подтверждают количественный расчёт предельной величины скорости сканирования, ограничивающей диапазон качественной работы системы.

Пользователь по доступным паспортным данным в состоянии оценить предельную скорость сканирования по номограммам (см. рис. 3 и 4).

Полученные рекомендации могут быть использованы при формировании требований к перспективным системам и служить руководством при комплексной наладке существующей программно-аппаратной среды.

Библиографические ссылки

1. **Афонин А.А., Никитин В.Н., Никитин Н.В., Чемоданов В.Б., Шацкий А.В.** Автоматические системы и устройства наведения лазерных пучков / Под ред. В.Б. Чемоданова. М.: Физматлит, 2016. 280 с.

2. **Ларченко Ю.В., Леонов А.М., Жук С.М.** Современные сканирующие системы на основе электромеханических дефлекторов света // Лазер-информ. 2003. № 9, 10. С. 8—12.

3. **Нестерук И.Н.** Современные гальванометрические сканаторы / Лазер-информ. 2007. № 5 (356). С. 9—10.

4. **Леонов А.М., Ларченко Ю.В., Леонов А.М.** и др. Расчёт элементов лазерных сканирующих систем. Минск, 1986.

5. **Артамонов С.И., Грязнов Н.А.** и др. Выбор сканера для лазерной локационной системы / Оптический журнал. 2016. Т. 83. № 9. С. 51—59.

6. **Brown D., Stukalin F.** Galvanometer unit // Patent US № 6.380.649.2002.

7. **Blais F.** High Precision Control of Galvanometer Scan // SPIE. 1987. Vol. 817. P. 14.

8. **Duma V.-F., Mnerie C.** Optimization of Scanning and Command Functions of Galvanometerbased Scanners // SPIE. 2011. Vol. 8083 808319-1. P. 12.

Ссылка для цитирования

Ларченко Ю.В., Суборев К.Г., Филипчик А.В., Филипчик В.И., Коваленко М.Н. Предельное быстродействие сканирующих систем на основе оптических гальванометров // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 5. С. 195—198.

Уважаемые читатели!

Редакция предлагает руководителям организаций,
ищущих новые рынки для реализации своей продукции,
услуги по размещению рекламы и объявлений.
Цены за публикацию рекламы умеренные.

УДК 65.012.123

В.В. Курицына, канд. техн. наук, **М.В. Силуянова,** д-р техн. наук,
О.Б. Сильченко, д-р техн. наук
(Московский авиационный институт, национальный исследовательский университет)
tpdla@mail.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕДУР ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ В ПРИНЯТИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ РЕШЕНИЙ

Представлена автоматизированная система сопровождения технологической экспертизы производственных конструкторско-технологических решений в наукоёмких отраслях машиностроения, основанная на многомерной инфологической модели данных при реализации информационных процессов обработки экспертных оценок в многовариантных и многокритериальных задачах.

Ключевые слова: научно-техническая экспертиза; технологическая система; оценка; принятие решений; моделирование.

The automatic system of technological expertise maintenance of production design and technological solutions in science-intensive branches of machine building are presented. The system is based on a multidimensional infological data model when implementing information processes at expert estimates processing in multivariate and multicriteria tasks.

Keywords: scientific and technical expertise; technological system; evaluation; decision-making; modeling.

Введение. Многообразие целей и задач, стоящих перед технологическим менеджментом производственной организации, сложность проблем, динамичные и нечёткие условия требуют регулярного принятия различных управленческих решений в таких областях, как конструкторско-технологическая доводка изделий производства, внедрение новых технологических процессов в производство, приобретение сторонних технологий, коммерческая реализация собственных технологий, модернизация технологического оснащения, поиск причин брака продукции или нестабильности технологических систем, выбор направления технологических инвестиций и др. [1]. Технологические решения служат основой для разработки конструкторско-технологических мероприятий и соответствующей документации, направляемой для исполнения и внедрения в производство [2].

Сложные технические и технологические системы обладают огромным количеством как тактико-технических параметров, так и параметров, отражающих совершенство технологий изготовления, экономические аспекты производства, эксплуатации. При этом оценка многих параметров носит субъективный характер (например, в части эргономики). Рассматривая варианты технических решений, часто можно наблюдать противоположные оценки по различным параметрам (например, «прочный, но тяжёлый», «лёгкий, но менее прочный», что лучше?). Наиболее распространён конфликт между тактико-техническими и экономическими параметрами, так называемое соотношение «цена—качество». Тем не менее в таких условиях необходимо принимать научно обоснованные решения, от которых зависят не только тактические моменты, но и стратегия развития предприятий, отрасли.

Научно-техническая экспертиза стала как предметом научных исследований в области методологии, так и областью практической деятельности, а теория принятия решений — одним из наиболее эффективных интеллектуальных инструментов технологического менеджмента научно-производственного предприятия.

Условия принятия производственных решений. Принятие технологических решений в такой области, как авиа- и ракетостроение, имеет ряд особенностей:

преобладание в предметной области описательных форм представления знаний, большая роль эмпиризма;

сложная логика суждений, взаимосвязи, большая размерность задач (количество учитываемых факторов и альтернатив);

наличие скрытых объективных законов;

мощные информационные потоки метаописания технологий (характеристики оборудования, инструмента, материалов, режимов и т. д.);

итеративный характер процесса принятия решения (последовательное приближение к наиболее приемлемому в данных условиях варианту).

Экспертные методы используют эвристические возможности личности (эксперта или группы экспертов), позволяя на основе знания и опыта, интуиции специалистов, работающих в определённой области, получить оценку исследуемых технических и технологических объектов и систем. Сущность методов экспертных оценок заключается в проведении экспертами интуитивно-логического анализа проблемы с количественным суждением и формальной обработкой результатов. Итог экспертного метода оценки — получение некоторой интегральной оценки в условных единицах (баллах), которая была бы пропорциональна исследуемому свойству (критерию). Полученное в результате обработки обобщённое мнение экспертов есть заключение о решении.

Экспертные методы следует рассматривать как один из возможных подходов к всестороннему изучению сложных проблем, в которых окончательное решение не явно. Экспертные методы оценки могут использоваться при формировании как стратегических направлений технологического развития предприятия или подразделения, так и при решении многих частных тактических вопросов, связанных с определением показателей эффективности, рациональности, коммерческой привлекательности интеллектуального технологического продукта.

В условиях ограниченного ресурса времени и средств на принятие технологических решений эффективным средством является применение автоматизированных систем сопровождения принятия конструкторско-технологических решений, основанных на алгоритмах многомерной и многокритериальной оптимизации, математической статистики, обработки экспертных мнений специалистов.

Рис. 1. Структура и этапы процедуры технологической экспертизы

Главное условие необходимости принятия решения — это наличие альтернатив в количестве, превышающем желаемое для дальнейшего функционирования системы. Это может быть единственное предпочтительное решение из нескольких или несколько предпочтительных из большего количества альтернатив, а также все альтернативы, кроме самой неблагоприятной. Таким образом, с математической точки зрения понятие «выбор» подразумевает ситуацию, когда необходимо оставить множество решений, но меньшее, чем множество принципиально возможных альтернатив.

Методика технологической экспертизы. Сужение множества альтернатив возможно, если имеется способ их сравнения между собой и определения наиболее предпочтительных. При таком описании выбора предполагаются следующие аспекты подготовки технического задания на проведение экспертизы:

создание множества альтернатив, из которого предстоит осуществить выбор;

определение целей, для достижения которых производится выбор;

формулирование точки зрения на объект оценки;

установка требований к качеству экспертизы.

Для реализации метода экспертного оценивания технологических решений разработано программное обеспечение, позволяющее оперативно произвести сбор и обработку экспертных мнений в области инновационных технологий сложного формообразования деталей и конструкций. Компонентами такой автоматизированной системы являются подсистемы постановки задачи, организации экспертизы, экспертного оценивания и генерации отчёта (рис. 1).

Укрупнённый алгоритм функционирования программного комплекса (рис. 2) отражает взаимосвязи отдельных модулей системы и процесса итерационного приближения к качественным результатам научно-технической экспертизы, т. е. с достаточными показателями точности, достоверности и согласованности.

Апробация автоматизированной системы обработки экспертных оценок. Разработка и апробация автоматизированной системы обработки экспертных оценок при принятии технологических решений осуществлялись на примере технологической экспертизы производственной целесообразности метода сварки типовых элементов авиакосмических конструкций, про-

Рис. 2. Алгоритм экспертной оценки при коллективной экспертизе

водимой на базе Московского авиационного института (национального исследовательского университета) и Научно-исследовательского института природных, синтетических алмазов и инструмента «ВНИИАЛМАЗ».

Оценивалась производственная целесообразность метода сварки трением с перемешиванием в качестве технологии неразъёмного соединения компонентов конструкций авиакосмической техники. Сравнительному анализу подлежали пять альтернативных методов сварки, характеризующихся различными технологическими, эксплуатационными и экономическими характеристиками: сварка трением с перемешиванием, электродуговая сварка, электронно-лучевая сварка, лазерная сварка, газовая сварка. Таким образом, установлено пространство технологических альтернатив (вариант 1, вариант 2, ..., вариант m, ..., где $m = 1, ..., M$; M — количество альтернатив, $M = 5$). Альтернативные технологические методы обладают как достоинствами, так и недостатками, и не всегда очевидно, применение какого метода оптимально в конкретном технологическом процессе соединения различных конструкций из разных материалов. Сравнение сварки перемешиванием с другими процессами осуществляется в контексте целесообразности использования данного процесса в условиях авиационного производства. Успешное применение метода зависит от чёткого понимания характеристик процесса, поэтому для каждого случая необходимо разрабатывать свои критерии технической и экономической целесообразности внедрения процесса. При анализе технологических возможностей методов рассматривались физический принцип формирования соединения, область применения и эксплуатационные характеристики сварного шва. Также внимание уделялось выявлению специфических достоинств и недостатков метода.

При формировании экспертной группы для принятия инновационных решений в целях всестороннего анализа наукоёмких объектов и процессов привлекались представители сфер академической науки, производства и образования. Для повышения достоверности, точности, надёжности и воспроизводимости экспертных оценок экспертизу осуществляют путём принятия группового решения компетентными лицами. Число экспертов, входящих в группу, зависит от требуемой точности средних оценок и, как правило, составляет от 5 до 20 человек. Для обобщения оценок необходимо собрать ответы всех экспертов и провести средневзвешенную оценку с учётом коэффициентов значимости мнений экспертов:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^{n} a_i p_i k_i}{\sum_{i=1}^{n} k_i p_i}, \qquad (1)$$

где A — обобщённая оценка, данная группой экспертов по одному вопросу (объекту, факту, признаку, критерию и т. д.); a_i — оценка, данная объекту (факту, признаку, критерию и т. д.) i-м экспертом; n — число экспертов в группе; k_i — нормированный «весовой» коэффициент значимости мнения i-го эксперта; p_i — нормированный коэффициент квалификации i-го эксперта.

Критерий оценки при выборе решения — это параметр объекта, отражающий наиболее существенный признак желаемого решения или совокупность признаков, по которым отдельное решение можно выделить среди множества альтернативных. Массив критериев оценки — это подмножество полного массива параметров технической (технологической) системы, выбранное в соответствии с целью проводимой оценки (некоторые из параметров, принятые к рассмотрению в процессе оценки объекта и выбора приоритетов).

При формировании массива критериев в подсистеме организации экспертизы учитываются:

функциональные показатели качества объекта производства (сварного соединения), отражающие степень совершенства работоспособ-

ности соединения (прочность, герметичность, остаточные деформации, структура и т. п.);

технологические показатели производственного процесса (сварки), отражающие степень совершенства технологии выполнения сварного шва (скорость выполнения, возможность автоматизации, энергоёмкость, необходимая квалификация исполнителя, универсальность и т. п.);

экономические и эргономические показатели (трудоёмкость, ресурсоёмкость, стоимость, удобство выполнения, безопасность и т. п.).

Комплект критериев может быть составлен группой экспертов методом мозгового штурма. Большее количество критериев повышает объективность и разрешающую способность оценки.

Принимая во внимание цели и задачи технологической экспертизы, можно отметить, что весомость оценки технологических объектов по различным критериям неодинакова. Как правило, главное условие для разрабатываемых технологий — обеспечение максимальной экономической эффективности. В области оборонной и техногенной безопасности нередко важность экономических критериев уходит на второй план, выдвигая вперёд тактико-технические показатели, скорость и надёжность.

Каждый эксперт устанавливает весовую оценку значимости критериев в баллах с автоматическим преобразованием в относительный вид в долях единицы. Весовой коэффициент отражает значимость (важность) критерия для установленной цели экспертизы (точки зрения). Для разных точек зрения на оцениваемый объект (для разных целей экспертизы) значимость критериев может существенно меняться. Подсистема позволяет верифицировать субъективные мнения эксперта, предоставляя интерфейс выставления оценок методом парного сравнения. Известны различные методы расстановки приоритетов, основанные на математических процедурах разной сложности (статистика, векторная алгебра, анализ), отличающиеся точностью, быстродействием, трудоёмкостью, разрешающей способностью и другими показателями алгоритмической эффективности: экстремальный анализ целевых функций, анализ иерархий, применение международной фундаментальной шкалы предпочтений [3], ранжирование [4]. Возможны промежуточные и комбинированные решения. При выборе математической реализации процедуры оценки следует руководствоваться такими характеристиками, как количество рассматриваемых вариантов, степень рассеяния, требуемая вероятностная точность выбора, быстрота принятия решения, разрешающая способность шкалы оценки и др.

Результатом обработки экспертного мнения по оценке важности критериев в автоматизированной системе является диаграмма (рис. 3) распределения абсолютных (q_j, в баллах) и нормированных ($q'_j = q_j / \sum q_j$) весовых коэффициентов значимости критериев в пространстве критериев (критерий 1, критерий 2, ..., критерий j, ..., где j — номер критерия). Весовой коэффициент отражает значимость (важность) критерия для установленной цели экспертизы (точки зрения). Для разных точек зрения на оцениваемый объект (для разных целей экспертизы) значимость критериев может меняться кардинальным образом.

Степень согласованности мнений экспертов в теории ранговой корреляции выражается через коэффициент конкордации W [4]. Расчёт коэффициента конкордации основан на процедуре ранжирования объектов анализа экспертами и оценке коррелированности мнений экспертов в определении приоритетов.

Подсистема позволяет повысить объективность мнения и устранить возможные технические (не преднамеренные) ошибки выставления оценок методом парного сравнения, предоставляя соответствующий интерфейс.

Процедура интегральной оценки качества технологического решения включает:

экспертную оценку для каждого варианта степени удовлетворения (выполнения, качества) требований по каждому критерию (F_{jm}, в баллах);

Рис. 3. Номенклатура критериев и оценка их значимости

ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МЕТОДА (Q)

Точка зрения: Продвижение метода на рынок технологий

Оценка степени исполнения критериев технологическим методом

100 — хорошо реализует критерий; 0 — плохо реализует критерий

ОБЪЕКТ ОЦЕНКИ:
МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ

ОЦЕНКА ДАНА
ЭКСПЕРТОМ № 1

$$q'_j = \frac{q_j}{\sum q_j}$$

$$f'_{jm} = F_{jm} q'_j$$

$$Q_m = \sum_j f'_{jm}$$

		Важность критерия в баллах	Относительная важность критерия (в долях)	СТЕПЕНЬ УДОВЛЕТВОРЕНИЯ КРИТЕРИЯ 1 Сварка трением с перемешиванием		2 Электро-дуговая		3 Электронно-лучевая		4 Лазерная		5 Газовая	
		q_j	q'_j	F_j	f'_j	F_j	f'_j	F_j	f'_j	F_j	f'_j	F_j	f'_j
1	Прочность соединения	**100**	0,11	**90**	9,70	**80**	8,62	**80**	8,62	**80**	8,62	**80**	8,62
2	Герметичность	**71**	0,08	**95**	7,25	**75**	5,72	**70**	5,34	**75**	5,72	**60**	4,58
3	Удобство осуществления	**53**	0,06	**60**	3,41	**90**	5,12	**75**	4,27	**75**	4,27	**85**	4,84
4	Скорость осуществления	**45**	0,05	**90**	4,35	**80**	3,86	**85**	4,11	**85**	4,11	**75**	3,62
5	Производительность	**54**	0,06	**95**	5,54	**90**	5,25	**85**	4,96	**85**	4,96	**90**	5,25
6	Безопасность процесса	**29**	0,03	**95**	2,98	**60**	1,88	**60**	1,88	**60**	1,88	**60**	1,88
7	Трудоёмкость	**63**	0,07	**90**	6,14	**60**	4,09	**75**	5,12	**75**	5,12	**60**	4,09
8	Сложность выполнения	**40**	0,04	**60**	2,60	**85**	3,69	**75**	3,25	**75**	3,25	**75**	3,25
9	Электротехнические качества соединения	**17**	0,02	**95**	1,77	**95**	1,77	**95**	1,77	**95**	1,77	**95**	1,77
10	Стабильность процесса	**80**	0,09	**95**	8,24	**65**	5,64	**75**	6,50	**75**	6,50	**65**	5,64
11	Возможность автоматизации	**64**	0,07	**80**	5,50	**90**	6,18	**95**	6,53	**95**	6,53	**85**	5,84
12	Влияние на структуру материала	**73**	0,08	**95**	7,48	**60**	4,72	**60**	4,72	**60**	4,72	**60**	4,72
13	Остаточные деформации в изделии	**74**	0,08	**95**	7,63	**60**	4,82	**80**	6,43	**80**	6,43	**60**	4,82
14	Возможность сварки разнородных материалов	**55**	0,06	**95**	5,64	**60**	3,56	**80**	4,75	**80**	4,75	**60**	3,56
15	Энергоёмкость	**59**	0,06	**90**	5,73	**60**	3,82	**80**	5,09	**80**	5,09	**90**	5,73
16	Универсальность	**49**	0,05	**50**	2,66	**95**	5,05	**80**	4,25	**80**	4,25	**90**	4,78
				Q = 86,63		Q = 73,82		Q = 77,60		Q = 77,98		Q = 73,01	
	Эксперт 2			Q = 84,82		Q = 62,12		Q = 68,59		Q = 65,18		Q = 42,82	
	...												
	Эксперт 3			Q = 72,11		Q = 60,00		Q = 73,68		Q = 72,54		Q = 47,37	
	...												
	Эксперт n			Q = 86,61		Q = 74,35		Q = 77,86		Q = 78,21		Q = 63,51	
	...												
	Средневзвешенное			82,54		67,57		74,43		73,48		56,68	

Рис. 4. Интегральная оценка альтернативных методов сварки

расчёт показателя качества сравниваемых вариантов по каждому критерию (f'_{jm}); этот показатель характеризует относительную степень удовлетворения критерия j при решении по варианту m с учётом значимости (важности) критерия: $f'_{jm} = F_{jm} q'_j$;

расчёт комплексного (интегрального) показателя качества каждого варианта (Q_m) как суммы локальных оценок с учётом весового вклада значимости критериев: $Q_m = \sum_j f'_{jm}$;

обобщение мнений, полученных от каждого эксперта с учётом коэффициентов квалификации и значимости членов экспертной группы;

формулирование заключения технологической экспертизы.

Результаты расчётов отражаются в табличном (рис. 4) и графическом виде (рис. 5), при-

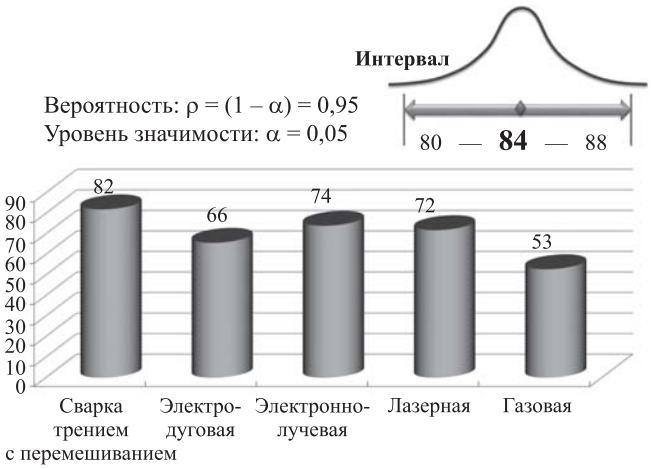


Рис. 5. Диаграмма интегральной оценки технологических решений

чём график отражает коллективное мнение с учётом квалификации и весомости мнений экспертов.

В зависимости от поставленной задачи в качестве вывода могут выступать:

заключение о ранжировании оцениваемых объектов по производственной целесообразности;

заключение о приоритетном варианте по условию $Q_i \to \max$;

заключение о группе «лучших» вариантов по рейтинговой оценке;

заключение о необходимости принятия управленческих решений по реорганизации вариантов процессов с низкими оценками;

локальные выводы по отдельным критериям.

Весьма важным и ответственным этапом экспертной оценки являются обработка и анализ результатов опроса экспертов. Принципы современного менеджмента качества в соответствии с международным стандартом ISO 9001:2000 (п. 7.5.2) позволяют обеспечить все контролируемые условия, необходимые для обеспечения качества экспертных оценок. Заключение технологической экспертизы формируется с расчётом и указанием качества по параметрам согласованности, точности и достоверности. Обобщению правомерно подвергать только согласованные оценки.

Для методов коллективной экспертной оценки этап обработки и анализа результатов опроса группы экспертов заключается в определении показателя обобщённого мнения и степени согласованности мнений экспертов по каждому вопросу, а также выявлении экспертов, высказывающих оригинальные суждения, и групп экспертов, придерживающихся противоположных точек зрения.

Степень согласованности мнений экспертов в теории ранговой корреляции выражается через коэффициент конкордации:

$$W = S/S_{\max}; \tag{2}$$

$$S = \sum_{m=1}^{M} (S_m - S_{\text{ср}})^2; \tag{3}$$

$$S_{\text{ср}} = \frac{1}{2} n(M+1); \tag{4}$$

$$S_{\max} = \frac{1}{12} n^2 (M^3 - M), \tag{5}$$

где S — сумма квадратов отклонений действительной суммы рангов для каждого объекта от средней суммы рангов, приходящихся на каждый объект; S_m — действительная сумма рангов для каждого объекта (зависит от мнений экспертов); $S_{\text{ср}}$ — средняя сумма рангов, приходящихся на каждый объект (одинакова для всех объектов и зависит от количества экспертов и количества объектов); $S_{\max}$ — максимально теоретически возможное значение суммы квадратов отклонений (зависит только от количества объектов M и числа экспертов n).

Очевидно, что чем выше согласие между экспертами, тем большим будет разброс выставленных сумм рангов каждому объекту относительно их среднего значения. Максимальное значение сумма квадратов отклонений принимает в случае, когда все мнения экспертов совпадают и при этом среди рангов, данных экспертами, нет одинаковых. Таким образом, коэффициент согласованности имеет вид

$$W = \frac{12S}{n^2(M^3 - M)}. \tag{6}$$

Коэффициент конкордации может принимать значения от 0 до 1, причём «0» означает полную несогласованность мнений, а «1» — полное согласование мнений. Статистика показывает, что при $W > 0{,}4$ работу с группой экспертов можно продолжать, приняв к руководству их оценку. Рассогласованность квалифицированных экспертов свидетельствует о высокой неоднозначности предмета анализа или о необходимости корректировки в постановке задач.

При достаточной согласованности мнений экспертов на заключительных этапах расчёта определяются характеристики точности и достоверности. В качестве истинного значения оценки при коллективной оценке m экспертов может выступать средневзвешенная усреднённая оценка с учётом значимости и квалификации экспертов. Доверительный интервал для итоговой интегральной оценки рассчитывается статистическими методами при заданном уровне значимости. В технике и технологии уровень значимости характеризует вероятность ошибки и принимается одной из величин 0,05, 0,01, 0,005, 0,001 в зависимости от степени ответственности и рисков последствий решения.

