

НАДЕЖНОСТЬ И КАЧЕСТВО СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

№ 1 (29) 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Воронин Е. А., Дарьина А. Н., Дивеев А. И., Прокопьев И. В., Юрков Н. К. У ИСТОКОВ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ.....	3
---	---

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

Старостин И. Е. ПОЛУЧЕНИЕ МОДЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ИЗ ПОТЕНЦИАЛЬНО- ПОТОКОВЫХ УРАВНЕНИЙ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЭТИХ ОБЪЕКТАХ.....	5
Северцев Н. А., Юрков Н. К., Гришко А. К. К ПРОБЛЕМЕ ГЛОБАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ИНВЕРСНЫМ МЕТОДОМ.....	13
Марков Ю. В., Боков А. С., Важенин В. Г., Мухин В. В., Нестеров М. Ю., Иофин А. А. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТРАЖЕННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ	24
Кузнецов Н. С., Смогунов В. В., Юрков Н. К. ГЕТЕРОЛОГИЯ КАЧЕСТВА ГЕТЕРОСФЕР ЦИВИЛИЗАЦИЙ.....	35
Ширинкина Е. В. ПЛАТФОРМЫ ОБУЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ.....	42

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Подкопаев А. В., Подкопаев И. А. ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫЙ АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ БЕЗОТКАЗНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ РАЗЛИЧНОЙ ЭНТРОПИИ.....	49
Горбунов Н. В., Колесников А. Г., Крюков Ю. А., Смолянин Т. А. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЗОНЫ ЭРОЗИИ ПЛАНАРНОГО МАГНЕТРОНА	57
Адамов А. П., Адамова А. А., Семенцов С. Г., Темиров А. Т., Цивинская Т. А. ЗАМЕРЫ ДАВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ АГРЕССИВНЫХ СРЕД.....	67

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

Перевертов В. П., Андрончев И. К., Иванкова М. В. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ	76
Адамов А. П., Адамова А. А., Семенцов С. Г. СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В КОНСТРУКЦИИ ДАТЧИКОВ ДЛЯ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ.....	84

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Маслобоев А. В. СРЕДСТВА ПОДДЕРЖКИ ИНТЕРОПЕРАБЕЛЬНОСТИ СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ.....	91
---	----

RELIABILITY AND QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

№ 1 (29) 2020

CONTENT

Voronin E. A., Dar'ina A. N., Diveev A. I., Prokop'ev I. V., Yurkov N. K. AT THE ORIGINS OF THE THEORY OF RELIABILITY OF COMPLEX SYSTEMS.....	3
---	---

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

Starostin I. E. OBTAINING RELIABILITY MODELS OF TECHNICAL OBJECTS FROM POTENTIAL-STREAMING EQUATIONS OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROCESSES IN THESE OBJECTS	5
Severtsev N. A., Yurkov N. K., Grishko A. K. TO THE PROBLEM OF GLOBAL PARAMETER OPTIMIZATION RELIABILITY AND SECURITY OF COMPLEX DYNAMIC SYSTEMS USING THE INVERSE METHOD.....	13
Markov Yu. V., Vazhenin V. G., Bokov A. S., Mukhin V. V., Nesterov M. Yu., Iofin A. A. MODELING REFLECTED RADAR SIGNALS FOR MULTI-CHANNEL EARTH REMOTE SENSING SYSTEM.....	24
Kuznetsov N. S., Smogunov V. V., Yurkov N. K. HETEROLOGY OF THE QUALITY OF HETEROSPHERES OF CIVILIZATIONS.....	35
Shirinkina E. V. LEARNING PLATFORMS IN DIGITAL TRANSFORMATION	42

DIAGNOSTIC METHODS OF ENSURING THE RELIABILITY AND THE QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

Podkopaev A. V., Podkopaev I. A. CENTRALIZED ADAPTIVE ALGORITHM FOR EVALUATING THE RELIABILITY OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS OF VARIOUS ENTROPY	49
Gorbunov N. V., Kolesnikov A. G., Kryukov Yu. A., Smolyanin T. A. PREDICTION OF THE PLANAR MAGNETRON EROSION ZONE.....	57
Adamov A. P., Adamova A. A., Sementsov S. G., Temirov A. T., Tsivinskaya T. A. PRESSURE MEASUREMENTS IN AGGRESSIVE ENVIRONMENTS	67

TECHNOLOGICAL BASES OF IMPROVING THE RELIABILITY AND QUALITY OF PRODUCTS

Perevertov V. P., Andronchev I. K., Ivankova M. V. TECHNOLOGICAL CAPABILITIES OF CONCENTRATED ENERGY FLOWS FOR FORMING MACHINE PARTS.....	76
Adamov A. P., Adamova A. A., Sementsov S. G. MODERN MATERIALS IN THE CONSTRUCTION OF SENSORS FOR AEROSPACE VEHICLES.....	84

SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS

Masloboev A. V. INTEROPERABILITY SUPPORT FACILITIES FOR NETWORK-CENTRIC CONTROL SYSTEMS OF REGIONAL SECURITY	91
---	----

Е. А. Воронин, А. Н. Дарьина, А. И. Дивеев, И. В. Прокопьев, Н. К. Юрков

У ИСТОКОВ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

E. A. Voronin, A. N. Dar'ina, A. I. Diveev, I. V. Prokop'ev, N. K. Yurkov

AT THE ORIGINS OF THE THEORY OF RELIABILITY OF COMPLEX SYSTEMS

В феврале 2020 г. исполнилось 90 лет вице-адмиралу *Северцеву Николаю Алексеевичу*, автору многочисленных работ в области надежности сложных систем и одному из основателей нашего журнала. Вся жизнь Н. А. Северцева – это пример непоколебимого служения российской науке.

Н. А. Северцев родился в 1930 г. в крестьянской семье в Смоленской области. Его отец, Северцев Алексей Яковлевич, был землеустроителем в колхозе, имел образование геодезиста, создал образовательный кружок для сельской молодежи, активно учил грамоте взрослое население. Отец Н. А. Северцева погиб в Великую Отечественную войну в 1943 г. на Белорусском фронте.

Мать Н. А. Северцева – Варвара Спиридоновна Северцева (1899–1992) родилась в зажиточной семье, родила и воспитала семерых детей, награждена «Медалью Материнства» и медалью «За доблестный труд в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.».

Н. А. Северцев рос в многодетной семье, у него было еще 5 братьев и одна сестра. Его старший брат Северцев Василий Алексеевич также был участником войны, командовал пехотным взводом, имел воинское звание капитан, участвовал в Сталинградской битве, в битве на Курской дуге и в Висло-Одерской операции, закончил войну в Берлине, награжден многими медалями и орденами, после войны закончил МГУ им. М. В. Ломоносова, стал профессором, работал в Минвузе СССР.



Во время войны Н. А. Северцев переезжает в Донбасс, г. Горловка, шахта Кондратьевка, где он окончил среднюю школу № 23 в 1948 г. и после окончания поступил в Высшее военно-морское училище им. Ф. Э. Дзержинского в г. Ленинграде на факультет, готовивший инженеров-механиков по энергетическим установкам для подводных лодок. В 1954 г. после окончания инженерного училища ВМФ был распределен в действующий Балтийский флот по обезвреживанию магнитно-донных мин Балтийского моря и Финского залива, которые фашисты оставили в ВОВ. За непосредственное активное разминирование Балтийского моря Н. А. Северцев награжден орденом Красной звезды, впоследствии за эту работу получил звание «Ветеран боевых действий». За успешное выполнение боевых заданий был рекомендован для поступления в Военно-морскую академию кораблестроения и вооружения им. А. Н. Крылова. После успешного прохождения вступительных испытаний учился на факультете ракетного вооружения.

В 1960 г., окончив академию, был распределен в ОКБ-52 (генеральный конструктор – академик В. Н. Челомей), где занимался как главный ведущий специалист созданием крылатых ракет для ВМФ. С его непосредственным участием были созданы и приняты на вооружение ВМФ комплексы КР «Аметист», «Прогресс», «Редут», «Гранит», которые и ныне находятся на вооружении ВМФ России.

В 1970 г. Н. А. Северцев защитил кандидатскую диссертацию (по вопросам разработки методов и моделей надежности твердотопливных двигателей крылатых ракет, стартующих из-под воды с подводной лодки).

Северцев Николай Алексеевич внес большой личный вклад, позволивший существенным образом улучшить боевые возможности вооружения и военной техники Военно-морского флота. За участие в разработке и создании новой технологии, позволившей обеспечить высокую эффективность и надежность крылатых ракет для ВМФ, ему присуждена Государственная премия СССР. В 1977 г. Н. А. Северцев защитил докторскую диссертацию по оборонной тематике.

В 1975 г. распоряжением Правительства СССР Н. А. Северцев был откомандирован, с оставлением в кадрах МО СССР, на должность начальника отдела специальных проблем науки и техники в Высшую аттестационную комиссию при Совете министров СССР. Н. А. Северцев создал экспертный совет ВАК СССР по военным и военно-морским наукам при Главном штабе ВМФ по аттестации и подготовке научных кадров высшей квалификации для НИИ и вузов ВМФ, где вместе с известными российскими учеными аттестовал несколько тысяч докторов и кандидатов наук, профессоров, доцентов, старших научных сотрудников для МО СССР и ВПК.

С 1984 г. по настоящее время Н. А. Северцев работает в институтах Академии наук: Институте проблем кибернетики ИПК АН СССР (ныне – РАН) в должности заведующего лабораторией, заведующим отделом надежности и системотехники по созданию супер ЭВМ, Институте высокопроизводительных вычислительных систем, Вычислительном центре им. А. А. Дородницына и сейчас главным научным сотрудником Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» РАН.

Работая в ВЦ РАН им. А. А. Дородницына, Н. А. Северцев создал в 2001 г. диссертационный совет Д002.017.03. Совет под председательством Н. А. Северцева успешно работал до 2015 г., аттестовал большое количество кандидатов и докторов физико-математических и технических наук.

За годы работы Н. А. Северцев создал научную школу по проблемам оборонной безопасности. Вместе с возглавляемым им отделом занимался научными исследованиями в сотрудничестве по оборонной безопасности страны с НПО машиностроения (организация, созданная В. Н. Челомеем), НИИЦ подготовки космонавтов им. Ю. А. Гагарина, ОАО НИИ электроники, МВТУ им. Н. Э. Баумана, Московским институтом химического машиностроения (ныне ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет»), ГБОУ ВО «МАИ» (технический университет), ГБОУ ВО «Университет машиностроения (МАМИ)» и др.

Н. А. Северцев является автором более 30 монографий, 300 научных работ, 19 изобретений, создателем научной школы «Фундаментальные проблемы надежности, эффективности, устойчивости и безопасности систем». Под руководством Н. А. Северцева защищено 78 кандидатских и 26 докторских диссертаций, в том числе 5 докторов и 12 кандидатов наук для ВМФ.

Н. А. Северцев – член докторского Совета при РХТУ им. Д. И. Менделеева, член докторского Совета при НПО «Машиностроения» и научный консультант генерального директора данного НПО, председатель ГАК при МАИ и РУДН; вице-президент постоянно действующей Международной многоцелевой конференции «Надежность и качество» (Пенза), руководитель секции «Моделирование безопасности и устойчивости систем» конференции.

Также является действительным членом общественно-научных академий (Российской академии космонавтики им. К. Э. Циолковского, Академии проблем качества, Российской академии естественных наук), президентом Международного фонда ученых и инженеров имени академика В. Ф. Уткина.

Вся сознательная жизнь Н. А. Северцева связана с научной, творческой и организационной деятельностью в разработке фундаментально-прикладных исследований по созданию высоконадежных комплексов вооружения и военной техники.

Основные достижения:

- один из создателей теории эффективности, надежности и управления эксплуатационными процессами;
- один из создателей статистической теории подобию;
- создатель теории системного анализа, безопасности, надежности и эффективности комплексов машиностроения на всем жизненном цикле (проектирование, отработка, испытание и управление при эксплуатации);
- создатель теории управления эксплуатационными процессами технических систем по их состоянию (не по временному интервалу), что позволило увеличить их ресурс в два раза;
- создатель математической модели безопасности технических систем на заданном интервале времени;
- мастер спорта СССР по классической борьбе, член Союза писателей РФ.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

УДК 62-97-98

DOI 10.21685/2307-4205-2020-1-1

И. Е. Старостин

ПОЛУЧЕНИЕ МОДЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ИЗ ПОТЕНЦИАЛЬНО-ПОТОКОВЫХ УРАВНЕНИЙ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЭТИХ ОБЪЕКТАХ

I. E. Starostin

OBTAINING RELIABILITY MODELS OF TECHNICAL OBJECTS FROM POTENTIAL-STREAMING EQUATIONS OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROCESSES IN THESE OBJECTS

Аннотация. *Актуальность и цели.* При проектировании и создании оригинальных технических объектов, в том числе и компонентов авиационных систем, встает вопрос о надежности и безопасности их эксплуатации. Функционирование технических систем осуществляется протеканием физико-химических процессов в них. Для моделирования этих процессов автором был разработан в рамках современной неравновесной термодинамики потенциально-потокосый метод – единый подход математического описания и моделирования процессов различной физической и химической природы. Целью настоящей работы является разработка моделей для анализа надежности и безопасности технических объектов из уравнений физико-химических процессов в них. *Материалы и методы.* Ранее автором было показано, что, исключив из уравнений потенциально-потокосого метода неизвестные переменные величины и неизвестные постоянные коэффициенты, мы получим диагностические и прогностические модели технических объектов с точностью до данных, получаемых из испытания этих объектов и лабораторных систем. Описанное исключение величин из уравнений потенциально-потокосого метода в общем случае целесообразно осуществлять методами глубокого машинного обучения. Проведя испытания этих технических объектов и лабораторных систем,

Abstract. *Background.* When designing and creating original technical objects, including components of aviation systems, the question arises of the reliability and safety of their operation. The functioning of technical systems is carried out by the course of physical and chemical processes in them. To model these processes, the author developed a potential-flow method within the framework of modern nonequilibrium thermodynamics – a unified approach to the mathematical description and modeling of processes of various physical and chemical nature. The aim of this work is to develop models for analyzing the reliability and safety of technical objects from the equations of physical and chemical processes in them. *Materials and methods.* Earlier, the author showed that by eliminating unknown variables and unknown constant coefficients from the equations of the potential-flow method, we obtain diagnostic and prognostic models of technical objects accurate to the data obtained from testing these objects and laboratory systems. The described exclusion of quantities from the equations of the potential-streaming method in the general case, it is advisable to carry out deep machine learning methods. Having tested these technical objects and laboratory systems, substituting the obtained test results in these diagnostic and prognostic models, we obtain models for solving various practical problems, including the tasks of ensuring the re-

подставив полученные результаты испытаний в эти диагностические и прогностические модели, мы получаем модели для решения различных практических задач, в том числе задач обеспечения надежности и безопасности эксплуатации технических объектов. *Результаты и выводы.* На основе описанных методов в настоящей работе представляется алгоритм получения моделей надежности технических объектов из информации о физико-химических процессах в этих объектах. Результаты работы позволяют планировать и проводить испытания конкретных технических объектов с последующим анализом надежности и безопасности эксплуатации этих объектов и дальнейшей разработкой методики повышения показателей надежности и безопасности эксплуатации рассматриваемых технических объектов. Этот анализ проводится с использованием моделей надежности, полученных из уравнений (потенциально-потокowych) физико-химических процессов этих объектов, что гарантирует адекватность этих моделей для различных режимов работы этих объектов (в том числе и для тех, для которых не проводились испытания этих объектов), так как потенциально-потоковой метод – единый подход описания физико-химических процессов различной природы, то рассматриваемая методология также представляет собой единый подход получения математических моделей сложных технических объектов различной природы. Этот подход позволяет разрабатывать сложные технические объекты повышенной надежности и повышенной безопасности эксплуатации.

Ключевые слова: технические объекты, надежность и безопасность эксплуатации, потенциально-потоковой метод, математическое моделирование.

liability and safety of operation of technical objects. *Results.* Based on the described methods, the present paper presents an algorithm for obtaining the reliability models of technical objects from information on the physicochemical processes in these objects. *Conclusions.* The results of the work make it possible to plan and carry out tests of specific technical objects with the subsequent analysis of the reliability and safety of operation of these objects and the further development of a methodology to increase the reliability and safety indicators of operation of the considered technical objects. This analysis is carried out using reliability models obtained from the equations (potential-flow) of the physicochemical processes of these objects, which guarantees the adequacy of these models for various operating modes of these objects (including those for which these objects have not been tested). Because Since the potential-flow method is a unified approach to the description of physical and chemical processes of various nature, the methodology under consideration also represents a single approach to obtaining mathematical models of complex technical objects of various nature. This approach allows the development of complex technical objects with increased reliability and increased operational safety.

Keywords: technical objects, reliability and safety of operation, potential-stream method, mathematical modeling.

Введение

В процессе проектирования и создания новых технических объектов принципиальная роль отводится обеспечению надежности и безопасности их эксплуатации [1]. Как известно, функционирование технических объектов, проведение технологических операций определяются протеканием физико-химических процессов в этих системах [2].

Для описания и математического моделирования физико-химических процессов в общем случае автором был разработан в рамках современной неравновесной термодинамики [3–5] потенциально-потоковой метод – единый подход моделирования физико-химических систем (в том числе и сложных), в которых протекают процессы различной физической и химической природы [2, 6–9]. В соответствии с этим методом на основе факторов, определяющих динамику физико-химических процессов (рис. 1) [2–10] синтезируется система уравнений динамики этих процессов в соответствии с формализмом, изложенным в работе [6], которая затем дополняется уравнениями для выходных характеристик системы [10–12]. Часть этих выходных характеристик рассматриваемой системы входит в ее критерии работоспособности [1].

Для получения из этих уравнений в численном виде динамики физико-химических процессов необходима информация о свойствах веществ и процессов в этой системе, получаемая из экспериментальных данных [10]. Затем из полученной потенциально-потокowym методом системы уравнений динамики физико-химических процессов численно-аналитическими методами исключаются динамические координаты (координаты состояния, однозначно определяющие состояние системы в любой текущий момент времени независимо от ее предыстории [2–4, 6]), ее индивидуальные параметры, неизвестные внешние воздействия на нее, а также частично коэффициенты, входящие

в функциональные разложения свойств веществ и процессов [9–12]. Затем, учтя полученную из экспериментальных данных информацию о свойствах веществ и процессов, мы получим связь одних выходных характеристик с другими (наблюдаемыми) [10–12]. В частности, связь выходных характеристик, входящих в критерии работоспособности технического объекта (которые в большинстве случаев ненаблюдаемые [1]) с наблюдаемыми выходными характеристиками этого объекта. Имея такую связь, сделать выводы о работоспособности этого объекта [1], а также, используя дополнительно методы теории вероятности, определить вероятность безотказной работы объекта [1].



Рис. 1. Факторы, определяющие динамику физико-химических процессов

Таким образом, из системы уравнений физико-химических процессов, полученной потенциально-потокным методом для произвольной системы, в которой эти процессы протекают, возможно получить математические модели для анализа надежности этой системы. Настоящая статья посвящена получению из системы уравнений потенциально-потокного метода этих математических моделей надежности системы.

Диагностические и прогностические модели технических объектов

Итак, исключив из потенциально-потокных уравнений вышеописанные величины и учтя информацию о коэффициентах функциональных разложений свойств веществ и процессов, полученную из эксперимента, мы получим связь наблюдаемых выходных характеристик рассматриваемой системы в последующие моменты времени с этими наблюдаемыми характеристиками в текущий и предыдущий моменты времени (прогностическая модель) [10–12]:

$$\mathbf{v}_z(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}_z(t), \mathbf{x}_s(t), \mathbf{q}) + \mathbf{e}_z(t), \quad (1)$$

где $\mathbf{v}_z(t)$ – старшие производные наблюдаемых характеристик $\mathbf{z}(t)$; $\mathbf{x}_z(t)$ – наблюдаемые характеристики $\mathbf{z}(t)$ и их младшие производные; $\mathbf{x}_s(t)$ – известные внешние воздействия $\mathbf{s}(t)$ и их производные; $\mathbf{q}$ – параметры, получаемые из результатов испытаний рассматриваемой системы; $\mathbf{e}_z(t)$ – составляющие шума. Связь ненаблюдаемых выходных характеристик рассматриваемой системы в текущий момент времени с ее наблюдаемыми характеристиками в текущий и предыдущий моменты времени (диагностическая модель) [10–12]:

$$\mathbf{v}_y(t) = \mathbf{g}(\mathbf{x}_y(t), \mathbf{x}_z(t), \mathbf{x}_s(t), \mathbf{q}) + \mathbf{e}_y(t), \quad \mathbf{x}_y(t_0) = \tilde{\mathbf{g}}(\mathbf{x}_z(t_0), \mathbf{x}_s(t_0), \mathbf{q}) + \mathbf{e}_y, \quad (2)$$

где $\mathbf{v}_y(t)$ – старшие производные ненаблюдаемых характеристик $\mathbf{y}(t)$ рассматриваемой системы; $\mathbf{x}_y(t)$ – ненаблюдаемые выходные характеристики $\mathbf{y}(t)$ и их младшие производные; $\mathbf{e}_y(t)$ – со-

ставляющие шума. Производные по времени выходных характеристик системы, входящие в формулы (1) и (2), могут быть как непрерывными производными, так и дискретными (разделенными разностями [13]).

Имея диагностические и прогностические модели (1) и (2), выполнив испытания рассматриваемого экземпляра, получив результаты из испытаний этого экземпляра параметра $\mathbf{q}$, возможно получить динамику его выходных характеристик (наблюдаемых и ненаблюдаемых), среди которых находятся характеристики, входящие в критерии работоспособности рассматриваемой системы [1]. Эти модели в силу сложности системы потенциально-поточковых уравнений [2–4, 6, 9, 11] получают численно-аналитическими методами Монте-Карло путем случайного задания значений [11]:

- коэффициентов функциональных разложений свойств веществ и процессов [9, 10];
- индивидуальных параметров системы [10];
- начального состояния системы;
- неизвестных внешних воздействий на нее;

а также дальнейшего расчета соответствующих этим заданным величинам динамик выходных характеристик системы (и их производных) и затем аппроксимации зависимостей (1) и (2).

Эта аппроксимация может быть выполнена:

- классическими методами аппроксимации [13];
- классическими методами машинного обучения [14, 15] (являющиеся дальнейшим развитием классических методов идентификации [16]);
- методами глубокого машинного обучения (в частности, с использованием нейронных сетей [17–20], методами символьной регрессии [21–24]).

Так как в силу сложности физико-химических процессов в общем случае невозможно заранее предсказать, в каком классе моделей следует искать зависимости (1) и (2), то для получения этих зависимостей следует использовать методы глубокого машинного обучения [17–24] (так как классические методы подразумевают знание классов, в которых ищутся эти зависимости (1) и (2) [13–16]).

Учет медленно протекающих деградиционных физико-химических процессов

Для упрощения получения диагностических и прогностических моделей (1) и (2) рассматриваемой системы потенциально-поточковые уравнения динамики физико-химических процессов в ней упрощаются методами, описанными в работе [8]. Частным случаем такого упрощения [8] является разделение физико-химических процессов в рассматриваемой системе на медленно протекающие и быстро протекающие процессы [8]. На относительно небольших промежутках времени координаты состояния, изменяющиеся в результате медленно протекающих процессов фиксируются («замораживаются»), и все описание этих медленно протекающих процессов из системы уравнений физико-химических процессов убирается. Затем из этой упрощенной системы потенциально-поточковых уравнений описанным выше способом (путем исключения вышеописанных величин численно-аналитическими методами Монте-Карло) получают диагностические и прогностические модели:

$$\mathbf{v}_z(t) = \bar{\mathbf{f}}(\mathbf{x}_z(t), \mathbf{x}_s(t), \bar{\mathbf{q}}, \mathbf{r}(t)) + \mathbf{e}_z(t), \quad (3)$$

$$\mathbf{v}_y(t) = \bar{\mathbf{g}}(\mathbf{x}_y(t), \mathbf{x}_z(t), \mathbf{x}_s(t), \bar{\mathbf{q}}, \mathbf{r}(t)) + \mathbf{e}_y(t), \quad \mathbf{x}_y(t_0) = \bar{\mathbf{g}}(\mathbf{x}_z(t_0), \mathbf{x}_s(t_0), \bar{\mathbf{q}}, \mathbf{r}(t_0)) + \mathbf{e}_y, \quad (4)$$

где $\mathbf{r}(t)$ – параметры, получаемые из результатов периодических испытаний рассматриваемой системы; эти параметры $\mathbf{r}(t)$ квазистационарные; $\bar{\mathbf{q}}$ – параметры, получаемые из испытаний рассматриваемой системы в начале ее эксплуатации. Прогностические и диагностические модели (3) и (4) аналогичны моделям (1) и (2) соответственно.

Прогностическая модель для квазистационарных параметров $\mathbf{r}(t)$, аналогичная (1):

$$\mathbf{v}_r(t) = \mathbf{f}^*(\mathbf{x}_r(t), \mathbf{p}_s(t), \bar{\mathbf{q}}) + \mathbf{e}_r(t), \quad (5)$$

где $\mathbf{v}_r(t)$ – старшие производные (разделенные разности) параметров $\mathbf{r}(t)$ рассматриваемой системы; $\mathbf{x}_r(t)$ – параметры $\mathbf{r}(t)$ и их младшие производные (разделенные разности); $\mathbf{p}_s(t)$ – характе-

ристики известных внешних воздействий $s(t)$, меняющиеся во времени существенно медленнее, чем эти воздействия $s(t)$; $e_r(t)$ – составляющие шума. Эта модель (5) получается численно-аналитическими методами Монте-Карло аналогично модели (1); для получения (5) необходимо моделировать как быстро, так и медленно протекающие процессы, используя в общем случае методы упрощения, описанные в работе [8].

Следует также отметить, что модели (3) и (4) (как и модели (1) и (2)) и модель (5) формируются для различных временных шкал. Прогностическая модель (5) может быть использована для выбора временных промежутков между периодическим техническим обслуживанием рассматриваемой системы, а также (наряду с моделями (3) и (4)) для выбора наиболее оптимальных режимов эксплуатации этой системы. Прогностические и диагностические модели (3) и (4) могут быть использованы для синтеза системы управления, выбора режима эксплуатации системы, ее диагностики.

В число ненаблюдаемых выходных характеристик системы $y(t)$ в общем случае входят как быстро меняющиеся характеристики (ненаблюдаемые) системы, так и медленно меняющиеся ненаблюдаемые характеристики рассматриваемой системы.

Получение вероятностных моделей технических объектов

Как нетрудно видеть из формул (3)–(5), для получения прогностических и диагностических моделей произвольной рассматриваемой системы (технического объекта) необходимы контрольные испытания этого объекта (входные и периодические). Из этих контрольных испытаний и определяются параметры $r(t)$ и $\bar{q}$, входящие в модели (3)–(5).

Однако в общем случае не всегда имеется возможность провести эти контрольные испытания. Более того, эти контрольные испытания должны быть неразрушающими (т.е. не выводящими испытываемый объект из строя). Однако могут быть случаи, когда из особенностей протекания физико-химических процессов в рассматриваемом объекте возможно получить лишь модели (3)–(5), принимающие на вход результаты разрушающих испытаний этих объектов. В описанных случаях возможно получить лишь из таких прогностических и диагностических моделей (3)–(5) вероятностные модели, используя статистику испытаний экземпляров рассматриваемой модели системы. Для решения этой задачи используются методы теории вероятностей, теории случайных процессов [25–27], а также методы Монте-Карло [25].

В соответствие с этими методами, используя статистику испытаний экземпляров рассматриваемой модели технического объекта, мы получим статистику параметров $r(t)$ и $\bar{q}$, входящих в модели (3)–(5). Затем, подставив каждую совокупность этих параметров $r(t)$ и $\bar{q}$ в модель (3)–(5), получим статистику этих диагностических и прогностических моделей для каждого экземпляра рассматриваемой модели технического объекта. Из этой статистики моделей мы получим статистику соответствующих динамик выходных характеристик, а из этой статистики динамик выходных характеристик, используя определения вероятности, мы получим вероятностные характеристики рассматриваемой системы [14, 25], а затем методами теории вероятностей и теории случайных процессов связь между ними [14, 25–27]. Отсюда и получаются вероятностные модели рассматриваемой системы [14, 25].

Получение показателей надежности

В общем случае критерии работоспособности системы имеют вид [1]

$$x_1^{(\min)} \leq x_1(t) \leq x_1^{(\max)}, x_2(t) \leq x_2^{(\max)}, x_3^{(\min)} \leq x_3(t). \quad (6)$$

Величинами x (с индексами) могут быть как наблюдаемые выходные характеристики $z(t)$, так и ненаблюдаемые выходные характеристики $y(t)$. Из этих критериев работоспособности (6) путем использования логических операций мы получаем более сложные критерии работоспособности [1]. Имея критерии работоспособности (6), а также прогностические и диагностические модели (3) и (4), мы можем спрогнозировать работоспособность системы [1], а также получить ее показатели надежности [1] (например, время безотказной работы).

Однако, как отмечалось выше, далеко не всегда из испытаний конкретного экземпляра технического объекта можно получить параметры $\mathbf{r}(t)$ и $\bar{\mathbf{q}}$. Отсюда из прогностических и диагностических моделей (3)–(5) мы описанным выше способом с использованием методов Монте-Карло [25], методов теории вероятностей и теории случайных процессов получаем вероятностные модели (имея статистику испытаний технических объектов (контрольных), из которой и получаем статистику этих параметров $\mathbf{r}(t)$ и $\bar{\mathbf{q}}$) [14, 26, 27]. Используя прогностические и диагностические модели (3)–(5), а также определения критериев работоспособности (6), мы получим описанным выше способом (с использованием методов Монте-Карло [25]) вероятностные характеристики надежности (например, вероятность безотказной работы в течение заданного промежутка времени) [1].

Заключение

Таким образом, для получения надежностных характеристик произвольного рассматриваемого технического объекта необходимо потенциально-потокowym методом синтезировать систему уравнений физико-химических процессов в этом объекте (в соответствии с изложенным в работе [6] формализмом). Затем, исключив (численно-аналитическими методами Монте-Карло [11]) из этой системы уравнений координаты состояния, индивидуальные параметры, неизвестные внешние воздействия, а также частично (с учетом результатов испытаний лабораторных систем [11, 12]) коэффициенты функциональных разложений свойств веществ и процессов, получим прогностические и диагностические модели (3)–(5) [11, 12]. Затем из этих моделей, используя критерии работоспособности (6), получаем характеристики надежности (в общем случае используя статистику параметров $\mathbf{r}(t)$ и $\bar{\mathbf{q}}$ для различных экземпляров рассматриваемой модели технического объекта).

Также по диагностическим и прогностическим моделям (3)–(5) и критериям работоспособности (6) можно прогнозировать (в общем случае с некоторой вероятностью) работоспособность конкретного экземпляра рассматриваемого технического объекта.

Отсюда роль моделирования физико-химических процессов (потенциально-потокowym методом) в рассматриваемом техническом объекте (для задач анализа надежности и безопасности эксплуатации) сводится к исключению из системы потенциально-потокowych уравнений вышеописанных величин и получению диагностических и прогностических моделей (3)–(5) этого объекта. В случае протекания в рассматриваемом объекте механических движений электромагнитных процессов потенциально-потокowe уравнения дополняются соответствующими уравнениями.

Библиографический список

1. Колодежный, Л. П. Надежность и техническая диагностика : учебник для вузов / Л. П. Колодежный, А. В. Чернодаров. – Москва : ВУНЦ ВВС ВВА им. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, 2010. – 452 с.
2. Старостин, И. Е. Программная реализация методов современной неравновесной термодинамики и система симуляции физико-химических процессов SimulationNonEqProcSS v.0.1.0 : монография / И. Е. Старостин, А. Г. Степанкин. – Бо Бассен, Маврикий : Lambert academic publishing, 2019. – 127 с.
3. Эткин, В. А. Энергодинамика: синтез теорий переноса и преобразования энергии : монография / В. А. Эткин. – Санкт-Петербург : Наука, 2008. – 409 с.
4. Жоу, Д. Расширенная необратимая термодинамика : монография / Д. Жоу, Х. Касас-Баскес, Дж. Лебон. – Москва ; Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика» ; Институт компьютерных исследований, 2006. – 528 с.
5. Полак, Л. С. Неравновесная химическая кинетика и ее применение : монография / Л. С. Полак. – Москва : Наука, 1979. – 248 с.
6. Starostin, I. E. Kinetic theorem of modern non-equilibrium thermodynamic : monograph / I. E. Starostin, V. I. Bykov. – Raleigh (North Carolina, USA) : Open Science Publishing, 2017. – 229 p.
7. Старостин, И. Е. Алгоритм численного интегрирования потенциально-потокowych уравнений в сосредоточенных параметрах с контролем корректности приближенного решения / И. Е. Старостин // Компьютерные исследования и моделирование. – 2014. – Т. 6, № 4. – С. 479–493.
8. Старостин, И. Е. Упрощение потенциально-потокowych уравнений динамики физико-химических процессов для получения математической модели системы / И. Е. Старостин, С. П. Халютин, В. И. Быков // Сложные системы. – 2019. – № 3 (32). – С. 82–97.
9. Старостин, И. Е. Задание функций состояния для величин, входящих в формализм потенциально-потокowego метода описания динамики физико-химических процессов / И. Е. Старостин // Инновационные информационные и коммуникационные технологии : материалы XVI Междунар. науч.-практ. конф. – Москва : Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2019. – С. 317–322.

10. Starostin, I. E. Obtaining robotic objects model from the equations of the potential-flow method / I. E. Starostin, S. P. Khalutin // 20th international conference on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2019. – Novosibirsk : Publishing NSTU, 2019. – P. 678–684.
11. Старостин, И. Е. Методика получения математической модели эксплуатируемого объекта из потенциально-потокowych уравнений физико-химических процессов / И. Е. Старостин // Научные горизонты. – 2019. – № 10 (26). – С. 197–206.
12. Старостин, И. Е. К вопросу программной реализации методики получения математической модели эксплуатируемого объекта из потенциально-потокowych уравнений физико-химических процессов / И. Е. Старостин // Научные горизонты. – 2019. – № 11 (27). – С. 214–230.
13. Калиткин, Н. Н. Численные методы : учебник для вузов / Н. Н. Калиткин. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2011. – 592 с.
14. Flach, P. Machine Learning. The Art and Science of Algorithms that Make Sense of Data : monograph / P. Flach. – Cambridge : Cambridge University Press, 2015. – 400 p.
15. Brink, H. Real Word. Machine Learning : monograph / H. Brink, J. W. Richards, M. Fetherolf. – Shelter Island, New York, USA : Manning Publications, 2017. – 338 p.
16. Eykhoff, P. Systems identification: parametrs and state estimation : monograph / P. Eykhoff. – Eindhoven, Netherlands : University of technology, 1975. – 680 p.
17. Haykin, S. Neural Networks. A Comprehensive Foundation : university textbook / S. Haykin. – Upper Saddle River, USA : Prentice hall, 2006. – 1105 p.
18. Пюкке, Г. А. Применение нейросетевого подхода при построении моделей анализа систем высокой размерности / Г. А. Пюкке, Д. С. Стрельников // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2013. – № 24. – С. 21–28.
19. Козлова, Л. Е. Разработка и исследование систем замкнутого асинхронного электропривода по схеме ТРН-АД с нейросетевым наблюдателем скорости / Л. Е. Козлова // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5. – С. 44–50.
20. Калистратов, Т. А. Методы и алгоритмы создания структуры нейронной сети в контексте универсальной аппроксимации функций / Т. А. Калистратов // Вестник Томского государственного университета. – 2019. – Т. 19, вып. 6. – С. 1845–1848.
21. Дивеев, А. И. Вариационные методы символьной регрессии для задач управления и идентификации / А. И. Дивеев // Идентификация систем и задачи управления : тр. X Междунар. конф. (Москва, 26–29 января, 2015 г.). – Москва, 2015. – С. 141–148.
22. Дивеев, А. И. Свойства суперпозиции функций для численных методов символьной регрессии / А. И. Дивеев // Cloud of Science. – 2016. – Т. 3, № 2. – С. 290–301.
23. Данг, Тхи Фук. Решение задач идентификации математических моделей объектов и процессов методом символьной регрессии / Тхи Фук Данг, А. И. Дивеев, Е. А. Софронова // Cloud of Science. – 2018. – Т. 5, № 1. – С. 147–162.
24. Дивеев, А. И. Метод бинарного генетического программирования для поиска математического выражения / А. И. Дивеев, Е. М. Ломакова // Вестник Российского университета дружбы народов. Сер.: Инженерные исследования. – 2017. – Т. 18, № 1. – С. 125–134.
25. Антонов, А. В. Системный анализ : учебник для вузов / А. В. Антонов. – Москва : Высш. шк., 2004. – 454 с.
26. Теория вероятностей : учебник для вузов / А. В. Печинкин [и др.]. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 456 с.
27. Волков, И. К. Случайные процессы : учебник для вузов / И. К. Волков, С. М. Зуев, Г. М. Цветкова. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. – 448 с.

References

1. Kolodezhnyy L. P., Chernodarov A. V. *Nadezhnost' i tekhnicheskaya diagnostika: uchebnik dlya vuzov* [Reliability and technical diagnostics: textbook for universities]. Moscow: VUNTs VVS VVA im. N. E. Zhukovskogo i Yu. A. Gagarina, 2010, 452 p. [In Russian]
2. Starostin I. E., Stepankin A. G. *Programmnyaya realizatsiya metodov sovremennoy neravnovesnoy termodinamiki i sistema simulyatsii fiziko-khimicheskikh protsessov SimulationNonEqProcSS v.0.1.0: monografiya* [Software implementation of methods of modern non-equilibrium thermodynamics and a system for simulating physical and chemical processes SimulationNonEqProcSS V. 0. 1 . 0: monograph]. Bo Bassen, Mavrikiy: Lambert academic publishing, 2019, 127 p. [In Russian]
3. Etkin V. A. *Energodinamika: sintez teoriy perenosa i preobrazovaniya energii: monografiya* [Energy dynamics: synthesis of theories of energy transfer and transformation: monograph]. Saint-Petersburg: Nauka, 2008, 409 p. [In Russian]
4. Zhou D., Kasas-Baskes Kh., Lebon Dzh. *Rasshirennaya neobratimaya termodinamika: monografiya* [Extended irreversible thermodynamics: monograph]. Moscow; Izhevsk: NITs «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika»; Institut komp'yuternykh issledovaniy, 2006, 528 p. [In Russian]

5. Polak L. S. *Neravnovesnaya khimicheskaya kinetika i ee primeneniye: monografiya* [Non-equilibrium chemical kinetics and its application: monograph]. Moscow: Nauka, 1979, 248 p. [In Russian]
6. Starostin I. E., Bykov V. I. *Kinetic theorem of modern non-equilibrium thermodynamic: monograph*. Raleigh (North Carolina, USA): Open Science Publishing, 2017, 229 p.
7. Starostin I. E. *Kompyuternye issledovaniya i modelirovaniye* [Computer research and modeling]. 2014, vol. 6, no. 4, pp. 479–493. [In Russian]
8. Starostin I. E., Khalyutin S. P., Bykov V. I. *Slozhnye sistemy* [Complex system]. 2019, no. 3 (32), pp. 82–97. [In Russian]
9. Starostin I. E. *Innovatsionnye informatsionnye i kommunikatsionnye tekhnologii: materialy XVI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Innovative information and communication technologies: proceedings of the XVI international scientific-practical conf.]. Moscow: Assotsiatsiya vypusnikov i sotrudnikov VVIA im. prof. N. E. Zhukovskogo, 2019, pp. 317–322. [In Russian]
10. Starostin I. E., Khalutin S. P. *20th international conference on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2019*. Novosibirsk: Publishing NSTU, 2019, pp. 678–684.
11. Starostin I. E. *Nauchnye gorizonty* [Scientific horizons]. 2019, no. 10 (26), pp. 197–206. [In Russian]
12. Starostin I. E. *Nauchnye gorizonty* [Scientific horizons]. 2019, no. 11 (27), pp. 214–230. [In Russian]
13. Kalitkin N. N. *Chislennyye metody: uchebnik dlya vuzov* [Numerical methods: textbook for universities]. Saint-Petersburg: BKhV-Peterburg, 2011, 592 p. [In Russian]
14. Flach P. *Machine Learning. The Art and Science of Algorithms that Make Sense of Data: monograph*. Cambridge: Cambridge University Press, 2015, 400 p.
15. Brink H., Richards J. W., Fetherolf M. *Real Word. Machine Learning: monograph*. Shelter Island, New York, USA: Manning Publications, 2017, 338 p.
16. Eykhoff P. *Systems identification: parametrs and state estimation: monograph*. Eindhoven, Netherlands: University of technology, 1975, 680 p.
17. Haykin S. *Neural Networks. A Comprehensive Foundation: university textbook*. Upper Saddle River, USA: Prentice hall, 2006, 1105 p.
18. Pyukke G. A., Strel'nikov D. S. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Kamchatka state technical University]. 2013, no. 24, pp. 21–28. [In Russian]
19. Kozlova L. E. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education]. 2013, no. 5, pp. 44–50. [In Russian]
20. Kalistratov T. A. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Tomsk state University]. 2019, vol. 19, iss. 6, pp. 1845–1848. [In Russian]
21. Diveev A. I. *Identifikatsiya sistem i zadachi upravleniya: tr. X Mezhdunar. konf. (Moskva, 26–29 yanvarya, 2015 g.)* [Identification of systems and management tasks: pr. X international conf. (Moscow, January 26–29, 2015)]. Moscow, 2015, pp. 141–148. [In Russian]
22. Diveev A. I. *Cloud of Science*. 2016, vol. 3, no. 2, pp. 290–301. [In Russian]
23. Dang Tkhi Fuk., Diveev A. I., Sofronova E. A. *Cloud of Science*. 2018, vol. 5, no. 1, pp. 147–162. [In Russian]
24. Diveev A. I., Lomakova E. M. *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Ser.: Inzhenernye issledovaniya* [Bulletin of the peoples' friendship University of Russia. Ser.: Engineering research]. 2017, vol. 18, no. 1, pp. 125–134. [In Russian]
25. Antonov A. V. *Sistemnyy analiz: uchebnik dlya vuzov* [System analysis: textbook for universities]. Moscow: Vyssh. shk., 2004, 454 p. [In Russian]
26. Pechinkin A. V. et al. *Teoriya veroyatnostey: uchebnik dlya vuzov* [Probability theory: textbook for universities]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N. E. Bauman, 2004, 456 p. [In Russian]
27. Volkov I. K., Zuev S. M., Tsvetkova G. M. *Sluchaynye protsessy: uchebnik dlya vuzov* [Random processes: a textbook for universities]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N. E. Bauman, 1999, 448 p. [In Russian]

Старостин Игорь Евгеньевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра электротехники
и авиационного электрооборудования,
Московский государственный
технический университет гражданской авиации
(Россия, г. Москва, Кронштадтский бульвар, 20)
E-mail: starostinigo@yandex.ru

Starostin Igor Evgenievich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of electrical engineering
and aviation electrical equipment,
Moscow State Technical University of Civil Aviation
(20 Kronstadt boulevard, Moscow, Russia)

Образец цитирования:

Старостин, И. Е. Получение моделей надежности технических объектов из потенциально-поточных уравнений физико-химических процессов в этих объектах / И. Е. Старостин // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 1 (29). – С. 5–12. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-1-1.

Н. А. Северцев, Н. К. Юрков, А. К. Гришко

К ПРОБЛЕМЕ ГЛОБАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ИНВЕРСНЫМ МЕТОДОМ

N. A. Severtsev, N. K. Yurkov, A. K. Grishko

TO THE PROBLEM OF GLOBAL PARAMETER OPTIMIZATION RELIABILITY AND SECURITY OF COMPLEX DYNAMIC SYSTEMS USING THE INVERSE METHOD

Аннотация. Актуальность и цели. Сложные динамические системы характеризуются множеством параметров, которые в процессе проектирования и эксплуатации изменяются, что может привести к потере надежности и безопасности системы, дополнительным расходам на поддержание их работоспособности. В процессе проектирования необходимо решить оптимизационную задачу с целью определения наилучших значений параметров системы или ее структуры. Приходится иметь дело с многоэкстремальными целевыми функциями и уравнениями большой размерности. Поиск эффективных методов нахождения глобального минимума или максимума в некоторой области конечномерного векторного пространства возможных проектных решений является актуальной задачей. Целью работы является разработка эффективного метода глобальной оптимизации в задачах построения сложных динамических систем. **Материалы и методы.** В работе использованы теория статистического синтеза сложных систем, методы поисковой оптимизации и математической статистики, а также метод формирования обратных функций. **Результаты.** Разработан принципиально новый метод решения задач глобальной оптимизации, в которых на целевую функцию не накладываются какие-либо специальные ограничения. Инверсный метод состоит в представлении варьируемых параметров в виде аппроксимирующих обратных функций, аргументом которых является значение целевой функции, которая изменяется по определенным правилам, образуя частично релаксационную последовательность. **Выводы.** Представление обратных аппроксимирующих функций позволило избежать просмотра критериальной поверхности на всем допустимом множестве, так как зондирование поверхности осуществляется лишь в направлении улучшения критерия оптимальности. Так как аппроксимирующие функции определяются ограниченным числом свободных параметров, то серьезно снижается размерность решаемых задач и снимаются ограничения на вид и особенности целе-

Abstract. *Background.* Complex dynamic systems are characterized by many parameters that change during the design and operation, which can lead to a loss of reliability and security of the system, additional costs for maintaining their performance. In the design process, it is necessary to solve the optimization problem in order to determine the best values of the system parameters or its structure. One has to deal with multi-extreme objective functions and equations of large dimension. The search for effective methods for finding a global minimum or maximum in a certain area of a finite-dimensional vector space of possible design solutions is an urgent task. The aim of the work is to develop an effective method of global optimization in the tasks of constructing complex dynamic systems. *Materials and methods.* The work uses the theory of statistical synthesis of complex systems, search engine optimization methods and mathematical statistics, as well as the method of generating inverse functions. *Results.* A fundamentally new method has been developed for solving global optimization problems in which no special restrictions are imposed on the objective function. The inverse method consists in representing variable parameters in the form of approximating inverse functions, the argument of which is the value of the objective function, which changes according to certain rules, forming partly a relaxation sequence. *Conclusions.* Representation of the inverse approximating functions made it possible to avoid viewing the criterial surface on the entire admissible set, since surface sensing is carried out only in the direction of improving the optimality criterion. Since the approximating functions are determined by a limited number of free parameters, the dimensionality of the problems to be solved is seriously reduced and the restrictions on the form and features of the objective functions are removed. The developed method is proposed to be used in the process of constructing and evaluating the reliability and safety of complex dynamic systems with variable structure and parameters.

вых функций. Разработанный метод предлагается применять в процессе построения и оценке надежности и безопасности сложных динамических систем с переменной структурой и параметрами.

Ключевые слова: многоэкстремальная функция, глобальный экстремум, обратная целевая функция, инверсная выборка.

Keywords: multi-extreme function, global extremum, inverse objective function, inverse sampling.

Введение

Развитие методов поиска глобального экстремума многомерных функций в настоящее время позволяет решать все больший спектр нелинейных задач с негладкими, многоэкстремальными функциями. Ведущее положение здесь занимают методы неравномерных покрытий и их модификации [1, 2], методы, построенные на генетических алгоритмах [3] и на нечетко-нейронных сетях [4, 5].

В данной работе рассматривается применение инверсного метода (метода построения обратных функций) к решению задач глобальной оптимизации. Многочисленные приложения в информатике показывают, что задача поиска глобального минимума становится тривиальной, если известна функция, обратная к целевой функции.

Постановка задачи

Пусть для непрерывной функции $f: R^n \rightarrow R$, ограниченной снизу $f(x) > -\infty$, ставится задача отыскания глобального минимума на допустимом множестве $X \subset R^n$

$$f_* = \mathop{\text{glob min}}_{x \in X} f(x) = f(x_*), \quad (1)$$

здесь x_* – любая точка глобального минимума, равного f_* .

В задаче (1) исключаются функции из класса $C^0(x)$, принимающие некоторое постоянное значение ξ_0 на множестве точек X положительной меры, т.е. $m\{x: f(x) = \xi_0\} > 0$.

Определим для этой задачи множество решений X_* и множество ε – оптимальных решений X_ε [2]:

$$\begin{aligned} X_* &= \{x \in X: f(x) = f_*\}; \\ X_\varepsilon &= \{x \in X: f(x) \leq f_* + \varepsilon\}, \varepsilon > 0, X_\varepsilon \neq \emptyset. \end{aligned} \quad (2)$$

Требуется найти хотя бы одну точку из множества X_ε .

Теоретическая часть

Рассмотрим простой пример функции одной переменной $J = f(x)$. Если на отрезке $[x_1, x_2]$ существует обратная функция $x = f^{-1}(J)$, то вычисляя

$$x^{(k)} = f^{-1}(J^{(k)}) \quad (3)$$

при последовательном уменьшении значений целевой функций $J^{(k)}$ и проверяя условие x , $x_{\min} \leq x^{(k)} \leq x_{\max}$, на некотором шаге $k = n$, найдется приближенное значение $X^{(n)}$ для аргумента целевой функции, такое, что $x^{(n)} \in X_\varepsilon$.

Как правило, обратная функция неизвестна, и тогда следует найти аппроксимирующую инверсную оценку. Так, в работах [4–6] такая оценка находится с помощью нечетко-нейронных сетей, которые играют роль аппроксимантов. В данной работе для формирования обратных функций применяется так называемый инверсный метод, который значительно проще, чем методы нейромоделирования обратных функций.

В теории статистического синтеза сложных систем [7–9] вводится понятие динамических статистических выборок, подразумевая при этом, что над статистическими выборками могут проводиться различные преобразования (операции). Эти преобразования могут быть одноразовыми или составлять некоторую последовательность, изменяющуюся по определенному алгоритму.

Направленность изменений в таких выборках определяется свойствами, которыми необходимо наделить функции, восстанавливаемые по соответствующей выборке. Одной из таких операций является операция инверсии, согласно которой формируется обратная выборка, по которой можно сформировать обратную функциональную зависимость [10–12]. Схематично операция инверсии показана на рис. 1.

Исходная n -переменная выборка объема N имеет вид

x_1	x_2	...	x_n	J
-------	-------	-----	-------	-----

Инверсная выборка объема N определяется в виде

J	x_1	x_2	...	x_n
-----	-------	-------	-----	-------

Рис. 1. Схема операции инверсии

Здесь J – символьное обозначение операции инверсии.

Исходная статистическая выборка строится посредством зондирования функции $f(x), x \in X \subset R^n$ N случайными испытаниями.

Как видно из схемы операции инверсии, инверсная выборка формируется простой перестановкой входных данных выборки $x_1, x_2, \dots, x_n$ с выходной переменной J .

Операция инверсии статистической выборки позволяет получить не только в аналитическом виде некоторое приближение к обратной функции, но в многомерном случае осуществить редукцию исходной n -мерной функции к последовательности n одномерных обратных функций

$$J = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \xRightarrow{I} x_1 = \phi_1(J), x_2 = \phi_2(J), \dots, x_n = \phi_n(J). \quad (4)$$

Обратные функции $\phi_i(J), i = \overline{1, n}$ в данном методе строятся в виде гармонического ряда

$$\phi_i(J) = \frac{a_0}{2} + \sum_{j=1}^m [a_j^{(i)} \cos(\omega_j^{(i)} \cdot J) + b_j^{(i)} \sin(\omega_j^{(i)} \cdot J)], i = \overline{1, n}; \quad (5)$$

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \phi(x_j);$$

$$a_j^{(i)} = \frac{2}{N} \sum_{l=1}^{N-1} \phi_l(j) \cos(\omega_j^{(i)} J);$$

$$b_j^{(i)} = \frac{2}{N} \sum_{l=1}^{N-1} \phi_l(J) \sin(\omega_j^{(i)} J).$$

Определение.

Обратные функции

$$\phi_i(J) = \frac{a_0}{2} + a_i \cos(\omega_i J) + b_i \sin(\omega_i J), i = \overline{1, n})$$

локально аппроксимируют функцию $f^{-1}(x)$ на множестве

$$U_\varepsilon = \{x \in X : p(x, x_r) \leq \varepsilon\}, \varepsilon > 0,$$

если $|J^{(k)} - f(x_r)| \leq \varepsilon$, при $k \rightarrow \infty$.

Теорема сходимости.

Пусть допустимая точка x_r определяется по последовательности локально аппроксимирующих функций (5). Тогда, для того чтобы точка x_r была ε -оптимальным решением задачи (1) и на множестве X имела место оценка

$$f(x_r) \geq f_* \geq f(x_r) - \varepsilon,$$

достаточно, чтобы процесс построения последовательности точек $\{J^{(k)}\}$ был релаксационным, т.е. $f(x_{k+1}) \leq f(x_k)$, $k = 0, 1, \dots$

Доказательство.

Покажем, что процесс построения последовательности точек $\{J^{(k)}\}$ является релаксационным, т.е.

$$f(x_{k+1}) \leq f(x_k), x_k \in X, k = 0, 1, \dots$$

Координаты точки рассчитываются по обратной функции вида

$$x_i^{(k)} = \frac{a_0}{2} + a_i^{(k)} \cos(\omega_i^{(k)} J^{(k)}) + b_i^{(k)} \sin(\omega_i^{(k)} J^{(k)}), i = \overline{1, n}. \quad (6)$$

Определим текущее рекордное значение функции $f(x)$ в виде

$$J_{\text{пред}}^{(k)} = J_{\min} - \Delta,$$

где $\Delta > 0$ – некоторая константа смещения, $J_{\min}$ – минимальное значение критерия, полученное по s статистическим испытаниям

$$J_{\min} = \min(J^{(1)}, J^{(2)}, \dots, J^{(s)}).$$

Для формирования s пробных точек проводится зондирование функции $f(x)$, $x \in X \subset R^n$ s статистическими испытаниями. Зондирование осуществляется случайно сгенерированными равномерно распределенными точками в области X .

Координаты точки x_k , рассчитываемые по формуле (6), зависят от коэффициентов Фурье $a_i^{(k)}$, $b_i^{(k)}$ и частоты $\omega_i^{(k)}$, $i = \overline{1, n}$, которые выбираются из условия минимизации невязки

$$\delta^{(k)} = \min_{\{a_i^{(k)}, b_i^{(k)}, \omega_i^{(k)}\} \in P} [f(x(a_i^{(k)}, b_i^{(k)}, \omega_i^{(k)})) - J_{\text{пред}}^{(k)}]^2, \quad (7)$$

где P – параллелепипед, определяемый системой параметрических ограничений

$$P = \{a_i^{(k)}, b_i^{(k)}, \omega_i^{(k)} : a_{i_{\min}}^{(k)} \leq a_i^{(k)} \leq a_{i_{\max}}^{(k)}, b_{i_{\min}}^{(k)} \leq b_i^{(k)} \leq b_{i_{\max}}^{(k)}, \omega_{i_{\min}}^{(k)} \leq \omega_i^{(k)} \leq \omega_{i_{\max}}^{(k)}\}.$$

Решение задачи (7) осуществляется каким-либо методом локальной оптимизации.

Если $\delta^{(k)} \leq \varepsilon$, $\varepsilon > 0$, то это означает, что рекорд еще не найден. Поэтому осуществляется переход на следующий итерационный шаг $k + 1$, на котором рассчитывается новое смещение

$$J_{\text{пред}}^{(k+1)} = J_{\text{пред}}^{(k)} - \Delta \quad (8)$$

с дальнейшим решением задачи (7).

Если $\delta^{(k)} > \varepsilon$, то это означает, что рекорд найден и начинается процесс уточнения точки x_r . Уточнение осуществляется смещением рекорда в обратном направлении в сторону увеличения критерия (для задачи минимизации) по правилу

$$J_{\text{пред}}^{(k+1)} = J_{\text{пред}}^{(k)} + \Delta f, \quad (9)$$

где приращение функции определяется в виде

$$\Delta f = \frac{J_{\text{пред}}^{(k)}}{r^{(k)}}.$$

Здесь r есть масштаб поискового шага, который выбирается из условия минимума принятого критерия оптимальности по правилу

$$r^{(k)} = \frac{a_{0r}}{2} + a_r^{(k)} \cos(\omega_r^{(k)} J^{(k)}) + b_r^{(k)} \sin(\omega_r^{(k)} J^{(k)}),$$

где $a_r^{(k)}, b_r^{(k)}, \omega_r^{(k)}$ также выбираются методом локальной оптимизации.

Пусть $f(x^{(k)})$ есть значение критерия, полученного в результате локальной оптимизации, проведенной на k -м шаге, а $f(x^{(k+1)})$ есть значение критерия, полученного на $(k+1)$ -м шаге. Релаксационность $f(x_{k+1}) \leq f(x_k)$ процесса построения последовательности точек $\{J^{(k)}\}$ следует из формулы (8).

Имеет место теорема [7], что если для множеств $Y \subset X \subset R^n$ и $X \setminus Y \neq \emptyset$ и для функции $z(x)$, $z(y) = 0$ для всех $y \in Y$, существует последовательность $\{x_k\} \subset X$ такая, что

$$z(x_k) \rightarrow 0, k \rightarrow \infty,$$

и кроме того, для $\forall \epsilon > 0, \exists \delta = \delta(\epsilon) > 0$ такое, что

$$z(x_k) \geq \delta \text{ для всех } x_k \in X \setminus U_\epsilon,$$

то $\rho(x_k, Y) \rightarrow 0, k \rightarrow \infty$.

Тогда для сходимости релаксационного процесса минимизации функции $f(x)$ на множестве X достаточно принять

$$z(x) = \|f'(x)\|^2.$$

Теорема сходимости показывает, что последовательный сдвиг критериальных оценок от некоторого, заранее принятого, рекорда приводит к релаксационному процессу построения последовательности точек $\{J^{(k)}\}$.

Количество итераций, необходимых для достижения глобального экстремума, во многом определяется правилом выбора масштаба поискового шага r . В рассматриваемом методе параметр r выбирается из условия минимума принятого критерия оптимальности, т.е. он включен в список варьируемых параметров, и таким образом функция f определяется как отображение

$$f \div R^{n+1} \rightarrow R.$$

Варируемые параметры $x_i, i = \overline{1, n+1}$ выбираются, как и ранее по формуле

$$x_i^{(k)} = \frac{a_0}{2} + a_i^{(k)} \cos(\omega_i^{(k)} J^{(k)}) + b_i^{(k)} \sin(\omega_i^{(k)} J^{(k)}), i = \overline{1, n+1}.$$

Здесь вектор x зависит от следующих параметров:

$$x_i = x_i(a_i, b_i, \omega_i), i = \overline{1, n+1}.$$

Все параметры $a_i, b_i, \omega_i, i = \overline{1, n+1}$ выбираются блоком локальной оптимизации. Процесс локальной оптимизации реализован на допустимом множестве P , которое дополняется параметрическими и функциональными ограничениями:

$$X = \{x \in R^{n+1} : a_i \leq x_i \leq b_i, i = \overline{1, n}; g(x) \leq 0_m\},$$

где $g(x) : R^{n+1} \rightarrow R^m$ – непрерывная вектор-функция функциональных ограничений.

Приведем базовый вариант алгоритма метода, в котором варьируемыми параметрами в локальной оптимизации являются коэффициенты a_i , b_i и частота $\omega_i, i = \overline{1, n+1}$.

Алгоритм SIS

Входные параметры:

P – исходный параллелепипед;

ε – заданная точность по целевой функции.

Выходные параметры:

x_r – рекордная точка;

J^* – значение глобального минимума.

1. Определить начальное ($k = 1$) рекордное значение критериальной функции $J_{\text{пред}}^{(1)}$.
2. Задать аргументы $x_i^{(k)}, i = \overline{1, n}$ задачи (1) в виде обратных функций, представленных тригонометрическими полиномами

$$x_i^{(k)} = \frac{a_o}{2} + a_i^{(k)} \cos(\omega_i^{(k)} J_{\text{пред}}^{(k)}) + b_i^{(k)} \sin(\omega_i^{(k)} J_{\text{пред}}^{(k)}), i = \overline{1, n}.$$

3. Сделать замену переменных $x_i, i = \overline{1, n}$ в критериальной функции $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ по правилу из п. 2.
4. Провести локальную оптимизацию по критерию невязки

$$\delta^{(k)} = \min_{\{a_i, b_i, \omega_i\} \in P} [f(x^{(k)}(a_i, b_i, \omega)) - J_{\text{пред}}^{(k)}]^2, i = \overline{1, n}.$$

5. Если в п. 4. найдено s -оптимальное решение, то перейти ко второй итерации, взяв $k = k + 1$ и приняв в качестве нового рекорда

$$J_{\text{пред}}^{(k+1)} = J_{\text{пред}}^{(k)} - \Delta,$$

где Δ – параметр метода. Перейти к п. 2.

6. Если в п. 4. ε -оптимальное решение не найдено, то это означает, что процесс определения рекорда $J_{\text{пред}}^{(k)}$ окончен и $J_{\text{пред}}^{(k+1)}$ увеличивается по правилу

$$J_{\text{пред}}^{(k+1)} = J_{\text{пред}}^{(k)} + \frac{J_{\text{пред}}^{(k)}}{r},$$

и осуществляется переход к п. 2.

Если ε -оптимальное решение найдено, то завершить работу алгоритма.

Примеры применения инверсного метода

Разработанный метод поиска глобального экстремума на основе инверсных функций был апробирован на ряде модельных задач, содержащих гладкие и негладкие целевые функции различного вида, заданных на ограниченных односвязных областях $P \subseteq R^n$, где n изменялось от 2 до 5000.

Гладкая многоэкстремальная функция. Целевая функция задана аналитическим выражением:

$$1. f(x) = -\frac{1}{\left(\frac{x_1^2 + x_2^2}{200} - \cos(x_1) \cdot \cos\left(\frac{x_2}{\sqrt{2}}\right) + 2\right)}, -100 \leq x_i \leq 100, i = 1, 2.$$

Точное решение $f_{\min} = -1, x_1 = x_2 = 0$.