В ходе опытной эксплуатации предлагаемого программно-информационного комплекса сопровождения технологической экспертизы были получены объективные оценки производственной целесообразности технологий создания неразъёмных соединений в базовых конструкциях авиакосмической техники из лёгких сплавов. Результатом оценки коммерческой привлекательности применения метода в типовых операциях сварки авиационных конструкций с высокой степенью согласованности явилось заключение о преимуществе сварки трением по сравнению с

электронно-лучевой и существенное предпочтение этого метода в сравнении с другими технологическими альтернативами.

Комплексная экспертиза сложных технологических систем. Технологическая система — совокупность функционально взаимосвязанных элементов производственной структуры предприятия, средств технологического оснащения и исполнителей, выполняющих в регламентированных условиях технологические процессы производства изделия в соответствии с требованиями нормативно-технологической документации. Согласно концепции электронного описания технические и технологические системы должны представляться в компьютерной среде в виде иерархии информационных моделей, составляющих единое целое и имеющих соподчинённость.

Технологическая система, рассматриваемая во времени с дискретными состояниями технологических операций и переходов, представляет собой прочно связанную информационную сеть наследственного характера. Носителем наследственной информации является собственно деталь с многообразием параметров, описывающих её состояние. Определённое свойство заготовки, выраженное входной характеристикой звена $X_{j(i-1)}$, изменяется в ходе технологической операции в соответствии с коэффициентом передачи наследственной связи K для данной операции и характеризуется новой величиной X_{ji}. Эти изменения определяются действием совокупности технологических факторов $\{t_{i1}, t_{i2}, ..., t_{ij}\}$ для каждой операции технологического процесса. Комплексная оценка проявления технологического наследования может быть представлена подсистемой определения интегральной характеристики технологического наследования, где коэффициенты передачи наследственных связей выступают в качестве весовых коэффициентов. Математическая модель общего вида технологического наследования весьма многомерна:

$$X_{vp} = \sum_{j=1}^{s}\left[\sum_{i=0}^{p-1}\left(\frac{1}{K_{vipj}}X_{ji}\right)\right], \qquad (7)$$

где X_{vp} — рассматриваемый v-й параметр качества детали после p-й операции процесса; v — номер рассматриваемого параметра качества детали (заготовки); p — номер рассматриваемой технологической операции; i — номер последовательности технологических операций от начала процесса до рассматриваемой операции ($i = 0, 1, ..., p$); j — текущий номер из числа учитываемых ($j = 1, 2, ..., s$) основных геометрических и физико-механических параметров; X_{ji} — свойства заготовки на предыдущих операциях; K_{vipj} — коэффициент передачи продольных и поперечных наследственных связей.

Инфологическая модель данных при реализации информационных процессов обработки экспертных оценок в многовариантных и многокритериальных задачах анализа технологических систем представляет многомерную векторную структуру. Программная реализация автоматизированной системы

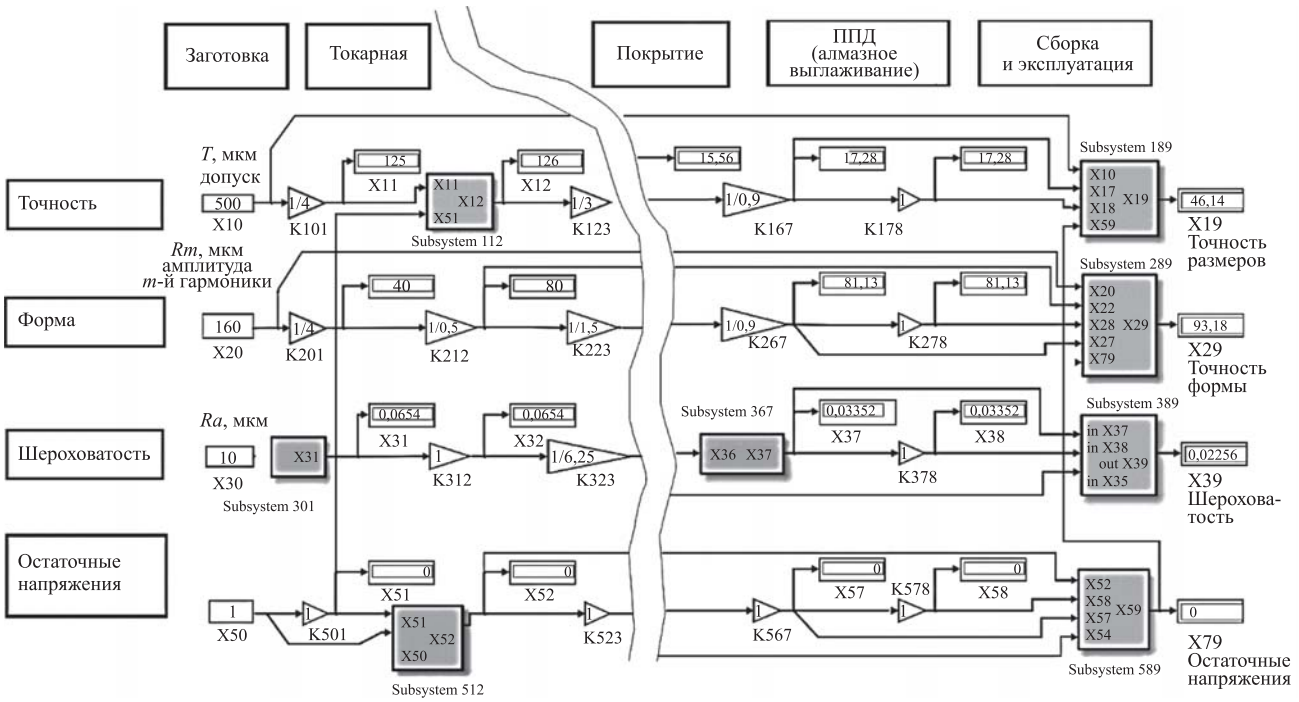


Рис. 6. Реализация модели технологической системы в среде MatLab Simulink

органично ложится на комбинацию методов реляционного (табличного) представления данных в Excel и информационного представления иерархических сетей в MatLAB (Math Works, Inc.) [5, 6]. Реализация принципов визуального программирования пакета расширения Simulink позволяет проектировать модели сложной структуры и иерархии. При этом уравнения состояния дискретной системы формируются автоматически.

Имитационная модель технологической системы изготовления прецизионных деталей авиакосмической техники представлена на рис. 6. Модель построена в соответствии с концепцией технологического наследования параметров в ходе операций технологического наследования.

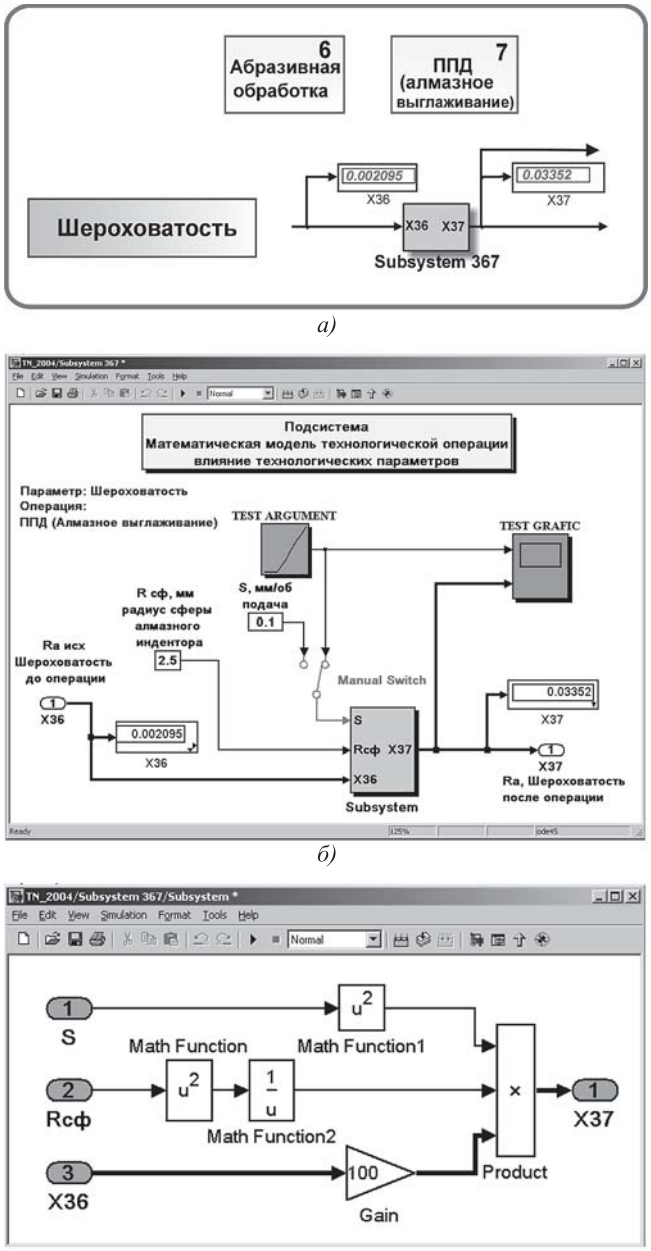


Рис. 7. Иерархическая структура модели технологической системы:
а — уровень 0; *б* — уровень 1; *в* — уровень 2

Моделируемый объект (технологическая система) представляется графически функциональной параметрической блок-схемой, включающей блоки элементов системы и связи между ними. В терминах Simulink такая блок-схема именуется *S*-модель (*S*-model). Функциональные блоки элементов моделируемой системы могут в свою очередь представлять вложенные подсистемы со своей организацией, образуя иерархические структуры. Структура подсистемы при моделировании может быть либо визуально скрыта, либо развернута при необходимости декомпозиции и детального анализа (рис. 7).

В качестве достоинств программной реализации разработанной автоматизированной системы технологической экспертизы можно отметить автоматизацию статистических расчётов, оперативное реагирование на смену производственных условий, объектов и субъектов анализа, возможность прогноза вариантов развития, последствий и рисков принятия тех или иных инновационных решений и проектов, модульную структуру, гибкость и возможность модификации для последующего расширения круга решаемых задач, поддержку визуализации и интерактивного диалога.

Выводы. Согласно цели создания программно-информационного сопровождения технологической экспертизы были получены следующие результаты:

1. Разработана автоматизированная система сопровождения технологической экспертизы производственных конструкторско-технологических решений в наукоёмких отраслях машиностроения. Методика учитывает специфику многовариантных и многокритериальных задач производственного управления.

2. В ходе опытной эксплуатации предлагаемого программно-информационного комплекса сопровождения технологической экспертизы были получены объективные оценки производственной целесообразности технологий получения неразъёмных соединений в базовых конструкциях авиакосмической техники из лёгких сплавов. С высокой степенью согласованности мнений экспертов установлено преимущество сварки трением перемешиванием в специальных задачах аэрокосмического производства.

3. Иерархическая модель технологической системы прогнозирования и оценки функционирования, реализованная в среде визуаль-

ного моделирования MatLAB Simulink, позволяет оптимизировать процесс, повысить эффективность и надёжность технологического обеспечения параметров качества изготовления высокотехнологичных изделий.

Современные информационные технологии обеспечивают возможность для моделирования процессов, оперативного анализа, подготовки и представления результатов для последующего принятия решений. Таким образом, обеспечивается возможность научного обоснования бизнес-планов технологического оснащения, переоснащения и модернизации наукоёмкого производства сложной продукции аэрокосмической отрасли, разработки стратегий развития [1, 7].

Библиографические ссылки

1. **Силуянова М.В., Курицына В.В., Иосифов П.А.** Стратегии, методы и модели управления технологическим развитием производств авиационно-космического машиностроения. М.: Изд-во МАИ, 2016. 160 с.

2. **Патраков Н.Н., Курицына В.В.** Основы технологического менеджмента качества прецизионных деталей авиакосмической техники. М.: Изд. центр МАТИ, 2003. 325 с.

3. **Саати Томас Л.** Принятие решений при зависимостях и обратных связях. Аналитические сети. М.: Ленанд, 2016. 360 с.

4. **Орлов А.И.** Организационно-экономическое моделирование: учебник. В 3 ч. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. Ч. 2. Экспертные оценки. 2011. 486 с.

5. **Курицына В.В., Лиокумович Д.С., Силуянова М.В.** Инструментальные средства MatLab Simulink в системе технологического менеджмента качества точного машиностроения // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2012. Т. 8. № 1. С. 22—31.

6. **Курицына В.В., Курицын Д.Н.** Инструментальные средства MatLab Simulink в задачах экспертной оценки технологических систем по параметрам качества изготовления изделий точного машиностроения // Труды ГОСНИТИ. 2016. Т. 124. № 1. С. 105—111.

7. **Силуянова М.В., Курицына В.В.** Опыт формирования экспертной площадки прогнозирования инновационного развития отраслевого кластера транспортных и космических систем // Успехи современной науки. 2017. Т. 4. № 1. С. 77—81.

Ссылка для цитирования

Курицына В.В., Силуянова М.В., Сильченко О.Б. Автоматизация процедур технологической экспертизы в принятии производственных решений // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 5. С. 199—207.

УДК 621.642.39

А.Г. Янишевская, д-р техн. наук, **Н.В. Дьяконов**
(Омский государственный технический университет)
dyakonov.n.v@gmail.com, anna-yanish@mail.ru

МОДЕЛЬ СФЕРИЧЕСКОЙ ВИНТОВОЙ ПЛОЩАДКИ ДЛЯ ОБСЛУЖИВАНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ СФЕРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ

Описан способ получения сферической винтовой поверхности, используемой при проектировании конструкций винтовых площадок, предназначенных для обслуживания внутренней поверхности сферических резервуаров. Представлены математические модели для внешнего и внутреннего контура площадки. Показан результат получения кривых пересечения с помощью САПР.

Ключевые слова: винтовая площадка; сферическая винтовая поверхность; математическая модель винтовой поверхности; локсодрома.

The method for obtaining a spherical helical surface used in the design of helical platforms intended for servicing the inner surface of spherical tanks is described. Mathematical models for the external and internal contour of the platform are presented. The result of obtaining the intersection curves with the help of CAD is shown.

Keywords: helical platform; spherical helical surface; mathematical model of the helical surface; loxodrome.

Введение. Сферические резервуары служат для хранения под давлением топливных газов и легкоиспаряющихся веществ. Парк сферических резервуаров представлен на рис. 1. В зависимости от выполняемой функции сферические резервуары различаются вместимостью и рабочим давлением.

Все сферические (шаровые) резервуары, находящиеся в эксплуатации, должны проходить комплексное техническое обследование [1].

Рис. 1. Парк сферических резервуаров

Основной целью комплексного технического обследования является определение возможности дальнейшей безопасной эксплуатации, сроков и полноты последующих обследований, необходимости ремонта или исключения из эксплуатации шарового резервуара при заданных технологических параметрах. Подготовка шарового резервуара к полному техническому обследованию производится силами предприятия-владельца и осуществляется в такой последовательности:

освобождение шарового резервуара от продукта;

установка заглушек;

удаление остатков продукта;

зачистка внутренней поверхности шарового резервуара;

монтаж освещения;

подготовка сварных швов и основного металла для проведения неразрушающих методов контроля качества и металлографических исследований.

Целью внутреннего осмотра является определение дефектов на внутренней поверхности сферического резервуара [1].

При внутреннем визуальном осмотре обязательной проверке подлежат:

состояние основного металла оболочки;

местные деформации, вмятины и выпучины;

состояние сварных соединений конструкций шаровых резервуаров в соответствии с требованиями проектов, СНиП, стандартов на соответствующие виды сварки и типы сварных швов.

В современной нефтехимической и нефтегазовой промышленности для осмотра и обслуживания внутренней поверхности сферического резервуара используют подмости. Широкое распространение получили два вида подмостей:

1) в виде внутренней поворотной лестницы (рис. 2), которая выполнена по авторскому свидетельству [2];

2) в виде внутренних многоуровневых лесов из круговых площадок с переходами между уровнями (рис. 3).

Недостатками первой конструкции являются:

необходимость вручную перемещать лестницу на необходимую позицию;

возможность применения только на сферических резервуарах объёмом до 2000 м^3 из-за значительного увеличения массы изделия при обеспечении условий прочности, что ведёт к невозможности ручного перемещения без применения дополнительных средств [2];

сложность проведения лакокрасочных и других работ.

Недостатки второй конструкции:

большая масса изделия;

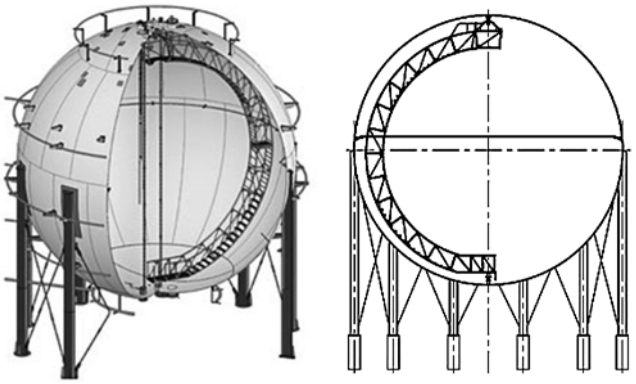


Рис. 2. Внутренняя поворотная лестница

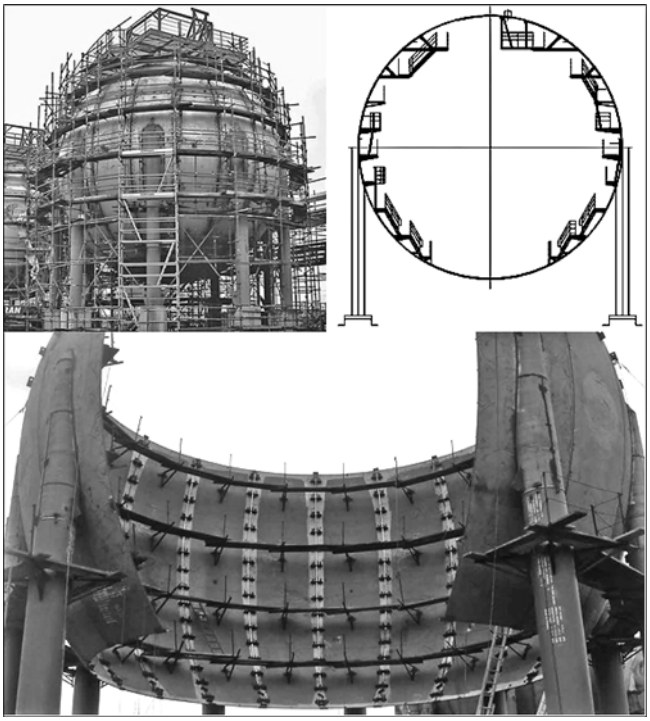


Рис. 3. Многоуровневые леса

сложность эвакуации персонала из-за наличия лестничных маршей и стремянок в качестве основного пути перемещения между уровнями.

История проектирования и строительства сферических резервуаров различной вместимости, сооружённых в СССР, США, ФРГ, Японии, Великобритании, Германии и других странах с начала XX в. и по настоящее время [3, 4], показывает, что для обслуживания внутренней поверхности резервуаров объёмом

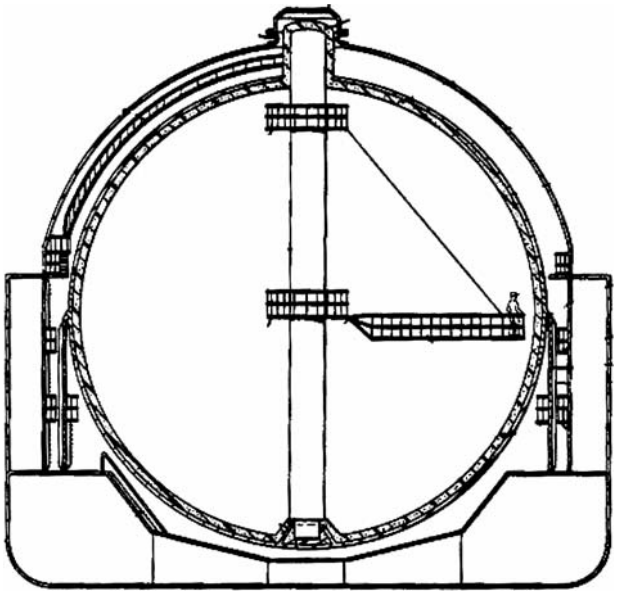


Рис. 4. Платформа с поворотной стрелой

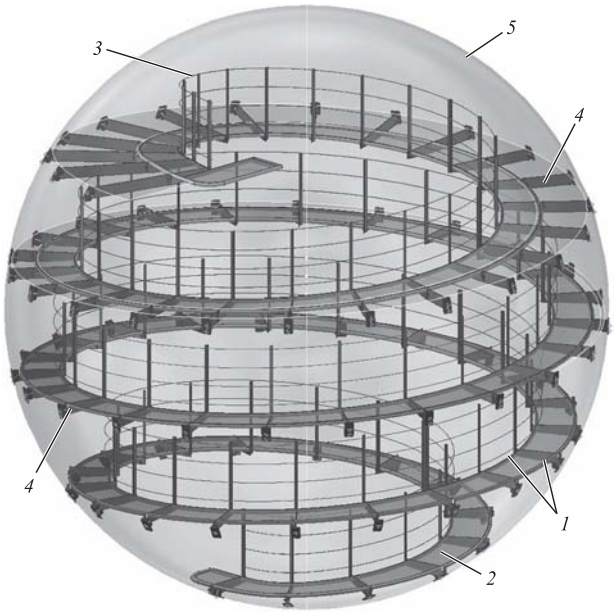


Рис. 5. Трёхмерная модель сферической винтовой площадки:

1 — винтовые балки площадки; *2* — настил площадки; *3* — ограждение; *4* — консоли площадки; *5* — внутренняя поверхность сферического резервуара

до 2000 м^3 широко используют внутреннюю поворотную лестницу (см. рис. 2). Для резервуаров ёмкостью 5000 м^3 и более используют многоуровневые леса либо «промышленный альпинизм» [3, 8, 9].

Крупнейшие производители судов для перевозки сжиженного природного газа (Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering, Hyundai Heavy Industries, Samsung Heavy Industries, Mitsubishi Heavy Industries) устанавливают для осмотра и обслуживания внутренней поверхности резервуаров платформу с поворотной стрелой [10], как показано на рис. 4.

В данной статье представлена разработка новых подмостей для обслуживания внутренней поверхности сферических резервуаров, которая выполнена в виде винтовой сферической площадки (рис. 5).

Конструкцию сферической винтовой площадки можно применять в широком диапазоне размеров сферических резервуаров (объём более 600 м^3). Предложенная конструктивная схема обеспечивает удобство обслуживания внутренней поверхности сферического резервуара и безопасность передвижения рабочего персонала. Снижение массы достигается за счёт отсутствия лестничных маршей и стремянок для перехода между уровнями.

Предложенная на рис. 5 конструкция подмостей не имеет аналогов в мире. Ближайшим прототипом являются подмости в виде внутренних многоуровневых лесов [8, 9] (см. рис. 3). В связи с этим по данной работе подана заявка на патент на изобретение «Винтовые подмости».

Математическая модель сферических винтовых линий площадки. Вопросам исследования отображения ортогональным проецированием поверхности на плоскость посвящены работы [5—7] и др. В них, в основном, определяются некоторые дифференциальные характеристики двумерной поверхности или алгебраической поверхности большей размерности.

Сферическая винтовая линия внешней балки площадки определяется путём пересечения поверхности сферы (рис. 6) с поверхностью геликоида (рис. 7).