SIS: $\min f = -1, x_1 = -4,2289 \cdot 10^{-6}, x_2 = -4,0930 \cdot 10^{-5}$.

2. $f(x) = x^2 + \sin(\exp(x^2)), x \in [-100, 100], n = 1.$

SIS: $\min f = 0,526476$, при $x = 1,225289$.

3. $f(x) = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 + x_5^2 + x_6^2 + x_7^2 + x_8^2 - 0,1 \cos(3x_1) - 0,2 \cos(2x_2) - 0,2 \cos(5x_3) - 0,4 \cos(x_4) - 0,1 \cos(2x_5) - 0,2 \cos(3x_6) - 0,1 \cos(4x_7) - 0,1 \cos(x_8), 0,5 \leq x_i \leq 1, i = \overline{1, 8}.$

Точное решение: $\min f = -1,4$, при $x_i = 0, i = \overline{1, 8}$.

SIS: $\min f = -1,4$, при $x_1 = -1,4478 \cdot 10^{-5}$, $x_2 = -2,1462 \cdot 10^{-5}$, $x_3 = -1,4478 \cdot 10^{-4}$, $x_4 = -1,0738 \cdot 10^{-4}$, $x_5 = -1,5543 \cdot 10^{-4}$, $x_6 = -5,4543 \cdot 10^{-6}$, $x_7 = -4,9669 \cdot 10^{-5}$, $x_8 = -1,9654 \cdot 10^{-4}$.

4. $f(x) = (4 - 2,1x_1^2 + \frac{x_1^4}{3})x_1^2 + x_1x_2 + (-4 + 4x_2^2), -100 \leq x_i \leq 100, i = 1, 2.$

Точное решение: $\min f = -1,03628$, при $x_1 = -0,089$, $x_2 = -0,7126$.

SIS: $\min f = -1,0316$, при $x_1 = -0,089$, $x_2 = -0,7126$.

На отрезке $-1000 \leq x_i \leq 1000, i = 1, 2$.

SIS: $\min f = -1,0274$, при $x_1 = -0,089$, $x_2 = -0,7126$.

5. $g_1 = -7 \exp(-3(|x_1 + 1|)^{0,6} + (|x_2 + 1|)^{0,6}); g_2 = -7 \exp(-2(|x_1 + x_2|)); g_3 = -7 \exp(-2,5(|x_1 - 1|)^{0,8} + (|x_2 - 1|)^{0,8}); g_4 = -3 \exp(-3(|x_1 - 2|)^{0,9} + (|x_2 - 2|)^{0,9}); f(x_1, x_2) = g_1 + g_2 + g_3 + g_4, -100 \leq x_i \leq 100, i = 1, 2.$

SIS: $\min f = -7,533266$, при $x_1 = -1,000002$, $x_2 = -1,000003$.

6. $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i x_i^2, x_i \in [-100, 100].$

Точное решение: $\min f = 0$, при $x_i = 0, i = \overline{1, n}$

n	Numerica	SIS
5	$f = 0,1$	$f = 1 \cdot 10^{-6}$
10	$f = 3,7$	$f = 1,3 \cdot 10^{-4}$
15	—	$f = 0,8 \cdot 10^{-2}$

7. Функция Экли

$$f(x) = -20 \exp\left(-0,2\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}\right) - \exp\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i)\right) + 20 + \exp(1), x_i \in [-33, 33].$$

Точное решение: $\min f = 0$, при $x_i = 0, i = \overline{1, n}$

n	Numerica	SIS
5	$f = 0,4$	$f = 1 \cdot 10^{-4}$
10	$f = 1,2$	$f = 0,6 \cdot 10^{-4}$
15	$f = 3,6$	$f = 1,4 \cdot 10^{-2}$

8. $f(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2, x_i \in [-100, 100].$

Точное решение: $\min f = 0$, при $x_i = 0, i = \overline{1, n}$.

n	Numerica	SIS	Число итераций
5	$f = 0,4$	$f = 1 \cdot 10^{-4}$	
200	$f = 1,2$	$f = 0.6 \cdot 10^{-4}$	
3000	$f = 3,6$	$f = 1,4 \cdot 10^{-2}$	
5000	–	$f = 1,917 \cdot 10^{-2}$	80246469

Рассматривается задача минимизации функции с двумя функциональными ограничениями [2]:

$$f(x) = x_i \rightarrow \min;$$

$$g_1(x) = (x_1 - 5)^2 + 2(x_2 - 5)^2 + (x_3 - 5)^2 - 18 \leq 0;$$

$$g_2(x) = 100 - (x_1 + 7 - 2x_2)^2 - 4(2x_1 + x_2 - 11)^2 - 5(x_3 - 5)^2 \leq 0.$$

Данная задача решалась без введения условия целочисленности аргументов, как это сделано в работе [2].

Множество P представлено параллелепипедом $-10 \leq x_i \leq 10, i = 1, 2, 3$. Для решения данной задачи был применен метод штрафных функций

$$L = x_1 + \alpha_1 \cdot g_1^2(x) + \alpha_2 g_2^2(x),$$

где α_1, α_2 – штрафные коэффициенты, выбираемые по правилу:

$$\alpha_1 = \begin{cases} 0, & \text{если ограничение } g_1(x) \text{ выполняется,} \\ 1, & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$$\alpha_2 = \begin{cases} 0, & \text{если ограничение } g_2(x) \text{ выполняется,} \\ 1, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

За 18946 итераций была определена допустимая точка

$$x_* = (1.223952, 3.583859, 5.029503).$$

При этом функциональные ограничения приняли значения

$$g_1(x_*) = -5.647946, \quad g_2(x_*) = -23,77913.$$

Рассматривается актуальная задача глобальной оптимизации в молекулярной биологии, размерность которой имеет порядок $6 - N$, где N – количество аминокислотных остатков в полимерной цепи белка. Средний размер полимерной цепи белка составляет около 200 аминокислотных остатков и, таким образом, актуальные для молекулярной биологии оптимизационные задачи имеют размерность как минимум несколько сотен независимых степеней свободы. Такого рода задачи весьма эффективно описываются стандартной тестовой функцией с произвольно изменяемым количеством переменных и локальных минимумов, а также с известным положением глобального минимума в точке $x_i = 1, i = \overline{1, n}$. Функция имеет вид

$$f(x) = \sin^2(\pi \cdot y_1) + \sum_{i=1}^{n-1} (y_i - 1)^2 (1 + 10 \sin^2(\pi \cdot y_{i+1})) + (y_n - 1),$$

$$y_i = 1 + \frac{(x_i - 1)}{4}, -10 \leq x_i \leq 10, i = \overline{1, n}.$$

Данная задача была решена инверсным методом для случая 1000 переменных, $n=1000$, при этом были получены следующие результаты:

$$\min f = 9,030409 \cdot 10^{-5};$$

$$x_1 = 0,999, x_2 = 1,001, x_3 = 1,001, x_4 = 1,000, x_5 = 1,000, x_6 = 0,998, x_7 = 1,001, x_8 = 0,998, \\ x_{997} = 1,000, x_{998} = 0,998, x_{999} = 1,001, x_{1000} = 0,998.$$

Данный результат был получен за 10 804 951 итераций.

Заключение

Представление обратных аппроксимирующих функций позволило избежать просмотра критериальной поверхности на всем допустимом множестве, так как зондирование поверхности осуществляется лишь в направлении улучшения критерия оптимальности. Так как аппроксимирующие функции определяются ограниченным числом свободных параметров, то серьезно снижается размерность решаемых задач и снимаются ограничения на вид и особенности целевых функций [13–16]. Разработанный метод предлагается применять в процессе построения и оценке надежности и безопасности сложных динамических систем с переменной структурой и параметрами.

Библиографический список

1. *Евтушенко, Ю. Г.* Методы поиска глобального экстремума / Ю. Г. Евтушенко // Исследование операций. – Москва : ВЦ АН СССР. – 1974. – Вып. 4. – С. 39–68.
2. *Евтушенко, Ю. Г.* Варианты метода неравномерных покрытий для глобальной оптимизации частично-целочисленных нелинейных задач / Ю. Г. Евтушенко, М. А. Посыпкин // Доклады Академии наук. – 2011. – Т. 437, № 2. – С. 168–172.
3. *Северцев, Н. А.* Статистическая теория подобию в задачах безопасности и надежности динамических систем : монография / Н. А. Северцев. – Москва : Радиотехника, 2016. – 400 с.
4. *Курейчик, В. М.* Генетические алгоритмы: состояние искусства, проблемы и перспективы / В. М. Курейчик // Известия Академии наук. Теория и системы управления. – 1999. – № 1. – С. 144–160.
5. *Гришко, А. К.* Анализ применения методов и положений теории статистических решений и теории векторного синтеза для задач структурно-параметрической оптимизации / А. К. Гришко // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 4 (16). – С. 26–34. – DOI 10.21685/2307-4205-2016-4-4.
6. *Кошур, В. Д.* Адаптивный алгоритм глобальной оптимизации на основе взвешенного усреднения координат и нечетко-нейронных сетей / В. Д. Кошур // Нейроинформатика. – 2006. – Т. 1, № 2. – С. 106–123.
7. *Рутковская, Д.* Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилинский, Л. Рутковский. – Москва : Горячая линия – Телеком, 2004. – 454 с.
8. *Балык, В. М.* Статистический синтез проектных решений при разработке сложных систем / В. М. Балык. – Москва : Изд-во МАИ, 2011. – 280 с.
9. *Гришко, А. К.* Многокритериальный выбор оптимального варианта сложной технической системы на основе интервального анализа слабоструктурированной информации / А. К. Гришко, И. И. Кочегаров, А. В. Лысенко // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 3 (21). – С. 97–107.
10. *Лапшин, Э. В.* Методы аппроксимации функций многих переменных применительно к авиационным тренажерам / Э. В. Лапшин, А. К. Гришко, И. М. Рыбаков // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 1 (21). – С. 3–9. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-1-1.
11. *Grishko, A.* Adaptive Control of Functional Elements of Complex Radio Electronic Systems / A. Grishko, N. Goryachev, N. Yurkov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10, № 23. – P. 43842–43845.
12. *Time Factor in the Theory of Anthropogenic Risk Prediction in Complex Dynamic Systems / V. A. Ostreikovskiy, Ye. N. Shevchenko, N. K. Yurkov, I. I. Kochegarov, A. K. Grishko // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 944, iss. 1. – P. 1–10. – DOI 10.1088/1742-6596/944/1/012085.*
13. *Grishko, A.* Dynamic Analysis and Optimization of Parameter Control in Radio Systems in Conditions of Interference / A. Grishko, N. Goryachev, I. Kochegarov, N. Yurkov // International Siberian Conference on Control and Communications SIBCON (Moscow, Russia, May 12–14, 2016). – 2016. – P. 1–4. – DOI 10.1109/SIBCON.2016.7491674.
14. *Lysenko, A. V.* Optimizing structure of complex technical system by heterogeneous vector criterion in interval form / A. V. Lysenko, I. I. Kochegarov, N. K. Yurkov, A. K. Grishko // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1015, iss. 4. – P. 1–6. – DOI 10.1088/1742-6596/1015/4/042032.
15. *Intellectual Method for Reliability Assessment of Radio-Electronic Means / N. K. Yurkov, A. K. Grishko, A. V. Lysenko, E. A. Danilova, E. A. Kuzina // International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering APEDE 2018 (Saratov, Russian Federation, 27–28 September 2018). – 2018. – P. 105–112. – DOI 10.1109/APEDE.2018.8542360.*

References

1. Evtushenko Yu. G. *Issledovanie operatsiy* [Operation research]. Moscow: VTs ANSSSR, 1974, iss. 4, pp. 39–68. [In Russian]
2. Evtushenko Yu. G., Posypkin M. A. *Doklady Akademii nauk* [Reports of the Academy of Sciences]. 2011, vol. 437, no. 2, pp. 168–172. [In Russian]
3. Severtsev N. A. *Statisticheskaya teoriya podobiya v zadachakh bezopasnosti i nadezhnosti dinamicheskikh sistem: monografiya* [Statistical similarity theory in security and reliability problems of dynamical systems: monograph]. Moscow: Radiotekhnika, 2016, 400 p. [In Russian]
4. Kureychik V. M. *Izvestiya Akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya* [Proceedings of the Academy of Sciences. Theory and control systems]. 1999, no. 1, pp. 144–160. [In Russian]
5. Grishko A. K. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2016, no. 4 (16), pp. 26–34. DOI 10.21685/2307-4205-2016-4-4. [In Russian]
6. Koshur V. D. *Neyroinformatika* [Neuroinformatics]. 2006, vol. 1, no. 2, pp. 106–123. [In Russian]
7. Rutkovskaya D., Pilinskiy M., Rutkovskiy L. *Neyronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy* [Neural networks, genetic algorithms, and fuzzy systems]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2004, 454 p. [In Russian]
8. Balyk V. M. *Statisticheskii sintez proektnykh resheniy pri razrabotke slozhnykh sistem* [Statistical synthesis of design solutions in the development of complex systems]. Moscow: Izd-vo MAI, 2011, 280 p. [In Russian]
9. Grishko A. K., Kochegarov I. I., Lysenko A. V. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2017, no. 3 (21), pp. 97–107. [In Russian]
10. Lapshin E. V., Grishko A. K., Rybakov I. M. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 1 (21), pp. 3–9. DOI 10.21685/2307-4205-2018-1-1. [In Russian]
11. Grishko A., Goryachev N., Yurkov N. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015, vol. 10, no. 23, pp. 43842–43845.
12. Ostreikovsky V. A., Shevchenko Ye. N., Yurkov N. K., Kochegarov I. I., Grishko A. K. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, vol. 944, iss. 1, pp. 1–10. DOI 10.1088/1742-6596/944/1/012085.
13. Grishko A., Goryachev N., Kochegarov I., Yurkov N. *International Siberian Conference on Control and Communications SIBCON (Moscow, Russia, May 12–14, 2016)*. 2016, pp. 1–4. DOI 10.1109/SIBCON.2016.7491674.
14. Lysenko A. V., Kochegarov I. I., Yurkov N. K., Grishko A. K. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, vol. 1015, iss. 4, pp. 1–6. DOI 10.1088/1742-6596/1015/4/042032.
15. Yurkov N. K., Grishko A. K., Lysenko A. V., Danilova E. A., Kuzina E. A. *International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering APEDE 2018 (Saratov, Russian Federation, 27–28 September 2018)*. 2018, pp. 105–112. DOI 10.1109/APEDE.2018.8542360.

Северцев Николай Алексеевич

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление»
Российской академии наук
(Вычислительный центр
им. А. А. Дородницына РАН)
(Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 40)
E-mail: severs@ccas.ru

Юрков Николай Кондратьевич

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Severtsev Nikolay Alekseevich

doctor of technical sciences, professor,
chief researcher,
Federal research center
«Computer science and control» of RAS
(Dorodnitsyn computer center
of the Russian Academy of Sciences)
(40 Vavilova street, Moscow, Russia)

Yurkov Nikolay Kondratjevich

doctor of technical sciences, professor
honoured worker of science
of the Russian Federation,
head of sub-department of design
and production of radio equipment
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Гришко Алексей Константинович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alexey-grishko@rambler.ru

Grishko Aleksey Konstantinovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Северцев, Н. А. К проблеме глобальной оптимизации параметров надежности и безопасности сложных динамических систем инверсным методом / Н. А. Северцев, Н. К. Юрков, А. К. Гришко // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 1 (29). – С. 13–23. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-1-2.

Ю. В. Марков, А. С. Боков, В. Г. Важенин, В. В. Мухин, М. Ю. Нестеров, А. А. Иофин

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТРАЖЕННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Yu. V. Markov, A. S. Bokov, V. G. Vazhenin, V. V. Mukhin, M. Yu. Nesterov, A. A. Iofin

MODELING REFLECTED RADAR SIGNALS FOR MULTI-CHANNEL EARTH REMOTE SENSING SYSTEM

Аннотация. *Актуальность и цели.* Разработка и совершенствование радиолокационных систем дистанционного зондирования Земли воздушного базирования актуальна для повышения точности и безопасности полетов, особенно при автоматической навигации и беспилотном использовании, а также при плохой видимости, на высоких скоростях (не допускающих ручное пилотирование) или в плохих погодных условиях. Для разработки и исследования алгоритмов обработки сигналов, принятых РЛС, целесообразно использовать компьютерное математическое моделирование. *Материалы и методы.* По известным алгоритмам и математическим выражениям построена модель отраженного сигнала для многоканальных бортовых РЛС. Построенная математическая модель была программно реализована в среде MATLAB. При моделировании проводится дополнительная обработка сигнала, выраженная в построении радиолокационного изображения поверхности. *Результаты.* Разработана и реализована модель отраженных сигналов, которая позволяет строить и исследовать радиолокационные изображения поверхности в широком диапазоне условий применения РЛС. *Выводы.* Разработанная модель и ее реализация позволяют проводить исследования сигналов и данных радиолокационного изображения в координатах дальность-доплер, которые могут быть использованы при решении широкого круга задач радиолокации и радионавигации.

Ключевые слова: математическая модель, многоканальный радиолокационный сигнал, бортовая радиолокационная система с синтезированной апертурой, радиолокационное изображение, координаты доплеровского диапазона.

Abstract. *Background.* The development and improvement of airborne radar systems for remote sensing is relevant for improving the accuracy and safety of flights, especially with automatic navigation and unmanned use, as well as with poor visibility, at high speeds (not allowing manual piloting) or in bad weather conditions. For the development and research of signal processing algorithms adopted by the radar, it is advisable to use computer mathematical modeling. *Materials and methods.* Using well-known algorithms and mathematical expressions, a model of the reflected signal for multichannel airborne radars is built. The constructed mathematical model was software implemented in the MATLAB environment. When modeling, additional signal processing is carried out, expressed in constructing a radar image of the surface. *Results.* A model of reflected signals was developed and implemented, which allows one to construct and study radar images of the surface in a wide range of radar conditions. *Conclusions.* The developed model and its implementation allow the study of signals and radar data in the range-Doppler coordinates, which can be used to solve a wide range of radar and radio navigation issues.

Keywords: mathematical model, multichannel radar signal, airborne synthetic-aperture radar system, radar image, Doppler-range coordinates.

Введение

Неконтактные методы получения информации о поверхности Земли, ее рельефе, объектах на ней или в ее недрах составляют основу дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [1]. Для случая активных авиационных и космических радиолокационных систем (РЛС) при этом измеряются коли-

ческие характеристики отраженного Землей электромагнитного поля: мощность, фаза, время распространения, спектральный состав, поляризационные свойства и др.

Для эффективного решения ряда навигационных и локационных задач рассматриваются вопросы измерения абсолютных и относительных координат летательных аппаратов (ЛА) и параметров целей, в том числе при совершенствовании существующих и разработке новых бортовых РЛС (БРЛС), многофункциональных радиовысотомерных систем (РВС) и радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА).

Разработка и совершенствование перспективных радиолокационных систем ДЗЗ воздушного базирования актуальна для повышения точности и безопасности полетов, особенно при автоматической навигации и беспилотном использовании, а также при плохой видимости, на высоких скоростях (не допускающих ручное пилотирование) или в плохих погодных условиях.

Общим для всех систем ДЗЗ активной радиолокации является то, что они используют в качестве источника информации эхо-сигнал, отраженный подстилающей поверхностью. А оценка информационных параметров отраженного сигнала и построение радиолокационного изображения (РЛИ) подстилающей поверхности возможны благодаря точно известной форме излученного зондирующего радиосигнала.

С этой точки зрения бортовые РЛС, РВС (в том числе на базе радиовысотомеров – РВ) могут использовать общие алгоритмы формирования и обработки радиолокационных сигналов, отраженных от различных типов земной поверхности [11]. Поэтому они, их модели и алгоритмы работы, могут быть рассмотрены в обобщенной задаче ДЗЗ, в том числе для получения РЛИ в координатах дальность-доплер [2, 3].

Постановка задачи и методы ее решения

Для разработки и исследования алгоритмов обработки принятых РЛС сигналов очень важно обладать информацией об этих сигналах, их статистических и функциональных свойствах на выходе передающей антенны, на входе и выходе радиоприемного устройства РЛС. Также необходима верификация алгоритмов работы РЛС. Эти задачи могут быть решены с помощью натурных экспериментов в виде тестовых полетов или в виде натурального, полунатурного или математического моделирования. Преимущество математического моделирования с помощью ЭВМ заключается в его высокой гибкости, простоте реализации, возможности многократного воссоздания условий и, следовательно, в экономической эффективности, т.е. в отсутствии высоких затрат всех видов ресурсов (включая время и аппаратуру) на его проведение.

Исходя из вышесказанного, был разработан программный комплекс моделирования сигналов, принимаемых многоканальной бортовой РЛС ЛА. Комплекс предусматривает возможность моделирования сигналов как одно-, так и многоканальных РЛС при различных видах зондирующих сигналов (импульсный, непрерывный), при широком диапазоне параметров полета ЛА, его траекторий, параметров сигнала и антенной системы, подстилающей поверхности. Также комплекс предусматривает построение РЛИ поверхности в координатах дальность-доплер, предназначенное для оценки возможности и совершенствования принципов применения моделируемых сигналов и самих РЛИ.

Базовой в комплексе является одноканальная версия модели. Структура моделирования сигналов одного канала представлена на рис. 1. Для построения модели одноканальной радиолокационной или радионавигационной системы ЛА необходимо построить ряд моделей ее составных частей:

- модель траектории движения ЛА;
- модель антенной системы бортовой РЛС;
- модель подстилающей поверхности и ее объектов;
- модель зондирующего и отраженного сигналов.

Подстилающая поверхность и объекты на ней моделируются в виде набора элементарных отражателей, заменяющих собой допустимо малые участки поверхности – фацеты.

Все созданные модели необходимо объединить в единый комплекс моделирования, обеспечить их взаимодействие и обмен информацией. После моделирования сигнала, отраженного от подстилающей поверхности, с целью проверки его валидности необходимо осуществить соответствующую обработку полученных данных. В результате обработки целесообразно получить РЛИ поверхности в координатах дальность-доплер.

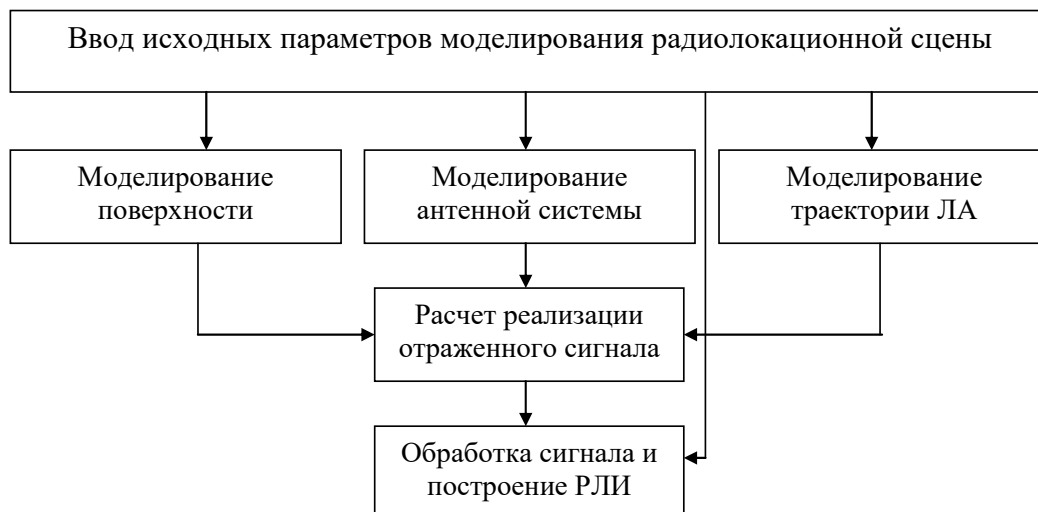


Рис. 1. Структура модели одного канала БРЛС

На первом этапе моделирования вводятся исходные данные для моделирования различных компонентов программного комплекса. Некоторые исходные данные могут быть общими для разных элементов общей модели. Необходимо ввести следующие исходные данные:

- исходная высота полета H ;
- скорости полета по трем составляющим вектора движения V_x, V_y, V_z ;
- углы эволюции ЛА (крен и тангаж);
- параметры диаграмм направленности приемных и передающих элементов антенной системы (КНД, ширина, при особых требованиях – форма ДНА);
- углы отклонения осей антенн от вертикальной оси ЛА;
- несущая частота передатчика;
- длина зондирующего импульса (для импульсной БРЛС);
- скважность следования импульсов (для импульсной БРЛС);
- количество импульсов, излученных на траектории моделирования (для импульсной БРЛС);
- девиация частоты (для БРЛС с непрерывным излучением);
- период модуляции (для БРЛС с непрерывным излучением);
- количество целых периодов модуляции на траектории моделирования (для БРЛС с непрерывным излучением);
- период или частота дискретизации сигналов;
- отношение мощности сигнала к мощности шумов;
- параметры ДОР поверхности;
- средняя величина крупномасштабных неровностей поверхности;
- тип поверхности и число facets;
- скорость и направление ветра в приповерхностном воздушном слое;
- балльность волнения водной поверхности;
- средний коэффициент затухания при отражении от facets;
- степень использования лучей ДНА антенн при формировании пятна облучения.

На базе введенных исходных данных строятся первичные модели: отражающей поверхности, антенной системы и траектории полета ЛА. На основе первичных моделей по известным алгоритмам и математическим выражениям [4–10] строится (рассчитывается), собственно, модель отраженного сигнала. При необходимости (при обработке сигнала) можно построить РЛИ поверхности.

Многоканальная система радиолокационного обзора строится на основе группы взаимосвязанных одноканальных систем. Ее структура представлена на рис. 2.

При моделировании многоканальной системы принимается, что каждый из моделируемых каналов независим, т.е. каждый из каналов представляет собой сигнал, принимаемый одной приемной антенной. Передающая антенна при этом может быть как общей для всех или группы каналов, так и собственной для каждого.

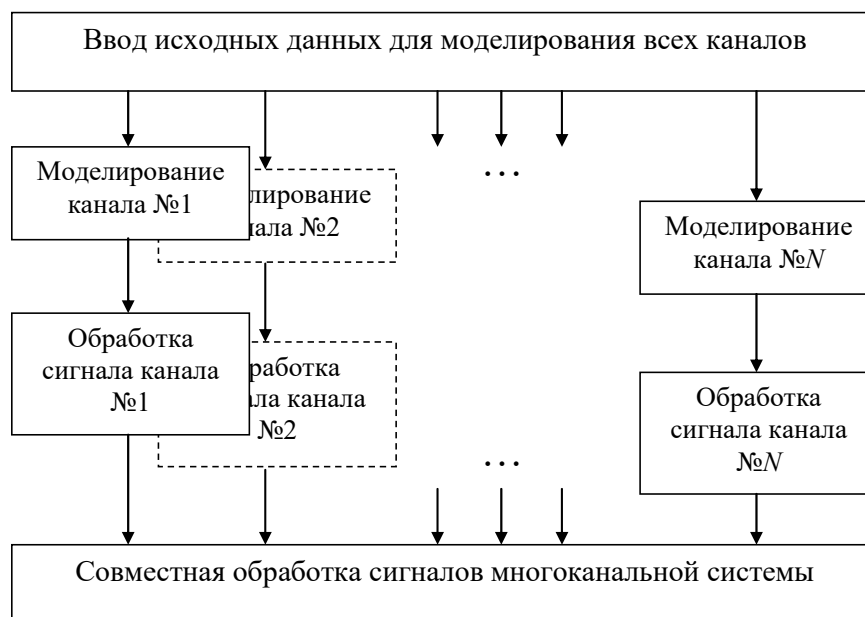


Рис. 2. Структура многоканальной модели

Также при моделировании поверхности принимается, что фацетное поле модели поверхности общее для всех каналов и отраженные сигналы для всех каналов в той или иной мере учитывают свойства этой поверхности.

На первом этапе моделирования вводятся исходные данные для моделирования N одноканальных БРЛС. Некоторые исходные данные могут быть общими для разных элементов общей модели. Необходимо ввести исходные данные, которые можно разбить на несколько групп.

Исходные данные о параметрах полета ЛА, общие для всех каналов:

- исходная высота полета H ;
- скорости полета по трем составляющим вектора движения V_x, V_y, V_z ;
- углы эволюции ЛА (крен и тангаж).

Исходные данные о модели и параметрах поверхности, общие для всех каналов:

- ширина ДОР поверхности;
- средняя величина крупномасштабных неровностей поверхности;
- тип поверхности и число фацетов;
- скорость и направление ветра в приповерхностном воздушном слое;
- балльность волнения водной поверхности;
- средний коэффициент затухания при отражении от фацета;

Исходные данные о параметрах антенной системы и параметрах зондирующего сигнала:

- ширины диаграмм направленности приемной и передающей антенны (при особых требованиях – их формы);
- углы отклонения осей антенн от вертикальной оси ЛА;
- несущая частота передатчика;
- длина зондирующего импульса (для импульсной БРЛС);
- скважность следования импульсов (для импульсной БРЛС);
- количество импульсов, излученных на траектории моделирования (для импульсной БРЛС);
- девиация частоты (для БРЛС с непрерывным излучением);
- период модуляции (для БРЛС с непрерывным излучением);
- количество целых периодов модуляции на траектории моделирования (для БРЛС с непрерывным излучением);
- период дискретизации сигналов;
- отношение мощности сигнала к мощности шумов.

При этом параметры приемной антенны для каждого канала будут уникальными, остальные параметры могут быть как общими, так и уникальными.

На основе исходных данных, как общих для каждого канала, так и собственных, рассчитываются реализации принимаемого траекторного сигнала для всех каналов системы. Затем для каждого канала проводится обработка сигнала и строится РЛИ. На заключительном этапе работы комплекса построенные РЛИ могут пройти совместную обработку с целью получения общего изображения, построения стереоизображения, оценки перемещений объектов и т.д.

Результаты модельных экспериментов

Для оценки работы комплекса были проведены несколько модельных экспериментов.

В первом эксперименте смоделирован случай горизонтального полета ЛА, одноканальная версия системы. Антенна РЛС направлена вертикально вниз (высотомерный вариант).

Проведем моделирование при следующих тестовых условиях:

- высота – 100 м;
- скорость ЛА – 100 м/с;
- число facets поверхности – 10 000;
- дистанция синтезирования – 5 м.

Использовался импульсный зондирующий сигнал:

- длительность импульса – 20 нс;
- скважность импульсов – 5409;
- количество импульсов – 287.

РЛИ поверхности представлено на рис. 3.