Уравнение сферы:

$$f(a,b) = \begin{pmatrix} x(a,b) \\ y(a,b) \\ z(a,b) \end{pmatrix},$$

где $x(a, b) = R\sin(a)\cos(b)$; $y(a, b) = R\sin(a)\sin(b)$; $z(a, b) = R\cos(a)$; $a = 0...2\pi$; $b = 0...\pi$; R — радиус сферы.

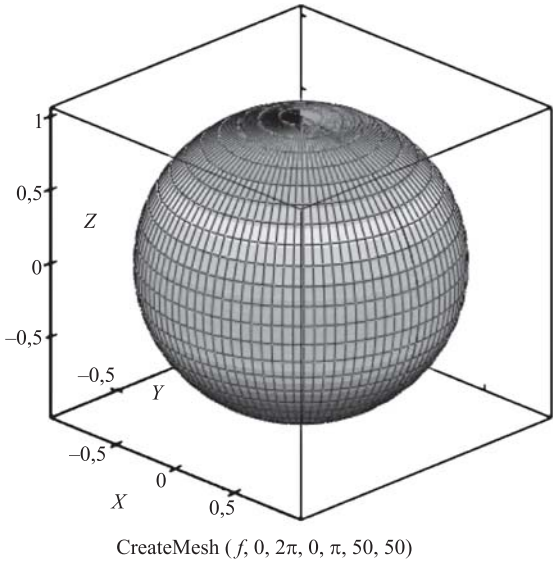


Рис. 6. График сферы в программном продукте Mathcad

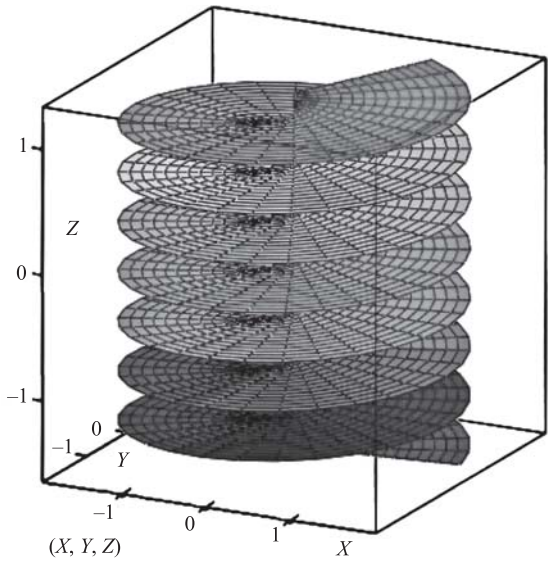


Рис. 7. График геликоида в программном продукте Mathcad

Уравнение однолопастного геликоида:

$$h(a,b)=\begin{pmatrix}X(a,b)\\Y(a,b)\\Z(a,b)\end{pmatrix},$$

где $X(a, b) = |a|\cos(b)$; $Y(a, b) = |a|\sin(b)$; $Z(a, b) = \Delta b$; Δ — шаг винтовой линии.

Уравнение кривой пересечения:

$$f(a,b)-h(a,b)=0\rightarrow\begin{pmatrix}x(a,b)\\y(a,b)\\z(a,b)\end{pmatrix}-\begin{pmatrix}X(a,b)\\Y(a,b)\\Z(a,b)\end{pmatrix}=0;$$

$$0,95R<Z(a,b)<0,8R.$$

Кривая пересечения поверхностей представлена на рис. 8.

Сферическая винтовая линия внутренней балки площадки находится путём пересечения поверхности сфероида с поверхностью геликоида (см. рис. 8), как показано на рис. 9.

Уравнение сфероида:

$$ff(a,b)=\begin{pmatrix}xx(a,b)\\yy(a,b)\\zz(a,b)\end{pmatrix},$$

где $xx(a, b) = R_1\sin(a)\cos(b)$; $yy(a, b) = R_1\sin(a)\sin(b)$; $zz(a, b) = R_2\cos(a)$; $a = 0...2\pi$; $b = 0...\pi$; R_1 и R_2 — радиусы сфероида.

Сферические винтовые линии внешнего и внутреннего контуров площадки, полученные пересечением поверхности однолопастного геликоида с поверхностями сфероида и сферы, представлены на рис. 10.

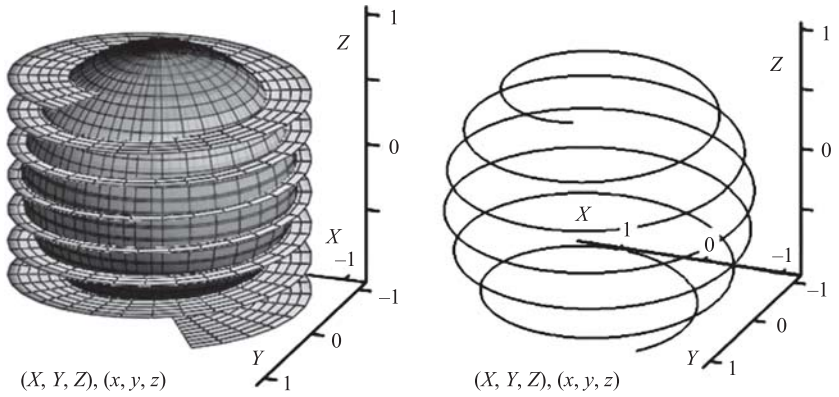


Рис. 8. Кривая пересечения поверхностей сферы и геликоида в программном продукте Mathcad

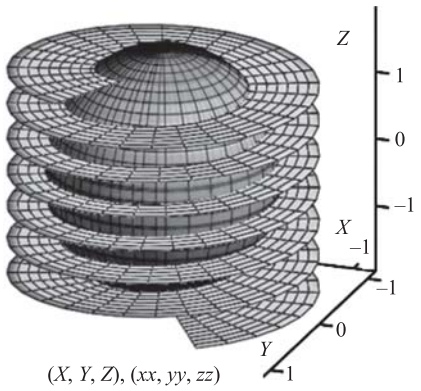


Рис. 9. Кривая пересечения поверхностей сфероида и геликоида в программном продукте Mathcad

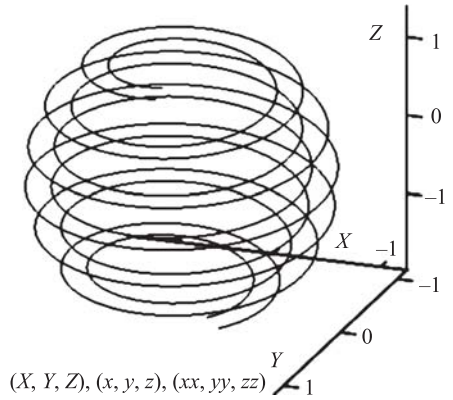


Рис. 10. Сферические винтовые линии внешнего и внутреннего контуров площадки

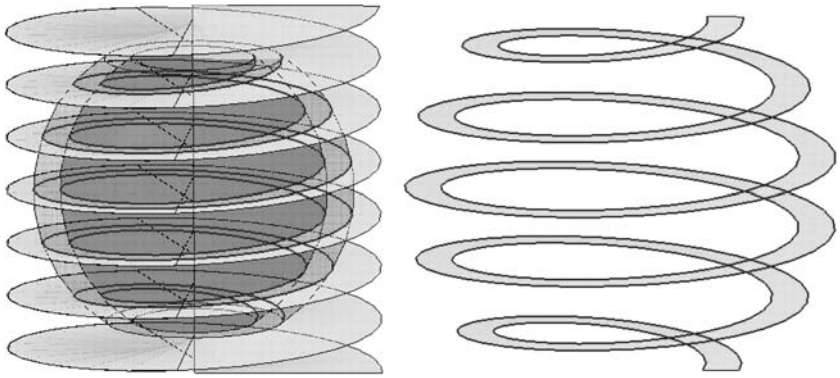


Рис. 11. Трёхмерная модель сферической винтовой поверхности

Результат построения кривых пересечений поверхности геликоида с поверхностями сферы и сфероида с помощью САПР «Компас 3D» представлен на рис. 11.

Заключение. Представленный математический способ получения кривых пересечения поверхности геликоида с поверхностью сферы и сфероида позволяет до начала проектирования изделия определять основные параметры нового изделия (сферической винтовой площадки): количество витков, длина кривой и др. Также он может служить частью единой системы при автоматизации проектирования этого изделия.

Представленная сферическая винтовая поверхность может использоваться на этапе предпроектной проработки шарового резервуара для оценки количества витков внутренней площадки, её массы и стоимости.

В настоящее время в современной нефтегазовой и нефтехимической промышленности конструкция внутренних лесов в виде сферической винтовой площадки не встречалась в мировой практике. Однако её применение позволит улучшить эксплуатационные качества сферических резервуаров.

Библиографические ссылки

1. **РД 03-380—00.** Инструкция по обследованию шаровых резервуаров и газгольдеров для хранения сжиженных газов под давлением. М.: НТЦБПГР, 2003. 80 с.

2. **Рванцев А.Д., Амелин В.С.** Подмости для производства работ внутри резервуаров // Авт. свид-во СССР № 969861. 1982.

3. **Дикун В.Н., Шейнблит Я.А.** Сооружение шаровых резервуаров. М.: Недра, 1987. 192 с.

4. **American** National Standard. BPV Code, Section VIII, Division 2: Design & Fabrication of Pressure Vessels. NY. 10016-5990. 2015.

5. **Арнольд В.И.** Особенности гладких отображений // Успехи мат. наук. 1968. Т. XXIII. Вып. 1 (139). С. 4—44.

6. **Брус Дж., Джиблин П.** Кривые и особенности. М.: Мир, 1988. 262 с.

7. **Быков В.И.** Определение контурной линии на поверхности, заданной уравнением в неявной форме / В сб.: тезисы всесоюзн. науч.-метод. симпозиума «Применение систем автоматизированного проектирования конструкций в машиностроении». Ростов-на-Дону, 1983. С. 40—41.

8. **Mechanical** Erection. 2016. Inside of a LPG storage tank Erection part 7 // YouTube. 16 December. URL: https://www.youtube.com/watch?v = o-Hf8wXDaig (дата обращения: 28.11.2017).

9. **Mechanical** Erection. 2017. LPG spherical tank welding video // YouTube. 2 July. URL: https://www.youtube.com/watch?v = kWtCaA8EFlM (дата обращения: 29.11.2017).

10. **Kvamsdal R., Tobiassen R.** Ships for transport of liquefied gases // Patent US 3968764 A. 1976.

Ссылка для цитирования

Янишевская А.Г., Дьяконов Н.В. Модель сферической винтовой площадки для обслуживания внутренней поверхности сферических резервуаров // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 5. С. 207—211.

Уважаемые читатели!

Перепечатка материалов из журнала «Автоматизация. Современные технологии» возможна при обязательном письменном согласии редакции журнала.
При этом ссылка на журнал обязательна.

УДК 628.971:621.385.2

С.А. Амелькина, канд. техн. наук, доц., **Э.А. Амелькин**
(Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва),
С.А. Микаева, д-р техн. наук, проф.
(Московский технологический университет)

mikaeva@npo.lit.ru

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

Освещены проблемные исследования, связанные с оценкой воздействия светодиодного освещения. Рассмотрены вопросы энергетической эффективности и экологической безопасности, а также физиолого-гигиенические аспекты использования светодиодного освещения.

Ключевые слова: светодиодное освещение; экологическая безопасность; физиолого-гигиенические исследования; состояние органа зрения; спектр излучения; световая среда; энергетическая эффективность.

The problem studies related to effects evaluation of LED lighting are highlighted. The issues of energy efficiency and environmental safety, as well as physiological and hygienic aspects of the LED lighting usage are considered.

Keywords: LED lighting; environmental safety; physiological and hygienic research; organ of sight state; spectrum of radiation; light environment; energy efficiency.

Необходимость повышения энергоэффективности систем освещения, в том числе использованием перспективных источников света, в частности светодиодов, ставит перед светотехниками и гигиенистами ряд актуальных вопросов, связанных с обоснованием их использования с учётом экологических и экономических аспектов. Сегодня наблюдается значительный рост рынка светодиодной продукции. Несмотря на высокую стоимость светодиодных светильников, потребителей подталкивают к их использованию значительная экономия электроэнергии на освещение и снижение эксплуатационных расходов. Именно светодиодное освещение в настоящее время рассматривается как перспективное. Преимущества светодиодного освещения неоспоримы, однако по оценкам специалистов [1—5], его влияние на качество жизни людей не представляется однозначным. Существует широкий разброс мнений об оптимальных условиях его применения, а также воздействии излучения светодиодов (СД) на орган зрения и физиологическое состояние человека.

Воздействуя на человеческий организм, свет влияет на зрительное восприятие, психофизиологическое и эмоциональное состояние, возможны также отдалённые последствия воздействия света для физического здоровья человека в целом. Следует отметить несовершенство и необоснованность нормативной базы по применению светодиодных источников в осветительных установках, в частности рекомендаций, содержащихся в СанПиН 2.2.1/2.1.1.2585-10 и Своде правил 52.13330-2011 «Естественное и искусственное освещение».

На различных международных конференциях ведутся дискуссии о воздействии искусственного освещения на организм человека, в том числе и светодиодного. Биологическое и зрительное воздействие света определяется совокупностью различных процессов, которые сегодня достаточно активно обсуждаются научной общественностью [2, 6—9].

Сотрудниками американского университета Брауна во главе с D.M. Berson было обнаружено, что кроме колбочек и палочек в органе зрения имеются фоторецепторы третьего типа, которые отвечают за биологическое воздействие света. Обнаруженный незрительный канал на основе меланопсинсодержащих ганглиозных клеток сетчатки обеспечивает передачу сигналов, которые поступают непосредственно в эпифиз — нейроэндокринный орган, регулирующий секрецию гормона мелатонина в кровь [10, 11]. Мелатонин является чрезвычайно важным гормоном, нерегулярность циклов изменения концентрации которого может привести к различным заболеваниям организма.

Спектральная кривая биологического действия (на основе эффекта подавления мела-

тонина) [12] имеет максимум в синей части спектра, в то время как максимум зрительной чувствительности соответствует жёлто-зелёному участку спектра. Максимальная чувствительность наблюдается в диапазоне 446...477 нм (голубая область видимого спектра). Максимум относительного спектра биологического действия $B(\lambda)$ (подавления секреции мелатонина) сдвинут примерно на 200 нм влево от максимума $V(\lambda)$ (555 нм) относительной спектральной световой эффективности излучения.

Открытие третьей фоторецепторной системы позволило найти объяснение многим явлениям, связанным с незрительным восприятием оптического излучения, а также направить усилия на исследование таких воздействий. Новый рецептор представляет собой недостающее звено в описании механизма биологических воздействий света, управляемого циклической сменой света и темноты. Специфическая компонента солнечного света — коротковолновые голубые лучи в узком диапазоне спектра 446...483 нм — чрезвычайно активна для регуляции производства мелатонина. Установлено, что именно эта компонента переключает внутренние часы организма человека через производство мелатонина. Анализ данных по повреждающему действию света на сетчатку глаза и спектральные свойства светофильтрующей защиты глаза свидетельствуют о том, что спектральные требования светогигиены сетчатки должны включать значительное ослабление синего света в области длин волн короче 450...460 нм [2, 13].

Учёные НТЦ микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН провели исследования, посвящённые оценке биологического эквивалента излучения как светодиодных, так и традиционных источников света с различными спектрами и коррелированной цветовой температурой $T_ц$ от 1800 до 10 000 К. Понятие биологического воздействия в работе связывалось с меланопсинсодержащими рецепторами сетчатки глаза, сигналы от которых регулируют концентрацию мелатонина в крови [7]. Авторы [7] считают, что светодиодные источники света с $T_ц$ = 2700...3000 К опасений не вызывают, а освещение СД холодно-белой цветности ведёт к пятикратному снижению содержания мелатонина в крови по сравнению, например, с освещением натриевых ламп высокого давления (НЛВД). Поэтому следует ввести полный запрет на вечерне-ночное освещение источниками света с заметной долей излучения с длинами волн короче 540 нм. Вместе с тем существуют другие данные, свидетельствующие о том, что важны не столько спектральные характеристики источников света, сколько длительность экспозиции и уровень освещённости. Утверждается, что при умеренных освещённостях час пребывания в условиях освещения светодиодным источником света холодной цветности способствует снижению концентрации мелатонина в крови на 3...8 % (эффект меньше, чем от телевизионного просмотра хоккейного матча).

В настоящее время применение СД регламентируется общим стандартом на источники света IEC 62471—2008 [14], согласно которому полная безопасность их применения гарантирована лишь при малых яркостях, менее 104 кд/м^2. Параметры современных СД, используемых для освещения, могут во много раз превосходить эти уровни, что требует разработки рекомендаций по их безопасной эксплуатации.

Авторами [15] установлено, что биодоза, получаемая в случае применения компактных люминесцентных ламп (КЛЛ) и светодиодных ламп (СДЛ) тёплого белого света с $T_ц$ = = 2700...3000 К и высоким индексом цветопередачи, меньше или равна биодозе, получаемой при использовании ламп общего назначения (ЛОН), КЛЛ и СДЛ холодного белого света с $T_ц$, примерно равной 4000 К. Таким образом, необходимо проявлять осторожность и ограничить применение именно СД холодно-белой цветности в детских и лечебных учреждениях, а также при работе в вечернее и ночное время.

Ряд специалистов считает [16, 17], что перспектива создания «здоровой» световой среды связана с новыми технологиями, основанными на светоизлучающих диодах, способных изменять свой спектр в течение суток: более теплые тона — утром и вечером, а более холодные — днём. Одним из подтверждений могут служить результаты исследований компании Philips [18], указывающие на благоприятное влияние такого режима освещения на пациентов кардиологического отделения Маастрихтского университета.

Учёные Люблянского университета [9] провели исследование воздействия освещения исходя из спектрального распределения мощности и фотобиологического действия света на подавление секреции мелатонина. При этом использовались различные типы источников света. Было установлено, что подавление секреции мелатонина почти линейно усилива-

ется по мере роста $T_ц$ для всех исследованных типов источников света. Монохроматические источники света (НЛНД и «янтарный» СД) оказывают наименьшее влияние, тогда как имеющий наибольшую $T_ц$ (9584 K) СД оказывает наибольшее влияние. Интересно и то, что все люминесцентные лампы (ЛЛ) с маркировкой X30 (530, 830 или 930) оказывают на секрецию мелатонина меньшее влияние, чем галогенные лампы накаливания (ЛН).

Некоторые исследователи утверждают, что СД могут вызвать усиленную дегенерацию жёлтого пятна (макулярную дегенерацию) и нарушение циркадных циклов [19]. Ряд исследований доказывает отсутствие вреда СД-освещения в связи с наличием синего света [20, 21].

Вместе с тем большинство учёных настаивает на необходимости проведения комплексных исследований светодиодного освещения [4, 9, 19, 21, 22] с точки зрения его влияния на орган зрения и организм человека в целом.

В работе [2] российских учёных П.П. Зака и М.А. Островского (Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН и МНТК Микрохирургия глаза им. С.Н. Фёдорова Росмедтехнологии) также поднимается вопрос об опасности сине-голубого излучения в диапазоне длин волн 440...460 нм. Указывается, что такое излучение представляет повышенную опасность для глаз детей и подростков, так как их хрусталики вдвое прозрачнее в сине-голубой области спектра, чем у взрослых людей. Авторы [2] делают вывод, что среди белых СД наименее опасными для зрения являются СД с коррелированной цветовой температурой не выше 4000 K, у которых уровень излучения в сине-голубой части спектра не больше, чем в жёлто-оранжевой. Поэтому применение белых СД с $T_ц$ около 6500 K вызывает опасения. Учёные приходят к выводу, что в целом в настоящее время использование светильников с СД в детских учреждениях может иметь абсолютно непредсказуемые негативные последствия. Поэтому они настаивают на проведении предварительных исследований по оценке безопасности белых СД для глаз детей и подростков с участием профильных специалистов в области физиологии зрения и детской офтальмологии.

Ещё одной проблемой, связанной со СД, является качество их цветопередачи и способы её оценки. Известный исследователь Я. Шанда в работе [23] указывает, что одним из основных вопросов является восприятие белого цвета. Различия восприятия белого света, создаваемого широкополосным источником белого цвета и узкополосным, каким является светодиод (blue chip & phosphor) или светодиодный кластер RGB, приводят к проблеме достоверности методов оценки индекса цветопередачи таких источников.

Технический комитет TC1-69 Международной комиссии по освещению (МКО) разрабатывает новую методику оценки цветопередачи светодиодных источников света. Однако, по оценке учёных, взаимное влияние цветности, цветопередачи и других характеристик спектра излучения источников света до сих пор изучено не полностью. При освещении СД могут возникать ситуации, когда оценки цветопередачи источников света по коэффициенту цветности Ra сильно отличаются от субъективных, поэтому для создания оптимальных светотехнических систем требуется учитывать не только фотометрические, но и циркадные параметры. Для этого необходимо измерять коэффициент циркадной эффективности ламп и светильников [13].

Принимая во внимание эффекты подавления мелатонина, фазового сдвига циркадных ритмов и «всплеска» активности, можно заключить, что действующая фотометрическая система не соответствует реальности. Должна быть разработана новая система световых измерений, учитывающая, что свет служит регулятором циркадной и эндокринной систем и вызывает нейроповеденческие реакции. Разработка этой системы потребует международного сотрудничества учёных, исследующих проблемы, связанные с циркадной системой и зрением, координирующей деятельности МКО. Рекомендуется количественно оценивать свет в единицах облучённости или плотности потока фотонов с чётким определением спектрального распределения энергии излучения источников света.

В современных условиях явно просматривается актуальность проблемы гигиенической оценки условий светодиодного освещения, о чём свидетельствует увеличение числа публикаций и выступлений на научных и практических конференциях.

Одной из наиболее масштабных работ по психофизиологической оценке светодиодов в технике освещения можно считать работу Научного центра здоровья детей РАМН под руководством Л.М. Текшевой, результаты которой отражены в ряде статей [3, 24] и монографии [13].

В работе [24] проведена сравнительная гигиеническая оценка влияния условий освещения ЛЛ и СДЛ на психофизиологическое и функциональное состояние волонтёров, подвергнутых значительной зрительной и умственной нагрузке. Полученные результаты свидетельствуют о более благоприятном воздействии на организм человека светодиодных источников света по сравнению с ЛЛ. Авторами [25] изучался комплекс показателей психофизиологического и функционального состояния организма. Динамика исследуемых показателей в течение эксперимента служила мерой утомлённости испытуемых от работы в изучаемых условиях освещения. Полученные авторами [25] данные достоверно свидетельствуют в пользу СД-освещения. На основе полученных результатов ими сделан вывод о более благоприятном воздействии на организм человека светодиодных источников света по сравнению с ЛЛ, что объясняется меньшей пульсацией светового потока и более целесообразным с биологической точки зрения спектром излучения.

Необходимо отметить, что работа Л.М. Текшевой и её коллег вызвала живой интерес у специалистов в области светотехники, о чём свидетельствует дискуссия на страницах журнала «Светотехника» [25]. Её участники единогласно сошлись во мнении об актуальности и необходимости проведения физиолого-гигиенических исследований условий СД-освещения. Было указано на целесообразность исследования более широкого спектра исследуемых СД (с точки зрения их цветопередачи), типов зрительных задач. Рекомендовалось обратить внимание на корректность выбранных для сравнения параметров ЛЛ (традиционно используемых в административных и ряде производственных зданий). Отмечалось, что необходимы результаты по оценке работоспособности СД (что важно для производственных помещений).

На основе проведённого анализа можно сделать вывод о целесообразности комплексного подхода к оценке эффективности осветительных условий, создаваемых СД, с учётом зрительного утомления, возникающего в отдельных звеньях зрительного анализатора. Условия освещения, создаваемые СД, требуют всесторонней оценки с учётом объективных, субъективных и психофизиологических критериев. Именно такие исследования позволят создать базу для нормирования СД-освещения и обоснованного определения областей его применения.