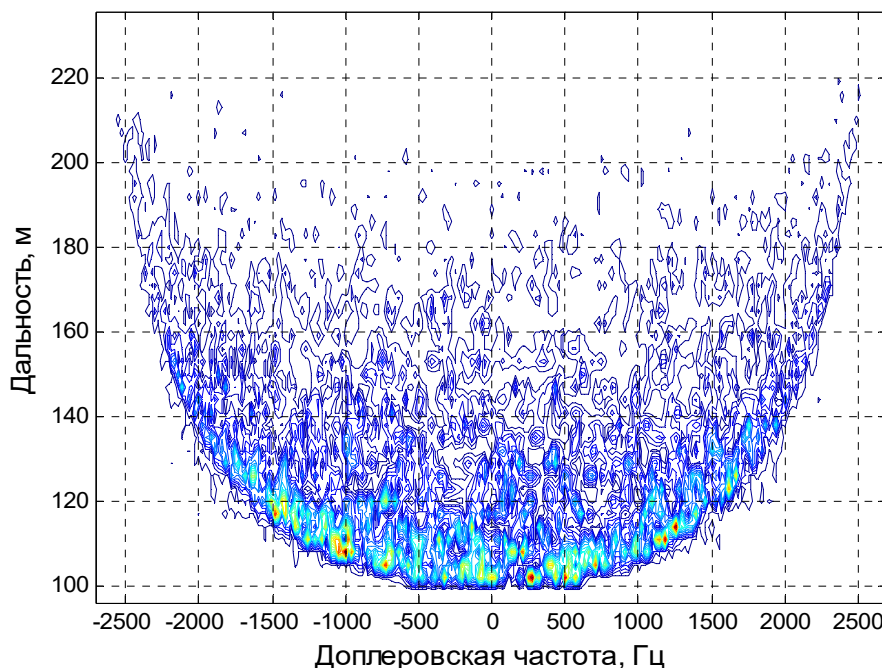


Рис. 3. РЛИ поверхности в координатах дальность-доплер

РЛИ на рис. 3 несет в себе информацию о расположении элементарных отражателей на поверхности (ярких точек) в пределах пятна облучения (используется антенна с широкой диаграммой направленности) и их геометрических отношениях, степень теплоты цвета пропорциональна отраженной энергии сигнала. Такое РЛИ не является картой местности в строгом понимании этого слова. Геометрия расположения facets сильно искажена. В частности, при использовании только одной антенны, направленной вертикально вниз, невозможно отличить отражения от facets, находящихся справа и слева ЛА. Также в РЛИ происходят растяжения и сжатия координатной плоскости подстилающей поверхности на различных участках. Тем не менее подобное РЛИ может быть использовано при решении задач как радиолокации, так и радионавигации. На рис. 4 представлен массив РЛИ той же поверхности в виде 3-мерного графика. Высота пиков на поверхности пропорциональна энергии отраженного сигнала, здесь она убывает с ростом наклонной дальности от РЛС.

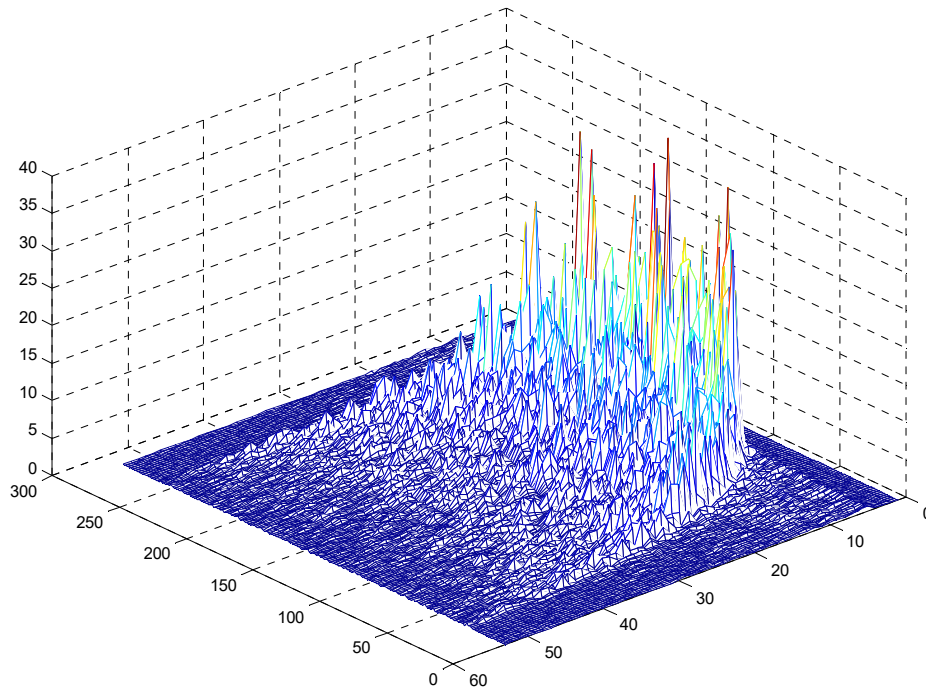


Рис. 4. РЛИ поверхности в виде 3-мерного графика

В следующем эксперименте смоделирован случай горизонтального полета ЛА, при работе двух каналов БРЛС. Геометрия антенной системы БРЛС представлена на рис. 5. В данном эксперименте две пары приемопередающих антенн направлены под углом 30° вперед и отклонены от вертикали также на 30° . Ширина диаграммы направленности всех антенн – 35° .

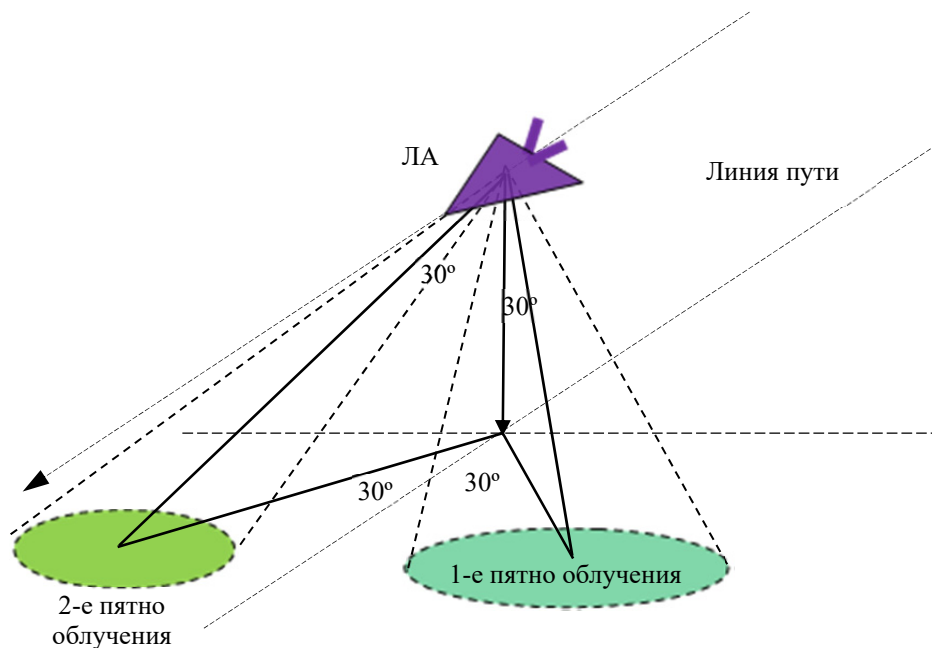


Рис. 5. Геометрия антенной системы БРЛС при двойном передне-боковом обзоре

Проведем моделирование при следующих тестовых условиях:

- высота – 100 м;
- скорость ЛА – 100 м/с;
- число факетов поверхности – 1000;
- дистанция синтезирования – 5 м.

Использовался импульсный зондирующий сигнал:

- длительность импульса – 20 нс;
- скважность импульсов – 5409;
- количество импульсов – 287.

В результате эксперимента получена группа из двух РЛИ.

На рис. 6 представлена группа РЛИ при двойном передне-боковом обзоре. Заметно, что РЛИ для различных каналов коррелированы между собой, так как отражают одну и ту же поверхность. Но так как эта поверхность облучается в каждом канале по своему, то между изображениями существуют отличия, особенно заметные для больших дальностей.

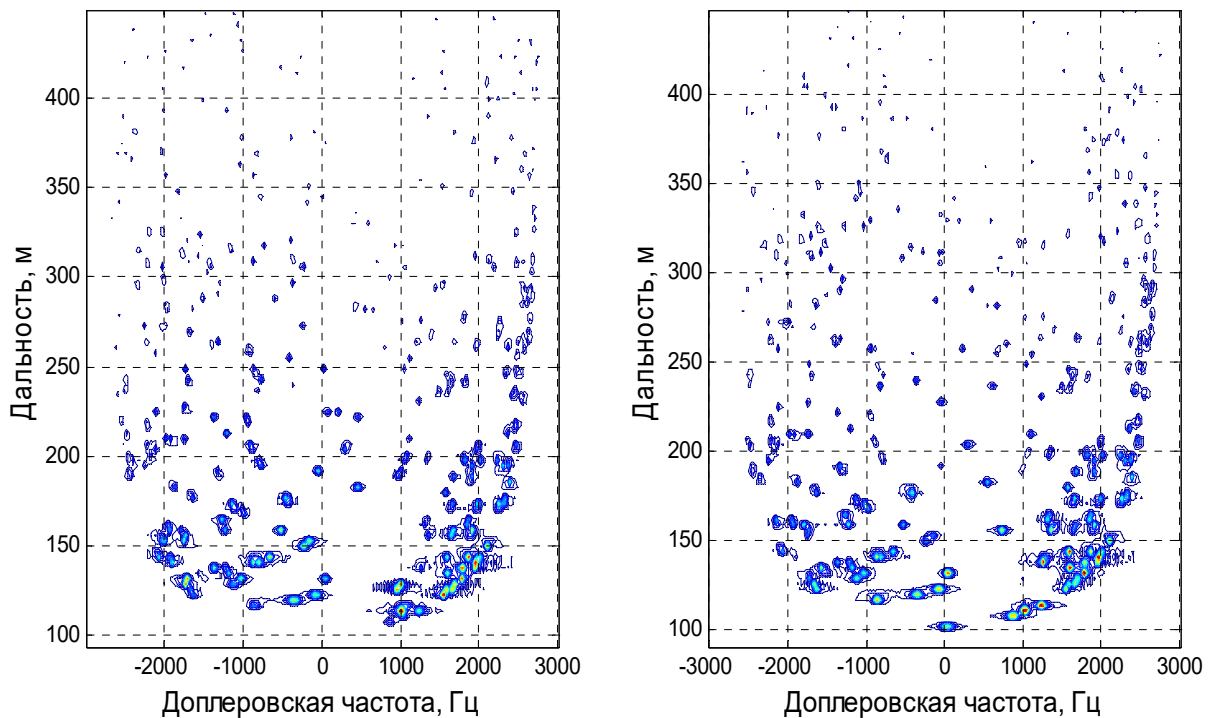


Рис. 6. Группа РЛИ БРЛС при двойном передне-боковом обзоре

В третьем эксперименте промоделирован случай горизонтального полета ЛА при работе двух каналов БРЛС, но применяется передне-боковой и боковой обзор. Геометрия антенной системы БРЛС представлена на рис. 7. В данном эксперименте одна пара приемопередающих антенн направлена под углом 30° вперед и отклонена от вертикали также на 30° . А вторая пара антенн отклонения в продольной плоскости не имеет, а в поперечной отклонена также на 30° .

Проведем моделирование при следующих тестовых условиях:

- высота – 100 м;
- скорость ЛА – 100 м/с;
- число facets поверхности – 1000;
- дистанция синтеза – 5 м.

Использовался импульсный зондирующий сигнал:

- длительность импульса – 20 нс;
- скважность импульсов – 5409;
- количество импульсов – 287;

В результате эксперимента получена группа из двух РЛИ.

На рис. 8 представлена группа РЛИ при боковом и передне-боковом обзоре. Заметно, что РЛИ для различных каналов также коррелированы между собой, но в существенно меньшей степени. Это объясняется тем, что поверхность облучается практически на разных участках. Тем не менее на некоторых участках сходство РЛИ разных каналов значительно, например, в подрадарной зоне, т.е. при наименьших дальностях и вблизи нулевого доплеровского сдвига частот.

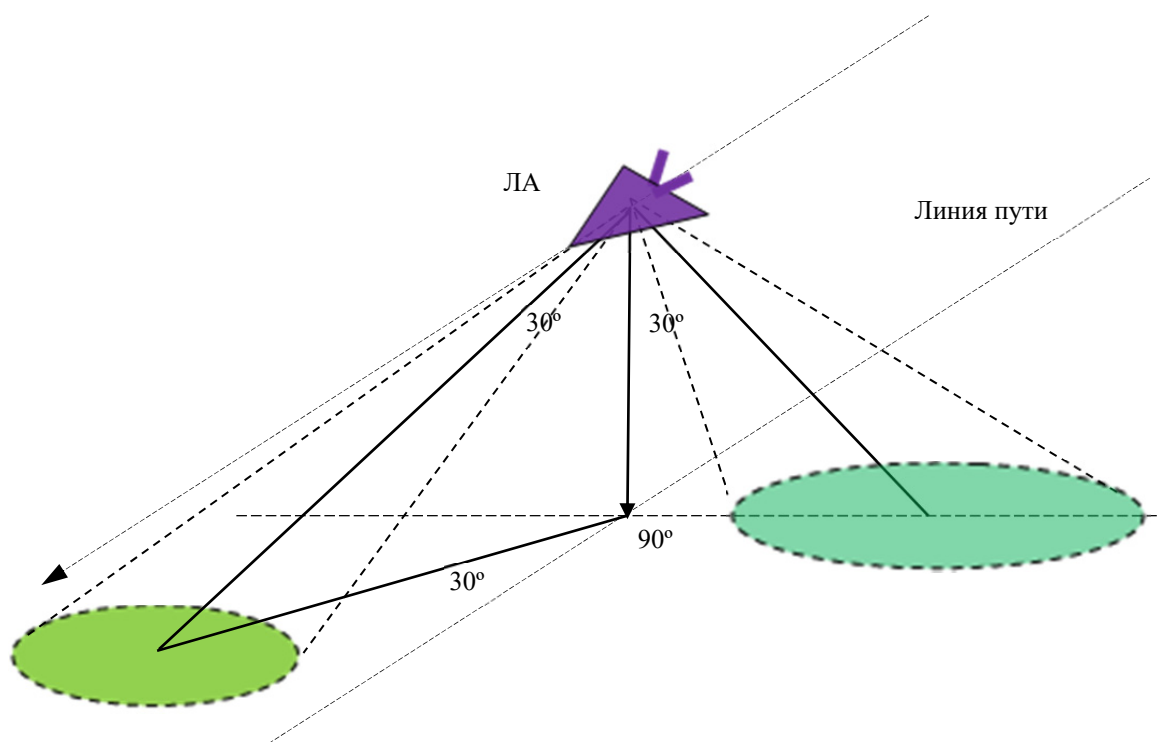


Рис. 7. Геометрия антенной системы БРЛС при боковом и передне-боковом обзоре

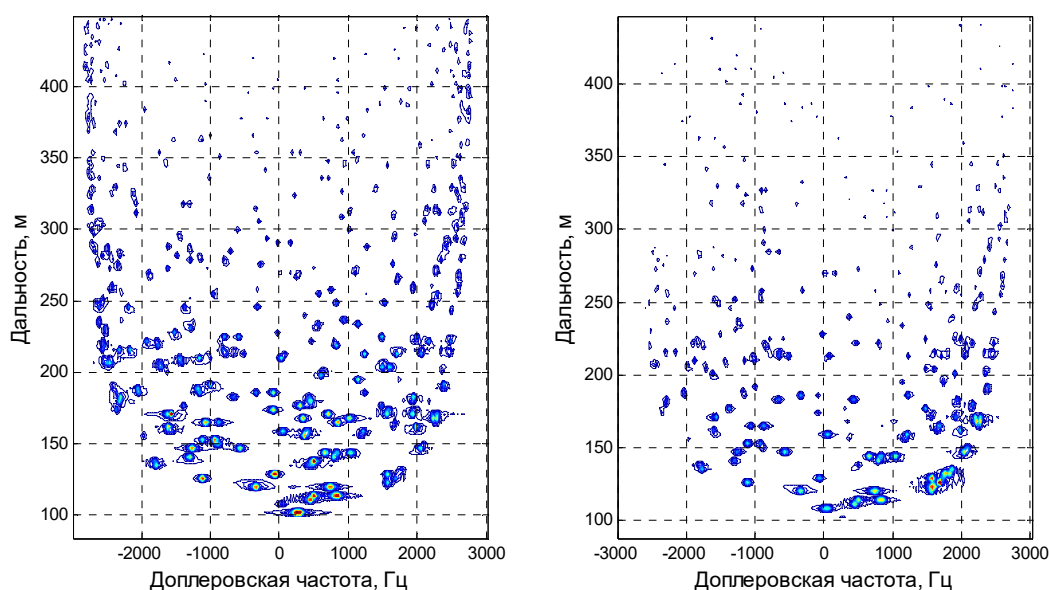


Рис. 8. Группа РЛИ БРЛС при боковом и передне-боковом обзоре

Путем комбинирования различных изображений из группы РЛИ, их взаимного учета или при помощи совместной обработки РЛИ другого вида можно получить изображение подстилающей поверхности, пригодное для навигации над этой поверхностью или для обнаружения объектов на поверхности. А также пригодное для автоматического слежения за объектами, совмещенного с управлением ЛА.

Заключение

На основе известных выражений и алгоритмов моделирования, отраженных подстилающей поверхностью радиолокационных сигналов, построена многоканальная, многофункциональная программная модель, формирующая отраженные сигналы для различных фоно-целевых обстановок РЛС. Модель позволяет строить РЛИ поверхности в широком диапазоне условий применения РЛС. РЛИ могут быть использованы при решении широкого круга задач радиолокации и радионавигации.

Библиографический список

1. Коберниченко, В. Г. Радиозлектронные системы дистанционного зондирования Земли : учеб. пособие / В. Г. Коберниченко. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 220 с.
2. Нестеров, М. Ю. Оценка высоты полета в режиме синтезирования апертуры для высотомера с непрерывным зондирующим сигналом / М. Ю. Нестеров, А. А. Монаков // Известия вузов. Сер.: Радиоэлектроника. – 2014. – Т. 57, № 11. – С. 15–22.
3. Нестеров, М. Ю. Расчет двумерной спектральной плотности мощности сигнала биений ЧМРВ / М. Ю. Нестеров // Радиовысотометрия-2013 : сб. тр. IV Всерос. науч.-техн. конф. – Екатеринбург : Форт Диалог-Исеть, 2013. – С. 391–395.
4. Жуковский, А. П. Рассеяние электромагнитных волн земной поверхностью : учеб. пособие / А. П. Жуковский. – Москва : Изд-во МАИ, 1991. – 80 с.
5. Скольник, М. Справочник по радиолокации / под ред. М. Скольника ; пер. с англ. под общ. ред. В.С. Вербы : в 2 кн. – Москва : Техносфера, 2014. – Кн. 1. – 672 с. ; Кн. 2. – 680 с.
6. Виницкий, А. С. Автономные радиосистемы : учеб. пособие для вузов / А. С. Виницкий. – Москва : Радио и связь, 1986. – 336 с.
7. Полунатурное моделирование бортовых радиолокационных систем, работающих по земной поверхности : учеб. пособие / В. Г. Вазенин, Н. А. Дядьков, А. С. Боков, А. К. Сорокин, Ю. В. Марков, Л. Л. Лесная. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 208 с.
8. Марков, Ю. В. Модель формирования принимаемого сигнала ЛЧМ радиовысотомера над морской и земной поверхностью / Ю. В. Марков, В. Г. Вазенин, Л. И. Пономарев // Радиолокация, навигация, связь : тез. докл. VIII Междунар. науч.-техн. конф. (г. Воронеж, 23–25 апреля 2002 г.). – Воронеж, 2002. – Т. 1. – С. 705–713.
9. Возможности исследования точностных характеристик бортовых радиовысотометрических систем на базе имитатора отраженных сигналов / А. С. Боков, В. Г. Вазенин, Н. А. Дядьков, В. В. Мухин, А. А. Иофин // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 1 (13). – С. 86–93.
10. Учет переменных параметров линейной частотной модуляции в имитаторе отраженных сигналов для радиовысотомеров / А. С. Боков, В. Г. Вазенин, А. В. Гусев, А. А. Иофин, Д. Ж. Нагашибаев // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 1 (13). – С. 86–93.
11. Боков, А. С. Программный комплекс моделирования сигнала, отраженного от подстилающей поверхности, для радиовысотометрических систем / А. С. Боков, В. Г. Вазенин, Ю. В. Марков, Г. В. Чирков // Радиовысотометрия-2016 : сб. тр. V Всерос. науч.-техн. конф. – Екатеринбург : Форт Диалог-Исеть, 2016. – С. 229–234.

References

1. Kobernichenko V. G. *Radioelektronnye sistemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli: ucheb. posobie* [Radio-electronic systems of remote sensing of the Earth: textbook]. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2016, 220 p. [In Russian]
2. Nesterov M. Yu., Monakov A. A. *Izvestiya vuzov. Ser.: Radioelektronika* [Izvestiya vuzov. Ser.: Radioelectronics]. 2014, vol. 57, no. 11, pp. 15–22. [In Russian]
3. Nesterov M. Yu. *Radiovysotometriya-2013: sb. tr. IV Vseros. nauch.-tekhn. konf.* [Radiovysotometry-2013: proceedings of the IV all-Russian scientific-technical conf.]. Ekaterinburg: Fort Dialog-Iset', 2013, pp. 391–395. [In Russian]
4. Zhukovskiy A. P. *Rasseyaniye elektromagnitnykh voln zemnoy poverkhnost'yu: ucheb. posobie* [Scattering of electromagnetic waves by the earth's surface: textbook]. Moscow: Izd-vo MAI, 1991, 80 p. [In Russian]
5. Skolnik M. *Spravochnik po radiolokatsii: v 2 kn.* [Radar reference: in 2 books]. Moscow: Tekhnosfera, 2014, bk. 1, 672 p.; bk. 2, 680 p. [In Russian]
6. Vinitskiy A. S. *Avtonomnye radiosistemy: ucheb. posobie dlya vuzov* [Autonomous radio systems: a textbook for universities]. Moscow: Radio i svyaz', 1986, 336 p. [In Russian]
7. Vazhenin V. G., Dyad'kov N. A., Bokov A. S., Sorokin A. K., Markov Yu. V., Lesnaya L. L. *Polunaturnoe modelirovaniye bortovykh radiolokatsionnykh sistem, rabotayushchikh po zemnoy poverkhnosti: ucheb. posobie* [Semi-natural modeling of onboard radar systems operating on the earth's surface: tutorial]. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2015, 208 p. [In Russian]
8. Markov Yu. V., Vazhenin V. G., Ponomarev L. I. *Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz': tez. dokl. VIII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (g. Voronezh, 23–25 aprelya 2002 g.)* [Radar, navigation, communication : abstracts of the VIII International scientific and technical conf. (Voronezh, April 23–25, 2002).]. Voronezh, 2002, vol. 1, pp. 705–713. [In Russian]
9. Bokov A. S., Vazhenin V. G., Dyad'kov N. A., Mukhin V. V., Iofin A. A. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2016, no. 1 (13), pp. 86–93. [In Russian]

10. Bokov A. S., Vazhenin V. G., Gusev A. V., Iofin A. A., Nagashibaev D. Zh. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2016, no. 1 (13), pp. 86–93. [In Russian]
11. Bokov A. S., Vazhenin V. G., Markov Yu. V., Chirkov G. V. *Radiovysotometriya-2016: sb. tr. V Vseros. nauch.-tekhn. konf.* [Radioastrometry-2016 : proceedings of V all-Russia. scientific-technical conf.]. Ekaterinburg: Fort Dialog-Iset', 2016, pp. 229–234. [In Russian]

Марков Юрий Викторович

кандидат технических наук, доцент,
департамент радиоэлектроники и связи,
Институт радиоэлектроники
и информационных технологий,
Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина
(Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32)
E-mail: asdal@mail.ru

Боков Александр Сергеевич

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
департамент радиоэлектроники и связи,
Институт радиоэлектроники
и информационных технологий,
Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина
(Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32)
E-mail: a.s.bokov@urfu.ru

Важенин Владимир Григорьевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра радиоэлектроники информационных
систем, Институт радиоэлектроники
и информационных технологий,
Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина
(Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32)
E-mail: v.g.vazhenin@urfu.ru

Мухин Владимир Витальевич

заместитель генерального директора –
главного конструктора по НИОКР,
Уральское проектно-конструкторское бюро
«Деталь»
(Россия, Свердловская обл.,
г. Каменск-Уральский, ул. Пионерская, 8)
E-mail: upkb@nexcom.ru

Нестеров Михаил Юрьевич

доктор технических наук,
начальник отдела,
Уральское проектно-конструкторское бюро
«Деталь»
(Россия, Свердловская обл.,
г. Каменск-Уральский, ул. Пионерская, 8)
E-mail: mn@list.ru

Markov Yuriy Viktorovich

candidate of technical sciences, associate professor,
department of radioelectronics and communications,
Institute of Radioelectronics
and Information Technologies,
Ural Federal University named after
the first President of Russia B. N. Yeltsin
(32 Mira street, Ekaterinburg, Russia)

Bokov Aleksandr Sergeevich

candidate of technical sciences,
senior scientist researcher,
department of radioelectronics and communications,
Institute of Radioelectronics
and Information Technologies,
Ural Federal University named after
the first President of Russia B. N. Yeltsin
(32 Mira street, Ekaterinburg, Russia)

Vazhenin Vladimir Grigor'evich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio electronics
of information systems,
Institute of Radioelectronics
and Information Technologies,
Ural Federal University named after
the first President of Russia B. N. Yeltsin
(32 Mira street, Ekaterinburg, Russia)

Mukhin Vladimir Vital'evich

substitute the general director- main designer,
Ural Design Bureau «Detal»
(8 Pionerskaya street, Sverdlovsk Region,
Kamensk-Uralsky, Russia)

Nesterov Mikhail Yur'evich

doctor of technical sciences,
head of department,
Ural Design Bureau «Detal»
(8 Pionerskaya street, Sverdlovsk Region,
Kamensk-Uralsky, Russia)

Иофин Александр Аронович

кандидат технических наук, начальник отдела,
заместитель главного конструктора,
Уральское проектно-конструкторское бюро
«Деталь»
(Россия, Свердловская обл.,
г. Каменск-Уральский, ул. Пионерская, 8)
E-mail: upkb@nexcom.ru

Iofin Aleksandr Aronovich

candidate of technical sciences, head of department,
deputy chief designer,
Ural Design Bureau «Detal»
(8 Pionerskaya street, Sverdlovsk Region,
Kamensk-Uralsky, Russia)

Образец цитирования:

Моделирование отраженных радиолокационных сигналов для многоканальной системы дистанционного зондирования земли / Ю. В. Марков, А. С. Боков, В. Г. Важенин, В. В. Мухин, М. Ю. Нестеров, А. А. Иофин // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 1 (29). – С. 24–34. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-1-3.

Н. С. Кузнецов, В. В. Смогунов, Н. К. Юрков

ГЕТЕРОЛОГИЯ КАЧЕСТВА ГЕТЕРОСФЕР ЦИВИЛИЗАЦИЙ

N. S. Kuznetsov, V. V. Smogunov, N. K. Yurkov

HETEROLOGY OF THE QUALITY OF HETEROSPHERES OF CIVILIZATIONS

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность работы обусловлена существенной гетерогенностью глобальной и локальных цивилизаций, приводящей к постоянным военным, торговым, финансовым, экологическим и прочим конфликтам. Цель – построение теории гетерологии цивилизаций. *Материалы и методы.* В качестве методов и средств исследований используются методы системного анализа и моделирования процессов, протекающих в социотехнологических гетероструктурах цивилизаций. *Результаты.* Сформулированы основополагающие аксиомы теории гетерологии цивилизаций.

Ключевые слова: гетерология, сложные системы, надежность, цивилизация, системный анализ, моделирование, оценка, перспективность, локальные цивилизации.

Abstract. *Background.* The relevance of the work is due to the significant heterogeneity of global and local civilizations, which leads to constant military, commercial, financial, environmental, and other conflicts. Goal – construction of the theory of heterology of civilizations. *Materials and methods.* Methods of system analysis and modeling of processes occurring in socio-technological heterostructures of civilizations are used as research methods and tools. *Results.* The fundamental axioms of the theory of heterology of civilizations are formulated.

Keywords: heterology, complex systems, reliability, civilization, system analysis, modeling, evaluation, perspective, local civilizations.

Введение

Гетерология – наука о зарождении, создании, существовании, функционировании, деградации и гибели природных и искусственных твердотельных, многофазных материальных и нематериальных, в том числе духовных, гетерогенных структур и процессов.

Гетерология базируется на системной аналитике результатов, полученных в естественных науках, науках об обществе и др., используя инженерию информации, моделирование, натурные наблюдения.

В отличие от классических наук, гетерология занимается изучением процессов, протекающих по границам сопряжений, соединений разнородных воззрений, фаз, материалов, полей и др.

В социальной гетерологии философы тщательнейшим образом анализируют процессы познания современной цивилизации. В общей гетерологии на этой основе анализируются природные, искусственные и гибридные гетерогенные структуры и процессы, в них протекающие.

К природным гетерогенным структурам в гетерологии относятся воздух, вода, Земля, климат, животный и растительный мир и люди; к искусственным относится все, что создано людьми в процессе эволюции цивилизации.

В настоящее время все большее значение приобретают гибридные структуры человек-компьютер.

Цивилизация в философском понимании – социальная форма движения материи, обеспечивающая ее саморазвитие, общество, основанное на началах гуманизма. Различают глобальную и «локальные» цивилизации с разными социотехнологическими сферами. Глобальная цивилизация – это компьютерная цивилизация, социотехнологическая сфера деятельности человека, характеризующая современную культуру и материальное производство.

Проблема, решаемая в статье, обусловлена недостаточной изученностью качества и надежности гетеросфер глобальной и «локальных» цивилизаций.

Исторические аспекты

В историческом плане цивилизации эволюционировали с эволюцией человека. Человек принадлежит к млекопитающим – человекоподобным существам – гоминидам. Ближайшие млекопитающие подвиды – человекообразные обезьяны. В науке отсутствует единая теория происхождения человека. Современной считается гипотеза антропологов эволюционного, в течение миллионов лет, развития человекоподобных существ от австралопитека до современных людей: австралопитек, *homo habilis* – человек умелый, *homo erectus* – человек прямоходящий (1 млн лет назад), неандерталец (500 тыс. лет назад), кроманьонец (250 тыс. лет назад), *homo sapiens* (3 тыс. лет назад).

Главное отличие человека от животного – умение придумывать, изготавливать и использовать технику. Умение изобретать, так же, как и хождение на двух ногах, способность к речи и совместному труду возникли в результате превращения древнейших предков в современных людей.

В каменном веке австралопитеки и *homo habilis* эволюционировали от собирательства к производству посуды, прядению, скотоводству и земледелию. В бронзовом веке *homo habilis*, *erectus*, неандертальцы, кроманьонцы и *homo sapiens* на Ближнем Востоке изобрели бронзу, письменность, ремесла, поливное земледелие. Железный век (1 тыс. лет до н.э.) ознаменовался развитием металлургии и переходом от первобытных к классовым обществам, при ускорившейся эволюции биовида человека от древнейших форм к *homo sapiens* на Ближнем Востоке, Китае и других территориях.

Время изобретений и расцвета во всех областях жизнедеятельности *homo sapiens* – 500 лет до н.э. прежде всего, изобретение различных приборов для освоения Земли – компас, микроскоп, часы, оружие и т.п.

В 1000–1870 г. – индустриальный век, произошла 1-я промышленная революция, люди добились существенного облегчения физического труда, механизировав промышленность и другие области жизни.

Вторая промышленная революция (1900–1990 гг.) породила электричество, связь, автомобили, нефть, ядерную энергетику, ракетно-космическую технику, технологии массового производства, компьютеры и прочее и к 2000 г. переросла в 3-ю научно-техническую революцию, со всей очевидностью благодаря повсеместному преобладанию умственного труда и трансформации биовида *homo sapiens* в *homo intellectus* с гибридным интеллектом [1].

В настоящее время происходит массовое преобразование биовида человека в принципиально новое качество, признаком которого является технология создания компьютерных, себе подобных, наделенных физическими, эмоциональными, психологическими и другими человеческими интеллектуальными свойствами. Особенно важным и трудным данный процесс является для людей, занимающихся умственным трудом, и сотрудников силовых структур. Это чрезвычайно сложный процесс, требующий напряжения всех сил человека. «Образовать человека, существо самое непостоянное и сложное из всех, есть искусство из искусств...» – Ян Амос Каменский.

Гетеросферы цивилизации

«Локальные» цивилизации зародились в глубокой древности в процессе эволюции рода человеческого. Что есть человек? Весьма распространенной и, пожалуй, самой обоснованной является теория двойственности человека. Тело и душа, соединенные вместе, существенно разнородные, даже противоположные начала.

Несмотря на множество гипотез о происхождении человека, в настоящее время нет ни одной, кроме божественной, которую можно было бы признать достаточно убедительной. Гениальным открытием и самой большой ценностью современной цивилизации признается открытие Бога! Именно вера в сакральное, священное открывает для человека возможности справиться с «пограничными» ситуациями, когда возникает шекспировское «быть или не быть». Подавляющее большинство людей на Земле – верующие, и они считают себя в той или иной степени представителями Бога, богоподобными людьми и уж никак не потомками обезьян.

Близкой к этой гипотезе является гипотеза симбиоза развития: человек создает цивилизацию, одновременно развивая свою собственную природу. Трансформация человека и цивилизации – многовековой сложнейший процесс рождения и гибели людей и цивилизаций. Считается, что современный биовид человека сформировался около 50 тыс. лет назад, развиваясь и создавая новые средства

выживания и орудия облегчения своего труда. С позиций современной генетики биовид *homo sapiens* включает бесконечное множество людей с разнородными гетероструктурами тела и души.

В настоящее время в рамках «глобальной» цивилизации существует около 220 разных стран с гетерогенными природными условиями, языками, культурой и прочим, которые объединяются в «локальные» цивилизации с разными понятиями, что такое человек, семья, способности, потребности, знания, интересы, воля; орудия труда, энергия, ресурсы, технологии, благосостояние людей, воспроизводство, обмен, управление, социально-политические отношения, образование, наука, религия, мораль, культура и пр.

Традиционно выделяют Западную, Азиатскую и Восточную цивилизации. Западная цивилизация с ее идеалом всеобщей истины, отделенной от исторических культур, не может претендовать на безусловную всемирность. Это надисторическое начало в силу известных обстоятельств представлено, в первую очередь, англо-саксонской цивилизацией с ее главным приоритетом «обмани ближнего, но заработай как можно больше». Западные «локальные» цивилизации воюют, вводят экономические санкции во имя золотого тельца. Исторические цивилизации Азии и Востока занимаются условиями диалога, модальностью и тоном, формирующими определенный тип отношений. Восток имеет свою культуру диалога, риторика на Востоке заменяет искусство манипулирования другими. Коммуникация на Востоке всегда имеет стратегическую природу и разделяет людей на властвующих и подчиненных. Искреннюю любовь китайцев к лозунгам и призывам или тот факт, что акцент китайского руководства на самобытности и «совокупной силе» своей цивилизации не переходит в идейный национализм западного образца. Природа власти на Востоке помогает рассеять многие недоумения, связанные с представлением о культуре как о неизменной сущности. Ничто не мешает японцам, наделенным исключительно сильным чувством национального достоинства и уникальности, перенимать достижения западной цивилизации. Западная свобода выбора и восточная свобода действия могут быть совмещены, как они были когда-то соединены в личности Бога.

Гетероструктуры цивилизации в разных науках различаются определенными характеристиками весьма существенно [2].

В системологии в понятие «цивилизация» вкладывается множество смыслов, в некоторых научных школах несколько десятков смыслов.

Историки считают основными следующие смыслы «локальных» цивилизаций – природные условия, языковое родство, близость политических и экономических устоев, культура, менталитет. «Локальные» цивилизации, на наш взгляд, могут быть классифицированы по главному смыслу – человеку и его роли: человек, семья. Способности, потребности, знания, интересы, воля; технологический способ производства – орудия труда, энергия, ресурсы, технологии; экономика – благосостояние людей, воспроизводство, обмен, управление; социально-политические отношения – народ, власть, право; духовный мир – образование, наука, религия, мораль, культура и пр.

В социологии принято считать следующие восемь гетероструктур цивилизации: западная, китайская, исламская, индуистская, латиноамериканская, африканская, православная, японская.

Материковая классификация цивилизаций предполагает пять материков: Евразия – 54,6 млн км², 94 страны; Африка – 30,3 млн км², 62 страны; Северная Америка – 24,4 млн км²; Южная Америка – 17,8 млн км²; Австралия – 7,7 млн км².

Региональная классификация включает: Северную Европу, Южную Европу, Центральную Европу, Россию, Ближний Восток и Персидский залив, Индостан, Центральную и Восточную Азию, Юго-Восточную Азию, Австралию и Океанию, Северную и Центральную Америки, Государства Карибского моря, Южную Америку, Северную и Восточную Африки, Западную Африку, Центральную Африку, Южную Африку. Всего 16 регионов и 220 стран.

По абсолютному показателю ВВП первые 12 стран мира: США – 19,5 трил. долл.; КНР – 12,2; Япония – 4,5; Германия – 3,6; Англия – 2,8; Франция – 2,5; Индия – 2,49; Италия – 1,9; Бразилия – 1,5; Канада – 1,5; Южная Корея – 1,38; Россия – 1,3 (рис. 1,а).

По ВВП на душу населения богатейшие страны: Катар, Сингапур, Норвегия, Бруней, ОАЭ, США, Гонконг, Швейцария. Беднейшие страны: Мозамбик, Гвинея, Нигер, Молави, Бурунди, Либерия, Конго, ЦАР (рис. 1,б).

Системный анализ 400 различных показателей конкурентоспособности цивилизаций по данным ООН с применением специального интеллектуального программного обеспечения для обработки гетерогенной информации позволил выявить основные смыслы классификации гетероструктур

земной цивилизации с объективными оценками перспективности той или иной локальной цивилизации в формах отношений дохода к прожиточному минимуму беднейшей части населения и процента беднейшего слоя к общей численности, а также *future*-коэффициента, как отношение доли населения к валовому мировому продукту: Япония – 0,12, Западная цивилизация – 0,25, Восточно-Европейская – 1,2, Исламская – 1,4, Конфуцианская – 1,6, Латиноамериканская – 1,6, Индуистская – 5,7 (рис. 1,а).

По результатам наших исследований индекс перспективности «локальных» цивилизаций в форме трех основных индексов для социально-экономических гетероструктур с учетом реальных интегральных характеристик «локальных» цивилизаций выстраивается следующим образом: русская, японская, китайская, западная, индуистская, исламская, латиноамериканская, африканская (рис. 1,б).

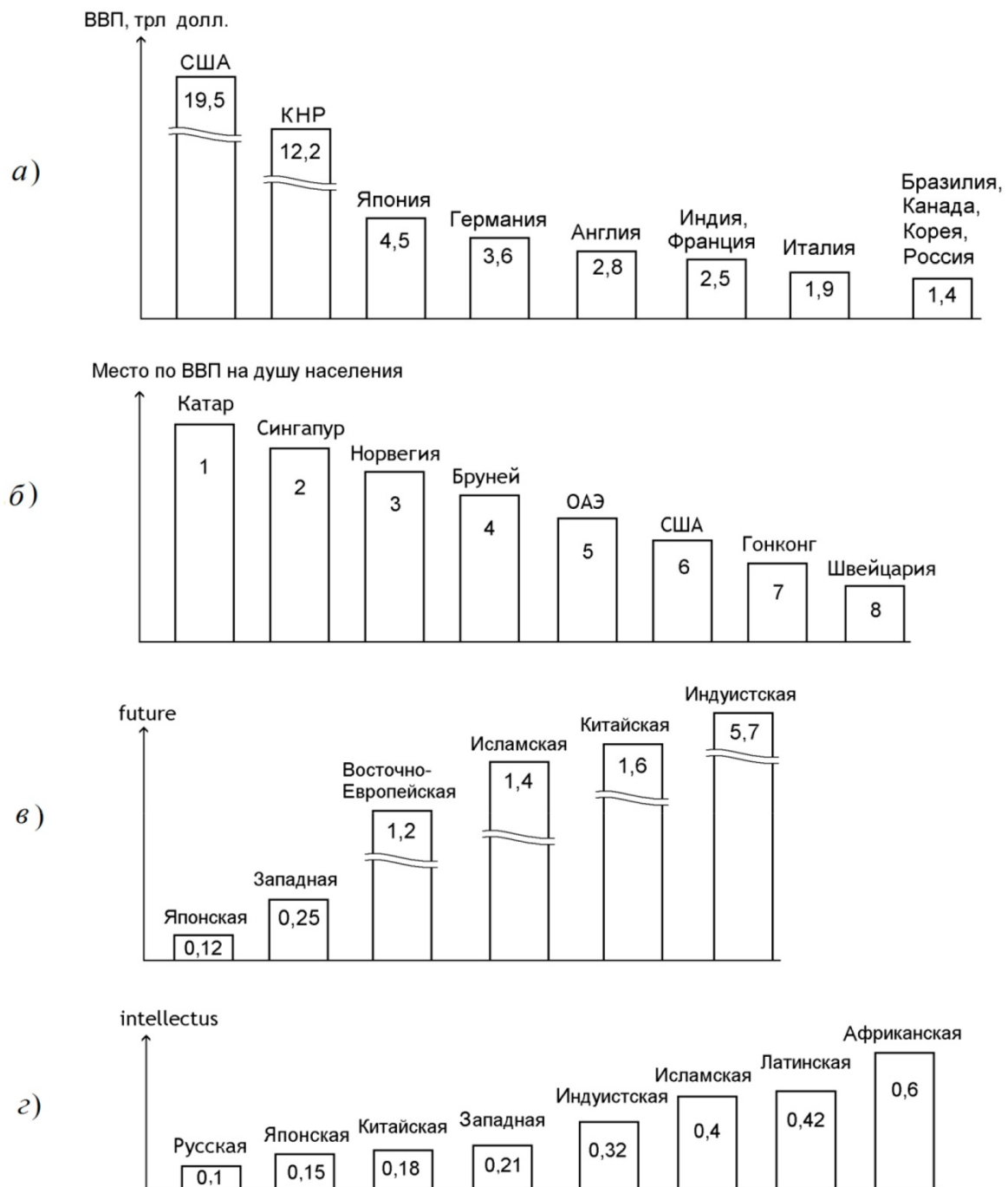


Рис. 1

Важнейшей гетероструктурой современной цивилизации во всех локальных цивилизациях признается человек. Руководствуясь данной аксиомой, строится систематика аксиом гетерологии.

Аксиоматика гетерологии

В аксиоматически строящейся теории исследуемый объект характеризуется некоторым множеством аксиом, которое при этом должно обладать полнотой и непротиворечивостью.

Поскольку гетерология относится к сложной динамической системе управления, целесообразно при определении аксиоматического множества воспользоваться хорошо развитой теорией управления, согласно которой система считается полной и непротиворечивой, если включает в себя следующие подсистемы: планирование, обеспечение, контроль, регулирование, анализ, развитие. Аксиоматическое множество СИГ (системная инженерия гетероструктур) будет полным и непротиворечивым в следующем составе аксиом для глобальной цивилизации:

1. *Аксиома планирования*: целью является снижение гетерогенности структур.
2. *Аксиома обеспечения*: достижение цели формулируется как технология обеспечения достижения цели осуществляется применением систематизированной совокупности операций, приемов, способов, методов переработки различных ресурсов – материальных, информационных, духовных и интеллектуальных с использованием накопленных цивилизацией и создания новых материальных, духовных и интеллектуальных ценностей.
3. *Аксиома контроля* формулируется в соответствии с целями и контролируется населением, органами правопорядка, международными организациями, прежде всего ООН.
4. *Аксиома регулирования*: управление процессом не может быть эффективным без самоуправления, управления в малой группе, в средней группе, большими группами. Вся история развития цивилизации с позиции современной теории управления является историей развития отношений «управляющий – управляемые».
5. *Аксиомы анализа* результатов планирования, обеспечения, контроля и регулирования формулируются на основе системного анализа: анализ отклонений от целей при максимально возможной достоверности информации об отклонениях и при заданных ограничениях; нет, и не может быть одной и только одной модели отклонения. Модель отклонения – это всегда система технологических, персонологических, физиологических, социальных моделей.
6. *Аксиомы развития* базируются на представлении развития как закономерного изменения материи и сознания. Их универсальное свойство – «развертывание» свойств в смысле восхождения от низшего к высшему. Источник развития находится внутри развивающегося, развитие представляет собой процесс постепенного накопления количественных изменений, приводящих к новому качеству.

Для «локальных» цивилизаций основные аксиомы формулируются следующим образом:

- Основной тенденцией эволюции «локальных» цивилизаций является дальнейшее нарастание гетерогенности социотехнологических сфер.
- Нарастание гетерогенности неизбежно приводит к росту конфликтных ситуаций между сферами цивилизаций, особенно, как и ранее, обусловленных религиозными различиями.
- Сбои в работе компьютерных сетей будут также нарастать в связи с расширением сетей и охватом большинства стран «локальных» цивилизаций вследствие высокого уровня бессознательно-го в компетентности эксплуатирующего персонала.
- Весьма вероятными катастрофами природных и искусственных гетероструктур станут катастрофы, связанные с общим потеплением климата Земли. Уже сейчас наблюдается повышенная смертность людей в периоды повышенной температуры, а также катастрофы сложной техники, оборудования, строительных объектов (мостов, зданий, сооружений).
- Грядет осознание необходимости ограничений рождаемости в «локальных» цивилизациях с природными условиями и климатом, не позволяющим обеспечить население основными продуктами питания.
- Главной опасностью для компьютерной цивилизации, как и для ранних цивилизаций, остается внешнее воздействие типа нарастания различных электромагнитных полей и импульсов, а также метеоритные и астероидные бомбардировки Земли, большинство «локальных» цивилизаций все больше интеллектуальных и материальных ресурсов вынуждены будут тратить на защиту от космических воздействий.

▪ «Великое» переселение народов с Азиатских и Африканских «локальных» цивилизаций в Европу приведет и уже приводит к увеличению катастрофических проявлений в жизни стран, принимающих беженцев.

Модели гетерологии цивилизаций

Известно несколько моделей гетерологии цивилизаций:

- вероятностные модели компьютерной цивилизации, позволяющие оценить опасность терроризма и угроз ядерной катастрофы;
- оценочные модели затрат интеллектуальных и материальных ресурсов на защиту цивилизаций от космических воздействий;
- модели эволюции для «локальных» цивилизаций и гомогенизации индексов конкурентоспособности стран и народов [3].

Наиболее используемой на практике считается модель ООН, содержащая около 400 различных показателей конкурентоспособности. Укрупненная графическая схема модели гетерологии цивилизаций, предлагаемая нами, приведена на рис. 2.

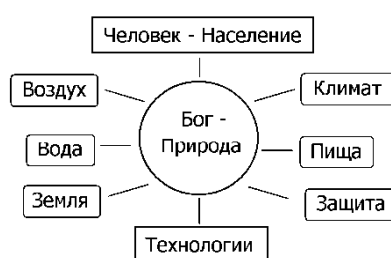


Рис. 2. Модель гетерологии цивилизаций

Применимость модели в приведенном виде не вызывает сомнений с точки зрения реальных оценок материальных ресурсов для населения.

Важнейшей гетероструктурой любых «локальных» цивилизаций является гетероструктура воздуха. На рис. 3 представлена структура вредных выбросов CO_2 , CH_4 , C в атмосферу разных отраслей экономики. Видно, что более 50 % выбросов приходится на теплоэнергетику (30 %) и автотранспорт (23 %). Средние по цивилизациям индексы конкурентоспособности не играют никакой роли в жизни людей, кроме рекламной для населения, так называемого «золотого» миллиарда.



Рис. 3. Гетероструктура воздуха

В частности, метаанализ данных по схеме рис. 3 показал несомненное преимущество «русской» цивилизации (см. рис.1,2) в связи с ее перспективностью, а не прогрессивностью Западной модели [4].

Заключение

Созданы основы гетерологии цивилизаций, аксиомы, оценки «локальных» цивилизаций. Показана перспективность модели Русской цивилизации по сравнению с западными и другими моделями.

Библиографический список

1. Смопут, М. Гетероструктуры компьютерной цивилизации / М. Смопут. – Москва : Издательский центр, 2019. – 99 с.
2. Смогунов, В. В. Математическое моделирование надежности гетеросфер цивилизации / В. В. Смогунов, Е. А. Кузина, Н. С. Кузнецов // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 4 (28). – С. 51–58.
3. Шкляр, В. Н. Надежность систем управления / В. А. Шкляр. – Томск : Изд-во ТПУ, 2009. – 126 с.
4. Кузнецова, О. В. Образование интеллекта / О. В. Кузнецова, В. В. Смогунов, А. А. Землянский. – Бишкек : Илим, 2009. – 246 с.

References

1. Smoput M. *Geterostruktury komp'yuternoy tsivilizatsii* [Heterostructures of computer civilization]. Moscow: Izdatel'skiy tsentr, 2019, 99 p. [In Russian]
2. Smogunov V. V., Kuzina E. A., Kuznetsov N. S. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2019, no. 4 (28), pp. 51–58. [In Russian]
3. Shklyar V. N. *Nadezhnost' sistem upravlenii* [Reliability of control systems]. Tomsk: Izd-vo TPU, 2009, 126 p. [In Russian]
4. Kuznetsova O. V., Smogunov V. V., Zemlyanskiy A. A. *Obrazovanie intellekta* [Intelligence education]. Bishkek: Ilim, 2009, 246 p. [In Russian]

Кузнецов Никита Сергеевич

студент,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kipra@pnzgu.ru

Смогунов Владимир Васильевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра теоретической и прикладной
механики и графики,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: smogunovvladimir@gmail.com

Юрков Николай Кондратьевич

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Kuznetsov Nikita Sergeevich

student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Smogunov Vladimir Vasilyevich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of theoretical and applied mechanics
and graphics,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Yurkov Nikolay Kondratjevich

doctor of technical sciences, professor
honoured worker of science
of the Russian Federation,
head of sub-department of design
and production of radio equipment
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Кузнецов, Н. С. Гетерология качества гетеросфер цивилизаций / Н. С. Кузнецов, В. В. Смогунов, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 1 (29). – С. 35–41. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-1-4.

Е. В. Ширинкина

**ПЛАТФОРМЫ ОБУЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ
ТРАНСФОРМАЦИИ**

E. V. Shirinkina

LEARNING PLATFORMS IN DIGITAL TRANSFORMATION

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность исследования обусловлена тем, что развитие цифровых технологий провоцирует формирование цифровой образовательной среды и, как следствие, увеличивает потенциал дистанционного обучения, где особая роль отводится развитию обучающим платформам. *Материалы и методы.* С появлением платформ онлайн-образования мнения ученых по их эффективности разделились. Имеются проблемы, которые пока не способны обеспечивать стремительного развития технологий. *Результаты и выводы.* В статье проведен анализ рынка обучающих платформ. Информационной базой исследования послужили данные аналитического отдела AnyClass, компании Kaltura, исследования Augmented and Virtual Reality Survey Report, данные HolonIQ. Представлены основные участники рынка обучающих платформ и образовательные выгоды от их использования.

Ключевые слова: цифровая экономика, образование, массовые открытые онлайн-курсы, образовательная среда, обучение.

Abstract. *Background.* The relevance of the study is due to the fact that the development of digital technologies provokes the formation of a digital educational environment and, as a result, increases the potential of distance learning, where the development of learning platforms plays a special role. *Materials and methods.* With the advent of online education platforms, scientists have divided their opinions on their effectiveness. There are problems that are not yet capable of ensuring the rapid development of technology. The article analyzes the market for training platforms. *Results and conclusions.* The research was based on data from AnyClass analytic department, Kaltura, Augmented and Virtual Reality Survey Report, HolonIQ data. The main participants in the market of educational platforms are presented, educational benefits from their use are presented.

Keywords: digital economy, education, mass open online courses, educational environment, training.

Введение

Рынок онлайн-образования активно развивается: массовые открытые онлайн-курсы (МООС) в последнее десятилетие стали интересны не только потенциальным слушателям, но и инвесторам. Однако эти решения по-прежнему являются дорогостоящими, не повышают качества существующего образования и почти не увеличивают вовлеченности студентов (Минтруд России заявляет, что 72 % выпускников всех вузов доучиваются на рабочих местах) [1–3].

Не так давно в онлайн-образовании появились пиринговые платформы обучения (p2p), основанные на бартерном обмене знаниями и отсутствии какой-либо централизации. Эти платформы помогают решить проблемы, стоящие перед МООС:

1. Повышение качества знаний. Большинство онлайн-курсов вертикально ориентированы – они предоставляют ограниченный круг знаний, субъективно подобранный преподавателями. Формат пирингового образования стимулирует организацию учебных коллективов, основанных на горизонтальных связях. Например, проект «Лекториум» вышел за рамки видеоуроков и запустил направление публичного разбора ошибок после завершения урока.

2. Доступность образования. Стоимость курсов, где преподают на уровне вузов, довольно высока, тогда как студенты p2p-платформ используют их бесплатно или за низкую плату. Например, онлайн-университет P2PU берет с пользователей деньги только за «звездные» лекции и курсы от именитых преподавателей [4].

3. Повышение вовлеченности студентов. Внутри пиринговых платформ студенты становятся носителями знаний и экспертизы. Они получают статус преподавателей и учат других своих соратников, а сами платформы превращаются в социальные сети для желающих получить новые знания и передать свои тем, кто в них нуждается. Например, Сбербанк открыл школу программирования «Школа 21», в которой нет учителей, лекций и оценок. Регуляторами площадки становятся менторы и более опытные студенты-участники.

С появлением платформ онлайн-образования мнения ученых по их эффективности разделились. Имеются проблемы, которые пока не способны обеспечивать стремительного развития технологий. Однако эксперты выделяют несколько перспективных секторов развития [5]:

1) корпоративный сегмент. По данным отчета Всемирного экономического форума, около 70 % российских компаний готовы переучить своих сотрудников к 2020 г.;

2) навыковые сервисы. Наряду с курсами по предпринимательству вакантным сектором является обучение рабочим профессиям. В связи с разрушением в 1990-е гг. системы среднего профобразования на рынке существует мало игроков, обучающих прикладным профессиям. Онлайн-платформы помогут масштабировать обучение и совершенствовать навыки. В этой связи проведем исследование рынка онлайн-обучения.

Методика исследования

Информационной базой исследования послужили данные аналитического отдела AnyClass, компании Kaltura, исследования Augmented and Virtual Reality Survey Report, данные HolonIQ.

По данным аналитического отдела AnyClass, объем продаж онлайн-курсов в России в 2018 г. составил 20–25 млрд рублей, а темпы роста рынка – не меньше 100 % в год. Сейчас при средней стоимости онлайн-курсов 5–6 тыс. рублей можно говорить об аудитории в 3–4 млн человек. Количество онлайн-курсов на рынке оценивается в 7–10 тыс. рублей, а количество авторов, задействованных на рынке, – вдвое меньше. Есть два варианта «начинки» онлайн-курсов, которые на текущий момент вызывают интерес у слушателей: курсы – источники знаний и курсы-помощники [6].

Курсы – источники знаний. Такие курсы составляют конкуренцию книгам, лекциям и другим традиционным источникам знаний. При этом у онлайн-формата есть безусловное преимущество: информация, упакованная в виде подкастов или видеозаписей, воспринимается легче, а пользователь прибегает к ней чаще.

Курсы – помощники. Люди покупают такие курсы не столько ради знаний, сколько для мотивации, а также для персональных экспертных консультаций, например, как пройти собеседование. В этом случае ценность курса может варьироваться от нескольких тысяч до сотен тысяч рублей. Это зависит от уникальности контента и практической пользы. Если автор и его команда лично проводят консультации с клиентами по использованию методики, ценность такого обучения намного возрастает. Такие курсы создают новую ценность для потребителей, которые нашли для себя эффективный инструмент саморазвития.

По данным компании Kaltura, 98 % опрошенных учителей считают видео ключевым звеном персонализации обучения (рис. 1).

В ходе опроса было сделано три основных вывода о применении видеотехнологий в развитии образования:

1) большинство опрошенных уверены в том, что в будущем всем нужны будут базовые знания по работе с видео, так как учащиеся ждут увеличения количества видеоконтента в учебном процессе;

2) образовательный видеоконтент идет рука об руку с развитием новых методов обучения людей, и учителя свободно используют видеоматериалы как для работы в классе, так и для домашних заданий;

3) хотя большинство утверждает, что обучающие видео удовлетворяют потребности учащихся, более половины преподавателей до сих пор не имеют ресурсов для создания контента этого формата. Это относится и к студентам, 63 % из которых также не имеют доступа к этим инструментам.

По данным исследования 2019 г. Augmented and Virtual Reality Survey Report, 86 % респондентов считают, что уже к 2025 г. распространение технологий XR можно будет сравнивать с повсеместным применением мобильных устройств (рис. 2).



Рис. 1. Доля ответов на вопрос: «С какой целью ваше образовательное учреждение использует видео?» [7]



Рис. 2. Доля ответов на вопрос: «В каких секторах вы ожидаете увидеть наибольший объем инвестиций, направленных на разработку технологии или контента AR/VR/MR/XR в ближайшие 12 месяцев?» [8]

Нарастающий темп применения технологий XR в сфере образования прогнозируют 41 % опрошенных. Объем венчурного финансирования в VR и AR достиг \$1,7 млрд к четвертому кварталу 2018 г., что в три раза больше, чем за тот же период предыдущего года. Термин XR включает технологии виртуальной реальности, дополненной реальности, а также их комбинированное применение. При использовании технологий AR/VR/XR выделяют несколько преимуществ: информативность, простота выстраивания ассоциативного ряда, например, при изучении языков, развитие долгосрочной памяти, а также повышение мотивации обучающихся к предмету изучения.

По данным HolonIQ, инвестиции в EduTech-компании превысят \$7,5 млрд в 2019 г. В первом полугодии 2019 г. более 400 EduTech-компаний по всему миру привлекли венчурный капитал на общую сумму \$3,5 млрд, а из 90 проведенных сделок каждая превышала \$5 млн (рис. 3).

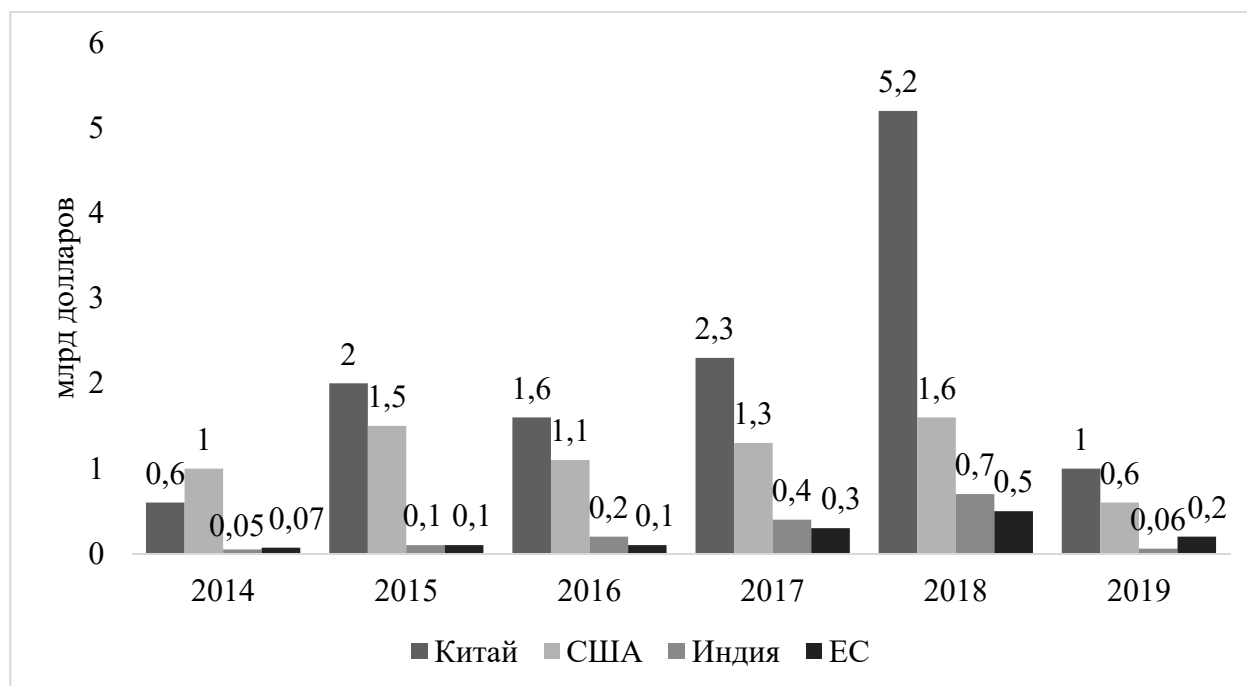


Рис. 3. Венчурные инвестиции в образование, млрд долларов [9]

Очевидно, что 70 % глобальных инвестиций в EduTech сосредоточены на рынках двух стран – Индии и Китая. По прогнозам аналитиков, в течение ближайших 20 лет США и Европейский союз будут все больше отставать от нынешних лидеров. EduTech-компании, которые ранее выступали в качестве реформаторов образования, стремясь создать рыночные изменения с помощью дизайна, технологий и педагогики, акцентировали свое внимание на подготовку рабочих кадров. Например, K12 INC. планирует развернуть платформу карьерного образования. По окончании обучения на этой платформе пользователи получают сертификат, который предоставит им некоторые привилегии на рынке труда. Специалисты McKinsey считают, что из-за важности человеческого взаимодействия образовательный сектор обладает низким техническим потенциалом для автоматизации. Лишь 27 % мероприятий в сфере образования, преимущественно за пределами аудиторий, имеют потенциал автоматизации благодаря новым технологиям [10].

По прогнозам HolonIQ, к 2025 г. более 1 млрд человек получают высшее образование, а в течение следующего десятилетия еще 280 млн человек получают высшее образование онлайн. Сегодня крупнейшим рынком в сфере онлайн-образования является США, где более 3 млн студентов – 15 % от общего числа поступивших студентов – получают образование полностью удаленно (рис. 4).