Библиографические ссылки

1. **Brainard G.C.** The effects of light on human health and behavior: relevance to architectural lighting // CIE Symposium '04' Light and Health: non-visual effects x027. 2004. P. 2—16.
2. **Зак П.П., Островский М.А.** Потенциальная опасность освещения светодиодами для глаз детей и подростков // Светотехника. 2012. № 3. С. 4—6.
3. **Текшева Л.М.** Сравнительная гигиеническая оценка условий освещения люминесцентными лампами и светодиодными источниками света в школах // Светотехника. 2012. № 5. С. 16—22.
4. **Амелькина С.А., Железникова О.Е., Синицына Л.В.** Эффективность светодиодного освещения. Саранск: Изд. В.С. Афанасьев, 2014. 200 с.
5. **Amelkina S.A., Zheleznikova O.E., Sinitsyna L.V.** Hygienical evaluation of led lighting systems // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2014. Т. 5. № 5. P. 1613—1618.
6. **Блаттер П., Текшева Л., Зак П.** и др. Световая среда для человека: наука, промышленность и закон // Светотехника. 2016. № 1. С. 45 — 49.
7. **Аладов А.В., Закгейм А.Л., Мизеров М.Н., Черняков А.Е.** О биологическом эквиваленте излучения светодиодных и традиционных источников света с цветовой температурой 1800—10 000 K //Светотехника. 2012. № 3. С. 7—10.
8. **Войтысяк А., Лю Ц.** Биологическое действие освещения традиционного и светодиодами// Светотехника. 2013. № 2. С. 17 — 19.
9. **Бизяк Г., Кланичек-Гунде М., Кобав М.Б., Маловар-Ребек К.** Спектры излучения и фотобиологическое действие светодиодов // Светотехника. 2013. № 2. С. 20 — 23.
10. **Berson D.M., Dunn F.A., Takao M.** Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock // Science. 2002. Vol. 295, No. 5557. P. 1070—1073.
11. **Thapan K., Arendt J., Skene D.** An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans // J. Physiol. 2001. Vol. 535 (pt 1). P. 261—267.
12. **Brainard G., Glickman G.** Photoreceptor system for melatonin regulation and phototherapy // Патент США № 7678140. 2011.
13. **Кучма В.Р., Текшева Л.М., Сухарева Л.М.** и др. Гигиенические основы использования светодиодов в системах искусственного освещения. М.: Изд-во ФГБУ «Научный центр здоровья детей» РАМН, 2013. 248 с.
14. **IEC/ EN 62471—2008.** Photobiological safety of lamps and lamp systems. URL: http://www.sharpleds.eu/resources/Photobiological (дата обращения 12.09.2016).
15. **Закгейм А.Л.** Светодиодные системы освещения: энергоэффективность, зрительное восприятие, безопасность для здоровья // Светотехника. 2012. № 6. С. 12—21.
16. **Lyons L.** LED-based products must meet photobiological safety standart: pt 1 // LEDs magazine. 2011. Vol. 46. P. 31.
17. **The True** Knowledge about White LEDs and Biological Clocks // LED professional Review. 2011. Vol. 28. P. 22.
18. **Philips** and Maastricht University study lighting impact on cardiac patients // LEDs magazine. 29.11. 2011.

URL:http://ledsmagazine.com/news/8/11/33 (дата обращения 12.09.2016).

19. **Behar-Cohen F., Martinsons C., Vienot F.** et al. Light-emitting diodes (LED) for domestic lighting: Any risks for the eye? // Progress in Retinal and Eye Research. 2011. Vol. 30. P. 239—257.

20. **Klanjsek-Gunde M., Friskovec M., Sever-Skapin A., Bernard J.** Fotobioloska varnost nekaterih virov nekoherentnih umetnih opticnih sevanj // Vakuumist. 2010. Vol. 30. No. 4. P. 9—15.

21. **Malovrh Rebec K., Klanjsek-Gunde M., Kobav M.B., Bizjak G.** Vpliv svetlecih diod na tvorjenje melatonina in poskodbe mreznice // Lighting Engineering 2011. Nova Gorica. Slovenia. 2011.

22. **Amelkina S.A., Zheleznikova O.E., Mikaeva S.A.** Development of experimental research installations with led light sources // Life Science Journal. 2014. 11(12s). P. 131—133. http://www.lifesciencesite.com/lsj/life1112s/024_26234 life1112s14_131_133.pdf (дата обращения 12.09.2016).

23. **Шанда Я.** Свет как актиничное (фотохимически активное) излучение // Светотехника. 2006. № 3. С. 51—53.

24. **Долин Е.В.** Сравнительная гигиеническая оценка условий освещения люминесцентными лампами и светодиодными источниками света // Светотехника. 2011. № 1. С. 48—52.

25. **Долин Е.В., Звездина И.В., Надеждин Д.С., Текшева Л.М., Шмаров И.А.** Сравнительная гигиеническая оценка условий освещения люминесцентными лампами и светодиодными источниками света // Светотехника. 2011. № 1. С. 53—58.

Ссылка для цитирования

Амелькина С.А., Амелькин Э.А., Микаева С.А. Современные проблемы светодиодного освещения // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 5. С. 212—216.

УДК 539.122.2

С.Н. Григорьев-Фридман
(Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород)

sergey-fridman@mail.ru

МОБИЛЬНОЕ ПЕРЕГОВОРНОЕ УСТРОЙСТВО НА БАЗЕ ТВЁРДОТЕЛЬНОГО ЛАЗЕРА С НАКАЧКОЙ ЛАЗЕРНЫМ ДИОДОМ

Предложен технологически реализуемый лазерный способ передачи и приёма закодированной информации между экипажами самолётов, вертолётов, надводных кораблей и подводных лодок в режиме радиомолчания с использованием твёрдотельного лазера с накачкой управляющим лазерным диодом.

Ключевые слова: переговорное устройство; оптический диапазон; режим радиомолчания; твёрдотельный лазер; накачка; лазерный диод; инверсия; активная среда; фотон; электромагнитная волна; лазерный луч; фокусирующая линза; непрозрачный отражательный диск; параболическое фокусирующее зеркало; полупрозрачное стекло; фотодатчик; фототранзисторная матрица; лазерное излучение; длина волны; частота сигнала.

A technologically realizable laser method for transmitting and receiving encoded information between crews of airplanes, helicopters, surface ships and submarines in the radio silence mode through the use of a solid-state laser pumped by a control laser diode is proposed.

Keywords: intercom; optical range; radio silence mode; solid-state laser; pumping; laser diode; inversion; active medium; photon; electromagnetic wave; laser ray; focusing lens; opaque reflective disc; parabolic focusing mirror; translucent glass; photosensor; phototransistor matrix; laser radiation; wavelength; signal frequency.

Введение. Предлагаемое переговорное устройство на базе твёрдотельного лазера с накачкой лазерным диодом может быть использовано в бортовых приёмно-передающих терминалах лазерных систем передачи и приёма закодированной информации между экипажами самолётов, вертолётов, надводных кораблей и подводных лодок в режиме радиомолчания.

Методика решения проблемы. Основной особенностью новой конструкции переговорного устройства, отличающей её от предшествующих вариантов [1, 2] как отечественных [3—12], так и зарубежных [14—16] аналогов, является не столько возможность успешно применять монохроматическое когерентное излучение узконаправленного действия, по-

лученное с использованием твёрдотельного лазера с накачкой лазерным диодом, вместо обычной, плоской, электромагнитной волны ТЕМ-типа в воздушном пространстве, сколько технологическая возможность иметь в 10...12 раз более узкий диаметр выходного пучка фотонов, модулированных низкочастотным информационным сигналом. Чем меньше диаметр лазерного пучка, тем большие интенсивность и мощность передаваемой информации имеет лазерная установка. Отсюда следует, что при таком технологическом решении увеличивается дальность приёма и передачи закодированной информации при осуществлении атмосферной лазерной связи. Если, например, в первом варианте мобильного переговорного устройства [1] дальность уверенного приёма-передачи информации $l \leqslant 5$ км, а во втором [2] $l \leqslant 10$ км, то в предложенном варианте $l \leqslant 20$ км.

Лазерное излучение имеет малую расходимость в пространстве [1, 2]. Если, например, диаметр пятна лазерного пучка для вариантов, описанных в работах [1], [2], равен 5 мм (видимо только в инфракрасном (ИК) диапазоне!), а длина волны $\lambda \approx 955$ нм, то конический угол расходимости лазерного пучка $\widehat{\Theta}$ составит всего $0{,}48 \cdot 10^{-6}$ рад, или $2{,}75 \cdot 10^{-5\circ}$. В предложенном варианте переговорного устройства диаметр пятна лазерного пучка в ИК-диапазоне равен 0,5 мм. Конический угол расходимости узконаправленного когерентного пучка фотонов $\widehat{\Theta}$ составит всего $0{,}05 \cdot 10^{-6}$ рад, или $2{,}87 \cdot 10^{-6\circ}$, т. е. на целый порядок ниже, чем в двух предыдущих вариантах конструкции переговорного устройства [1, 2].

Опытным путём установлено, что с уменьшением длины волны (увеличением частоты) резко возрастают интенсивность и мощность лазерного луча. Математическое моделирование электродинамических процессов и характер распространения поперечных электромагнитных волн в ближней и средней (тепловой) зонах ИК-диапазона показали, что когерентный лазерный луч имеет практически прямолинейную траекторию движения фотонов в зоне прямой видимости при условии, что в окружающем пространстве на расстоянии уверенных приёма и передачи закодированной информации, до 20 км, нет каких-либо серьёзных препятствий.

С учётом изложенного в качестве технического решения предлагается применение твёрдотельного лазера с накачкой лазерным диодом на основе арсенида галлия (GaAs) и арсенида алюминия-галлия (GaAlAs). При этом необходимо учесть, что длина волны твёрдотельного лазера должна полностью находиться в так называемых «окнах прозрачности» атмосферы Земли. Для существенного улучшения генерации узконаправленного пучка когерентного излучения модулированных фотонов в конструкции твёрдотельного лазера предлагается использовать модифицированный рубиновый кристалл Al_2O_3—Cr_2O_3—Nd_2O_3—Ir_2O_3—Co_2O_3.

Наиболее близкими по технической сущности и достигаемому результату к предлагаемому варианту конструкции переговорного устройства являются два предыдущих варианта переговорного устройства [1, 2], а также бортовое передающее устройство лазерной системы передачи информации, защищённой патентом [3], принятые в качестве ближайших аналогов (прототипов).

Следует отметить, что недостатками устройства, описанного в патенте [3], являются технологическая сложность, большие масса и внешние габариты, относительно большое потребление электроэнергии, высокая себестоимость сеансов лазерной связи, существенные затруднения при работе в условиях интенсивной облачности, различных осадков, загрязнений и повышенного уровня задымлённости, различных газов, плотных слоёв атмосферы Земли, а также низкая степень засекречивания и конфиденциальности приёма-передачи закодированной информации.

Представленная конструкция переговорного устройства обеспечивает повышение эффективности и надёжности связи при интенсивной облачности, различных видах осадков: в виде снега, дождя, густого тумана и т. п., а также повышение степени защищённости и скрытности передаваемой закодированной информации в момент осуществления сеанса атмосферной лазерной связи.

Принцип работы мобильного переговорного устройства на базе твёрдотельного лазера с накачкой лазерным диодом. Схема и принцип работы устройства приведены на рисунке. Конструкция переговорного устройства содержит полупроводниковый лазерный диод *12*, в корпусе которого на одной оптической оси установлены непрозрачный отражательный диск *13*, двойная гетероструктура из полупроводниковых кристаллов арсенида галлия *14* и арсенида алюминия-галлия *15* со сверхтонким средним слоем *p—n*-перехода *16* между ними, оптический фильтр *19*, фокусирующая линза *20*, регулируемый коллиматор *21*. За

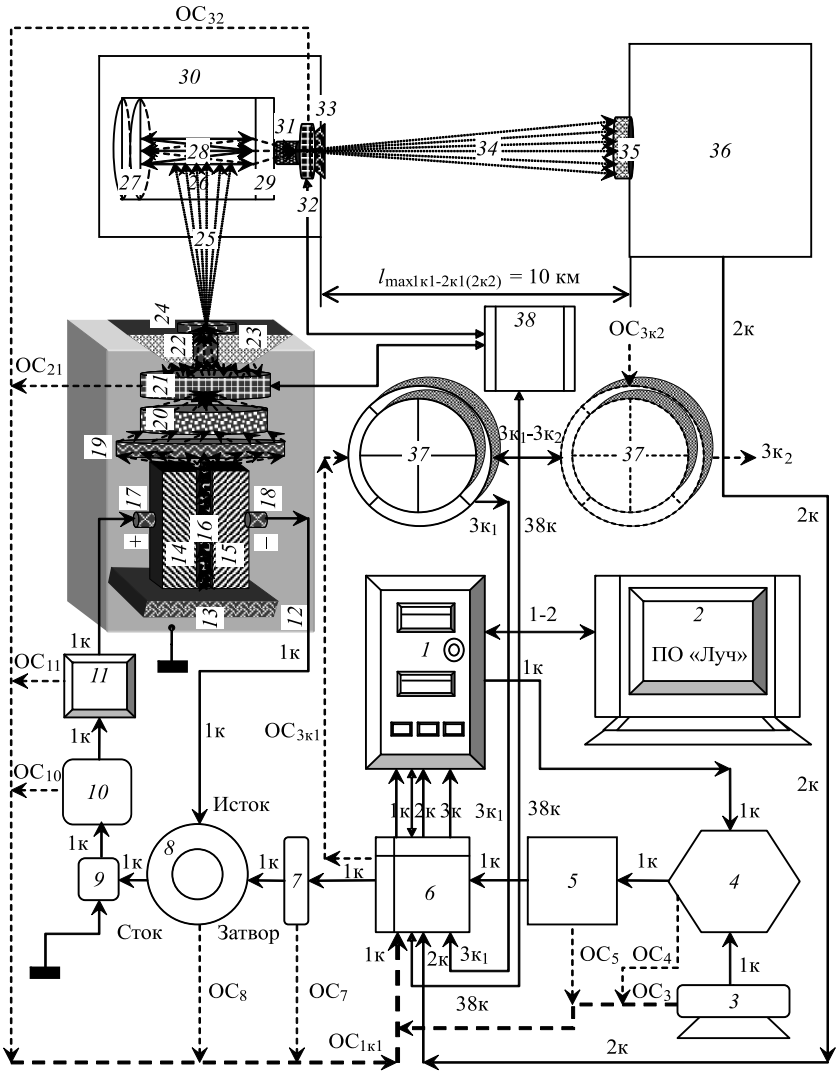


Схема и принцип работы мобильного переговорного устройства в оптическом диапазоне в режиме радиомолчания с применением твёрдотельного лазера и использованием лазерного диода для накачки и синхронного возбуждения первого лазера

коллиматором находятся высверленное узкое отверстие, в котором размещаются выходная оптическая система на основе собирающей фокусирующей микролинзы *22*, поглотитель и рассеиватель фотонов, движущихся не по прямой оптической линии, *23* и нерегулируемый стационарный коллиматор *24*.

Полупроводниковый лазерный диод *12* запитан от положительной клеммы стабилизатора напряжения *11* на анод *17*, а его катод *18* соединён прямым проводом со стоком коммутирующего устройства-ключа *8*.

Отрицательная клемма стабилизатора напряжения *11* соединена с входным проводом источника постоянного напряжения *10*, выходной провод, которого соединён с входным проводом переменного регулировочного резистора *9*. Его выходной провод, в свою очередь, подсоединён к стоку коммутирующего устройства-ключа *8*, выполненного, например, на основе полевого транзистора.

Светочувствительный фотодатчик *36* установлен на одной оптической оси с кристаллом *26* твёрдотельного лазера *30*.

Блок самонаведения и удержания военно-гражданской цели по лазерному лучу в ИК-диапазоне электромагнитных волн *38* установлен между регулируемыми коллиматорами *21*, *32* и блоком АЦП—ЦАП *6*.

Между компьютером (ЭВМ) *1* и блоком АЦП—ЦАП *6* выполнена обратная связь (ОС) для анализа и амплитудно-частотной коррекции выходных импульсов управления, позволяющая программному комплексу (ПО «Луч») оперативно регулировать тактовую частоту следования управляющих импульсов, поступающих из блока АЦП—ЦАП *6* на затвор коммутирующего устройства-ключа VT1 *8*.

Между компьютером (ЭВМ) *1*, монитором *2*, микрофоном *3*, блоком входного трёхкаскадного усилителя низкой частоты (НЧ) *4*, блоком оконечного двухтактного усилителя мощности *5*, разделительным конденсатором, коммутирующим устройством-ключом VT1 *8*, переменным регулировочным резистором *9*, источником постоянного напряжения *10*, стабилизатором постоянного напряжения *11* и регулируемым коллиматором *21* выполнена односторонняя связь по обмену данными и определению временной неработоспособности, утечки и потери информации по каждому из перечисленных выше блоков, через блок многоканального АЦП—ЦАП *6*.

Также между компьютером (ЭВМ) *1*, регулируемым коллиматором *32*, блоком оптического стабилизатора точного наведения и горизонтально-вертикального положения в пространстве *37* и блоком самонаведения и удержания военно-гражданской цели по лазерному лучу в ИК-диапазоне электромагнитных волн *38* выполнена постоянная двусторонняя связь по обмену данными, через блок многоканального АЦП—ЦАП *6*.

Блок входного трёхкаскадного усилителя НЧ *4* может содержать входной предваритель-

ный усилитель видеосигналов, а также блок специального кодера цветного изображения.

Коммутирующее устройство-ключ *8* может быть выполнено на базе полевого транзистора VT1, например, отечественной марки 2П769А9 или 2П7229А (2П7229А5).

Переменный регулировочный резистор *9* может быть изготовлен на базе потенциометра для ограничения предельного питания коммутирующего устройства — полевого транзистора VT1 *8* по току.

Источник постоянного напряжения *10* ($E_к$ = 1,5...3,0 В) спроектирован по схеме стабилизатора напряжения или содержит 1—2 пальчиковые батарейки.

Стабилизатор постоянного напряжения ($U_{стаб}$ = (+5 ± 0,25) В) *11* может быть выполнен, например, на базе интегральной микросхемы российского производства марки К142ЕН5А, К142ЕН8В или К1234ЕН3.

Оптический фильтр *19* изготовлен из полупрозрачного стекла.

Фокусирующая линза *20* может быть изготовлена, например, из высококачественного стекла.

Светочувствительный фотодатчик *36* спроектирован в виде фотоприёмной матрицы на базе высокочувствительного фотодиода, например, марки ФД256 или составного (трёхкаскадного) фототранзистора, например, на основе ФТ-К.

Блок оптического стабилизатора точного наведения и горизонтально-вертикального положения в пространстве *37* разработан на основе гироскопной технологии.

Блок самонаведения и удержания военно-гражданской цели по лазерному лучу в ИК-диапазоне электромагнитных волн *38* может быть изготовлен, например, на основе системы (головки) самонаведения переносных зенитно-ракетных комплексов.

Предлагаемое переговорное устройство работает следующим образом.

Сеанс связи в режиме радиомолчания и передачи закодированной информации и/или сообщения осуществляют в условиях только прямой электромагнитной связи в невидимой части спектра поперечных электромагнитных волн (чаще всего в ИК-диапазоне). За редким исключением можно использовать ультрафиолетовый (УФ) диапазон, который неприменим в озоновом слое атмосферы Земли из-за сильного поглощения волн озоном. Информационный сигнал может быть закодирован программой, являющейся основой программного комплекса радиомолчания «Луч», организационно собранного из компьютера (ЭВМ) *1* и монитора *2*, специальным военным кодером-шифровальщиком, и передаваться в блок входного трёхкаскадного усилителя НЧ *4*, в котором также может иметься входной предварительный усилитель видеосигналов, а также блок специального кодера цветного изображения. Необходимо помнить, что после установления современных операционных систем, например Windows-XP-7.0 version и выше или Linux в компьютер (ЭВМ) *1* следует последовательная инсталляция пакета специализированных программ из программного обеспечения «Луч». Следует иметь в виду, что военные лётчики, моряки и подводники вправе передавать свою отдельную информацию в виде НЧ-радиосигнала через обычный микрофон *3* (в случе заражения вирусом программного обеспечения, зависания или непредвиденного сбоя в автоматическом режиме и экстренного перевода программного комплекса «Луч» в ручной режим работы), который также передаётся в блок специального кодера-шифровальщика секретной информации, располагающегося в блоке предварительного входного усилителя НЧ *4*. Далее радиосигнал из блока предварительного входного усилителя НЧ *4* передаётся в блок оконечного двухтактного усилителя мощности (УМ) *5*, где он усиливается как аналоговый сигнал до своего максимально-номинального значения, и затем поступает в многоканальный блок АЦП—ЦАП *6* для преобразования в цифровой формат, необходимый для формирования импульсов управления и последующей их передачи через разделительный конденсатор *7* на управляющий электрод — затвор коммутирующего устройства-ключа *8*, выполненного, например, на основе полевого транзистора VT1. Между блоком многоканального АЦП—ЦАП *6* и ЭВМ (компьютером) *1* выполнена ОС для анализа и амплитудно-частотной коррекции выходных импульсов управления, позволяющая программному комплексу «Луч» оперативно регулировать тактовую частоту следования управляющих импульсов, поступающих из многоканального блока АЦП—ЦАП *6* на затвор коммутирующего устройства-ключа *8*. Переменный регулировочный резистор *9*, выполненный, например, на базе стандартного потенциометра, ограничивает предельное питание коммутирующего устройства-ключа VT1 *8* по току. Общее напряжение питания осуществляют от

источника постоянного напряжения *10*, например от бортового источника постоянного напряжения самолёта или корабля ($U_{борт.сети}$ = = 27 В), через понижающий трансформатор или автотрансформатор. Анализ и постоянный контроль нормальной работы переговорного устройства и номинального функционирования входящих в него основных узлов и блоков предусматривается осуществлять с помощью взаимной ОС основных блоков ($ОС_3$, $ОС_5$, $ОС_7$, $ОС_8$, $ОС_{10}$, $ОС_{11}$ и $ОС_{21}$) с программным комплексом «Луч», компьютером (ЭВМ) *1* и монитором *2*, через блок многоканального АЦП—ЦАП *6*.

В корпусе полупроводникового лазерного диода *12* устанавливают слева непрозрачный отражательный диск *13*, к которому справа монтируют верхнюю гетероструктуру на основе полупроводникового кристалла из арсенида галлия *14* и нижнюю гетероструктуру на основе полупроводникового кристалла из арсенида алюминия-галлия *15*. Между верхней *14* и нижней *15* гетероструктурами, каждая из которых состоит из отдельного полупроводникового кристалла, расположена промежуточная зона, состоящая из сверхтонкого среднего слоя *p—n*-перехода *16* лазерного диода. Анод *17* и катод *18* полупроводникового лазерного диода располагаются соответственно на верхней *14* и нижней *15* полупроводниковых гетероструктурах.

В едином корпусе полупроводникового лазерного диода размещают выходную оптическую систему на основе оптического фильтра из полупрозрачного стекла *19*, собирающей фокусирующей линзы *20*, а также регулируемого коллиматора *21* (устройства, необходимого для собирания и фокусировки расходящихся лучей фотонов в узкий параллельный главной, основной, оптической оси пучок фотонов); узкое отверстие, в котором находятся выходная оптическая система на основе собирающей фокусирующей микролинзы *22*, поглотитель и рассеиватель фотонов, движущихся не по прямой оптической линии, *23*, нерегулируемый, стационарный коллиматор *24*, через который испускается в открытое окружающее пространство монохроматический когерентный луч лазерного излучения *25*. Лазерный когерентный узконаправленный пучок фотонов имеет длину волны, близкую к так называемым «окнам прозрачности» в плотных слоях атмосферы, например $\lambda_в$ = = 955 нм. Он невидим для человеческого глаза и может быть обнаружен только с помощью специальной радиотехнической аппаратуры связи и точной нелинейной оптики. Частота этого лазерного излучения с закодированным секретным сообщением синхронизирована с тактовой частотой следования управляющих импульсов, поступающих на затвор коммутирующего устройства-ключа VT1 *8* из блока АЦП—ЦАП *6*. Интенсивность, инверсность, мощность и сила лазерного излучения сильно зависят от диапазона рабочих частот входного сигнала. Для повышения быстродействия и уменьшения времени задержки фронтов импульсов современные фототранзисторы чаще всего изготавливают на основе диодов Шоттки. На представленном рисунке тыльная сторона твёрдотельного лазера представляет собой непрозрачный, отражательный диск *27*. Узконаправленный когерентный поток фотонов *25* при бомбардировании атомно-кристаллической решётки кристалла твёрдотельного лазера *26* возбуждает в последнем интенсивное, лавинообразное движение собственных фотонов *28*, которые, отражаясь в структуре кристалла лазера от отражательного диска *27*, попадают в переднюю часть лазера — полупрозрачный затемнённый диск *29*. Модулированные низкочастотным закодированным сообщением фотоны *28*, проходя сквозь полупрозрачный диск *29*, фокусируются микролинзой *31* в геометрическом центре регулируемого коллиматора *32*. Частично отражённые от диска *29* фотоны *28* направляются в толщу атомно-молекулярной кристаллической решётки кристалла, снова попадают на отражательный диск *27* и движутся в сторону полупрозрачного диска *29*. Поглотителем и рассеивателем фотонов *28*, движущихся не по прямой оптической линии, является нерегулируемый стационарный коллиматор *33*, через который испускается в открытое, окружающее пространство монохроматический когерентный узконаправленный тончайший луч лазерного излучения *34*. Монохроматический когерентный луч лазерного излучения *25* доносит зашифрованную секретную информацию от лазерного передатчика (кристалла *26* твёрдотельного лазера *30*) до абонента в виде пульсирующих вспышек, которые регистрируются в форме светящегося в ИК-диапазоне пятна лазерной подсветки *35* на поверхности светочувствительного фотодатчика *36*, выполненного, например, в виде фотоприёмной матрицы на базе высокочувствительного фотодиода или составного (трёхкаскадного) фототранзистора.

Блок АЦП—ЦАП *6* является многоканальным преобразователем (translator) поступающих сигналов из аналогового формата в цифровой и обратно с последующей передачей в компьютер (ЭВМ) *1*, где программы по обработке входных данных в цифровом формате программного комплекса «Луч» проводят анализ, сравнение и амплитудно-частотную коррекцию импульсов управления для последующей передачи необходимых команд в третий канал — между блоком оптического стабилизатора точного наведения и горизонтально-вертикального положения в пространстве *37* лазерного передатчика и приёмником информации — абонентом связи.

Аналоговый сигнал поступает из оптического датчика регулируемого коллиматора *21* в блок самонаведения и удержания военно-гражданской цели по лазерному лучу в ИК-диапазоне электромагнитных волн *38*. Одновременно блок *38* получает команды внешней системы обнаружения и целеуказания, коррекции с помощью управляющих импульсов, поступающих из блока АЦП—ЦАП *6*.

Следует помнить, что полупроводниковый лазерный диод *12* последовательно запитывают от положительной клеммы питающего источника постоянного напряжения *10* через стабилизатор *11* на анод *17*, а его катод *18* — отрицательная клемма подсоединяется к истоку полевого транзистора VT1, представляющего собой коммутирующее устройство *8*. В результате указанных выше соединений полупроводниковый лазерный диод *12* и твёрдотельный лазер *30* начинают квазисинхронно (почти одновременно) мигать и излучать мощными импульсными вспышками, в такт с задающей тактовой частотой управляющих импульсов, поступающих из блока многоканального АЦП—ЦАП *6*.

В предлагаемом переговорном устройстве возможно использование трёх лазерных каналов связи в ближней зоне ИК-диапазона электромагнитных волн:

канала передачи закодированной информации с помощью лазерного луча от первого источника-передатчика ко второму приёмнику (1к);

канала приёма закодированной информации, поступающей при приёме лазерного луча от второго источника-передатчика к первому приёмнику (2к);

независимого, автономного канала оптической юстировки, точного наведения и соосности двух лазерных систем для постоянного обмена информацией в виде коротких импульсов, подтверждающих точные координаты взаимного расположения абонентов в пространстве, а также определения по системе кодирования и зашифрованного пароля «свой—чужой» наличия вражеского самолёта, беспилотного летательного аппарата или иного воздушного судна в отечественном воздушном пространстве (3к).

Между блоком оптического стабилизатора точного наведения и горизонтально-вертикального положения в пространстве *37*, выполненным на основе гироскопной технологии, компьютером (ЭВМ) *1* с программным комплексом «Луч» и монитором *2* обеспечивается постоянно действующая связь путём преобразования аналогового сигнала в цифровой формат и обратно через интерфейсный тип соединений. Компьютер (ЭВМ) *1* с активным применением программного комплекса «Луч» и монитора осуществляет постоянный мониторинговый контроль и визуальную коррекцию поступающей видео- и аудиоинформации в форме потока закодированных импульсов с определёнными последовательностью, амплитудой и частотой следования. При таких условиях оптическая связь наиболее эффективна, качественна и надёжна, без существенных искажений и затуханий, т. е. монохроматический когерентный луч *34* твёрдотельного лазера *30* точно попадает на светопоглощающую поверхность и специальные зачернённые стёкла светочувствительного фотодатчика *36* с достаточно высокой степенью черноты и крайне низкой возможностью отражения лазерного луча обратно в окружающее пространство. При этом свечение и подсветка траектории движения лазерного луча от источника (кристалла *26* твёрдотельного лазера *30*) до фотоприёмной матрицы светочувствительного фотодатчика *36*, выполненного, например, на базе высокочувствительного составного фототранзистора, не подсвечиваются в воздушном и водном пространствах.

Выводы

1. Предложен технологически реализуемый лазерный способ передачи и приёма закодированной информации между экипажами самолётов, вертолётов, надводных кораблей и подводных лодок в режиме радиомолчания с использованием твёрдотельного лазера с накачкой управляющим лазерным диодом.

2. Предложена апробированная модель применения мобильного переговорного устройства в оптическом диапазоне в режиме радиомолчания для более эффективной защиты и обеспечения надёжной скрытности проведения сеансов связи при приёме или передаче закодированной секретной информации.

3. Разработанное устройство способно передавать и принимать на борт самолётов, вертолётов, надводных кораблей и подводных лодок закодированную секретную информацию в режиме радиомолчания с использованием в качестве несущей частоты частоты генерации твёрдотельного лазера и лазерного диода.

4. В разработанной модели мобильной атмосферной лазерной связи используются относительно недорогие марки твёрдотельных лазеров и лазерных диодов отечественного производства.

5. Представленный вариант мобильного переговорного устройства более энергосберегающий по сравнению с приведённым в работе [1] вариантом, где в качестве средства накачки и возбуждения твёрдотельного лазера используется мощный светодиод.

6. В отличие от варианта, в основу которого положено применение твёрдотельного лазера с оптической поперечной накачкой с использованием мощного светодиода [1], в предлагаемой конструкции мобильного переговорного устройства применён полупроводниковый лазерный диод на базе двойной гетероструктуры (например, на основе арсенида галлия и арсенида алюминия-галлия) в качестве средства накачки и синхронного возбуждения твёрдотельного лазера. Это позволило добиться более стабильной и надёжной атмосферной лазерной связи, в отличие от первого варианта [1], который более инерционен в вопросах передачи и приёма закодированной информации.

7. Переговорное устройство отличается от предшествующих модификацией [1, 2] тем, что для более эффективной накачки и возбуждения твёрдотельного лазера используется полупроводниковый компактный, надёжный, лёгко управляемый лазерный диод VD1, а не мощный светодиод, в котором значительная часть энергии тратится на побочный нагрев корпуса системы и окружающей среды. При предложенном способе уверенной передачи и качественного приёма закодированной информации увеличивается практическая дальность лазерной связи с 5 до 20 км. Второй вариант [2] предполагает устойчивую связь лишь до 10 км.

Библиографические ссылки

1. **Григорьев-Фридман С.Н.** Мобильное переговорное устройство в оптическом диапазоне в режиме радиомолчания // Автоматизация. Современные технологии. № 12. 2016. С. 6—14.

2. **Григорьев-Фридман С.Н.** Мобильное переговорное устройство на базе лазерного диода // Автоматизация. Современные технологии. № 12. 2017. С. 552—559.

3. **Мальцев Г.Н., Буриков С.В.** Бортовое передающее устройство лазерной системы передачи информации // Патент России № 2365007 C1. 2009. Бюл. № 23.

4. **Крюкова И.В., Мармалюк А.А., Матвеенко Е.В.** и др. Перспективные полупроводниковые лазеры с мощностью излучения до 200 мВт для межспутниковых оптических линий связи // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2002. № 3. С. 18—35.

5. **Крюкова И.В., Белов М.Л., Осипов А.В., Чуковский Н.Н.** Расчёт энергетических параметров лазерных излучателей для межспутниковых оптических линий связи и линий связи Земля—спутник—Земля // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2002. № 3. С. 34—44.

6. **Крюкова И.В., Чуковский Н.Н.** Проблемы создания аппаратуры для межспутниковых и атмосферных оптических линий связи // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2007. № 1. С. 9—23.

7. **Широбакин С.Е., Крюкова И.В., Чуковский Н.Н., Танаев Г.Ю.** Новая концепция построения бортовой аппаратуры межспутниковых оптических линий связи // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2008. № 2. С. 122—127.

8. **Крюкова И.В.** Физические процессы в полупроводниковых импульсных лазерах с накачкой электронными пучками. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 443 с.

9. **Диязитдинов Р.Р.** Системы связи с подвижными объектами: Конспект лекций для студентов вузов России. Самара, ПГУТИ, 2013. 204 с.

10. **Милинкис Б.М., Петров В.М.** Атмосферная лазерная связь. Информост // Радиоэлектроника и телекоммуникации. 2001. № 5 (18). С. 22—28.

11. **Милинкис Б.М.** Лазерная линия связи // Патент России № 2233549 C1. 2004. Бюл. № 21.

12. **Сапрунов А.С., Толстых Н.Н.** Система лазерной связи с подвижными объектами // Патент России № 2197066. 2003. Бюл. № 2.

13. **Айрапетян В.С., Ушаков О.К.** Физика лазеров: Учеб. пособие для вузов России. Новосибирск, СГГА, 2012. 134 с.

14. **Пратт В.К.** Лазерные системы связи / Пер. с англ. М.: Связь, 1972. С. 14—19.

15. **Звелто О.** Принципы лазеров / Пер. с англ. М.: Мир, 1990. 558 с.

16. **Мэйтленд А., Дан М.** Введение в физику лазеров / Пер. с англ. М.: Наука, 1978. 407 с.

Ссылка для цитирования

Григорьев-Фридман С.Н. Мобильное переговорное устройство на базе твёрдотельного лазера с накачкой лазерным диодом // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 5. С. 216—222.

УДК 681.513

К.А. Неусыпин, д-р техн. наук, проф., **М.С. Селезнева, Кай Шэнь, Пьо Си Тху**
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

shenkaichn@mail.ru

РАЗРАБОТКА ЧИСЛЕННОГО КРИТЕРИЯ СТЕПЕНИ ИДЕНТИФИЦИРУЕМОСТИ ПАРАМЕТРОВ НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ АТМОСФЕРНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Исследована проблема идентификации нелинейных систем. Рассмотрены критерии наблюдаемости и идентифицируемости нелинейных систем, выявлены их недостатки. Разработан численный критерий степени идентифицируемости параметров нелинейной модели одного класса, базирующийся на SDC-представлении нелинейной модели.

Ключевые слова: нелинейная система; State Dependent Coefficient; SDC-представление; критерий степени идентифицируемости; качество идентифицируемости.

The problem of nonlinear systems identification is investigated. The criteria of observability and identifiability for nonlinear systems are considered, their shortcomings are revealed. A numerical criterion of the parameters identifiability degree for a nonlinear model of one class, based on the SDC representation of the nonlinear model is developed.

Keywords: nonlinear system; State Dependent Coefficient; SDC representation; a criterion for the degree of identifiability; quality of identifiability.

Введение. Теория идентификации [1] нелинейных систем, впервые сформулированная в начале XX в., применяется для решения широкого круга нелинейных задач, описывающих большинство сложных процессов. В качестве основной трудности решения проблемы идентификации можно назвать необходимость обработки большой базы данных, характеризующей работу идентифицируемой системы.

Для аэродинамического объекта, например, летательного аппарата (ЛА), совершающего полёт в атмосфере, ставится задача по высокоточному управлению и прежде всего по обеспечению заданных терминальных условий движения центра масс ЛА с необходимой точностью [2]. Эти цели достигаются путём реализации современных подходов при разработке ЛА, системы управления (СУ) и соответствующего математического обеспечения.

Особый интерес представляют ЛА с автономной СУ либо с комбинированными системами. Для таких объектов, совершающих длительный полёт, к моменту достижения конечного участка (КУ) «накапливаемые» навигационные ошибки, а также погрешности метода наведения на КУ не позволяют обеспечить с необходимой точностью требуемые терминальные параметры движения ЛА.

Одним из источников появления ошибок в процессе наведения являются погрешности в определении аэродинамических характеристик ЛА, которые проявляются прежде всего через ошибки прогноза параметров движения ЛА. Возникает необходимость в более точном знании аэродинамических и других характеристик ЛА, в том числе навигационных параметров движения. Это может быть необходимо для совершенствования алгоритма управления по максимуму аэродинамического качества, в том числе и при замене реального «качания» объекта на модельное.

Решение задач по идентификации ряда параметров ЛА, уточнению характеристик движения ЛА на атмосферном КУ движения необходимо обеспечить в процессе полёта ЛА. Большой практический интерес вызывают методы решения этой задачи автономным образом, т. е. с использованием измерений инерциального типа и различного рода априорной информации (характеристики атмосферы, скорость ветра, аэродинамические характеристики ЛА и др.). Очевидно, что для практического решения задачи необходимо получить уравнения, которые описывают взаимосвязь уточняемых в процессе полёта ЛА параметров движения (навигационных погрешностей), разбросов па-

раметрических характеристик ЛА (в том числе аэродинамических, массовых, центровочных характеристик, характеристик органов управления и т. п.), разбросов плотности атмосферы, скорости ветра, ошибок приборов инерциального типа и др.

Описание таких связей в основном является нелинейным. В этом случае уравнения объекта имеют явно выраженный нелинейный характер. Поэтому для определения степени идентифицируемости параметров нелинейных моделей динамических систем необходимо разработать новый критерий.

Критерии наблюдаемости и идентифицируемости нелинейных систем. Пусть модель навигационных погрешностей ЛА описывается системой векторных дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} &\frac{d}{dt}x(t) = f(t,x) + g(t,x)w(t), \;\; x(t_0) = x_0; \\ &y(t) = h(t,x) + v(t); \\ &f,\, g : T \times \Omega_x \to R^n, \;\; h : T \times \Omega_x \to R^m; \\ &(t,x) \to f(t,x),\, g(t,x),\, h(t,x), \end{aligned} \tag{1}$$

где T — интервал $[t_0, t_1]$; $x(t) \in \Omega_x$; Ω_x — область (открытое связанное множество) R^n, содержащая начало; $x \in R^n$ — состояние системы; $x_0 \in \Omega_x$; $w \in R^n$ — входное возмущение; $y \in R^m$, $m \leqslant n$ — измерение системы; $v \in R^m$ — измерительный шум; $f(t, x)$, $g(t, x)$, $h(t, x)$ — действительные и непрерывные матрицы.

Представим систему (1) в эквивалентном виде: модель имеет структуру линейных дифференциальных уравнений с параметрами, которые зависят от состояния. Такое представление называют «расширенной линеаризацией» или «параметризацией состояния системы» (State Dependent Coefficient, SDC-представление) [3]. Преобразованная с помощью метода SDC-представления система уравнений (1) имеет вид

$$\begin{aligned} &\frac{d}{dt}\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}(t,\mathbf{x})\mathbf{x}(t) + \mathbf{G}(t,\mathbf{x})\mathbf{w}(t), \;\; \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0; \\ &\mathbf{y}(t) = \mathbf{H}(t,\mathbf{x})\,\mathbf{x}(t) + \mathbf{v}(t), \end{aligned} \tag{2}$$

где $\mathbf{A}(\cdot)$, $\mathbf{G}(\cdot)$, $\mathbf{H}(\cdot)$ — матрицы действительных переменных.

SDC-представление нелинейной системы (2) является наблюдаемым в области $T \times \Omega_x$, если пара $\langle \mathbf{A}(t,\mathbf{x})\ \mathbf{H}(t,\mathbf{x}) \rangle$ наблюдаема в линейном смысле для $(t,\mathbf{x}) \in T \times \Omega_x$, т. е.

$$\begin{aligned} &\operatorname{rank}\left[\mathbf{O}(t,\mathbf{x})\right] = \operatorname{rank}[\mathbf{H}^T(t,\mathbf{x}), \\ &\mathbf{H}^T(t,\mathbf{x})\mathbf{A}^T(t,\mathbf{x}), \ldots, \mathbf{H}^T(t,\mathbf{x})\mathbf{A}^T(t,\mathbf{x})^{n-1}] = n. \end{aligned} \tag{3}$$

Приведённый критерий аналогичен критерию наблюдаемости Калмана [4] для линейных систем.

После SDC-представления система (2) называется вполне идентифицируемой в начальный момент t_0 на заданном отрезке времени идентификации, когда ей в соответствие может быть поставлена только одна стационарная система, близкая к исходной в смысле минимума квадрата нормы разности векторов их фазовых скоростей, т. е.

$$\begin{aligned} &\int_{t_0}^{t_1} \left[\mathbf{A}(t,\mathbf{x})\mathbf{x}(t) - \mathbf{A}\mathbf{x}(t)\right]^T \times \\ &\times \left[\mathbf{A}(t,\mathbf{x})\mathbf{x}(t) - \mathbf{A}\mathbf{x}(t)\right] dt \to \min. \end{aligned} \tag{4}$$

Для оценки свойств линейных нестационарных систем Калман ввёл грамиан идентифицируемости [5]

$$\mathbf{\Gamma}_0 = \int_{t_0}^{t_1} \left[\mathbf{\Phi}(t,t_0,\mathbf{x})\mathbf{x}(t_0)\mathbf{x}(t_0)^T \mathbf{\Phi}(t,t_0,\mathbf{x})^T\right]^T dt, \tag{5}$$

где $\mathbf{\Phi}(t, t_0, \mathbf{x})$ — переходная матрица системы.

Динамическая система идентифицируема тогда и только тогда, когда матрица $\mathbf{\Gamma}_0$ (грамиан идентифицируемости) положительно определена.

Следует отметить, что задачи исследования наблюдаемости и идентифицируемости систем вида (2), т. е. систем с параметрами, зависящими от состояния, общего конструктивного решения в настоящее время не имеют. При исследовании подобных систем можно ограничиться проверкой выполнения условий наблюдаемости «поточечно», т. е. для линеаризованной системы в окрестности исследуемого состояния.

На практике для удобства обработки информации часто используется дискретная форма системы, в которой SDC-представление нелинейной системы (2) имеет вид

$$\begin{aligned} &\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{\Phi}(t_k,\mathbf{x}_k)\mathbf{x}_k + \mathbf{G}(t_k,\mathbf{x}_k)\mathbf{w}_k; \\ &\mathbf{y}_{k+1} = \mathbf{H}(t_{k+1},\mathbf{x}_{k+1})\,\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_{k+1}. \end{aligned} \tag{6}$$

Предполагается, что $\mathbf{w}_k$ и $\mathbf{v}_{k+1}$ являются гауссовскими «белыми» некоррелированными шумами, причём для любых значений j и k, v_j и w_k некоррелированы между собой, т. е. $M\left[\mathbf{v}_j\mathbf{w}_k^T\right] = 0$.

После проведения n измерений выражение $\mathbf{y}_{k+1}$ для вектора состояния имеет вид

$$\begin{gathered}\mathbf{y}_k = \mathbf{H}(t_k, \mathbf{x}_k)\,\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k;\\ \mathbf{y}_{k+1} = \mathbf{H}(t_{k+1}, \mathbf{x}_{k+1})\,\mathbf{\Phi}(t_k, \mathbf{x}_k)\mathbf{x}_k + \mathbf{H}(t_{k+1}, \mathbf{x}_{k+1})\mathbf{w}_k + \mathbf{v}_{k+1};\\ \ldots\\ \mathbf{y}_{k+n-1} = \mathbf{H}(t_{k+n-1}, \mathbf{x}_{k+n-1})\mathbf{\Phi}(t_{k+n-2}, \mathbf{x}_{k+n-2})\ldots\mathbf{\Phi}(t_k, \mathbf{x}_k)\mathbf{x}_k +\\ + \mathbf{H}(t_{k+n-1}, \mathbf{x}_{k+n-1})\mathbf{\Phi}(t_{k+n-2}, \mathbf{x}_{k+n-2})\ldots\mathbf{\Phi}(t_{k+1}, \mathbf{x}_{k+1})\mathbf{w}_k +\\ +\ldots + \mathbf{H}(t_{k+n-1}, \mathbf{x}_{k+n-1})\mathbf{w}_{k+n-2} + \mathbf{v}_{k+n-1}.\end{gathered} \tag{7}$$

В матричной форме

$$\mathbf{y}_k^* = \mathbf{O}_k^*\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k^*, \tag{8}$$

где $\mathbf{y}_k^* = \begin{bmatrix}\mathbf{y}_k\\ \mathbf{y}_{k+1}\\ \ldots\\ \mathbf{y}_{k+n-1}\end{bmatrix}$;

$$\mathbf{O}_k^* = \begin{bmatrix}\mathbf{H}(t_k, \mathbf{x}_k)\\ \mathbf{H}(t_{k+1}, \mathbf{x}_{k+1})\,\mathbf{\Phi}(t_k, \mathbf{x}_k)\\ \ldots\\ \mathbf{H}(t_{k+n-1}, \mathbf{x}_{k+n-1})\,\mathbf{\Phi}(t_{k+n-2}, \mathbf{x}_{k+n-2})\ldots\mathbf{\Phi}(t_k, \mathbf{x}_k)\end{bmatrix};$$

$$\mathbf{v}_k^* = \begin{bmatrix}\mathbf{v}_k\\ \mathbf{H}(t_{k+1}, \mathbf{x}_{k+1})\mathbf{w}_k + \mathbf{v}_{k+1}\\ \ldots\\ \mathbf{H}(t_{k+n-1}, \mathbf{x}_{k+n-1})\mathbf{\Phi}(t_{k+n-2}, \mathbf{x}_{k+n-2})\ldots\\ \ldots\mathbf{\Phi}(t_{k+1}, \mathbf{x}_{k+1})\mathbf{w}_k + \ldots +\\ + \mathbf{H}(t_{k+n-1}, \mathbf{x}_{k+n-1})\mathbf{w}_{k+n-2} + \mathbf{v}_{k+n-1}\end{bmatrix};$$

векторы $\mathbf{y}_k^*$, $\mathbf{v}_k^*$ и матрица $\mathbf{O}_k^*$ включают параметры, которые зависят от состояния.