Только офлайн – 13,5 млн учащихся в 6,472 вузах, 20 % из числа которых входят в рейтинг Топ-100 лучших учебных заведений. Частично онлайн 3,5 млн учащихся в 3,438 вузах, 29 % из числа которых входят в рейтинг Топ-100 лучших учебных заведений. Полностью онлайн 3,1 млн учащихся в 3,491 вузах, 46 % из числа которых входят в рейтинг Топ-100 лучших учебных заведений, а 20 % из этих 46 % – в Топ-10. График показывает, насколько сильно фрагментировано образование в США. Более 6000 образовательных учреждений имеют в среднем 2000 офлайн-студентов, со средним показателем 300 человек в каждом. Анализируя эти данные, можно заметить, что почти

3500 учебных заведений имеют менее 1000 онлайн-студентов. Однако их средний балл несколько выше, чем у каждого из 316 сверстников, обучающихся в автономном режиме.

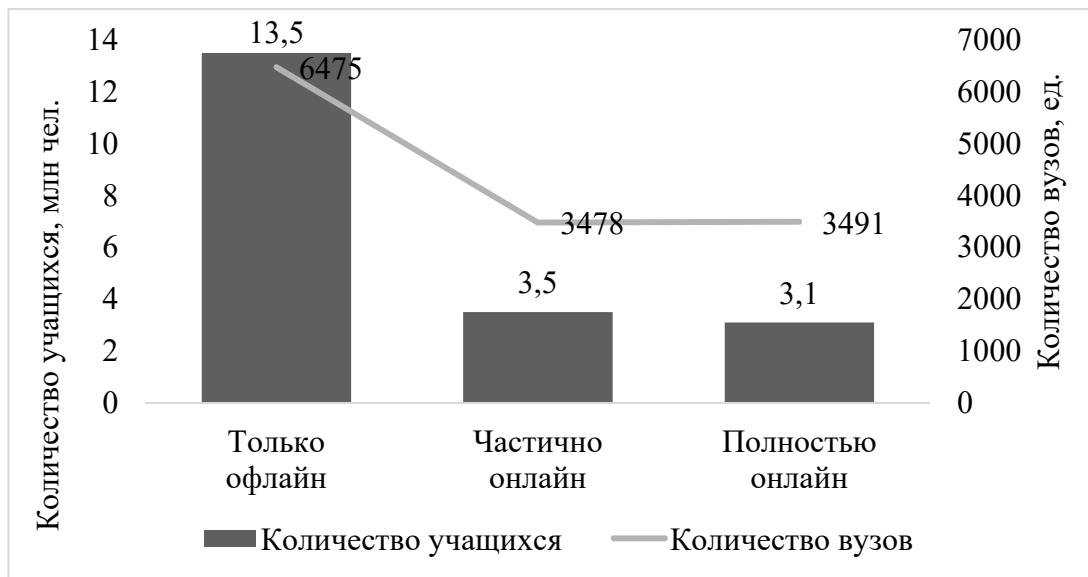


Рис. 4. Получение высшего образования онлайн [4]

Участие работодателей в MOOK преследует не только цели обучения трудовых ресурсов. Работодатели признали, что MOOK может служить сильным инструментом, чтобы обеспечить следующее поколение талантов, в особенности относительно потребностей промышленности ИКТ. Пример Open Education Alliance (OEA) ясно иллюстрирует этот тезис. OEA – совместное предприятие между Udacity и крупнейшими компаниями-разработчиками программного обеспечения, такими как Google, Facebook, ATandT и Nvidia, созданное в целях обеспечения доступности высококачественного образования и соединения учеников с возможностями в промышленности. OEA осуществляет набор студентов и рабочих, ищущих работу, для обучения соответствующим навыкам. В рамках курсов OEA ученики могут принять участие в нанопрограммах на получение степени, посредством чего курсы выровнены, чтобы ответить учебным требованиям и навыкам, которые высоко пользуются спросом в секторе ИКТ.

Образовательные выгоды от использования MOOK представлены на рис. 5.



Рис. 5. Образовательные выгоды от использования MOOK, % опрошенных [6]

Полученные результаты

Таким образом, преимущества обучающих платформ в следующем:

1. Платформы обучения дополняют всеобщее образование;
2. Формат обучающих платформ подходит для:
 - курсов повышения квалификации – 71,8 %;
 - факультативных образовательных программ/образовательных программ без присвоения степени – 58,6 %;
 - программ технической подготовки – 53,4 %;
 - элективных курсов – 51,7 %;
 - коррекционных классов – 46,6 %;
 - всех направлений школьной подготовки – 19,0 %.
3. Платформы обучения позволяют идти в ногу с развитием образования и улучшают качество преподавания.

Заключение

Развитие национальных платформ поддержки систем дистанционного образования с учетом закономерностей учебного процесса способствует преобразованию сферы образования в свободную инновационную образовательную среду, требует целостного и системного подхода и должно быть нацелено на развитие интеллектуального человеческого капитала как стратегического ресурса, отвечающего вызовам новой цифровой действительности и общественного развития.

Библиографический список

1. Измайлова, М. А. Новые кадры для экономики знаний: как привлечь и удержать таланты? / М. А. Измайлова // Экономика образования. – 2019. – № 1 (110). – С. 4–16.
2. Майстер, В. А. Цифровая трансформация финансовой отрасли как фактор конкурентоспособности / В. А. Майстер, Е. В. Ширинкина // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2018. – Т. 2. – С. 269–271.
3. Frisiani, G. A future for mobile operators: The keys to successful reinvention / G. Frisiani, J. Jubas, T. Lajous, P. Nattermann. – 2017. – URL: <http://www.mckinsey.com/industries/telecommunications/our-insights/a-future-for-mobile-operators-the-keys-to-successful-reinvention>
4. IBM Institute for Business Value. Facing the storm. Navigating the global skills crisis. – 2016. – URL: <http://blog.oxfordeconomics.com/>
5. ATD. Training Industry Report. – 2016. – URL: https://trainingmag.com/sites/default/files/images/Training_Industry_Report_2016.pdf
6. Coursera. Google IT Support Professional Certificate. – 2018. – URL: <https://www.coursera.org/specializations/google-it-support>
7. Корпоративный университет Сбербанка. Корпоративное обучение для цифрового мира. – 2018. – URL: <https://www.litres.ru/kollektiv-avtorov/korporativnoe-obuchenie-dlyacifrovogo-mira/>
8. Digital McKinsey. – URL: <http://www.mckinsey.com/global-locations/europe-andmiddleeast/russia/ru/our-work/mckinsey-digital>
9. KPMG. Corporate Digital Learning. – 2015. – URL: <https://iversity.org/en/courses/corporate-digital-learning>
10. Андреева, Г. Н. Развитие цифровой экономики России как ключевой фактор экономического роста и повышения качества жизни населения / Г. Н. Андреева, С. В. Бадалянц, Т. Г. Богатырева и др. – 2018. – URL: <https://docviewer.yandex.ru/>

References

1. Izmaylova M. A. *Ekonomika obrazovaniya* [Economics of education]. 2019, no. 1 (110), pp. 4–16. [In Russian]
2. Mayster V. A., Shirinkina E. V. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2018, vol. 2, pp. 269–271. [In Russian]
3. Frisiani G., Jubas J., Lajous T., Nattermann P. *A future for mobile operators: The keys to successful reinvention*. 2017. Available at: <http://www.mckinsey.com/industries/telecommunications/our-insights/a-future-for-mobile-operators-the-keys-to-successful-reinvention>
4. *IBM Institute for Business Value. Facing the storm. Navigating the global skills crisis*. 2016. Available at: <http://blog.oxfordeconomics.com/>

5. *ATD. Training Industry Report*. 2016. Available at: https://trainingmag.com/sites/default/files/images/Training_Industry_Report_2016.pdf
6. *Coursera. Google IT Support Professional Certificate*. 2018. Available at: <https://www.coursera.org/specializations/google-it-support>
7. *Korporativnyy universitet Sberbanka. Korporativnoe obuchenie dlya tsifrovogo mira* [Sberbank corporate University. Corporate training for the digital world]. 2018. Available at: <https://www.litres.ru/kollektiv-avtorov/korporativnoe-obuchenie-dlyacifrovogo-mira/> [In Russian]
8. *Digital McKinsey*. Available at: <http://www.mckinsey.com/global-locations/europe-andmiddleeast/russia/ru/our-work/mckinsey-digital>
9. *KPMG. Corporate Digital Learning*. 2015. Available at: <https://iversity.org/en/courses/corporate-digital-learning>
10. Andreeva G. N., Badal'yants S. V., Bogatyreva T. G. et al. *Razvitie tsifrovoy ekonomiki Rossii kak klyuchevoy faktor ekonomicheskogo rosta i povysheniya kachestva zhizni naseleniya* [Development of the Russian digital economy as a key factor of economic growth and improving the quality of life of the population]. 2018. Available at: <https://docviewer.yandex.ru/> [In Russian]

Ширинкина Елена Викторовна

кандидат экономических наук, доцент,
заведующий кафедрой менеджмента и бизнеса,
Сургутский государственный университет
ХМАО – Югра
(Россия, г. Сургут, пр. Ленина, 1)
E-mail: shirinkina86@yandex.ru

Shirinkina Elena Viktorovna

candidate of economical sciences, associate professor,
head of sub-department of management
and business,
Surgut State University Khanty-Mansi
Autonomous Okrug – Ugra
(1 Lenin avenue, Surgut, Russia)

Образец цитирования:

Ширинкина, Е. В. Платформы обучения в условиях цифровой трансформации / Е. В. Ширинкина // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 1 (29). – С. 42–48. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-1-5.

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

DIAGNOSTIC METHODS OF ENSURING THE RELIABILITY AND THE QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

УДК 62-192 : 004.421.4

DOI 10.21685/2307-4205-2020-1-6

А. В. Подкопаев, И. А. Подкопаев

ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫЙ АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ БЕЗОТКАЗНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ РАЗЛИЧНОЙ ЭНТРОПИИ

A. V. Podkopaev, I. A. Podkopaev

CENTRALIZED ADAPTIVE ALGORITHM FOR EVALUATING THE RELIABILITY OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS OF VARIOUS ENTROPY

Аннотация. Актуальность и цели. Современные и перспективные сложные технические системы (в дальнейшем для краткости по тексту – система) характеризуются усложнением структур соединения и повышением требований к надежности элементов. Учитывая приоритет важнейшего этапа эксплуатации систем – применение по назначению, предназначим методологию оценки безотказности как свойство, отражающее основное содержание надежности. Для большинства элементов табуляция значений статистических показателей безотказности в процессе обработки данных из сферы эксплуатации систем не представляет значительных вычислительных трудностей. Однако при анализе безотказности систем, данные о наработке до отказа элементов которых отсутствуют (например, для элементов, сравнительно недавно принятых в эксплуатацию или при отсутствии информации об условиях функционирования элемента, вновь введенного в структуру разработанной

Abstract. Background. Modern and promising complex technical systems (hereinafter referred to as the system for brevity) are characterized by a complication of connection structures and increased requirements for the reliability of elements. Given the priority of the most important stage of systems operation - the intended use, we will devise a methodology for assessing reliability, as a property that reflects the main content of reliability. For most elements, the tabulation of the values of the statistical reliability indicators in the process of processing data from the field of operation of the systems does not present significant computational difficulties. However, when analyzing the failure-free operation of systems for which the operating time to failure of the elements is not available (for example, for elements recently commissioned or in the absence of information on the functioning conditions of the element again brought into the structure of the developed or modernized system), direct algorithmization of engineering methods based on the collection

или модернизированной системы), прямая алгоритмизация инженерных методик, основанных на сборе статистической информации, не представляется возможной. Целью работы установлена разработка взаимосвязанной совокупности математических и логических блок-схем получения и применения фактических знаний в программно-математическом обеспечении процедуры расчета безотказности систем неодинаковой степени статистической определенности. *Материалы и методы.* Перспективным направлением в подобных исследованиях является дифференцированная селекция апробированных методов физической надежности с выбором соответствующего математического и алгоритмического аппарата непосредственного вероятностного моделирования систем. *Результаты.* Предложена блок-схема и рассмотрен вариант практического приложения синтезированного алгоритма имитационной оценки безотказности систем различной энтропии (далее по тексту – алгоритм). *Выводы.* Для применения разработанного алгоритма отсутствует необходимость в декомпозиции систем, а потенциал многократных повторений результатов случайного процесса смены технических состояний элементов и систем предопределяет возможность получения больших выборок с высокой точностью программной компиляции.

Ключевые слова: статистически определенный и статистически неопределенный элемент, прямое имитационное моделирование, показатели безотказности элементов и систем, методы надежности, экспоненциальное распределение, фрейм, экспертная система.

of statistical information is not possible. The aim of the work is the development of an interconnected set of mathematical and logical flowcharts for obtaining and applying factual knowledge in the mathematical software of the procedure for calculating the reliability of systems of varying degrees of statistical certainty. *Materials and methods.* A promising direction in such studies is the differentiated selection of proven methods of physical reliability with the choice of the appropriate mathematical and algorithmic apparatus for direct probabilistic modeling of systems. *Results.* A block diagram is proposed and a practical application of a synthesized algorithm for simulating the failure-free assessment of the reliability of systems of various entropy is considered (hereinafter, the algorithm). *Summary.* Using the developed algorithm, there is no need for decomposition of systems, and the potential of multiple repetitions of the results of a random process of changing the technical states of elements and systems determines the possibility of obtaining large samples with high accuracy of program compilation.

Keywords: statistically determined and statistically indefinite element, direct probabilistic modeling, reliability indicators of elements and systems, reliability methods, exponential distribution, frame, expert system.

Введение

В условиях непрерывного финансирования программ совершенствования вооружения и военной (специальной) техники особенно остро встает вопрос поиска наиболее эффективных путей повышения, обеспечения и поддержания безотказности систем.

Применительно к электромеханическим системам под безотказностью будем понимать способность системы выполнять функции в переключательном, усилительном, выпрямительном и других режимах, а также, что весьма важно, в различных конструктивных решениях и условиях эксплуатации.

Вместе с тем сложность систем достигла в настоящее время такого уровня, что в большинстве случаев отдельный человек-эксперт или группа экспертов не в состоянии полно и точно обрабатывать объемы информации о неоднородных процессах, происходящих при функционировании, повреждениях и отказах систем. Более того, перспективные системы достаточно уникальны и (или) малосерийны, а составляющие их элементы в своей основе миниатюрны или дороги. Поэтому дальнейшее развитие теории и практики надежности представляется как формирование базы, ориентированной на частичную или полную передачу аналитических функций эксперта от человека-оператора машине.

Основная часть

Алгоритмы вероятностного моделирования задач исследования безотказности систем, информация о моментах времени отказов которых статистически однозначно определена, разработаны весьма детально и рассмотрены в специальной литературе, например [1, 2].

С учетом актуализации стратегии технической эксплуатации по состоянию и смешанной стратегии технической эксплуатации, процессов планомерного продления ресурсов систем [3] в качестве наиболее естественной, практически осуществимой формой, удовлетворяющей современным требованиям, обусловим целесообразность дальнейшего совершенствования процедур надежности разработкой алгоритма, обладающего свойствами централизованности и адаптации. Блок «множество времен наработки до отказа» такого алгоритма рассматривается как центральный, обеспечивающий функции регулятора при расчете показателей безотказности статистически определенных и статистически неопределенных элементов, исходная информация об отказах которых различна. Свойство адаптации отражает то обстоятельство, что формирование ветвей подобного алгоритма осуществляется, исходя из дефиниции структур систем, а связи между ветвями при применении алгоритма по назначению реализуются на основе функционального сочетания всех алгоритмических блоков.

При достижении цели работы задействованы инструменты прямого имитационного моделирования, при которых алгоритм воспроизводит, имитирует реальные действия человека-оператора, являющиеся случайно зависимыми от вида априорной информации и структуры системы.

Синтезированный алгоритм представлен в виде блок-схемы операторов, отдельные из которых отображают достаточно крупную группу элементарных арифметических и логических операций, как показано на рис. 1.

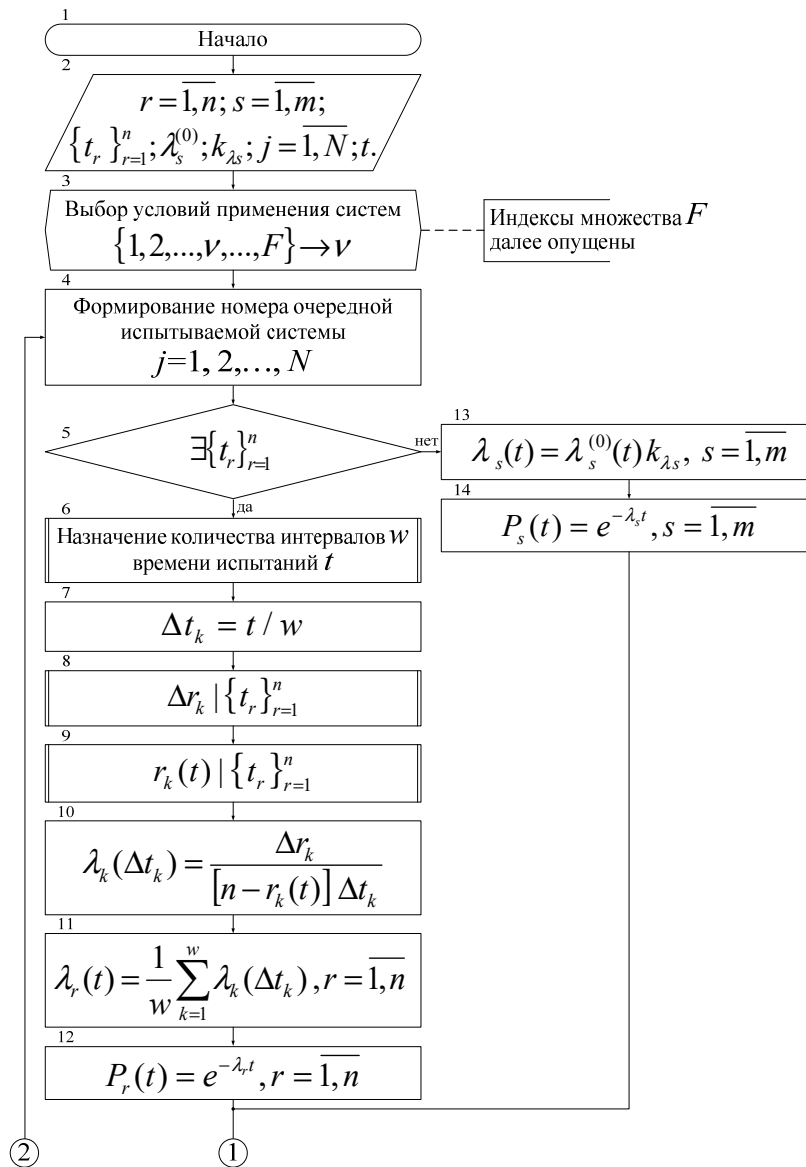


Рис. 1. Блок-схема централизованного адаптивного алгоритма оценки безотказности сложных технических систем различной энтропии (начало)

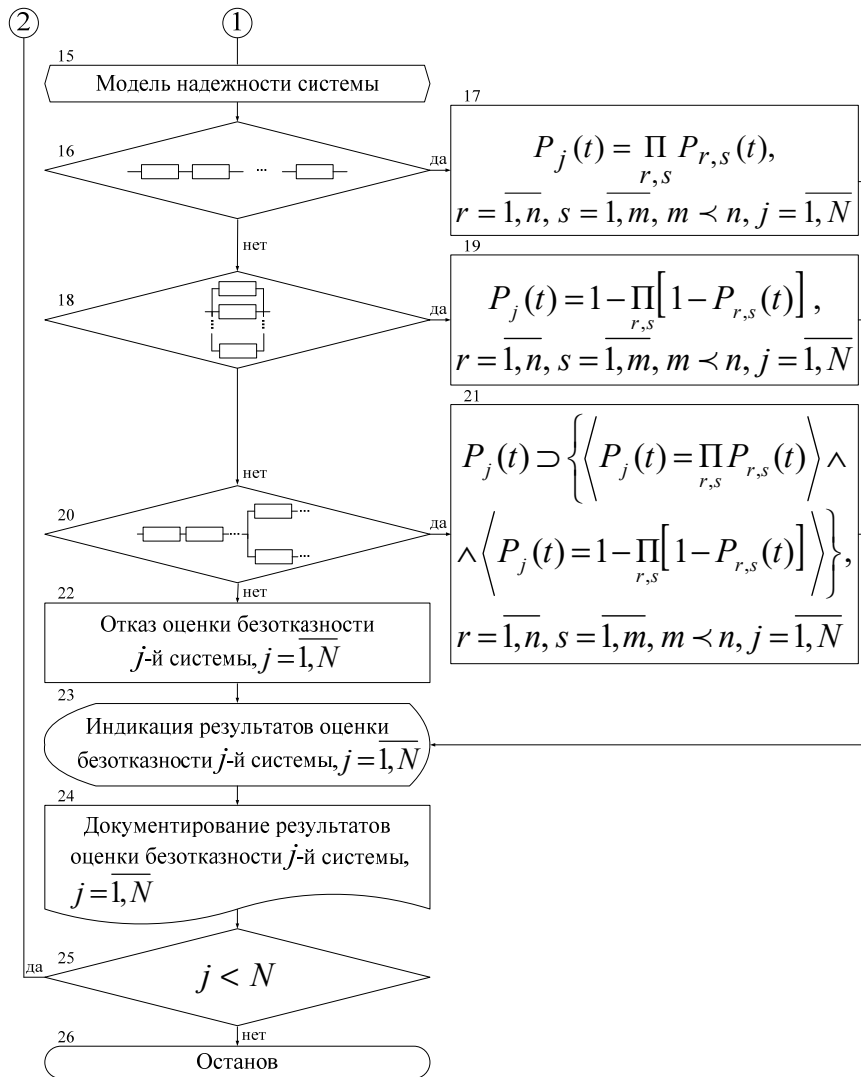


Рис. 1. Блок-схема централизованного адаптивного алгоритма оценки безотказности сложных технических систем различной энтропии (окончание)

Разработанный алгоритм функционирует на основе исходных данных, систематизируемых в операторе 2:

- заданного количества статистически определенных r -х элементов $r = \overline{1, n}$;
- заданного количества статистически неопределенных s -х элементов $s = \overline{1, m}$;
- множества времен наработки до отказа статистически определенных r -х элементов $\{t_r\}_{r=1}^n$;
- интенсивностей отказов для идеальных условий функционирования (нормальные: атмосферное давление, влажность, температура; отсутствие вибраций и ударных сотрясений) статистически неопределенных s -х элементов $\lambda_s^{(0)}(t)$;
- значений поправочного коэффициента k_{λ_s} , показывающих, во сколько раз значения интенсивностей отказов статистически неопределенных s -х элементов, функционирующих в заданных условиях применения, больше интенсивностей отказов элементов данного типа, функционирующих в идеальных условиях;
- количества j -х исследуемых систем $j = \overline{1, N}$.

Время испытаний элементов t задается исходя из целей эксперимента.

По завершении процесса ввода исходных данных, с применением оператора 3 осуществляется конкретизация условий применения систем $\{1, 2, \dots, v, \dots, F\} \rightarrow v$ (например, выбираются условия применения систем в составе бортового оборудования летательных аппаратов).

После ввода исходных данных и выбора условий применения систем оператор 4 формирует очередной номер $j = 1, 2, \dots, N$ исследуемой системы.

Далее функционирует группа операторов 5–14, выполняющих выбор и воспроизведение соответствующего метода расчета безотказности элементов различной степени неопределенности на основе назначенных исходных данных. Логический оператор 5 обеспечивает разветвление общей процедуры расчета безотказности элементов в зависимости от наличия или отсутствия статистических сведений об отказах элементов.

При существовании множества времен наработки до отказа $\{t_r\}_{r=1}^n$ статистически определенных r -х элементов оператор 5 подключает операторы 6–12, реализующие инженерную методику расчета безотказности элементов [4, 5].

Рассматриваемое время испытаний t разбивается на малые интервалы длительностью Δt_k , где $k = \overline{1, w}$ – номер интервала времени испытаний t . Схема назначения количества интервалов w времени испытаний t , определяемая в операторе 6, обусловливается продолжительностью эксперимента и точностью расчетов. В основном эта задача разрешима эвристическими методами, в которых не последнюю роль играют интуиция специалистов, знание ими прикладных вопросов теории статистических решений и умения в корректном применении формулировок надежности. Решение подобных вопросов по-прежнему остается прерогативой человека-оператора.

Длительность малых интервалов Δt_k времени испытаний t вычисляется простой арифметической операцией оператора 7.

Для выбора количества статистически определенных r -х элементов, отказавших на k -м интервале наработки – Δr_k и количества статистически определенных r -х, отказавших к началу k -го интервала наработки – $r_k(t)$, предусмотрены соответственно операторы 8 и 9, устанавливающие условную зависимость алгоритмических действий от множества времен наработки до отказа испытываемых элементов.

Таким образом, функционирование группы операторов 6–9 выполняется в условиях активного эксперимента, что диктует необходимость обобщения результатов для конкретных условий расчета. Сформулируем эти результаты, представив в операторе 10 математическую форму оценки интенсивности отказов совокупности статистически определенных r -х элементов для каждого k -го интервала времени испытаний t как отношение количества статистически определенных r -х элементов, отказавших на k -м интервале наработки Δr_k к количеству статистически определенных r -х элементов, работоспособных на начало k -го интервала наработки $[n - r_k(t)]$.

С учетом классических допущений о возможности применения экспоненциального распределения на каждом участке так называемой «лямбда-характеристики» [6–8] интенсивность отказов $\lambda_r(t)$ и вероятность безотказной работы $P_r(t)$ в течение времени испытаний t всех статистически определенных r -х элементов вычисляются согласно зависимостям статистических решений, представленным в операторах 11 и 12 соответственно.

В случае отсутствия статистической информации об отказах элементов оператором 5 передается управление на операторы 13 и 14, содержащие аппарат коэффициентного метода расчета статистически неопределенных s -х элементов [4, 8]. Применяемый в разработанном алгоритме коэффициентный метод физической надежности предопределяет возможность оценки показателей безотказности элементов, неполнота сведений о которых не позволяет использовать методы непосредственного аналитического моделирования.

Интенсивность отказов статистически неопределенных s -х элементов $\lambda_s(t)$ определяется в операторе 13 произведением интенсивностей отказов для идеальных условий функционирования статистически неопределенных s -х элементов $\lambda_s^{(0)}(t)$ на справочные значения поправочного коэффициента k_{λ_s} , обсужденного выше.

В операторе 14 определяются вероятности безотказной работы статистически неопределенных s -х элементов, соответствующие значениям интенсивностей отказов, вычисленных в операторе 13. Для этого также используется формула экспоненциального распределения.

Существенно важным аспектом в практических приложениях методологии надежности является определение возможности распространения результатов обработки полученной количественной

информации о безотказности элементов различной энтропии на единство подходов в типовых решениях безотказности систем в целом.

Оператор 15 является типовым для идентификации последовательной, параллельной моделей надежности системы или смешанной структуры соединения элементов и предназначен для проведения анализа взаимодействия элементов между собой в пространственно-временной организации системы, определяющей виды, характер связей и отношений между элементами. Для структуризации системы могут быть использованы фреймы – конструкции описания некоторой системы, обладающей теми или иными свойствами и хранящие всю информацию о свойствах и отношениях системы [9]. Здесь же заметим, что такой анализ является промежуточным этапом решения задачи оценки безотказности систем на вычислительной машине.

После анализа структуры системы, в процесс функционирования разработанного алгоритма включаются операторы 16–22, предназначенные для воспроизведения метода и вычисления показателей безотказности системы, установленной оператором 15.

При последовательном соединении элементов в системе оператор 16 подключает оператор 17, реализующий правило расчета вероятности безотказной работы j -й системы – $P_j(t)$, представленной последовательной моделью надежности.

Отсутствие условия применимости метода расчета последовательного соединения элементов приводит к необходимости передачи управления оператору 18. Оператор 18 проверяет условия применимости метода расчета параллельного соединения элементов, при выполнении которого оператором 19 по известному правилу вычисляется количественный показатель безотказности такого соединения.

При смешанной структуре соединения элементов в системе, приводимой к универсальным моделям надежности, оператор 18 включает в процесс функционирования алгоритма оператор 20, предопределяющий подобную структуру. При выделении простейших универсальных моделей надежности вероятность безотказной работы j -й системы $P_j(t)$ вычисляется в операторе 21 по правилу включения многообразных комбинаций последовательных и параллельных структур системы.

Некоторые системы (например, мостовое соединение элементов) могут иметь структуру, не приводимую к универсальным моделям надежности. Методы решения безотказности систем со сложной конфигурацией структуры, изложенные, например, в работах [5, 6], весьма специфичны, а алгоритмическое исполнение методов достаточно трудоемко и не всегда эффективно. Вследствие исключительности систем, не приводимых к универсальным моделям надежности, с одной стороны, и значительных затрат ресурсов при программировании аналитических формул, содержащих большое число членов (например, экспонент с различными, в том числе, близкими показателями), с другой стороны, обусловим отсутствие подобных вычислений в разработанном алгоритме.

Итак, в случае отсутствия возможности приведения структуры системы к сочетаниям последовательных и параллельных организаций взаимодействия элементов расчет безотказности подобной системы не осуществляется. Управление переходит на оператор 22, выполняющий процесс отказа оценки безотказности j -й системы и образующий тупиковую ветвь в структуре алгоритма. Информация об отсутствии частного решения передается на оператор 23.

При адаптации функциональных возможностей алгоритма данные количественной оценки безотказности j -й системы установленной структуры подаются от операторов 17, или 19, или 21 на операторы 23 и 24, предназначенные соответственно для индикации и документирования полученной информации.

Оператор 25 проверяет выполнение условия исследования заданного числа систем $j < N$. Если это условие выполняется, управление вновь передается оператору 4 для формирования номера следующей испытываемой системы. Из невыполнения проверяемого условия $j < N$ следует воспроизведение заданного числа исследуемых систем, и управление переходит на оператор останова 26.

Заключение

Таким образом, предлагаемый алгоритм является действенным инструментом расчета, оценки и количественного анализа вероятностных показателей безотказности систем различной структуры и определенности.

Вариант практического применения разработанного алгоритма возможен в структуре экспертных систем, относящихся к типологии систем искусственного интеллекта [9]. За счет включения разработанного алгоритма в состав механизма получения решений (решателя) экспертной системы исключается необходимость оперирования правилами – достаточно объемными конструкциями выражения связей, зависимостей между фактами и их комбинациями. Автоматическое подключение процедур-знаний, позволяющих выполнять вычисления или преобразования функций в определенной ситуации, выполняется алгоритмом в зависимости от данных операторов 2–4. Следовательно, механизм получения решений экспертной системы, содержащий полученный алгоритм, предполагается в максимальной оптимизации.