Матрица $\mathbf{O}_k^*$ в формуле (6) для нелинейных объектов является матрицей наблюдаемости. В соответствии с критерием (3), система (4) является наблюдаемой, если $\operatorname{rank}\left[\mathbf{O}_k^*\right] = n$, т. е. все столбцы в матрице $\mathbf{O}_k^*$ являются линейно независимыми.

В практических приложениях часто помимо принципиальной возможности необходимо идентифицировать параметры матрицы модели исследуемого процесса, иметь информацию о качестве идентификации. Под качественными характеристиками процесса идентификации будем понимать интервал времени, за который можно идентифицировать параметр с заданной точностью, и возможную достижимую точность определения параметра. Для линейных стационарных и нестационарных систем разработаны численные критерии степени идентифицируемости [6, 7]. При описании динамического объекта нелинейными уравнениями для вычисления степени параметрической идентифицируемости используют различные подходы линеаризации исследуемой модели [3, 8]. Однако при проведении процедуры линеаризации точность представления динамического объекта существенно снижается, за исключением некоторых случаев, когда линеаризация осуществляется без потери точности [9]. В связи с этим целесообразно разработать критерий степени идентифицируемости параметров нелинейных моделей.

Разработка численного критерия степени идентифицируемости параметров нелинейных моделей одного класса. Известные критерии степени идентифицируемости [5—7] предполагают анализ объектов, описываемых линейными уравнениями. Однако часто встречаются случаи, когда уравнения объекта имеют явно выраженный нелинейный характер. Для определения степени идентифицируемости параметров нелинейных моделей динамических систем критерий необходимо модифицировать.

Пусть уравнение объекта в SDC-представлении и уравнение измерений имеют вид (6). В этом случае вектор состояния $\mathbf{x}_{k+n}$ можно выразить его значением в начальный момент $\mathbf{x}_k$ в виде

$$\begin{gathered}\mathbf{x}_{k+n} = \mathbf{\Phi}(t_{k+n-1}, \mathbf{x}_{k+n-1})\ldots\mathbf{\Phi}(t_k, \mathbf{x}_k)\mathbf{x}_k +\\ + \mathbf{\Phi}(t_{k+n-1}, \mathbf{x}_{k+n-1})\ldots\mathbf{\Phi}(t_{k+1}, \mathbf{x}_{k+1})\mathbf{G}(t_k, \mathbf{x}_k)\mathbf{w}_k +\\ +\ldots + \mathbf{G}(t_{k+n-1}, \mathbf{x}_{k+n-1})\mathbf{w}_{k+n-1}.\end{gathered} \tag{9}$$

Подставив выражение для $\mathbf{x}_{k+n}$ в уравнение измерений $\mathbf{y}_{k+n}$, получим

$$\begin{gathered}\mathbf{y}_{k+n} = \mathbf{H}_{k+n}\mathbf{\Phi}(t_{k+n-1}, \mathbf{x}_{k+n-1})\ldots\mathbf{\Phi}(t_k, \mathbf{x}_k)\mathbf{x}_k +\\ + \mathbf{H}_{k+n}\mathbf{\Phi}(t_{k+n-1}, \mathbf{x}_{k+n-1})\ldots\\ \ldots\mathbf{\Phi}(t_{k+1}, \mathbf{x}_{k+1})\mathbf{G}(t_k, \mathbf{x}_k)\mathbf{w}_k +\\ +\ldots + \mathbf{H}_{k+n}\mathbf{G}(t_{k+n-1}, \mathbf{x}_{k+n-1})\mathbf{w}_{k+n-1} + \mathbf{v}_{k+n}.\end{gathered} \tag{10}$$

Подставив в это уравнение выражение $\mathbf{x}_k$, получим

$$\begin{gathered}\mathbf{y}_{k+n} = \mathbf{H}_{k+n}\mathbf{\Phi}(t_{k+n-1}, \mathbf{x}_{k+n-1})\ldots\mathbf{\Phi}(t_k, \mathbf{x}_k)\mathbf{O}_k^+\mathbf{y}_k^* -\\ - \mathbf{H}_{k+n}\mathbf{\Phi}(t_{k+n-1}, \mathbf{x}_{k+n-1})\ldots\mathbf{\Phi}(t_k, \mathbf{x}_k)\mathbf{O}_k^+\mathbf{v}_k^* +\\ + \mathbf{H}_{k+n}\mathbf{\Phi}(t_{k+n-1}, \mathbf{x}_{k+n-1})\ldots\\ \ldots\mathbf{\Phi}(t_{k+1}, \mathbf{x}_{k+1})\mathbf{G}(t_k, \mathbf{x}_k)\mathbf{w}_k +\\ +\ldots + \mathbf{H}_{k+n}\mathbf{G}(t_{k+n-1}, \mathbf{x}_{k+n-1})\mathbf{w}_{k+n-1} + \mathbf{v}_{k+n},\end{gathered} \tag{11}$$

где $\mathbf{O}_k^+ = \left[\mathbf{O}_k^{*T}\mathbf{O}_k^*\right]^{-1}\mathbf{O}_k^{*T}$ — псевдообратная матрица $\mathbf{O}_k^*$.

Введём следующие обозначения:

$$\begin{gathered}\begin{bmatrix}\lambda_{1,k} & \lambda_{2,k} & \ldots & \lambda_{n,k}\end{bmatrix} =\\ = \mathbf{H}_{k+n}\mathbf{\Phi}(t_{k+n-1}, \mathbf{x}_{k+n-1})\ldots\mathbf{\Phi}(t_k, \mathbf{x}_k)\mathbf{O}_k^+.\end{gathered} \tag{12}$$

Тогда

$$\begin{aligned}\mathbf{v}_k^0 &= \gamma_{1,k}\mathbf{w}_k + \gamma_{2,k}\mathbf{w}_{k+1} + \ldots + \gamma_{n,k}\mathbf{w}_{k+n-1} - \\ &- \lambda_{1,k}\mathbf{v}_k - \lambda_{2,k}\mathbf{v}_{k+1} - \ldots - \lambda_{n,k}\mathbf{v}_{k+n-1} + \mathbf{v}_{k+n} = \\ &= \mathbf{H}_{k+n}\mathbf{\Phi}(t_{k+n-1}, \mathbf{x}_{k+n-1})\ldots\mathbf{\Phi}(t_k, \mathbf{x}_k)\mathbf{O}_k^+\mathbf{v}_k^* + \\ &+ \ldots + \mathbf{H}_{k+n}\mathbf{G}(t_{k+n-1}, \mathbf{x}_{k+n-1})\mathbf{w}_{k+n-1} + \mathbf{v}_{k+n}.\end{aligned} \tag{13}$$

В этом случае постановка задачи сводится к определению неизвестных нестационарных элементов вектора-столбца $[\lambda_{1,k}\ \lambda_{2,k}\ \ldots\ \lambda_{n,k}]$ по вновь сформированным измерениям [7], т. е.

$$\begin{aligned}\lambda_{1,k} &= f_{1,k}\left(y_k, \ldots, y_{k+2n-1}\right) + v_k^{00}; \\ \lambda_{2,k} &= f_{2,k}\left(y_k, \ldots, y_{k+2n-1}\right) + v_{k+1}^{00}; \\ &\ldots \\ \lambda_{n,k} &= f_{n,k}\left(y_k, \ldots, y_{k+2n-1}\right) + v_{k+n-1}^{00},\end{aligned} \tag{14}$$

где

$$\begin{bmatrix} f_{1,k}\left(y_k, \ldots, y_{k+2n-1}\right) \\ f_{2,k}\left(y_k, \ldots, y_{k+2n-1}\right) \\ \ldots \\ f_{n,k}\left(y_k, \ldots, y_{k+2n-1}\right) \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} y_k & y_{k+1} & \cdots & y_{k+n-1} \\ y_{k+1} & y_{k+2} & \cdots & y_{k+n} \\ & & \cdots & \\ y_{k+n-1} & y_{k+n} & \cdots & y_{k+2n-2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} y_{k+n} \\ y_{k+n+1} \\ \ldots \\ y_{k+2n-1} \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} v_k^{00} \\ v_{k+1}^{00} \\ \ldots \\ v_{k+n-1}^{00} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_k & y_{k+1} & \cdots & y_{k+n-1} \\ y_{k+1} & y_{k+2} & \cdots & y_{k+n} \\ & & \cdots & \\ y_{k+n-1} & y_{k+n} & \cdots & y_{k+2n-2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v_k^0 \\ v_{k+1}^0 \\ \ldots \\ v_{k+n-1}^0 \end{bmatrix}.$$

Поэтому критерий степени идентифицируемости параметров модели динамических нестационарных систем имеет вид

$$DI_{Nk}^i = \frac{E\left[(\lambda_{i,k})^2\right]R_0}{E\left[(y_{i,k})^2\right]\widehat{R}_k^i}, \tag{15}$$

где $E[(\lambda_{i,k})^2]$ — дисперсия произвольной i-й компоненты вектора параметров λ; $E[(y_{i,k})^2]$ — дисперсия непосредственно измеряемого вектора состояния; R_0 — дисперсия исходного измерительного шума; $\widehat{R}_k^i$ — дисперсия приведённого измерительного шума.

Таким образом, формализованная зависимость (15) используется для определения степени идентифицируемости параметров матрицы $\mathbf{\Phi}(t_k, \mathbf{x}_k)$.

Дисперсия исходного измерительного шума определяется из практических соображений в соответствии с режимом работы измерительной системы или принимается значение из паспорта измерительного прибора. Определённые сложности возникают при вычислении приведённого измерительного шума. Однако при использовании адаптивного алгоритма оценивания дисперсия приведённого измерительного шума вычисляется на каждом шаге функционирования алгоритма. Качество идентификации или эффективности идентификации определяется максимально достижимой точностью идентификации и необходимым временем достижения заданной точности идентификации.

Разработанный численный критерий степени идентифицируемости имеет ясный физический смысл, отличается простотой, удобен в практических приложениях и позволяет вычислять качество идентификации параметров в виде скаляра.

Интуитивно ясно, что имеется связь [5—7] между степенью наблюдаемости и степенью идентифицируемости, но для получения формализованных зависимостей в явном виде требуются дополнительные исследования. Систематизация результатов подобных исследований существенно дополняет теорию качественного анализа систем [7, 8].

Заключение. Разработан численный критерий степени идентифицируемости параметров нелинейных моделей динамических систем. Применение критерия справедливо для нелинейных систем, представляемых с помощью SDC-метода. Таким образом, критерий позволяет определить степень идентифицируемости параметров матрицы модели одного класса нелинейных систем.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-8-00522), на основании Госзадания Минобрнауки России (проект № 2.7486.2017/БЧ) и the Programme of Introducing Talents of Discipline to Universities in P.R. China («Программа 111», No. B 16025).

Библиографические ссылки

1. **Эйкхофф П.** Основы идентификации систем управления. М.: Мир, 1975. 680 с.

2. **Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Цибизова Т.Ю.** Системы управления летательными аппаратами и алгоритмы обработки информации. М.: Изд-во МГОУ, 2006. 235 с.

3. **Афанасьев В.Н.** Управление нелинейными неопределенными динамическими объектами. М.: Либроком/URSS, 2015. 224 с.

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

5. **Балонин Н.А.** Теоремы идентифицируемости. СПб.: Политехника, 2010. 48 с.

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

7. **Шэнь Кай, Неусыпин К.А.** Исследование критериев степеней наблюдаемости, управляемости и идентифицируемости линейных динамических систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. № 11. С. 723—731.

8. **Афанасьев В.Н., Колмановский В.Б., Носов В.Р.** Математическая теория конструирования систем управления. М.: Высшая школа, 2003. 614 с.

9. **Неусыпин К.А., Кэ Фан, Дзя Л.С.** Управление и наведение ракет, основанное на теории дифференциальной геометрии // Автоматизация и современные технологии. 2012. № 1. С. 16—20.

Ссылка для цитирования

Неусыпин К.А., Селезнева М.С., Кай Шэнь, Пьо Си Тху. Разработка численного критерия степени идентифицируемости параметров нелинейной модели атмосферных летательных аппаратов // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 5. С. 223—227.

УДК 629.735.33.015.3.025.38

Г.Т. Андреев, А.А. Ершов, О.В. Павленко, канд. техн. наук
(Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, г. Жуковский)

olga.v.pavlenko@yandex.ru

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К УМЕНЬШЕНИЮ ШАРНИРНЫХ МОМЕНТОВ ОРГАНОВ УПРАВЛЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Рассмотрены способы уменьшения величины коэффициента шарнирного момента элерона лёгкого транспортного самолёта (ЛТС). Численное исследование проведено по программе, основанной на численном решении осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье—Стокса.

Ключевые слова: шарнирные моменты; элерон; расчётные и экспериментальные исследования.

Methods for reducing the value of the jointed moment coefficient for the light-transport aircraft (LTS) aileron are considered. A numerical study was carried out according to a program based on a numerical solution of the Navier—Stokes equations averaged over the Reynolds.

Keywords: jointed moments; aileron; calculated and experimental studies.

Введение. При управлении летательным аппаратом большое значение имеют величины шарнирных моментов органов управления, так как от их величины зависит мощность и габариты бустерной системы. Но наибольшую проблему они представляют для пилотов самолётов с ручным управлением, когда их величина определяет усилия пилота на ручке (штурвале) управления рулевой поверхностью. Величина шарнирного момента зависит от многих параметров: формы профиля и угла его схода, угла стреловидности несущей поверхности, угла стреловидности органа управления, его относительного размаха и хорды рулевой поверхности и т. д. При неизменном значении коэффициента шарнирного момента его размерная величина возрастает с увеличением скоростного напора, размера рулевой поверхности и скорости набегающего потока.

Возможны случаи, когда шарнирный момент поверхности управления настолько велик, что требуется мощный бустер, габариты которого не позволяют установить его в месте расположения поверхности управления из-за малой толщины профиля крыла. Тогда можно использовать предложенные в статье некоторые способы уменьшения шарнирного момента.

Следует отметить, что для самолётов с ручным управлением при выборе осевой компенсации необходим комплексный подход к выбору оптимальной величины шарнирного момента, когда нужно учитывать его эффективность, технологичность и экономичность выбранного метода уменьшения шарнирного момента.

Для уменьшения шарнирных моментов органов управления проводятся экспериментальные и численные исследования.

В Центральном аэрогидродинамическом институте (ЦАГИ) шарнирные моменты органов управления определяются при испытаниях моделей летательных аппаратов и их частей в аэродинамических трубах (АДТ). На основе

обширной базы экспериментальных параметрических исследований различных моделей летательных аппаратов был создан справочник «Аэродинамические компенсации шарнирных моментов рулевых поверхностей самолётов с ручным управлением» [1].

Описание модели и условий проведения эксперимента. Для проведения эксперимента шарнирных моментов крыла ЛТС в АДТ Т-102 была изготовлена модель полукрыла с шайбой в масштабе 1:6, которая показана на рис. 1.

Модель полукрыла имеет площадь S = = 0,814 м^2 и размах l = 2 м (до шайбы). Угол стреловидности полукрыла по линии 1/4 хорд $\chi_{1/4}$ = 2,6°, удлинение λ = 5,11, сужение η = 2,05. Полукрыло скомпоновано из профиля П-308 с относительной толщиной $\bar{c}$ = 0,155...0,13 от бортовой до концевой хорды. Угол заклинения бортового сечения φ = 0. В бортовом сечении крыла установлена шайба.

Модель испытывали на ленточной подвеске в трубном положении с поперечной базой L_z = 1,2 м и продольной базой L_x = 0,6 м. Углы атаки модели отсчитывали относительно хорды контрольного сечения крыла, расположенного на расстоянии $Z_{кс}$ = 0,11 м от шайбы.

На модели полукрыла был выполнен однозвенный двухсекционный отклоняемый закрылок с дефлектором и элероном. Осевая компенсация элерона — «Эллипс-100» с относительной площадью $\bar{S}_{ок} = 0,32$.

При расчёте коэффициента шарнирного момента элерона за характерные размеры принимались его площадь за осью вращения и средняя аэродинамическая хорда за осью вращения по перпендикуляру к оси вращения: $S'_э$ = 0,04584 м^2, $b'_{Аэ}$ = 0,07244 м.

Эксперимент проведён при M = 0,147 (V = = 50 м/с) и Re = 1,5·10^6.

Проведение численных исследований. Расчётные исследования позволяют дополнить данные эксперимента, объяснить некоторые особенности обтекания модели и сократить число испытаний в аэродинамической трубе за счёт предварительной оценки нагрузки на рулевые поверхности [2, 3].

В данной работе по программе ANSYS FLUENT (лицензия № 501024), основанной на численном решении уравнений Навье—Стокса, проведено численное исследование некоторых возможных способов уменьшения величины шарнирного момента элерона лёгкого транспортного самолёта. Структурированные расчётные сетки построены с использованием программы ANSYS ICEM CFD и содержат около 7 млн шестигранных ячеек. Расчёт выполнен на модели полукрыла с шайбой в масштабе 1:6, в условиях эксперимента в АДТ Т-102 при скорости потока V = 50 м/с (M = 0,147) и Re = 1,5·10^6.

В результате численного исследования предложены следующие способы уменьшения шарнирного момента элерона:

уменьшение подрезки профиля элерона в его хвостовой части (в районе его средней аэродинамической хорды — САХ);

изменение формы аэродинамической компенсации носовой части элерона «Эллипс-100» на «Параболу-100»;

увеличение площади осевой компенсации путём сдвига оси вниз по потоку.

Геометрические данные расчётной модели. Модель крыла для расчёта была выполнена с шайбой и элероном (рис. 2). В целом она полностью соответствует экспериментальной

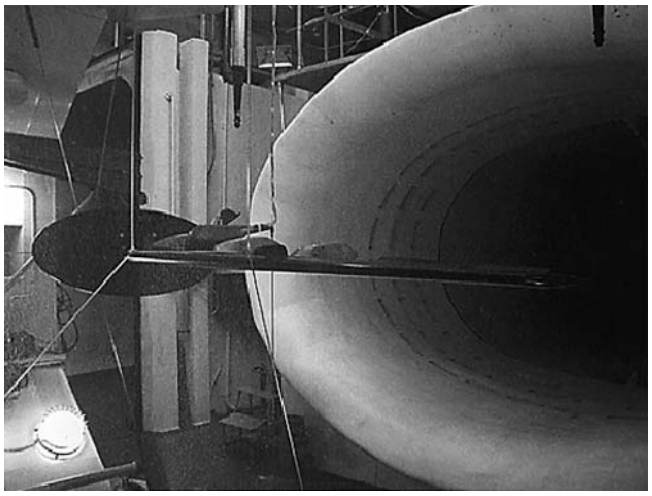


Рис. 1. Аэродинамическая модель полукрыла в АДТ Т-102

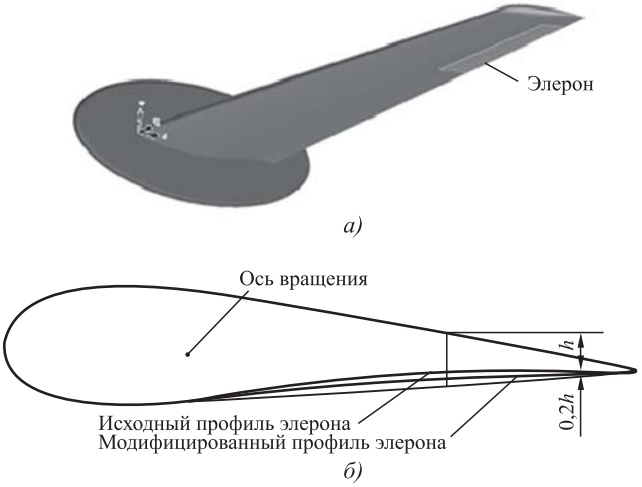


Рис. 2. Общий вид расчётной модели:
а — расчётная модель крыла; *б* — сечение средней аэродинамической хорды элерона

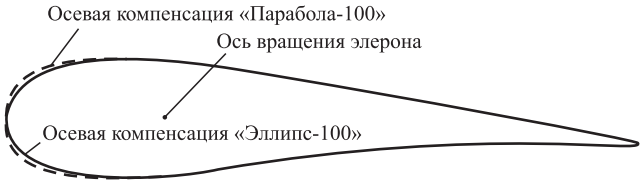


Рис. 3. Сравнение в сечении САХ элерона форм осевых компенсаций «Эллипс-100» и «Парабола-100»

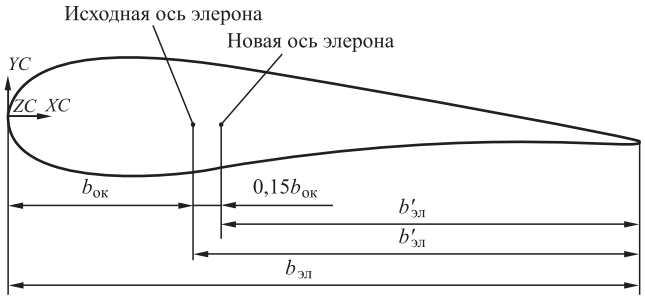


Рис. 4. Изменение (исправление) оси вращения элерона

модели, включая щели между рулевой и основной частью крыла, но без державок.

Для *первого варианта* расчётных исследований по уменьшению шарнирного момента элерона была выполнена модификация нижней поверхности элерона ЛТС, проведённая на основе результатов исследований модели полукрыла самолёта ИЛ-96 в аэродинамической трубе Т-108 ЦАГИ [1]. Новые обводы нижней поверхности элерона на 20 % подрезают профиль его средней аэродинамической хорды в районе наибольшего прогиба, а в корневом и концевом сечениях элерона полностью совпадают с профилем крыла.

Для *второго варианта* расчёта по уменьшению шарнирного момента элерона была построена осевая компенсация «Парабола-100» (рис. 3) с относительной площадью

$$\bar{S}_{окэ} = 0,32,$$

где $\bar{S}_{окэ} = \dfrac{S_{окэ}}{S_э}$; $S_{окэ}$ — площадь осевой компенсации элерона; $S_э$ — габаритная площадь элерона.

При этом использованы формулы теории построения осевых компенсаций для вычисления координат их обводов [2].

Третий вариант уменьшения величины шарнирного момента элерона представляет собой смещение оси вращения элерона назад по хорде, что увеличивает хорду осевой компенсации $b_{ок}$ на 15 % (рис. 4). Расстояние, на которое должна быть сдвинута ось вращения, подбиралось так, чтобы полученные величины моментов были сопоставимы с моментами, полученными путём изменения нижней поверхности элерона, а при отклонении элерона на большие углы осевая компенсация не должна слишком выходить в поток за обводы крыла.

Из рассмотренных вариантов только второй вариант с заменой осевой компенсации даёт определённую величину шарнирного момента. Остальные варианты позволяют варьировать величину шарнирного момента и подбирать наиболее оптимальную в определённом диапазоне, так как можно подрезать профиль или сдвинуть ось вращения на некоторое расстояние.

Коэффициенты шарнирных моментов элерона были получены по формуле

$$m_ш = \frac{M_ш}{S_э q b_э},$$

где $M_ш$ — момент относительно оси вращения руля, кг·м; $S_э = 0{,}04584$ — площадь руля за осью вращения в проекции на плоскость XOZ, м^2; $b_э = 0{,}07244$ — хорда руля высоты за осью вращения, м; q — скоростной напор, который вычислен по формуле

$$q = \frac{\rho V^2}{2} = \frac{1{,}176674 \cdot (50)^2}{2} = 150, \text{ кг/м}^2.$$

Результаты расчёта. Сравнение расчётных и экспериментальных данных крыла с исходным элероном показало удовлетворительную сходимость результатов как при неотклонённом элероне ($\delta = 0$) (рис. 5, *а*), так и при отклонённом ($\delta = 20°$) (рис. 5, *б*).

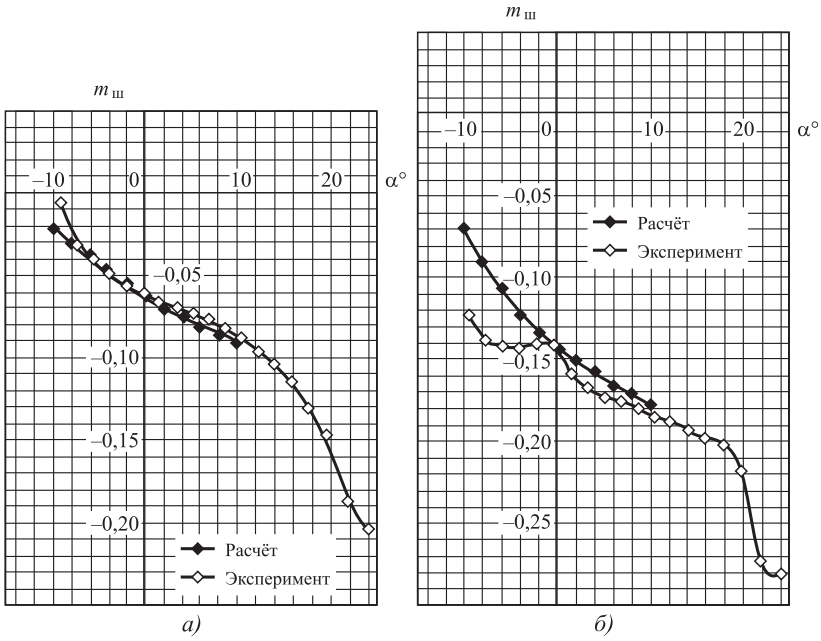


Рис. 5. Зависимости шарнирного момента от угла атаки с исходным элероном «Элипс-100»:
а — $\delta_э = 0$; *б* — $\delta_э = 20°$

Модификация нижней поверхности элерона была выполнена локально только в районе его САХ, что позволило, не нарушая профилировку всего крыла, и не изменяя его аэродинамические характеристики, уменьшить величину шарнирного момента элерона при неотклонённом ($\delta = 0$) и отклонённом элероне ($\delta = 20°$) (рис. 6). На нулевом угле атаки ($\alpha = 0$) модифицированная поверхность неотклонённого элерона уменьшает его шарнирный момент примерно в 2 раза, а при отклонённом — в 1,2 раза.

Замена осевой компенсации «Эллипс-100» на «Параболу-100» при неотклонённом элероне ($\delta_э = 0$) уменьшает величину шарнирного момента на нулевом угле атаки примерно на 80 % (рис. 7, *а*).

При отклонении элерона ($\delta_э = 20°$) осевая компенсация «Парабола-100» почти не влияет на величину шарнирного момента элерона на отрицательных углах атаки и немного увеличивает её на положительных (рис. 7, *б*).

При смещении оси вращения аэродинамические характеристики крыла при неотклонённом элероне практически не изменяются, а коэффициент шарнирного момента элерона уменьшается почти вдвое (рис. 7, *а*). Отклонение элерона ($\delta_э = 20°$) при смещённой оси вращения уменьшает не только шарнирный момент, но и его производную по углу атаки $m_ш^\alpha$ (рис. 8, *б*).

Сравнение обтекания представленных вариантов по уменьшению шарнирного момента элерона показало, что высота отрывной зоны

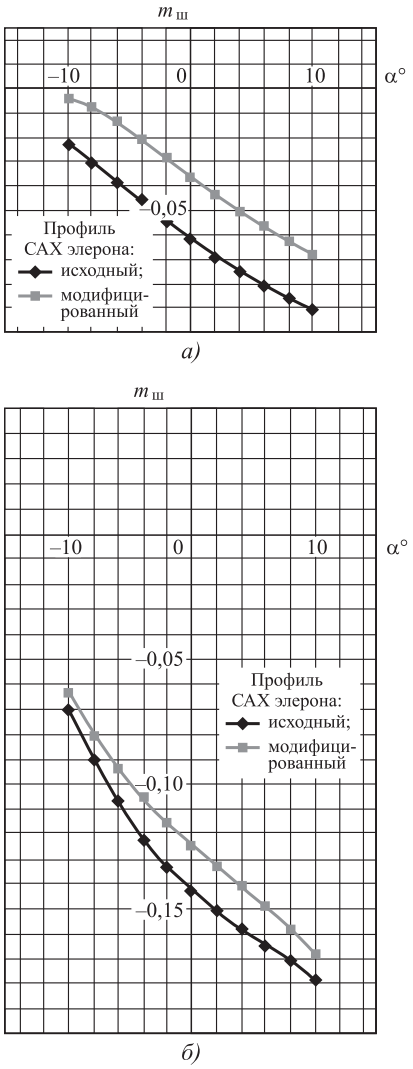


Рис. 6. Зависимости шарнирного момента от угла атаки:
а — $\delta_э = 0$; *б* — $\delta_э = 20°$

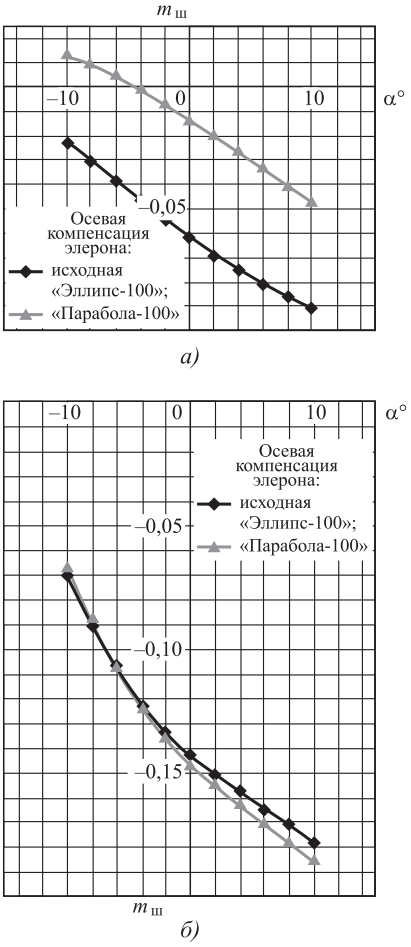


Рис. 7. Зависимости шарнирного момента от угла атаки:
а — $\delta_э = 0$; *б* — $\delta_э = 20°$

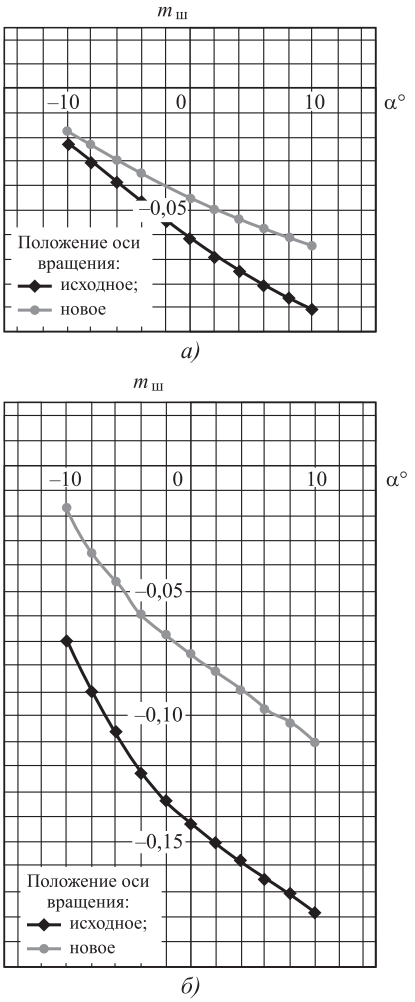
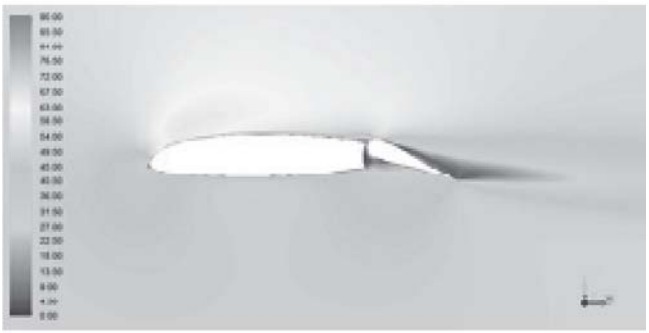


Рис. 8. Зависимости шарнирного момента от угла атаки:
а — $\delta_э = 0$; *б* — $\delta_э = 20°$

а)

б)



в)

Рис. 9. Распределение скоростей в сечении САХ элерона ($\delta_р$ = 20°, α = 4°):
а — исходная компенсация элерона «Эллипс-100»; *б* — модифицированный профиль САХ элерона; *в* — компенсация элерона «Парабола-100»

в сечении САХ модифицированного профиля элерона с аэродинамической компенсацией «Парабола-100» ниже исходного (рис. 9, *б*).

Заключение. Численные исследования по уменьшению коэффициента шарнирного момента элерона лёгкого транспортного самолёта, проведённые по программе ANSYS FLUENT, основанной на численном решении осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье—Стокса, показали, что наиболее рациональным из предложенных вариантов является модификация нижней поверхности элерона, так как она уменьшает величину шарнирного момента и высоту отрывной зоны при отклонённом элероне. Данная модификация нижней поверхности позволяет за счёт изменения её высоты добиться требуемой величины шарнирного момента. Этот вариант наиболее технологичен и не представляет затруднений в его изготовлении на производственных предприятиях. Но для окончательных выводов по этому вопросу необходимы экспериментальные исследования.

Для элерона с симметричным профилем уменьшение коэффициента его шарнирного момента реализуется путём изменения формы осевой компенсации и увеличения её площади за счёт смещения оси вращения к задней кромке крыла.

При комплексном подходе к задаче уменьшения величины шарнирного момента можно использовать как предложенные варианты, так и их комбинации.

Библиографические ссылки

1. **Андреев Г.Т., Мельничук Ю.П., Кутухина Н.В., Павленко О.В.** Аэродинамические компенсации шарнирных моментов рулевых поверхностей самолётов с ручным управлением: справочник. М.: Инновационное машиностроение, 2017.

2. **Ершов А.А.** Численное исследование влияния формы осевой компенсации на шарнирные моменты рулевой поверхности прямого крыла // Техника воздушного флота. 2016. Т. XC. № 4 (725). С. 35—41.

3. **Павленко О.В.** Численное исследование аэродинамических нагрузок на руль высоты натурной модели хвостового отсека самолёта // Техника воздушного флота. 2009. Т. LXXXIII. № 4 (697). С. 1—5.

Ссылка для цитирования

Андреев Г.Т., Ершов А.А., Павленко О.В. Комплексный подход к уменьшению шарнирных моментов органов управления летательных аппаратов // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 5. С. 227—231.

Уважаемые читатели!

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении,

а также непосредственно на сайте издательства «Инновационное машиностроение».

УДК 004.031.42

М.С. Тимофеева, канд. экон. наук, доц., **В.Н. Семенов,** доц.
(Ростовский государственный университет путей сообщения)

mara1512@yandex.ru

КОМПЬЮТЕРНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ КАК ИНСТРУМЕНТ ОЦЕНКИ УРОВНЯ СФОРМИРОВАННОСТИ ПУЛА КОМПЕТЕНЦИЙ ОБУЧАЮЩИХСЯ

Университеты все более и более интернационализируются, поэтому приходится принимать во внимание не только конкуренцию с внутренними участниками образовательного процесса, но и тенденции, сложившиеся на внешних рынках образовательных услуг, интенсивность взаимосвязей отечественных образовательных учреждений с иностранными. В статье рассмотрено соответствие полученных в электронной информационно-образовательной среде университета результатов обучающегося по промежуточной аттестации в форме компьютерного тестирования проявленному уровню сформированности пула компетенций обучающегося в процессе опроса экспертами.

Ключевые слова: интернационализация высшего образования; качество образования; электронная информационно-образовательная среда; компьютерное тестирование; фонды оценочных средств; результаты промежуточной аттестации; пул компетенций.

Universities are more and more internationalized therefore it is to take into account not only the competition with internal participants of the educational process, but also the trends emerged in the foreign markets of educational services, the interrelationships intensity of domestic educational institutions with foreign ones. In the article the conformity of the student results in accordance with the intermediate certification in the computer testing form, obtained in the electronic information and educational environment of the university, to the competencies pool level of the student developed in the process of the questioning by experts is considered.

Keywords: internationalization of higher education; quality of education; electronic information and educational environment; computer testing; funds of valuation means; results of intermediate attestation; pool of competences.

В связи с трендом образовательной системы к интернационализации образовательным учреждениям приходится принимать во внимание не только конкуренцию с внутренними участниками образовательного процесса, но и тенденции, сложившиеся на внешних рынках образовательных услуг, интенсивность взаимосвязей отечественных образовательных учреждений с иностранными. Реализация новых конкурентных стратегических преимуществ образовательного учреждения без использования современных инструментов и технологий оценки качества подготовки обучающихся не даст возможности образовательному учреждению осуществлять подготовку высококвалифицированных специалистов, отвечающих современным требованиям международного рынка труда. Для интеграции отраслевых образовательных учреждений в рамках межотраслевого взаимодействия на глобальном экономическом рынке необходимо:

сформировать единое образовательное пространство путём создания отраслевых центров дистанционной практической и тренажёрной подготовки с использованием электронной информационно-образовательной среды университетов с обновляющейся базой данных (контингент, учебные планы, рабочие программы дисциплин (модулей), фонды оценочных средств, методические материалы, шкалы оценивания компетенций);

создать двухстороннюю инфраструктуру доступа университетов и отраслевых центров подготовки к единой технологии оценки качества подготовки обучающихся;

проанализировать инструмент оценки уровня сформированности пула компетенций;

создать единую базу фондов оценочных средств (ФОС) для текущего контроля, промежуточной аттестации, итоговой аттестации выпускников;

разработать архитектуру инструмента оценки результатов образовательного процесса со следующими элементами: цели и задачи оценки, роли и ресурсы, процедура оценки, структура информационных потоков (вер-

тикальная, горизонтальная), структура данных (количественные, качественные), взаимосвязь объектов оценки и структур.

Очевидно, что отечественная система оказания образовательных услуг в подготовке специалистов для железнодорожной отрасли требует более углублённого методологического осмысления и разработки новых концептуальных основ и механизма перехода к оценке уровня формируемых компетенций в системе непрерывного образования, отвечающих новым вызовам транспортного бизнеса. Современные образовательные технологии не поспевают за потребностями трансконтинентального и глобального рынков транспортных услуг, которые непрерывно генерируются в соответствии со стратегией инновационного развития ОАО «РЖД» в условиях изменения внешней среды, и требованиями к специалистам.

Среди зарубежных работ, исследующих различные стороны конкурентоспособности и маркетингового управления в условиях фрагментации системы глобального управления на рынке услуг, следует отметить труды таких учёных, как P. Drucker [1], N. Egel [2], M. Porter [3], A. Zakharov [4]. Проблемы оценки качества высшего образования и инструменты и технологии независимой оценки качества подготовки обучающихся представлены в работах В.А. Болотова [5], А.Р. Денисова [6], В.Г. Наводнова [7] и др. Проблемы организации обучения и управления высшей школой, представленные в работах В.И. Звонникова [8], Н.Р. Кельчевской [9], Г.В. Семеко [10], В.Д. Шадрикова [11] и др., связывают качество образования с достижением цели развития и формированием гражданских и профессиональных компетенций личности, а также с личностно-профессиональным саморазвитием.

В целом теоретические, методологические и методические аспекты развития независимой оценки качества подготовки обучающихся с использованием компьютерного тестирования, имеющего в основе единую базу фондов оценочных средств для различных направлений подготовки (специальностей), остаются малоизученными, а имеющийся зарубежный опыт в области создания таких систем и их дальнейшего внедрения не может быть применён в полном объёме из-за специфики отечественной системы отраслевого образования. Попытки прямого заимствования накопившегося в мировой практике опыта оказания отраслевыми образовательными учреждениями услуг по подготовке квалифицированных специалистов малоэффективны ввиду существенных, порой принципиальных различий отечественных и зарубежных систем среднего, высшего и дополнительного образования. Механизмы экономической оценки конкурентоспособных человеческих ресурсов и управления их формированием в транспортной отрасли пока не отработаны. В частности, отсутствуют эффективное информационное взаимодействие образовательных, научных и бизнес-структур, система оценки качества непрерывного образования, критерии и методики оценки человеческого капитала и его включения как нематериального актива в капитал российских компаний-работодателей, что для них особенно важно.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (РГУПС) как многопрофильный отраслевой университет более 10 лет проводит оценку качества подготовки обучающихся с использованием в рамках Автоматизированной системы управления РГУПС разработанного программного продукта — подсистемы «Тестирование» [12]. Модуль данной подсистемы интегрирован в «Образовательный портал» и доступен всем участникам электронной информационно-образовательной среды университета. Подсистема «Тестирование» позволяет предоставлять оперативную, объективную информацию о результатах освоения образовательной программы обучающимися, уровне сформированных компетенций, качестве электронного портфолио выпускника стейкхолдерам. Стратегия РГУПС направлена на качественную подготовку обучающихся, приобретение ими как формальных, так и неформальных знаний, навыков и умений, которыми не могут обладать роботизированные рабочие места (боты), таких как способность к развитию, ориентация на интересы, ответственное мышление, нацеленность на результат, работа с высоким качеством, способность к лидерству.

Для повышения качества подготовки обучающихся РГУПС на базе Центра мониторинга качества образования (ЦМКО) был апробирован новый инструмент оценки уровня сформированности приобретаемых компетенций обучающихся в подсистеме «Тестирование». Данный инструмент позволил провести проверку соответствия результатов промежуточной аттестации в форме компьютерного тестирования в подсистеме «Тестирование»

минимальному уровню формируемых компетенций по внедрённым в образовательный процесс единым фондам оценочных средств по дисциплинам (1-й этап — 19—23 января 2015 г.; 2-й этап — 13—29 января 2016 г.). ЦМКО в составе экспертной комиссии координировал мероприятия, обеспечивающие проверку соответствия результатов промежуточной аттестации обучающихся в форме компьютерного тестирования уровню формируемых общекультурных, общепрофессиональных и профессиональных компетенций, так называемому пулу компетенций обучающихся по дисциплинам, закреплённым за видами профессиональной деятельности. ЦМКО обеспечил подготовительные мероприятия, направленные на достижение заявленного результата: разработал план проведения проверки по 38 дисциплинам, обеспеченным фондами оценочных средств; организовал работу групп комиссий из числа наиболее квалифицированных научно-педагогических работников, обладающих компетенциями, закреплёнными за дисциплинами, для оценки уровня сформированности приобретаемых общекультурных, общепрофессиональных и профессиональных компетенций; сформировал в подсистеме «Тестирование» тесты, соответствующие компетентностному подходу, для групп обучающихся (рис. 1).

Функциональная структура настройки ФОС в подсистеме позволяет осуществлять привязку компетенций, закреплённых в учебном плане специальности (направления под-

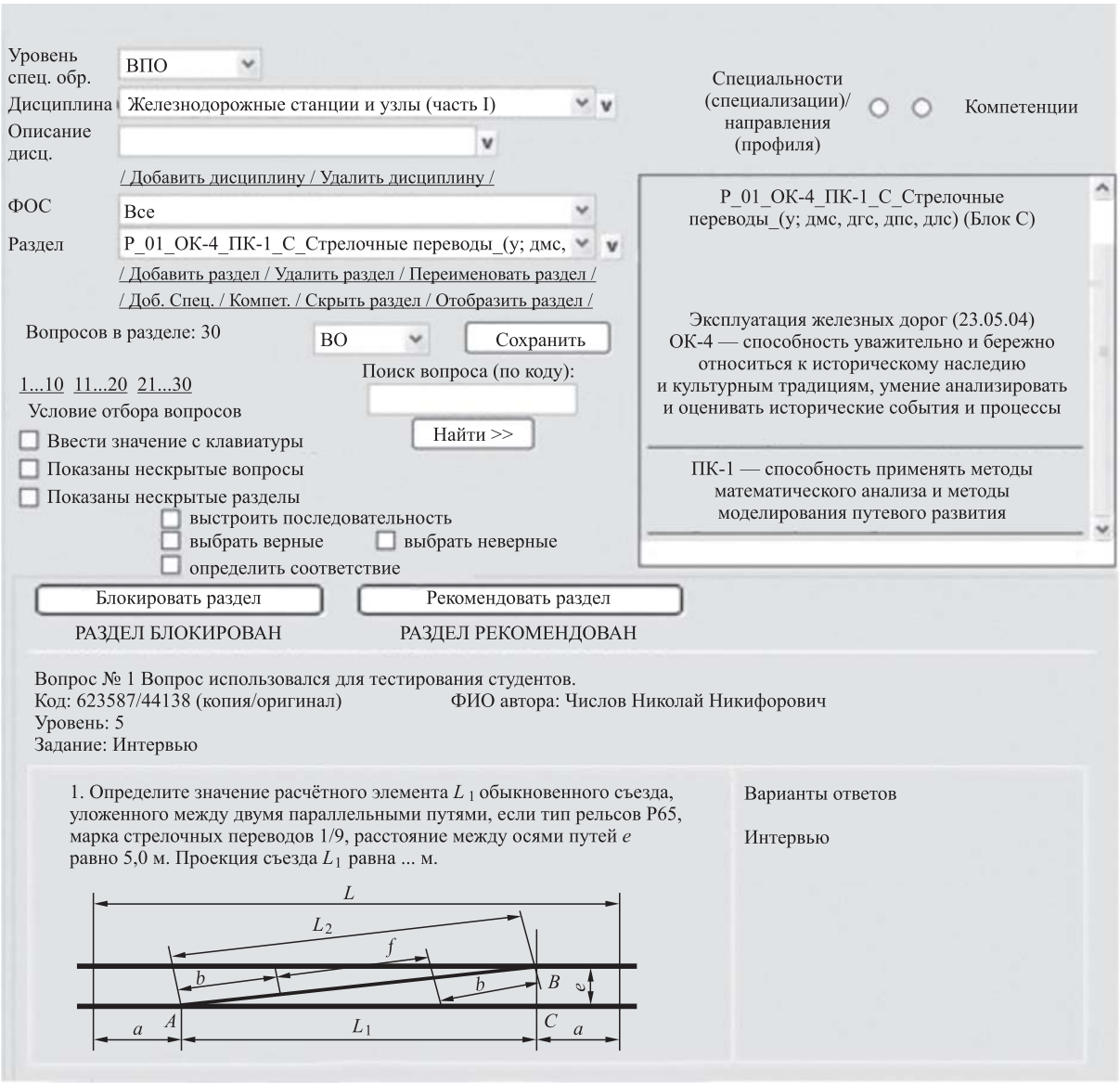


Рис. 1. Функциональная структура настройки ФОС в подсистеме «Тестирование» для специальности 23.05.04 «Эксплуатация железных дорог»

готовки) за разделами дисциплин. Подсистема позволяет добавлять, переименовывать, удалять, скрывать и отображать разделы дисциплин, которые закреплены за уровнями освоения компетенций. Минимальный уровень освоения компетенций в подсистеме имеет привязку к блоку А. В этот блок закачаны и в нём сгруппированы в алфавитном порядке тестовые задания на последовательность, соответствие с выбором одного или нескольких ответов. Базовый уровень освоения компетенций в подсистеме имеет привязку к блоку В. В этот блок закачаны и в нём сгруппированы в алфавитном порядке тестовые задания открытого типа с заложенным эталоном ответа в подсистеме «Тестирование». Высокий уровень освоения компетенций в подсистеме имеет привязку к блоку С, в котором сгруппированы в алфавитном порядке закачанные тестовые задания типа кейс, интервью, билеты или структурированный тест (ввод ответов объёмом 78 000 знаков с клавиатуры).