Библиографический список

1. Теория надежности радиоэлектронных систем в примерах и задачах / Г. В. Дружинин, С. И. Степанов, В. Л. Шихматова, Г. А. Ярыгин; под ред. Г. В. Дружинина. – Москва : Энергия, 1976. – 448 с.
2. Лысенко, А. В. Алгоритм реализации адаптивной системы вибрационных испытаний бортовой радиоэлектронной аппаратуры / А. В. Лысенко, Г. В. Таньков, В. С. Калашников, Н. В. Горячев, И. И. Кочегаров // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 2 (26). – С. 60–69.
3. Эксплуатация комплексов авиационного вооружения / под ред. А. И. Буравлева. – Москва : Изд-во ВВИА, 2006. – 287 с.
4. Коваленко, И. Н. Методы расчета высоконадежных систем / И. Н. Коваленко, Н. Ю. Кузнецов. – Москва : Радио и связь, 1988. – 176 с.
5. Козлов, Б. А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики / Б. А. Козлов, И. А. Ушаков. – Москва : Советское радио, 1975. – 472 с.
6. Гнеденко, Б. В. Математические методы теории надежности и их статистический анализ / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. – Москва : URSS, 2013. – 584 с.
7. Рудзит, Я. А. Основы метрологии, точность и надежность в приборостроении / Я. А. Рудзит, В. Н. Плуталов. – Москва : Машиностроение, 1991. – 304 с.
8. Александровская, Л. Н. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем / Л. Н. Александровская, А. П. Афанасьев, А. А. Лисов. – Москва : Логос, 2001. – 206 с.
9. Робототехнические системы подготовки и контроля комплексов авиационного вооружения / под ред. В. Д. Закутаева. – Москва : Изд-во ВУНЦ ВВС ВВА, 2011. – 360 с.

References

1. Druzhinin G. V., Stepanov S. I., Shikhmatova V. L., Yarygin G. A. *Teoriya nadezhnosti radioelektronnykh sistem v primerakh i zadachakh* [Reliability theory of radio electronic systems in examples and problems]. Moscow: Energiya, 1976, 448 p. [In Russian]
2. Lysenko A. V., Tan'kov G. V., Kalashnikov V. S., Goryachev N. V., Kochegarov I. I. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2019, no. 2 (26), pp. 60–69. [In Russian]
3. *Ekspluatatsiya kompleksov aviatsionnogo vooruzheniya* [Operation of aviation weapons systems]. Ed. A. I. Buravlev. Moscow: Izd-vo VVIA, 2006, 287 p. [In Russian]
4. Kovalenko I. N., Kuznetsov N. Yu. *Metody rascheta vysokonadezhnykh sistem* [Methods for calculating highly reliable systems]. Moscow: Radio i svyaz', 1988, 176 p. [In Russian]
5. Kozlov B. A., Ushakov I. A. *Spravochnik po raschetu nadezhnosti apparatury radioelektroniki i avtomatiki* [Reference guide for calculating the reliability of radio electronics and automation equipment]. Moscow: Sovetskoe radio, 1975, 472 p. [In Russian]
6. Gnedenko B. V., Belyaev Yu. K., Solov'ev A. D. *Matematicheskie metody teorii nadezhnosti i ikh statisticheskiy analiz* [Mathematical methods of reliability theory and their statistical analysis]. Moscow: URSS, 2013, 584 p. [In Russian]
7. Rudzit Ya. A., Plutalov V. N. *Osnovy metrologii, tochnost' i nadezhnost' v priborostroenii* [Fundamentals of Metrology, accuracy and reliability in instrument engineering]. Moscow: Mashinostroenie, 1991, 304 p. [In Russian]
8. Aleksandrovskaya L. N., Afanas'ev A. P., Lisov A. A. *Sovremennye metody obespecheniya bezotkaznosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem* [Modern methods of ensuring reliability of complex technical systems]. Moscow: Logos, 2001, 206 p. [In Russian]
9. *Robototekhnicheskie sistemy podgotovki i kontrolya kompleksov aviatsionnogo vooruzheniya* [Robotic systems for training and control of aviation weapons systems]. Ed. V. D. Zakutaev. Moscow: Izd-vo VUNTs VVS VVA, 2011, 360 p. [In Russian]

Подкопаев Александр Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра эксплуатации комплексов авиационного
вооружения (и прицельных систем),
Военный учебно-научный центр
Военно-воздушных сил «Военно-воздушная
академия имени профессора Н. Е. Жуковского
и Ю. А. Гагарина»
(Россия, г. Воронеж, ул. Старых большевиков, 54А)
E-mail: aleksanpodkopaev@mail.ru

Подкопаев Илья Александрович

инженер-испытатель,
Государственный летно-испытательный центр
имени В. П. Чкалова
(Россия, Московская обл., г. Щелково-10,
войсковая часть 15650-9)
E-mail: podkopilya@mail.ru

Podkopaev Aleksandr Vladimirovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of operation of aviation arms
complexes (and aiming systems),
Air Force Military Educational and Scientific Center
«Air Force academy named after professor
N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin»
(54A Starykh bol'shevikov street, Voronezh, Russia)

Podkopaev Ilya Aleksandrovich

engineer and tester,
State flight Test Center named after V. P. Chkalov
(military unit 15650-9, Shchelkovo-10,
Moscow region, Russia)

Образец цитирования:

Подкопаев, А. В. Централизованный адаптивный алгоритм оценки безотказности сложных технических систем различной энтропии / А. В. Подкопаев, И. А. Подкопаев // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 1 (29). – С. 49–56. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-1-6.

Н. В. Горбунов, А. Г. Колесников, Ю. А. Крюков, Т. А. Смолянин

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЗОНЫ ЭРОЗИИ ПЛАНАРНОГО МАГНЕТРОНА

N. V. Gorbunov, A. G. Kolesnikov, Yu. A. Kryukov, T. A. Smolyanin

PREDICTION OF THE PLANAR MAGNETRON EROSION ZONE

Аннотация. Прогнозирование формы выработки мишени при магнетронном распылении имеет важную практическую значимость для эффективного использования материала мишени и получения однородных слоев пленок. Предложен метод прогнозирования эрозии мишени магнетронных распылительных систем, который основан на предположении прямой связи величины B_x составляющей вектора B магнитного поля, параллельной плоскости мишени, с эффективностью ионизации атомов рабочего газа и уменьшения плотности процессов ионизации пропорционально ослаблению магнитного поля. При этом границы и форма $h_e(x)$ эрозионной области определяются косинусом угла между B и B_x , а форма эрозионной канавки $h_g(x)$ определяется распределением Гаусса для отношения B_x/B относительно среднего значения равного единице. Практическая реализация основана на программном комплексе моделирования и расчета физических полей методом конечных элементов ELCUT, формирующем выходные матрицы вектора B индукции и его компонентов. Для определения формы профиля эрозии разработана программа вычислений Pretarger на основе MATLAB.

Ключевые слова: дефекты материалов, контроль, химические и физико-химические воздействия, коррозия, эрозия, поверхностные дефекты, пороки поверхности.

Abstract. Prediction of the shape of the target's production during magnetron sputtering is of great practical importance for the efficient use of the target material and the production of uniform film layers. A method is proposed for predicting the erosion of a target of magnetron sputtering systems, which is based on the assumptions of a direct relationship between the B_x value of the component of the magnetic field vector B parallel to the target plane and the ionization efficiency of the working gas atoms and a decrease in the density of ionization processes in proportion to the magnetic field attenuation. The boundaries and shape of the erosion region $h_e(x)$ are determined by the cosine of the angle between B and B_x , and the shape of the erosion groove $h_g(x)$ is determined by the Gaussian distribution for the ratio B_x/B relative to the average value equal to unity. The practical implementation is based on the software package for modeling and calculating physical fields by the finite element method ELCUT, which forms the output matrices of the induction vector B and its components. To determine the shape of the erosion profile, a Pretarger calculation program based on MATLAB was developed.

Keywords: defects in materials, control, chemical and physico-chemical effects, corrosion, erosion, surface defects, surface defects.

Введение

При нанесении тонкопленочных покрытий из драгоценных и дорогостоящих материалов вакуумным магнетронным распылением особо важной характеристикой магнетрона является эффективность использования материала мишени, т.е. относительная величина количества вещества, распыляемого до утилизации мишени. Эта величина характеризуется коэффициентом K_e использования

материала мишени: $K_e = \frac{m_0 - m_e}{m_0} 100\%$, где m_0 – начальная масса мишени, $m_0 - m_e$ – масса мишени

при утилизации. Утилизация наступает при выработке мишени-катода, достигающей минимально допустимую толщину катода в зоне максимальной выработки. Типовые значения для коэффициента использования материала мишени соответствуют $K_e = 12 - 25\%$. Вторичное применение металлических мишеней возможно для повторного использования при переплавке утилизированных мишеней, хотя на практике это редко применяется, так как утилизированная мишень после переплавки может содержать большое количество примесей. Вторичное применение керамических утилизированных мишеней невозможно. Поэтому при применении в качестве мишени спеченных из дорогих порош-

ковых смесей керамических пластин очень важно использование магнетронных распылительных систем (МРС) с максимально возможной эффективностью использования материала мишени. А это в первую очередь зависит от конструкции магнитной системы магнетрона. Совершенствуя магнитную систему, можно достичь значений $K_e = 65 - 85 \%$. Кроме этого, увеличение коэффициента использования материала мишени приводит к расширению зоны распыления от узкой эрозионной канавки, напоминающей в сечении точечный источник (для МРС с $K_e = 12 \%$), до широкой зоны распыления, соответствующей в сечении протяженному источнику (для МРС с $K_e = 85 \%$). Расширение зоны распыления повышает однородность и равномерность напыляемого слоя пленки. Практическую реализацию подбора магнитной системы при конструировании такого высокоэффективного магнетрона удобнее всего выполнять с помощью компьютерного моделирования и расчета прогнозируемого профиля эрозии мишени магнетрона. Наиболее простой оценкой ширины полосы основной эрозии мишени на этапе проектирования магнетрона является оценка участка мишени, где вектор индукции магнитного поля параллелен поверхности мишени [1, 2]. В работе [3] сделана попытка прогнозирования эрозии мишени МРС, основанная на модели магнетронного разряда, в соответствии с которой разряд имеет определенные границы зоны эффективной ионизации, примерную концентрацию заряженных частиц и определенную зависимость распределения концентрации заряженных частиц при удалении от мишени. С помощью программы расчета статических полей формируются матрицы индукции магнитного поля и ее составляющих, на основании установленных формул выполняется вычисление прогнозируемого профиля эрозии. Лежащая в основе модель магнетронного разряда лишь отдаленно соответствует экспериментальной модели, что позволяет рассчитывать некоторые конструкции планарных МРС с точностью не лучше 20 %.

Таким образом, целью работы является разработка методики прогнозирования эрозии мишени для любых конструкций планарных магнетронов и реализация ее в виде компьютерной программы расчета. Методика должна опираться на конструкцию магнетрона и его магнитной системы и основываться на модели магнетронного разряда, соответствующей современным представлениям.

Физическая модель магнетронного разряда

Магнетронные распылительные системы по своему механизму относятся к ионно-плазменному распылению низкотемпературной плазмой и представляют собой дальнейшее развитие диодных распылительных систем, основанных на распылении материала катода ионами рабочего газа в разряде низкого давления (тлеющем разряде), включенном в режим аномального разряда. Для увеличения скорости распыления катода-мишени в МРС добавлена магнитная система, удерживающая электроны плазмы у катода для многократного столкновения электронов с атомами рабочего газа до максимального расхода кинетической энергии электронов на ионизацию атомов рабочего газа. При этом значительно понижается рабочее напряжение. Удержание электронов происходит за счет эффекта силы Лоренца в замкнутой области скрещенного электрического и магнитного полей, заставляющей электроны двигаться параллельно поверхности катода-мишени по циклоидным замкнутым траекториям, образуя в дрейфовом приближении замкнутый ток Холла. Для этого магнитная система собирается таким образом, чтобы сформировать над поверхностью катода-мишени замкнутую область вектора индукции, параллельного поверхности катода-мишени. На практике для МРС рассматриваемого планарного типа получают туннелеобразное замкнутое магнитное поле, и лишь верхняя часть свода имеет область, где вектор магнитной индукции параллелен поверхности катода. В сечении магнитное поле имеет арочный вид. Такая форма поля воздействует на электроны, заставляя их стремиться под купол, в область скрещенных электрического и магнитного полей, т.е. эффект арочного магнитного поля заключается в фокусировке электронов под купол арки. Поэтому, несмотря на то, что в МРС разряд горит по всему катоду, и яркость свечения плазмы разряда, и плотность тока на катоде, и выработка (эрозия) катода-мишени взаимосвязаны и имеют неравномерное распределение. На рис. 1 наглядно видна эта связь [4], из которой следует вывод: основные процессы ионизации рабочего газа, ответственные за распыление и эрозию катода-мишени, происходят в приповерхностном слое, а максимальная яркость свечения плазмы, сосредоточенная в приповерхностном слое, совпадает с наибольшей глубиной эрозии мишени и с верхней областью приповерхностной туннелеобразной силовой линии магнитного поля, т.е. там, где вектор индукции параллелен поверхности катода-мишени.

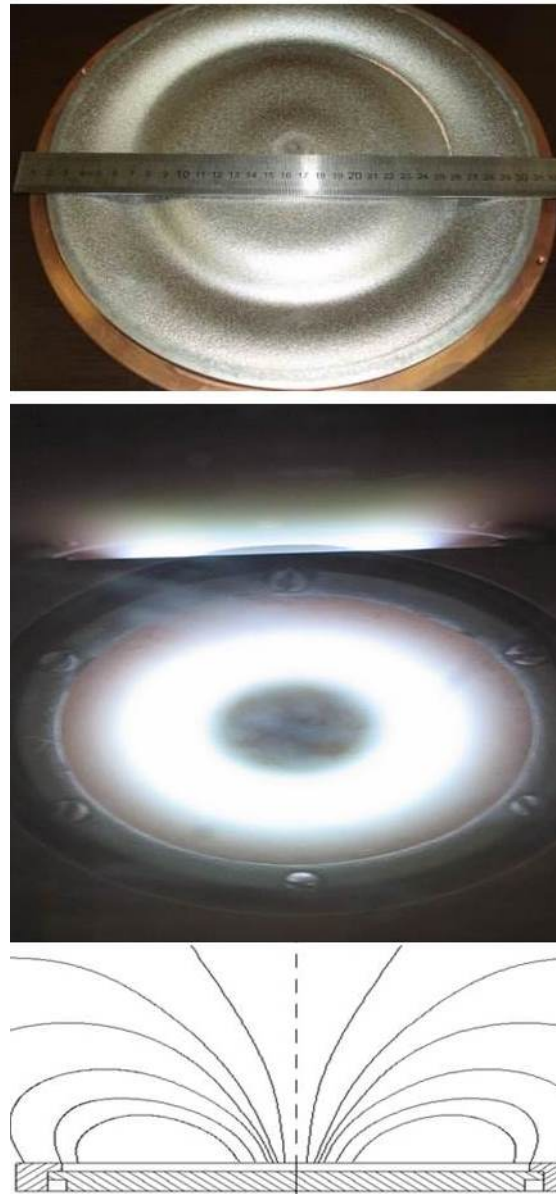


Рис. 1. Связь свечения плазмы, выработки катода и формы силовых линий магнитного поля

Исследования магнетронного разряда на протяжении многих лет, обобщенные в работе [4], приводят к выводу, что магнетронный разряд можно разбить на три характерные области: катодный слой или темное катодное пространство (ТКП), область частично замагниченной плазмы и анодный слой. На рис. 2 схематично показано магнитное поле, электрическое поле и характерные области плазмы. В магнетронном разряде для типичных МРС величина B индукции магнитного поля изменяется в пределах 0,1–0,001 Тл.

Катодный слой или ТКП начинается от поверхности катода-мишени и имеет толщину 0,1–10 мм, которая определяется приложенным разрядным напряжением U и величиной компоненты B_x вектора B магнитной индукции в этом слое. Толщина слоя определяется радиусом циклоидного ускоряющего движения электрона. В этом слое происходит основное падение напряжения, составляющее 80–90 % от разрядного напряжения U , напряженность электрического поля имеет высокое значение, резко спадающее от $8 \cdot 10^6$ до $4 \cdot 10^4$ В/м. Поскольку ионизация рабочего газа имеет свое насыщение до максимальной величины, определяемой током разряда, т.е. ионный ток равен току разряда: $I_i = I$, то перенос тока разряда осуществляется ионами, а так как процессов ионизации не происходит, то свечение разряда отсутствует, поэтому слой называется темным катодным пространством, ТКП. Здесь концентрация ионов имеет максимальную величину $n_i = n_{\max}$, определяемую условием устой-

чивости магнетронного разряда: $\alpha\beta=1$, где $\alpha=0,001\div0,1$ – коэффициент вторичной ионно-электронной эмиссии, зависящий от состава рабочего газа и материала мишени, β – коэффициент электронной ионизации рабочего газа (в связи с малостью величины автоэлектронной и термоэлектронной эмиссией можно пренебречь), а концентрация вторичных электронов равна $n_e = \alpha n_i$. Поэтому в ТКП электронный ток равен току вторичной электронной эмиссии: $I_e = \alpha I_i$. В этой области наряду с электронами и ионами атомов рабочего газа присутствуют нейтральные атомы рабочего газа, а также выбитые из мишени ионы, атомы, молекулы и кластерные образования материала катода. Здесь ионы рабочего газа приобретают основную энергию, необходимую для распыления мишени посредством ее бомбардировки. Магнетронное распыление очень энергоемко и составляет около 500 эВ на один атом мишени. Так, на выбивание атомов из мишени всего расходуется энергия 15–40 эВ, состоящая из пороговой энергии распыления (энергии связи), составляющей 15–30 эВ, и энергии распыленных атомов, лежащей в пределах 1–10 эВ. Остальная энергия идет на нагрев мишени. Напряжение магнетронного разряда составляет 250–800 В. При увеличении напряжения увеличивается энергия бомбардирующих ионов и возрастает коэффициент распыления, но при этом усиливается процесс внедрения ионов в кристаллическую решетку мишени, приводящий к ее деформации, объемному искажению и, как следствие, нагреву мишени, требуя эффективного охлаждения.

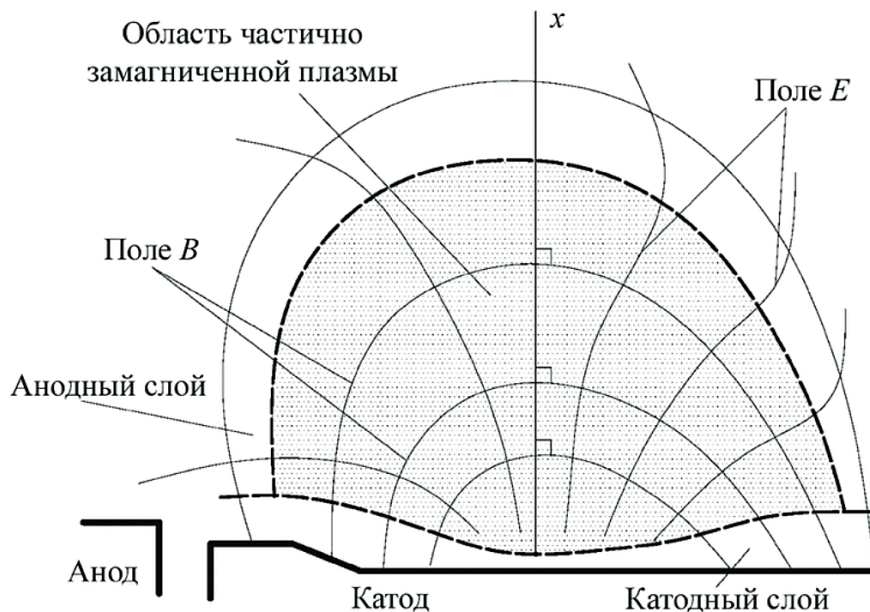


Рис. 2. Схема расположения характерных областей разряда в МРС

Область частично замагниченной плазмы примыкает к ТКП и начинается там, где электроны, вышедшие из мишени, заканчивают набор энергии и начинают ее расходовать на ионизацию. Наличие интенсивной ионизации объясняет свечение частично замагниченной области. По мере удаления от мишени количество электронов, способных к ионизации уменьшается, уменьшая количество актов ионизации и уменьшая свечение плазмы. Толщина области составляет от 10 до 100 мм. Падение напряжения – 10...15 % от напряжения U магнетронного разряда. Напряженность электрического поля по мере удаления от мишени изменяется от $2 \cdot 10^4$ В/м в пограничном слое, сначала спадая быстро, затем все более плавно и приближается до значений, близких к нулю. Особенностью этой области является существование двух встречно направленных потоков заряженных частиц: ионного, связанного с ионизацией рабочего газа электронным ударом, и электронного, состоящего из высокоэнергичных вторичных электронов и электронов, выбитых из атомов при ионизации. В отличие от образующихся ионов газа, свободно начинающих ускоренное движение в направлении катода, электроны удерживаются воздействием магнитного поля, заставляющего их двигаться по циклоидальным траекториям вдоль поверхности мишени. Движение в сторону анода происходит при столкновении с атомами газа, которое приводит к перескоку электрона на более удаленные от мишени

траектории по направлению к аноду. Если энергия электрона достаточна для ионизации, то ионизация атома происходит, если энергия электрона недостаточна для ионизации, то перескок происходит в результате упругого столкновения. Поэтому на максимальном удалении ток плазмы в основном состоит из электронов, а ближе к катоду – из ионов. Начиная от пограничного с ТКП слоя число столкновений настолько частое, что выполняется соотношение $\omega_e \tau_e \gg 1$; $\omega_i \tau_i < 1$, где ω_e , ω_i – циклотронные частоты для электронов и ионов; τ_e , τ_i – время между столкновениями для электронов и ионов. В работах [5, 6] показано, что в области плазмы, где это условие выполняется, эквипотенциали электрического поля совпадают с силовыми линиями магнитного поля и справедливо соотношение: $\vec{E} \times \vec{B} = 0$. Поскольку силовые линии электрического поля становятся перпендикулярными силовым линиям магнитного поля, магнитное поле оказывает определяющее влияние на движение электронов. В то же время на ионы магнитное поле не оказывает влияние, и они движутся беспрепятственно к катоду вдоль сформированных силовых линий электрического поля. Поэтому область, где выполняются эти условия, называется областью частично замагниченной плазмы. По мере удаления от мишени магнитное поле спадает, и указанные условия, постепенно ослабляясь, пропадают. Этим определяются границы распространения области частично замагниченной плазмы, характерные до ослабления поля до 0,001 Тл, где $\omega_e \tau_e \sim 30 \dots 90$. Эксперименты показывают, что переходная зона начинается там, где величина индукции спадает до величины около 0,01 Тл.

Анодный слой непосредственно примыкает к аноду и служит для транспортировки электронов к аноду. Падение напряжения на анодном слое мало и составляет величину порядка одного-двух потенциалов ионизации рабочего газа, для аргона около 15...30 В. Разрядный ток в анодном слое осуществляется электронами.

Математическое описание распределения глубины выработки мишени магнетрона

Рассмотрение движения электронов в сечении магнетронного разряда свяжем с левой частью мишени, разделенной осью симметрии, как на рис. 2. В отличие от рис. 2, ось Oy направлена вверх от центра мишени и совпадает с осью симметрии. Начало O координат установим в центре на поверхности мишени, а ось Ox направим вдоль поверхности. Изучение выработанной мишени показывает, что выработку мишени можно поделить на две зоны (см. рис. 1, сверху): зону поля эрозии и зону эрозионной канавки. В соответствии с описанной выше моделью электроны вылетают с поверхности катода перпендикулярно поверхности мишени параллельно оси Oy и входят в область частично замагниченной плазмы вертикально. Значит можем предположить, что количество электронов, удерживаемых воздействием на них магнитного поля, зависит от угла между вектором скорости электронов и вектором магнитной индукции, определяемого отношением B_x / B . Эти электроны вызывают ионизацию по всей области частично замагниченной плазмы и формируют поле эрозии, носительная глубина h_e которого определяется

$$h_e(x) \sim \int_{y=d(x)}^{y_{\max}} n(x,y) \frac{B_x(x,y)}{B(x,y)} dy,$$

где $d(x)$ – высота ТКП, $n(x,y)$ – концентрация актов ионизации. Другая часть электронов подхватывается магнитным полем и вдоль силовых линий устремляется к верхней точке свода куполообразного поля, где вектор индукции параллелен поверхности мишени. Вследствие этого в верхней области свода концентрируется основное количество электронов, распределение которых подчиняется распределению Гаусса, ответственных за формирование эрозионной канавки, ширина которой определяется плотностью тока магнетронного разряда, а глубина – количеством захваченных электронов. Относительная глубина профиля h_g канавки определяется

$$h_g(x) \sim \int_{y=d(x)}^{y_{\max}} n(x,y) \exp \left(- \frac{\left(\frac{B_x(x,y)}{B(x,y)} - 1 \right)^2}{2\sigma^2} \right) dy,$$

где $\sigma = \frac{1 - B_x / B}{2}$ – дисперсия распределения, задаваемая в зависимости от плотности магнетронного

разряда и характеризуемая допустимым углом отклонения вектора $\vec{B}$ индукции от поверхности катода. Распределение концентрации актов ионизации пропорционально изменению индукции, точнее ее компоненты B_x , удерживающей электроны

$$n(x, y) \sim \frac{B_x(x, y)}{B_{x0}(x, y)}.$$

Итоговый профиль эрозии определяется нормированной суммой нормированного профиля эрозийной канавки и нормированного профиля зоны эрозии, умноженной на подбираемый коэффициент k , который изменяется в пределах от 0,1 до 0,8 и показывает долю удержанных электронов от их общего числа, зависящего от плотности тока магнетронного разряда (электрической мощности подаваемой на магнетрон):

$$h(x) = h_g(x) + kh_e(x).$$

Программная реализация расчета профиля выработки мишени магнетрона

Использование предложенного метода связано с необходимостью предварительного выполнения расчета конфигурации магнитного поля над поверхностью мишени с помощью программы магнитостатического моделирования и расчета физических полей, исходя из конструкции магнетрона и его магнитной системы. В качестве такой программы выбран программный комплекс ELCUT [7], основанный на моделировании физических полей методом конечных элементов. Особенностью комплекса является возможность использования ресурсов и результатов внешних подключаемых модулей (технология ActiveField). Для формирования матриц выходных данных и анализа результатов с использованием этой технологии разработана на языке MATLAB программа *Pretarger* (*Prediction of target erosion*). При этом объекты ELCUT обеспечивают постановку новой задачи, описание ее геометрической модели, построение сетки конечных элементов и ее решение. Разработанная программа *Pretarger* обеспечивает создание матриц индукции магнитного поля $B(x, y)$ и ее компонентов $B_x(x, y)$ и $B_y(x, y)$. Функциональные возможности программы включают расчет профилей выработки материала мишени магнетронных распылительных систем планарного типа любых размеров и конструкций. Программа по приведенным выше формулам создает матрицу выходных результатов и выводит график профиля $h(x)$ прогнозируемой эрозии мишени.

В качестве примера прогнозирования профиля эрозии с помощью программы *Pretarger* осуществлен расчет профиля эрозии мишени протяженного планарного магнетрона, сбалансированная магнитная система которого включает магнитопровод из Ст3 (магнитная проницаемость 100) с размерами в сечении 120×6 мм, установленные на нем магниты из NdFeB марки N33 (коэрцитивная сила 955 кА/м) высотой 10 мм, состоящие из периферийных магнитов шириной 10 мм, расстояние между которыми по внешней границе 88 мм, и центрального магнита шириной 16 мм. Магнетрон разработан для распыления алюминиевой мишени шириной 100 мм и толщиной 10 мм, закрепленной на расстоянии 1 мм от магнитов. На рис. 3 представлены в виде цветовой диаграммы распределение интенсивности компоненты B_x вектора B магнитного поля и вид силовых линий, рассчитанных с использованием программного комплекса ELCUT. На рис. 4 приведены результаты расчета с помощью программы *Pretarger* прогнозируемых профилей эрозии мишени для разных значений подаваемой на магнетрон электрической мощности, характеризующей плотность тока магнетронного разряда: E1 – минимальная мощность, E2 – средняя мощность, E3 – наибольшая мощность.

На рис. 5 приведена фотография участка мишени этого магнетрона, проработавшего в общей сложности непрерывно 12 ч, на которой можно различить центр канавки и границы эрозионной зоны. Линейка установлена так, что центру мишени соответствует 44,5; центру канавки – 22, границы зон эрозии – одной от 41 до 0, второй от 38,2 до 3,3. Пересчет показывает положение центра канавки 22,5, границы зон эрозии – от 3,5 до 44,2 и от 6,2 до 41,2. На первом этапе магнетрон работал в режиме со средней плотностью тока 40 мА/см² или средней мощностью 15 Вт/см², этот режим на рис. 4 характеризуется профилем E2. В настоящее время магнетрон работает в режиме со средней плотностью тока 4 мА/см² или средней мощностью 2 Вт/см², что соответствует режиму E1. В табл. 1 сведены расчетные характеристические точки границ эрозии и экспериментальные. Заметно высокое совпадение центра эрозийной канавки и границ зоны эрозии, расположенных у центра мишени.