Наименование раздела дисциплины с разными блоками имеет вид

$$P_xx_k_y_N_(y; ...),$$

где P_xx — номер раздела, соответствующий рабочей программе дисциплины и номеру семестра изучения; k — закреплённые компетенции в учебном плане специальности (направления подготовки), например ОПК, УК, ПСК, ПК, ДПК; y — уровень освоения компетенций, например блок А, В, С; N — название раздела согласно рабочей программе дисциплины; (y; ...) — элемент, соответствующий обозначению специальности (направления подготовки).

Функциональная структура настройки ФОС позволяет по коду вопроса проводить содержательный анализ тестового задания и формировать отчёт по валидности.

В соответствии с имеющимися фондами оценочных средств в подсистеме «Тестирование» были сформированы пакеты тестовых заданий по дисциплине и установлены настройки для теста, такие как номер теста, дата создания, описание, число вопросов в тесте, время, отводимое на тест в целом, время, отводимое на каждый вопрос или группу вопросов, порядок представления вопросов в тесте, порядок вопросов в тесте для группы вопросов, а также приоритет по настройке блоков (рис. 2).

Настройка выборки вопросов в тест по разделам

Дисциплина: Железнодорожные станции и узлы (часть I)
Код теста: 12095
Описание теста: тест-сессия - 1 - 2015/2016
Количество вопросов в тесте: 41
Выборка вопросов в тест из раздела: по количеству

Разделы	Вопросов в разделах, выбранных в пакет	Выбрать вопросов в тест	Выбрать вопросов в тест для группы	Порядок предъявления вопросов в тесте	Порядок вопросов в тесте для группы
P_01_ОК-4_ПК-1_А_Стрелочные переводы_(y; дмс, дгс, дпс, длс)	30	5		1	
P_02_ОК-4_ПК-1_ПК-13_А_Стрелочные улицы_(y; дмс, дгс, дпс, длс)	30	5		1	
P_03_ПК-13_ПК-15_ПК-30_ПК-33_ПК-34_ПКС-1.6_А_Разъезды_(y; дмс, дгс, дпс, длс)	30	5	25	1	1
P_04_ПК-13_ПК-15_ПК-30_ПК-33_ПК-34_ПКС-1.6_А_Обгонные пункты_(y; дмс, дгс, дпс, длс)	30	5		1	
P_05_ПК-13_ПК-15_ПК-30_ПК-33_ПК-34_ПКС-1.6_А_Промежуточные станции_(y; дмс, дгс, дпс, длс)	30	5		1	
P_01_ОК-4_ПК-1_В_Стрелочные переводы_(y; дмс, дгс, дпс, длс)	9	3		2	
P_02_ОК-4_ПК-1_ПК-13_В_Стрелочные улицы_(y; дмс, дгс, дпс, длс)	7	3		2	
P_03_ПК-13_ПК-15_ПК-30_ПК-33_ПК-34_ПКС-1.6_В_Разъезды_(y; дмс, дгс, дпс, длс)	8	3	15	2	2
P_04_ПК-13_ПК-15_ПК-30_ПК-33_ПК-34_ПКС-1.6_В_Обгонные пункты_(y; дмс, дгс, дпс, длс)	7	3		2	
P_05_ПК-13_ПК-15_ПК-30_ПК-33_ПК-34_ПКС-1.6_В_Промежуточные станции_(y; дмс, дгс, дпс, длс)	7	3		2	
P_01_ОК-4_ПК-1_С_Стрелочные переводы_(y; дмс, дгс, дпс, длс)	1	1		3	
P_02_ОК-4_ПК-1_ПК-13_С_Стрелочные улицы_(y; дмс, дгс, дпс, длс)	1	0		3	
P_03_ПК-13_ПК-15_ПК-30_ПК-33_ПК-34_ПКС-1.6_С_Разъезды_(y; дмс, дгс, дпс, длс)	1	0	1	3	3
P_04_ПК-13_ПК-15_ПК-30_ПК-33_ПК-34_ПКС-1.6_С_Обгонные пункты_(y; дмс, дгс, дпс, длс)	1	0		3	
P_05_ПК-13_ПК-15_ПК-30_ПК-33_ПК-34_ПКС-1.6_С_Промежуточные станции_(y; дмс, дгс, дпс, длс)	1	0		3	

Рис. 2. Пример настройки в подсистеме «Тестирование» выборки вопросов в тест по разделам для специальности 23.05.04 «Эксплуатация железных дорог»

ИНДИВИДУАЛЬНАЯ ВЕДОМОСТЬ ОБУЧАЮЩЕГОСЯ ФИО

Дата __.__._____

Группа	ДМВ-3-235	Вид тестирования	Промежуточная аттестация студентов
Время	38 минут	Дисциплина	Железнодорожные станции и узлы (часть I)

Группа - 1	Освоение разделов, %	Группа - 2	Освоение разделов, %	Группа - 3
1 – Р_01_ОК-4_ПК-1_А_Стрелочные переводы	100	6 – Р_01_ОК-4_ПК-1_В_Стрелочные переводы	80	11 – Р_03_ПК-13_ПК-15_ПК-30_ПК-33_ПК-34_ПКС-1.6_С_Разъезды
2 – Р_02_ОК-4_ПК-1_ПК-13_А_Стрелочные улицы	40	7 – Р_02_ОК-4_ПК-1_ПК-13_В_Стрелочные улицы	40	
3 – Р_03_ПК-13_ПК-15_ПК-30_ПК-33_ПК-34_ПКС-1.6_А_Разъезды	80	8 – Р_03_ПК-13_ПК-15_ПК-30_ПК-33_ПК-34_ПКС-1.6_В_Разъезды	100	
4 – Р_04_ПК-13_ПК-15_ПК-30_ПК-33_ПК-34_ПКС-1.6_А_Обгонные пункты	60	9 – Р_04_ПК-13_ПК-15_ПК-30_ПК-33_ПК-34_ПКС-1.6_В_Обгонные пункты	60	
5 – Р_05_ПК-13_ПК-15_ПК-30_ПК-33_ПК-34_ПКС-1.6_А_Промежуточные станции	80	10 – Р_05_ПК-13_ПК-15_ПК-30_ПК-33_ПК-34_ПКС-1.6_В_Промежуточные станции	60	
Итого по группе	72	Итого по группе	68	Билет № 18
Общий процент правильных	**70**	Процент правильных по разделам	**86**	
			Блок А, Блок Б / Блок С	**Атт.** / Не атт.

Рис. 3. Пример индивидуальных результатов компьютерного тестирования с указанием уровня освоения разделов обучающимся

В целях получения структурных данных по результатам тестирования при формировании теста для обучающихся устанавливаются особые настройки, которые позволяют регламентировать:

процесс компьютерного тестирования за счёт ограничения числа представляемых вопросов (40 тестовых заданий (блок А, блок В) для зачёта; 40 тестовых заданий (блок А, блок В) и одно тестовое задание (блок С) для экзамена), установленного времени тестирования (40 мин на зачёт, 80 мин на экзамен) и времени работы с протоколом неправильных (правильных) ответов по результатам компьютерного тестирования (2 ч);

процесс представления теста субъекту оценки: по числовым параметрам, содержащимся в колонках «Вопросов в разделах, выбранных в тест», «Выбрать вопросов в тест», «Выбрать вопросов в тест для группы», выбранных случайным образом вопросов по каждому разделу для отдельного обучающегося из общего числа заданий, имеющихся в базе в подсистеме «Тестирование»; по уровням последовательного представления блоков «Порядок предъявления вопросов в тесте» и «Порядок вопросов в тесте для группы»; по уровню аттестации «Порядок вопросов в тесте для группы» по последней колонке: для зачёта — 1-я группа включает в себя все разделы блока А; 2-я группа — все разделы блока В; для экзамена дополнительно используется 3-я группа — все разделы блока С;

процедуру оценки экзаменатором результатов компьютерного тестирования обучающегося: для зачёта используется индивидуальная ведомость результатов компьютерного тестирования; для экзамена — индивидуальная ведомость результатов компьютерного тестирования с указанием оценки «удовлетворительно» или номера билета и протокола ответа обучающегося в случае выбора обучающимся блока С (рис. 3).

На этапе мероприятий подготовки к проведению экспертизы все участники получили доступ к автоматически сформированной в подсистеме «Тестирование» сводной ведомости результатов компьютерного тестирования по всем дисциплинам, участвующим в экспертной оценке в целях выявления обучающихся, у которых уровень сформированных компетенций ниже порогового значения. Персональные данные обучающихся, представленные на рис 4, изменены.

Группе комиссии (эксперты — 5 человек, ведущий эксперт — 1), оценивающей уровень сформированности приобретаемых компетенций, предлагалось присутствовать при опросе обучающихся преподавателем непосредственно после прохождения промежуточной аттестации в форме компьютерного тестирования по утверждённым билетам из подсистемы «Рабочие программы дисциплин» в аудитории, назначенной для устного экзамена.

Группе экспертов по проверке соответствия результатов промежуточной аттестации в форме компьютерного тестирования уровню сформированности приобретаемых общекультурных компетенций предлагалось оценить уровень сформированности следующих компетенций обучающихся:

Сводная ведомость результатов компьютерного тестирования по группе

Дата __.__ _____

Группа:	ДМВ-3-235	**Аттестационный признак:**	атт./не атт.
Дисциплина:	Железнодорожные станции и узлы (часть I)	**Пороговое значение (по группе)**	% освоенных разделов 100
Тип тестирования:	Промежуточная аттестация студентов	**В процессе**	Доступна попытка № 2

№ пп.	ФИО	Процент освоения/ оценка блока С	Выбор обучающегося			КИМ/КОС (Атт./Не атт.)
			№ билета	Оценка	Блок С	
1	Абдулгамид М.С.	91/–	2	–	–	Атт./Атт.
2	Агалуян А.Х.	100/3	–	–	+	Атт.
3	Варжевин В.В.	91/–	–	**Удовл.**	–	Атт./Атт.
4	Колганович Р.Ю.	Неявка	–	–	–	Не атт.
5	Лазарев А.Д.	В процессе	–	–	–	Не атт.
...	...	...	...	...	...	...
N	Оганесянц О.Н.	100/4	18	–	–	Атт./Атт.

Количество аттестованных студентов: 18	**Количество студентов "В процессе тестирования": 1**
Количество неаттестованных студентов: 1	**Количество неявившихся студентов: 1**

Рис. 4. Пример анализа экспертами сводной ведомости результатов компьютерного тестирования

владение культурой мышления, способность к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей её достижения, умение логически верно, аргументированно и ясно строить устную речь;

умение критически оценивать свои достоинства и недостатки, наметить пути и выбрать средства развития достоинств и устранения недостатков;

способность к саморазвитию.

Первой группой экспертов, участвовавших в опросе обучающихся с учётом полученных результатов промежуточной аттестации в форме компьютерного тестирования по дисциплинам, обеспеченным оценочными материалами, установлено, что на развитие междисциплинарных компетенций и эффективное наращивание уровня компетенций у обучающихся оказывает влияние не только временной фактор, но и наличие целостной структуры учебного плана. При проведении планирования проверки развития междисциплинарных компетенций определялись дисциплины, имеющие существенный вес в структуре учебного плана для каждого направления подготовки (специальности). Например, для специальности 23.05.04 «Эксплуатация железных дорог» план проведения проверки соответствия результатов промежуточной аттестации уровню сформированности приобретаемых общекультурных компетенций включал такие дисциплины, как «История», «Социология», «Философия». Для проверки уровня сформированности общепрофессиональных компетенций у обучающихся в план были включены такие дисциплины, как «Информатика», «Математика», «Теоретическая механика» и «Сопротивление материалов», а для оценки профессиональных компетенций — дисциплины «Подвижной состав железных дорог», «Железнодорожные станции и узлы (часть I)». Контрольно-оценочные средства в форме практико-ориентированных заданий, кейсов, структурированных тестов, разработанные по данным дисциплинам, позволяют экспертам оценить наблюдаемые признаки проявления следующих компетенций:

способность работать в коллективе, эффективно участвовать в групповой работе, толерантно воспринимать социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия;

владение культурой мышления, способность к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей её достижения;

умение анализировать и оценивать исторические события и процессы;

способность к самоорганизации и саморазвитию;

способность к коммуникации в устной и письменной формах на русском и иностранном языках для решения задач межличностного и межкультурного взаимодействия;

способность использовать приёмы первой помощи, методы защиты в условиях чрезвычайных ситуаций.

В соответствии с планом и утверждённым расписанием сессии была назначена аудито-

рия, в которой эксперты и экзаменатор должны были получить результаты компьютерного тестирования для проведения анализа и экспертный бланк. Экзаменатор получал сводную ведомость результатов компьютерного тестирования, в которой указаны фамилия, имя, отчество обучающегося, явка / неявка, аттестация / неаттестация (в зависимости от уровня освоения раздела), выбор обучающегося (оценка «удовлетворительно», номер билета, протокол ответа). На экзамен оставались все обучающиеся, допущенные, явившиеся, аттестованные в подсистеме «Тестирование» и готовые проявить свои компетенции. Экзамен проводился в традиционной форме с учётом выбранного обучающимся варианта результата компьютерного тестирования в зависимости от личностных характеристик: открытость к инновациям в образовательных технологиях, амбициозность (протокол ответа блока С), активность (номер билета), конформизм, низкая требовательность к себе (оценка «удовлетворительно»). Эксперты наблюдали за процессом проведения экзамена и оценивали только ответы обучающихся по дихотомической шкале с указанием признака проявления компетенций.

Второй группе экспертов предлагалось оценить уровень сформированности общепрофессиональных компетенций, приобретаемых обучающимися в процессе обучения. Экспертам предлагалось оценить уровень сформированности следующих компетенций обучающихся:

способность использовать основные законы естественно-научных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследований;

способность применять основные законы и приёмы создания и чтения чертежей и документации по аппаратным и программным компонентам информационных систем;

способность использовать современные компьютерные технологии поиска информации для решения поставленной задачи, критического анализа этой информации и обоснования выдвинутых идей и подходов к их реализации.

Оценка уровня сформированности приобретаемых профессиональных компетенций обучающихся проводилась третьей группой экспертов, которые в рамках своей профессиональной деятельности оценивали наблюдаемые признаки проявления компетенций обучающихся. В группу вошли эксперты, обладающие профессиональными навыками в области определённых научных исследований, имеющие опыт практической работы и способные квалифицированно провести оценку следующих проявляемых компетенций:

способность собрать и проанализировать исходные данные, необходимые для расчёта экономических и социально-экономических показателей, характеризующих деятельность хозяйствующих субъектов;

способность на основе типовых методик и действующей нормативно-правовой базы рассчитать экономические и социально-экономические показатели;

готовность к разработке и внедрению технологических процессов, техническо-распорядительных актов и иной технической документации железнодорожной станции;

владение основными методами, способами и средствами получения, хранения и переработки информации, навыками работы с компьютером как средством управления информацией; автоматизированными системами управления базами данных;

способность самостоятельно приобретать с помощью информационных технологий и использовать в практической деятельности новые знания и умения, в том числе в новых областях знаний, непосредственно не связанных со сферой деятельности;

способность участвовать в сборе и анализе исходных данных для проектирования энергообъектов и их элементов в соответствии с нормативной документацией.

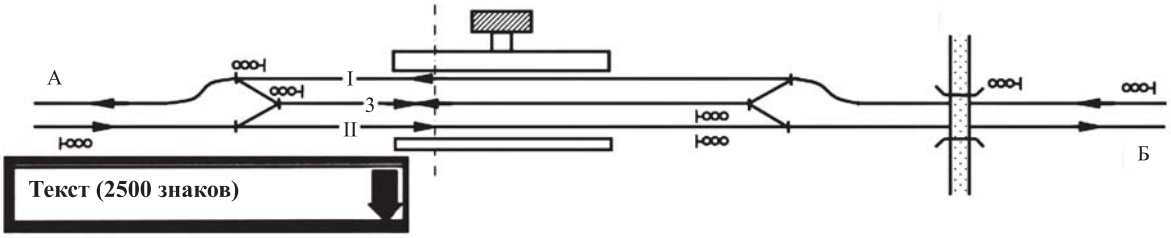
На рис. 5 приведён пример сформированного в подсистеме «Тестирование» билета по дисциплине «Железнодорожные станции и узлы (ч. I)» для специальности 23.05.04 «Эксплуатация железных дорог», который был представлен обучающемуся для ответа.

Для получения более точной оценки подготовленности обучающегося к применению приобретённых компетенций эксперты в протокол по каждому ответу за проявление критериев формируемой компетенции выставляли баллы респонденту: проявление компетенции оценивалось экспертом в 1 балл, непроявление — 0 баллов. Обучающиеся, набравшие превалирующее число баллов за проявление компетенций по методу заданного распределения по уровням освоения (минимальный, базовый, высокий), считаются подтвердившими степень владе-

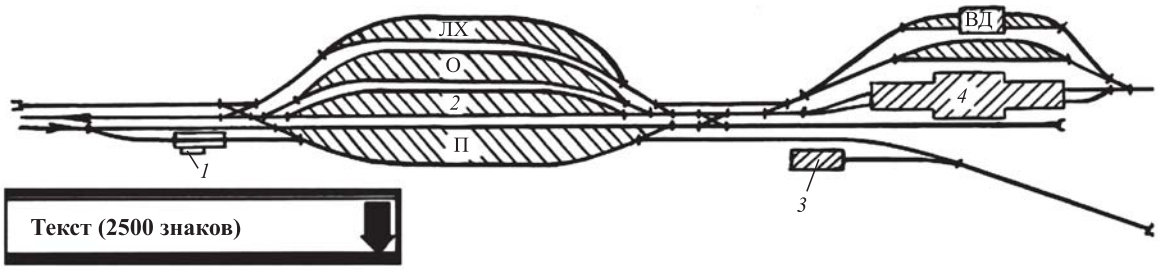
Билет № 18

ИНТЕРВЬЮ (ВВОД ТЕКСТ) [ПК-1]

1. При значительных объёмах пассажирских перевозок и наличии протяжённой станционной площадки применяется схема обгонного пути. Укажите особенности обгонных путей, расположенных на подходах к участковой и сортировочной станциям. Какой тип схемы обгонного пути представлен на элементе схемы путевого развития станции, приведённой в транспортно-распорядительном акте (ТРА станции)?



2. Дайте пояснения позициям *1*, *2*, *3*, *4* на схеме пассажирской технической станции



3. Определите количество путей для пригородных мотор-вагонных поездов на пассажирской станции при заданной продолжительности стоянки поездов под высадкой и посадкой пассажиров 20 мин и расчётном интервале прибытия 10 мин.

Рис. 5. Пример сгенерированного билета в подсистеме «Тестирование» для проведения экспертной оценки ответа обучающегося

ния компетенцией (элементарная, самостоятельная, свободная).

В проведении проверки соответствия результатов промежуточной аттестации в форме компьютерного тестирования уровню освоения формируемых компетенций принимали участие обучающиеся очной формы обучения. Для обеспечения объективной оценки соответствия знаний обучающихся определённому уровню освоения компетенций из множества обучающихся в группах, принимающих участие в проверке, рассматривались подмножества студентов, допущенных к промежуточной аттестации в форме компьютерного тестирования и явившихся на тестирование. Область множества составила 548 обучающихся, из которых 21 обучающийся получил признак в подсистеме «Тестирование» «не аттестован» по порогу аттестации 40 %, что явилось дополнительным объектом проверки экспертов.

Итоги работы экспертной комиссии оформляли в форме протокола проведения ревизионных мероприятий и сдавали ведущему эксперту, который суммировал баллы при выставлении полной оценки ответа обучающегося. Ведущий эксперт проверял соответствие результатов обучающегося по промежуточной аттестации в форме компьютерного тестирования проявленному в процессе опроса уровню сформированности пула компетенций обучающегося. У ведущего эксперта было достаточно времени для анализа ответов обучающихся на вопрос «На какую оценку претендуете?», что позволяло оценить способность обучающего к критической оценке своих достоинств и недостатков. Обучающиеся, принимавшие участие в опросе и изъявившие желание подтвердить высокий и базовый уровни освоения компетенций, в процессе опроса подтвердили заявленный уровень сформированного пула компетенций: по общекультурным — на 92 %, по общепрофессиональным — на 86 %, по профессиональным — на 80 %.

Таким образом, компьютерное тестирование позволило выявить обучающихся, у которых в процессе обучения по дисциплинам был сформирован пул компетенций на минимальном, базовом или высоком уровне, что является индивидуальными достижениями обучающегося, фиксируемыми в электрон-

ной образовательно-информационной среде университета. Индивидуальная траектория развития обучающегося должна строиться образовательной организацией с учётом заявленного и подтверждённого уровней сформированности пула компетенций.

Библиографические ссылки

1. **Drucker P.P.** Managing in a Time of Great Change. Oxford, 1997.
2. **Egel N.** Order and Disorder in Today`s Global Order // Report from Princeton University hosted fifth workshop on global governance. 2015, 4—5 June.
3. **Porter M.E., Kramer M.R.** Strategy and Society: The Link Between Competitive Advantage and Corporate Social Responsibility // Harvard Business Review, December 2006. P. 78—92.
4. **Zakharov A., Carnoy M., Loyalka P.** Which teaching practices improve student performance on highstakes exams? Evidence from Russia // International Journal of Educational Development. 2014. Vol. 36 (May 2014). P. 13—21.
5. **Болотов В.А., Карданова Е.Ю., Енчикова Е.С., Илюшина Н.В., Наводнов В.Г.** К вопросу об оценке качества высшего образования // Высшее образование сегодня. 2015. № 6. С. 3—8.
6. **Денисов А.Р., Степанова М.М.** Управление образованием // Образование и наука. 2015. № 9. С. 15—36.
7. **Наводнов В.Г.** ФЭПО: Уровневая модель ПИМ для оценивания результатов обучения на соответствие требованиям ФГОС. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.i-exam.ru/sites/default/files/navodnov_v.g._layered_model.pdf, свободный (дата обращения: 09.09.2016).
8. **Звонников В.И., Челышкова М.Б.** Оценка качества результатов обучения при аттестации (компетентностный подход): учеб. пособие. М.: Логос, 2012. С. 11—17.
9. **Кельчевская Н.Р., Гончарова Н.В., Неволина А.Л.** Интеграция образования и фундаментальной науки: проблемы, тенденции, опыт // Экономика образования. 2013. № 4. С. 4—16.
10. **Семеко Г.В.** Исследовательские университеты: мировой опыт и стратегия России // Экономика образования. 2009. № 3. С. 70—94.
11. **Шадриков В.Д., Кургинян С.С.** Рефлексия субъекта в структуре деятельности // Современные исследования интеллекта и творчества / Под общ. ред. А.Л. Журавлева, Д.В. Ушакова, М.А. Холодной. М., Институт психологии РАН, 2015. С. 280—300.
12. **Методические** рекомендации по проведению апробации модели внутреннего мониторинга и оценки качества высшего профессионального образования и модели аудита результатов внутреннего мониторинга / А.В. Челохьян, О.В. Муленко, Д.В. Глазунов и др.: учеб.-метод. пособие. Ростов-н/Д., Ростовский государственный университет путей сообщения, 2012. С. 20—34.

Ссылка для цитирования

Тимофеева М.С., Семенов В.Н. Компьютерное тестирование как инструмент оценки уровня сформированности пула компетенций обучающихся // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 5. С. 232—240.

Вниманию авторов!

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

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

Сдано в набор 01.03.2018.	Отпечатано в ООО «Канцлер»
Подписано в печать 19.04.2018.	150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.	Оригинал-макет: ООО «Адвансед солюшнз».
Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.	119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

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