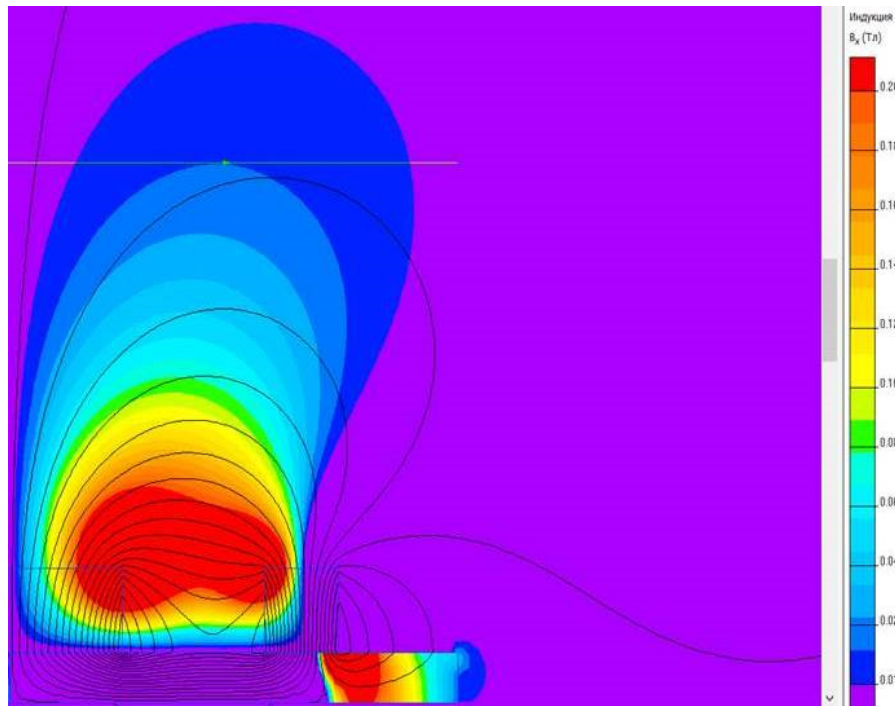


Рис. 3. Вид силовых линий магнитного поля и распределение интенсивности компоненты B_x вектора B магнитного поля

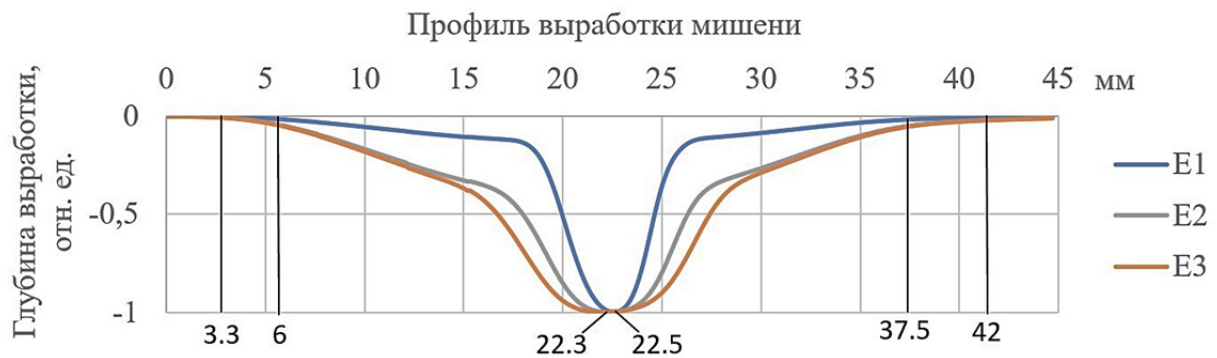


Рис. 4. Профиль выработки мишени в зависимости от электрической мощности работы магнетрона

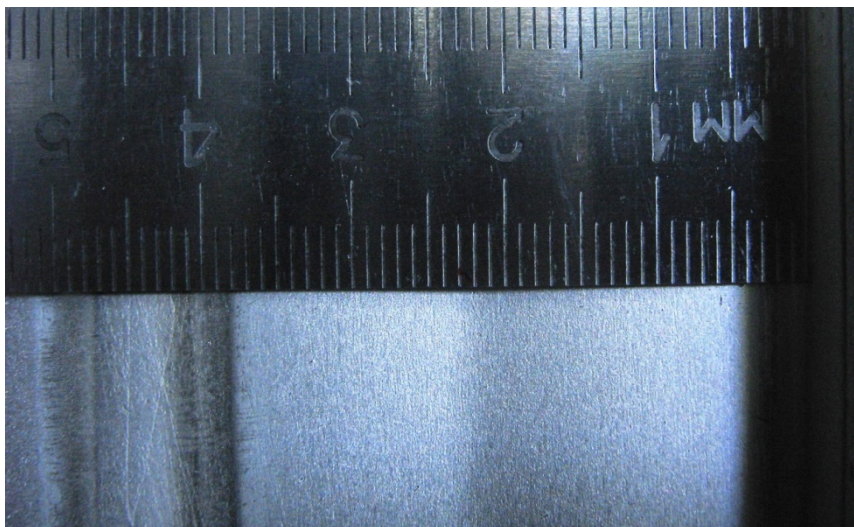


Рис. 5. Фотография участка мишени рабочего магнетрона

Таблица 1

Сравнение расчетных границ с экспериментом

Плотность тока разряда	Центр канавки	Левый край зоны	Правый край зоны
E1 – минимальная мощность	22,5	6	37,5
Эксперимент (2 Вт/см ²)	22,5	6,3	41,2
E3 – максимальная мощность	22,3	3,3	42
Эксперимент (15 Вт/см ²)	22,5	3,5	44,2

Несовпадение периферийных границ зоны эрозии связано с отсутствием учета влияния близко расположенного анода, где электрические силовые линии направлены под углом к поверхности мишени, что расширяет область скрещенных полей к периферии и расширяет зону эрозии.

Заключение

Приведена упрощенная модель сложных процессов, происходящих в магнетронном разряде, обобщающая имеющиеся данные, построенная на основе использования результатов экспериментальных исследований. На основе модели предложена математическая модель прогнозирования выработки мишени магнетронных распылительных систем, основанная на трех предположениях:

1. Существует прямая связь компоненты B_x вектора B магнитного поля, параллельной плоскости мишени, с эффективностью ионизации атомов рабочего газа, вследствие чего уменьшение плотности процессов ионизации пропорционально ослаблению этой компоненты.

2. Границы и профиль глубины $h_g(x)$ эрозионной канавки определяются распределением Гаусса для отношения B_x/B относительно среднего значения, равного единице.

3. Границы и профиль глубины $h_e(x)$ эрозионной области выбираются исходя из соотношения B_x/B .

Разработана программа *Pretarger* на основе MATLAB, которая применяет программный комплекс ELCUT для моделирования и расчета физических полей методом конечных элементов, формирующий выходные матрицы вектора B индукции и его компонентов, и с помощью технологии ActiveField обеспечивает создание матриц индукции магнитного поля $B(x,y)$ и ее компонентов $B_x(x,y)$ и $B_y(x,y)$. Функциональные возможности программы включают расчет профилей выработки материала мишени магнетронных распылительных систем планарного типа любых размеров и конструкций.

Приведен пример расчета профиля эрозии имеющегося магнетрона. Положения центра эрозионной канавки и границ эрозии совпали с расчетными, что показывает хорошее соответствие с расчетом. Отличается лишь периферийный участок границы эрозии, что связано с отсутствием учета влияния близко расположенного анода. Сравнение полной картины профиля эрозии станет возможным после глубокой выработки мишени.

Введение в программу расчета учета внешнего электрического поля позволит прогнозировать профиль выработки мишени с учетом формы и размещения анода.

Библиографический список

1. Method to design magnetrons that match preferred erosion patterns / R. Stelter [et al.] // Proceedings of the annual technical conference-society of vacuum coaters – 2004. – P. 47.
2. Powell, S. Finite element modeling of magnetostatics for magnetron sputter sources / S. Powell // CAD for Electromagnetic Devices. One-Day Seminar. – 2006. – P. 1–4.
3. Голосов, Д. А. Прогнозирование эрозии мишени магнетронных распылительных систем / Д. А. Голосов, С. Н. Мельников, С. П. Кундас, А. П. Достанко // Проблемы физики, математики и техники. – 2010. – № 2 (3). – С. 62–67.
4. Духопельников, Д. В. Магнетронные распылительные системы / Д. В. Духопельников. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2014. – Ч. 1. Устройство, принцип работы, применение.
5. Гришин, С. Д. Электрические ракетные двигатели / С. Д. Гришин, Л. В. Лесков, Н. П. Козлов. – Москва : Машиностроение, 1975. – 272 с.
6. Морозов, А. И. Физические основы космических электрореактивных двигателей. Элементы динамики потоков в ЭРД / А. И. Морозов. – Москва : Атомиздат, 1978. – 328 с.
7. ELCUT программа моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач. – URL: <http://www.tor.ru/elcut/>

References

1. Stelter R. et al. *Proceedings of the annual technical conference-society of vacuum coaters*. 2004, p. 47.
2. Powell S. *CAD for Electromagnetic Devices. One-Day Seminar*. 2006, pp. 1–4.
3. Golosov D. A., Mel'nikov S. N., Kundas S. P., Dostanko A. P. *Problemy fiziki, matematiki i tekhniki* [Problems of physics, mathematics and engineering]. 2010, no. 2 (3), pp. 62–67. [In Russian]
4. Dukhopel'nikov D. V. *Magnetronnye raspylitel'nye sistemy* [Magnetron spray systems]. Moscow: Izd-vo MG TU im. N. E. Bauman, 2014, part 1. [In Russian]
5. Grishin S. D., Leskov L. V., Kozlov N. P. *Elektricheskie raketnye dvigateli* [Electric rocket engines]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1975, 272 p. [In Russian]
6. Morozov A. I. *Fizicheskie osnovy kosmicheskikh elektroeaktivnykh dvigateley. Elementy dinamiki potokov v ERD* [Physical bases of space electric-jet engines. Elements of flow dynamics in ERD]. Moscow: Atomizdat, 1978, 328 p. [In Russian]
7. *ELCUT programma modelirovaniya elektromagnitnykh, teplovykh i mekhanicheskikh zadach* [ELCUT program for modeling electromagnetic, thermal and mechanical problems]. Available at: <http://www.tor.ru/elcut/> [In Russian]

Горбунов Николай Васильевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра проектирования электроники
для установок МЕГАСАЙНС,
Государственный университет «Дубна»
(Россия, Московская обл., г. Дубна,
ул. Университетская, 19);
начальник сектора,
Объединенный институт ядерных исследований
(Россия, Московская обл., г. Дубна,
ул. Ж. Кюри, 6)
E-mail: nikolai_gorbunov@mail.ru

Колесников Александр Георгиевич

заведующий лабораторией тонких пленок,
Государственный университет «Дубна»
(Россия, Московская обл., г. Дубна,
ул. Университетская, 19)
E-mail: torgcentr2004@mail.ru

Крюков Юрий Алексеевич

кандидат технических наук, доцент,
проректор по научной
и инновационной деятельности,
Государственный университет «Дубна»
(Россия, Московская обл., г. Дубна,
ул. Университетская, 19)
E-mail: kua@uni-dubna.ru

Смолянин Тимофей Андреевич

магистрант,
Государственный университет «Дубна»
(Россия, Московская обл., г. Дубна,
ул. Университетская, 19);
инженер,
Объединенный институт ядерных исследований
(Россия, Московская обл., г. Дубна,
ул. Ж. Кюри, 6)
E-mail: metallhead97@bk.ru

Gorbunov Nikolay Vasilevich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of design of electronics
for megascience experimental setup,
State University of Dubna
(19 Universitetskaya street, Dubna,
Moscow region, Russia);
head of sector,
Joint Institute for Nuclear Research
(6 Zh. Kyuri street, Dubna,
Moscow region, Russia)

Kolesnikov Alexander Georgievich

head of the thin film laboratory,
State University of Dubna
(19 Universitetskaya street, Dubna,
Moscow region, Russia)

Kryukov Yuri Alekseevich

candidate of technical sciences, associate professor,
vice-rector for research and innovation,
State University of Dubna
(19 Universitetskaya street, Dubna,
Moscow region, Russia)

Smolyanin Timofey Andreevich

master degree student,
State University of Dubna
(19 Universitetskaya street, Dubna,
Moscow region, Russia);
engineer,
Joint Institute for Nuclear Research
(6 Zh. Kyuri street, Dubna,
Moscow region, Russia)

Образец цитирования:

Горбунов, Н. В. Прогнозирование зоны эрозии планарного магнетрона / Н. В. Горбунов, А. Г. Колесников, Ю. А. Крюков, Т. А. Смолянин // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 1 (29). – С. 57–66. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-1-7.

А. П. Адамов, А. А. Адамова, С. Г. Семенцов, А. Т. Темиров, Т. А. Цивинская

ЗАМЕРЫ ДАВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ АГРЕССИВНЫХ СРЕД

A. P. Adamov, A. A. Adamova, S. G. Sementsov, A. T. Temirov, T. A. Tsivinskaya

PRESSURE MEASUREMENTS IN AGGRESSIVE ENVIRONMENTS

Аннотация. Актуальность и цели. Работа посвящена исследованию системы защиты чувствительного элемента высокоточного пьезорезистивного датчика давления от воздействия агрессивной внешней среды. Эта задача особенно актуальна при разработке универсальных датчиков давления, рассчитанных на работу в различных средах, в том числе агрессивных. Рассмотрены технологические аспекты существующих технических решений в предметной области. Целью работы является синтез технических решений, позволяющих оптимизировать конструкцию подобных датчиков и повысить их надежность. **Материалы и методы.** Экспериментальным методом определены оптимальные размеры и величина гофрировки защитной разделительной мембраны из стали 12X18H10T. В ходе эксперимента выявилась зависимость предельного рабочего давления от объема приборной жидкости. А также выяснилась и потребность в знании зависимости величины перемещения кремниевой мембраны от величины упругих деформаций. С целью определения величины перемещения использована методика моделирования методом конечных элементов в программной среде ANSYS. Моделирование позволило оценить распределение значений упругой деформации на поверхности мембраны. **Результаты.** Предложены методики расчета размера разделительной защитной мембраны, расчета объема приборной жидкости, таблицы зависимости величины перемещений кремниевых мембран от габаритных размеров и рабочего давления. В результате расчеты объединяются в расчет системы, состоящей из защитной мембраны, кремниевой рабочей мембраны и объема жидкости. Предложены технологические решения, позволяющие реализовать разработанные методики и обосновать применимость различных конструкционных материалов. Получены значения упругой деформации на различных рабочих диапазонах датчиков. **Выводы.** Предложенные в работе методики, технологии и конструктивные решения позволяют на новом качественном уровне решить задачу создания универсального датчика давления с заданным диапазоном измерений, функционирующего в условиях агрессивных внешних сред. Результатом правильно рассчитанного усилия Q , усилия передачи рабочего давления на кремниевую мембрану, является простая конструкция малогабаритного высокоточного датчика давления рабо-

Abstract. Background. The work is devoted to the study of the system of protection of the sensitive element of a high-pressure piezoresistive pressure sensor from the influence of an aggressive external environment. This task is especially relevant when developing universal pressure sensors designed to work in a variety of environments, including aggressive ones. The technological aspects of existing technical solutions in the subject area are considered. The purpose of the work is to synthesize technical solutions that allow to optimize the design of such sensors and increase their reliability. **Materials and methods.** The optimal size and size of the corrugation of the protective separation membrane made of 12X18H10T steel were determined by the experimental method. During the experiment, the dependence of the maximum working pressure on the volume of the instrument liquid was revealed. As well as the need to know the dependence of the magnitude of the movement of the silicon membrane on the magnitude of the elastic deformations. To determine the magnitude of the displacement, a finite element simulation technique was used in the ANSYS software environment. The simulation made it possible to estimate the distribution of elastic strain values on the membrane surface. **Results.** Methods for calculating the size of the separation protective membrane, the calculation of the volume of the instrument liquid, and the table of the dependence of the magnitude of the movements of the silicon membranes on the overall dimensions and the working pressure are proposed. As a result, the calculations are combined to calculate a system consisting of a protective membrane, a silicon working membrane and a volume of liquid. Technological solutions are offered that allow to realize the developed methods and to substantiate the applicability of various structural materials. Elastic deformation values were obtained at different sensor operating ranges. **Conclusions.** The methods, technologies and design solutions proposed in this work allow us to solve the problem of creating a universal pressure sensor with a given measurement range operating in the conditions of aggressive external environments at a new qualitative level. The result of a properly calculated force Q , the force of transferring the working pressure to the silicon membrane, is the simple design of a small-sized high-precision pressure sensor operating in aggressive media at high pressures. In addition to reducing the overall dimensions and improving the measurement accuracy, the proposed solutions make it possible to significantly increase the reliability of the sen-

тающего в агрессивных средах на высокие давления. Помимо снижения массогабаритов и повышения точности измерений, предложенные решения позволяют значительно повысить надежность функционирования датчиков в условиях агрессивных сред.

Ключевые слова: датчик давления, сенсор давления, защитная мембрана, пьезорезистивный сенсор.

sors in harsh environments.

Keywords: pressure sensor, pressure sensor, protective membrane, piezoresistive sensor.

Введение

Манометры, механические приборы измерения давления, уходят в прошлое и на замену им приходят электронные датчики давления, основанные на различных принципах преобразования механических напряжений в электрический сигнал. Опираясь на многочисленные исследования, направленные на сравнительные характеристики датчиков, выпускаемых различными фирмами, можно отметить, что наилучшими показателями по чувствительности измерения, характеристике гистерезиса сигнала, стойкости к вибрации, эффективности обработки сигнала и температурным диапазоном обладают датчики с чувствительными пьезорезистивными элементами. Данное преимущество объясняется тензорезистивными свойствами монокристаллического кремния, в объеме которого вытравлена измерительная мембрана, и тем, что пьезорезисторы измерительного моста, сформированные методом диффузии, в том же объеме на поверхности мембраны. При разработке датчиков на базе подобных чувствительных элементов конструкторы сталкиваются с двумя трудностями: высокая химическая активность поверхности кристалла и хрупкость монокристаллической мембраны, что делает ее непригодной для измерений высоких давлений. При давлениях до 2,5 МПа в нейтральной среде, используя конструкцию, показанную на рис. 1, можно обеспечить защиту от воздействия внешней среды заливкой гелем – компаундом, например марки СИЭЛ.

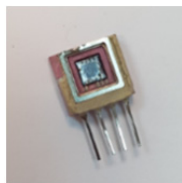


Рис. 1. Датчик абсолютного давления ИПДА

Но при более высоких давлениях или в условиях агрессивных сред средством защиты служит разделительная защитная мембрана. Модуль с разделительной встроенной мембраной датчика давления на 60 МПа для работы в агрессивных средах показан на рис. 2.

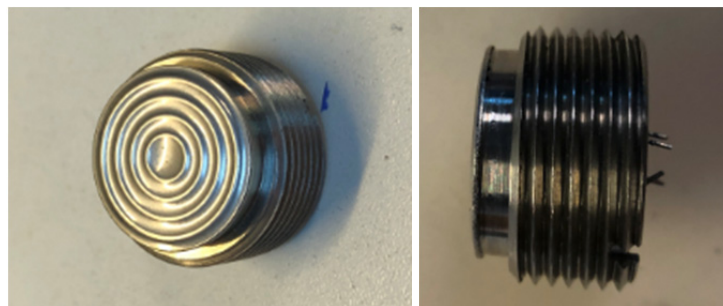


Рис. 2. Измерительный модуль датчика давления ИПДМ

Предлагаются конструкции с выносными мембранами, встроенными в отдельный корпус. Встроенные мембраны лежат на ложементе корпуса, повторяющем конфигурацию мембраны, использующие в качестве передающей среды приборную жидкость, в основном силиконовую, и конструкции КНС. Но имеются общие недостатки: температурный диапазон от -40 до $+80$ °C и отрицательное влияние жидкости на погрешность измерения или конструктивный недостаток КНС – временная нестабильность выходного сигнала. Последнее десятилетие идут активные поиски кон-

структивных решений малогабаритных высокоточных датчиков давления со встроенной защитной мембраной на высокие, более 100 МПа, давления или, наоборот, малые, до 1 Па. Проблема состоит в том, что разработчики, решая проблему надежности датчика давления, забывают, что это контрольно-измерительный инструмент, и, следовательно, разделительная мембрана должна не только защитить чувствительный элемент, но и сохранить его рабочие характеристики. Задача усложняется еще одним условием: для передачи прилагаемого давления от металлической мембраны до мембраны измерительной используется жидкость, которая вносит свои негативные коррективы в точностные характеристики датчика. Отсюда получается задача с тремя неизвестными величинами: защитная мембрана, объем жидкости и свойства рабочей кремниевой мембраны.

Требования к защитной мембране

В конструкции датчика давления, работающего в агрессивных средах или в области высоких давлений, применяется гофрированная металлическая мембрана. Мембрана в данном случае служит не только как разделитель сред, а играет ответственную роль в преобразовании механического давления в электрический сигнал, определяя класс точности датчика. Основными рабочими характеристиками мембраны являются те, которые определяют ее способность деформироваться под действием нагрузки: упругая характеристика, жесткость и чувствительность. Упругой характеристикой называют зависимость между перемещением центра мембраны (λ) и прилагаемой нагрузкой (P). Она может быть линейной или нелинейной. Если характеристика линейна, то жесткость (K) определяется как отношение нагрузки к перемещению: $K = P/\lambda$, а чувствительность (δ) – отношение перемещения к нагрузке: $\delta = \lambda/P$. Имеется еще характеристика мембраны, от которой напрямую зависит точность датчика – гистерезис упругого элемента, который обнаруживается в ходе цикла увеличения давления и сброса до нулевой отметки. Гистерезис отмечается как запаздывание перемещения мембраны по отношению приложенного давления, и в результате сигнал не возвращается к нулевой отметке и, что еще хуже, он постоянно меняет значения. Устранить такой дефект методами программной корректировки не удастся. Зависит данная характеристика от сопротивления материала микропластическим деформациям, величина которых зависит от свойств материала мембраны, способа сварки, качества сварного шва, технологии термообработки металла и узлов в процессе сборки. Материал для мембран должен обладать высоким пределом упругости, быть коррозионно-стойким и термостойким. Высокой коррозионной стойкостью и работоспособностью до 400 °С обладает сталь 12Х18Н9Т, кроме того, данная сталь немагнитна, хорошо сваривается и радиационно-стойкая. С целью получения требуемых свойств сталь должна пройти как минимум три термообработки: отжиг неполный при температуре +500°С перед штамповкой, отжиг, уменьшающий напряжения, при температуре +250°С и после сварки еще один отжиг с целью снижения напряжений и повышения твердости в области шва при температуре +350°С [1]. Температурный режим приведен для конкретного типа мембран сенсора датчика ИПДМ как пример. Термообработка проводится в условиях вакуумной печи.

На упругую характеристику существенно влияет способ крепления мембраны к корпусу датчика. Наиболее технологичным способом можно смело признать лазерную сварку. Лазерный луч легко управляется и регулируется по мощности. В отличие от электронного луча или электрической дуги, на него не влияют магнитные поля, что обеспечивает стабильное формирование шва. Из-за высокой концентрации энергии (в пятне диаметром 0,1 мм и менее) в процессе лазерной сварки объем сварочной ванны небольшой, малая ширина зоны термического влияния, высокие скорости нагрева и охлаждения. Это обеспечивает высокую технологичную прочность сварных соединений, а незначительное тепловое воздействие на околошовную зону вследствие высоких скоростей нагрева и охлаждения металла существенно повышают сопротивляемость стали 12Х18Н10Т образованию горячих и холодных трещин. Существенно (до 10 раз) снижаются деформации соединяемых деталей, что особенно важно для обеспечения параметров упругой характеристики мембраны.

Высокое качество лазерной сварки имеет особое значение при разработке конструкции датчиков-сенсоров при применении в беспроводной сенсорной сети. Мембрана размером 16 ÷ 19 мм обеспечивает диапазон давлений от 10 Па до 100 МПа и более. Малый размер мембраны обусловлен тем, что она работает в условиях силовой компенсации: с внутренней стороны на нее оказывает давление жидкость, которая находится в герметичном объеме. По этой схеме упругий элемент осуществляет преобразование давления P в усилие Q , в условиях малых перемещений и силовой ком-

пенсации. При этих условиях перемещение точки приложения силы практически равно нулю. Деформации подвержена только центральная часть мембраны, именуемая как эффективная площадь. Развиваемая упругим элементом сила Q связана с давлением P через эффективную площадь $F_{\text{эф}}$: $Q = PF_{\text{эф}}$. В этом случае точность преобразования во многом определяется свойствами эффективной площади, которая зависит от геометрии мембраны, ее жесткости и условий нагружения. Эффективная площадь определяется как $F_{\text{эф}} = Q/P$. Для мембран с неглубокой гофрировкой ($H/h < 6$) эффективная площадь значительно меняется с изменением давления, а для мембран, где соотношение $H/h > 6$ – меняется меньше, и характер ее изменения становится близким к линейному. Отсюда вывод, что основными геометрическими параметрами, которые следует учитывать при расчетах, являются рабочий радиус, толщина материала (h) и глубина гофрировки (H). Для расчета величины $F_{\text{эф}}$ необходимо определить величину f_0 , используя номограмму для расчета мембран в условиях силовой компенсации. Номограмма показана на рис. 3. Величина f_0 – относительная величина эффективной площади. Для ее определения по номограмме нужно подсчитать относительную глубину H/h и параметр давления $p^- = pR^4 / Eh^4$; $F_{\text{эф}} = f_0 \pi R^2$. Графики номограммы позволяют определять эффективную площадь при любой величине рабочего давления [2].

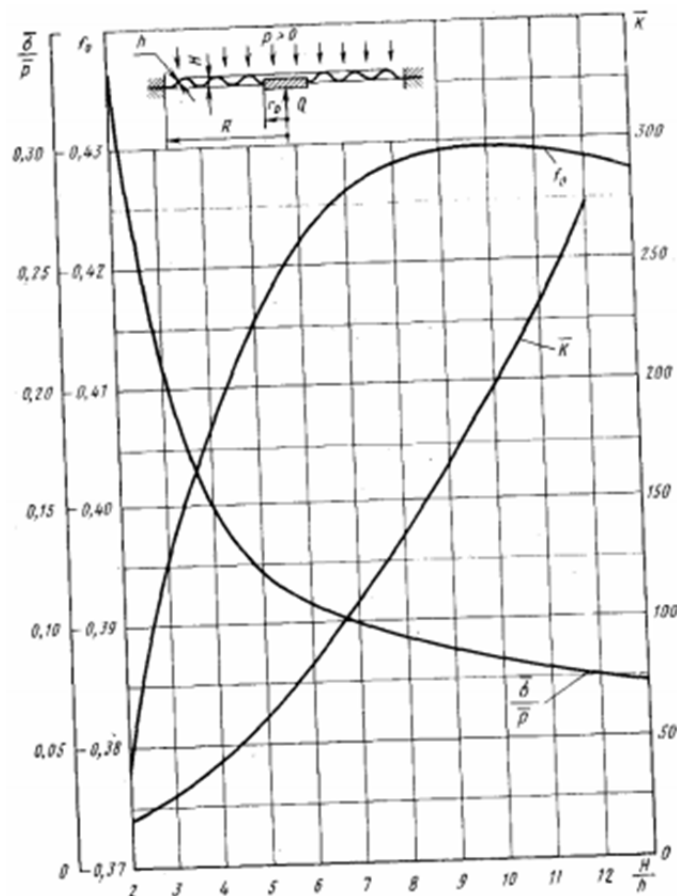


Рис. 3. Номограмма для расчета мембран в условиях силовой компенсации

Методики расчета эффективной площади принимают за базу величину прогиба не более 0,09 мм [2]. Чтобы выполнить требования по деформации защитной и рабочей (кремниевой) мембран, необходимо ввести в расчеты объем рабочей жидкости, как элемент системы, способный обеспечить величину деформации кремниевой мембраны.

Влияние жидкости на характеристики датчика

Жидкость в датчике давления рассматривалась исключительно как передающее звено давления, поступающего на разделительную мембрану, на мембрану чувствительного элемента по принципу механической передачи, действующей в манометрических приборах. При этом жидкость все-

гда выступает в роли негативного фактора, ухудшающего характеристики датчика и особенно в эксплуатации при повышенных или пониженных температурах и в области малых давлений. Постоянно идут поиски нейтрализации данного негатива путем увеличения диаметра разделительных мембран, подбором соотношения толщины материала разделительной мембраны и глубины гофр. В результате увеличиваются габариты и увеличивается масса датчика, но качественно улучшить погрешность и температурный дрейф датчика не получается. А может быть роль жидкости в конструкции датчика играет более существенную роль, чем ей предписано? И здесь самое время рассмотреть вопрос: что происходит с жидкостью в условиях герметично закрытого объема?

При герметизации отверстий в корпусе после заполнения жидкостью датчика жидкость находится под избыточным давлением, что отчетливо отслеживается по изменению начального сигнала датчика: после заполнения сигнал на $2 \div 4$ мВ выше. Жидкость не имеет собственной формы, но обладает собственным объемом и способна сопротивляться сжатию и растяжению. Закон Паскаля для несжимающихся жидкостей гласит: возмущение давления, производимое на покоящуюся жидкость, передается в любую точку жидкости одинаково по всем направлениям. Следовательно, поведение жидкости во внутреннем объеме датчика подчиняется законам упругого тела и описывается деформациями давления и сжатия. Жидкости обладают упругими свойствами только по отношению изменения объема. При увеличении давления P увеличивается усилие Q как ответная реакция изменения объема. Объем изменяется незначительно, так как межмолекулярные расстояния малы и при деформации жидкости приходится преодолевать значительные силы отталкивания, действующие между молекулами, и даже испытывать влияние сил, действующих внутри атома. Упругие свойства жидкости по отношению к малым деформациям характеризуются коэффициентом объемного сжатия β_v :

$$\beta_v = -1/V \times \Delta V / \Delta P.$$

Из формулы коэффициента β_v прослеживается прямая зависимость: чем больше объем жидкости, тем больше должно быть приложено давление для уменьшения объема на ΔV . Коэффициент объемного сжатия большинства жидкостей имеется в справочниках. Зная коэффициент объемного сжатия, объем жидкости, рабочее давление, можно вывести закономерность зависимости измеряемого давления от объема жидкости и использовать полученные данные в расчетах конструкции датчика.

Кремниевая мембрана

При разработки конструкции датчика давления необходимо правильно подобрать чувствительный элемент (кристалл монокристаллического кремния с интегральной схемой преобразования механических напряжений в электрический сигнал), чувствительность и надежность которого зависят от габаритных размеров самого кристалла и размеров рабочей мембраны, полученной методом травления в объеме кристалла. Для точного определения габаритных размеров рабочей мембраны чувствительного элемента проводится моделирование методом конечных элементов в программной среде ANSYS. Измерения проводились на кристалле размером 4×4 мм и размером активной части 2×2 мм и толщиной рамки 460 мкм. В результате получено изображение, показанное на рис. 4.

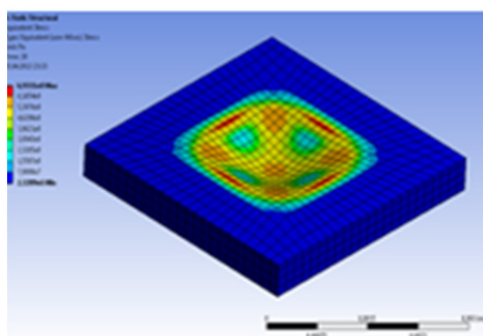


Рис. 4. Распределение значений упругой деформации на поверхности мембраны

Результаты моделирования, сведенные в табл. 2.1, 2.2, 2.3 [3], показаны на рис. 5–7.

Давление, Па	Толщина мембраны, мкм	Перемещение, мкм	Коэффициент запаса прочности
60 63 100 160 250 400 600 630 1000 1600 2500 4000	20	0,011908 0,012504 0,019847 0,031755 0,049618 0,079388 0,11908 0,12504 0,19847 0,31755 0,49618 0,79388	15
6000 6300 10 000 16 000 25 000 40 000 60 000 63 000 1,0×10 ⁰⁵	20	1,1908 1,2504 1,9847 3,1755 4,9618 7,9388 11,908 12,504 19,847	15 14,826 9,8843 9,4136 5,3423
1,0×10 ⁰⁶ 1,6×10 ⁰⁶ 2,5×10 ⁰⁶ 4,0×10 ⁰⁶ 6,0×10 ⁰⁶ 6,3×10 ⁰⁶ 1,0×10 ⁰⁷ 1,6×10 ⁰⁷ 2,5×10 ⁰⁷ 4,0×10 ⁰⁷ 6,0×10 ⁰⁷ 6,3×10 ⁰⁷ 1,0×10 ⁰⁸ 1,6×10 ⁰⁸ 2,5×10 ⁰⁸ 4,0×10 ⁰⁸ 6,0×10 ⁰⁸ 6,3×10 ⁰⁸ 1,0×10 ⁰⁹	30 40 50 60 70 80 100 120 140 180 210 220 300 350 400 — — — — —	60,361 41,943 34,601 33,070 32,258 23,430 20,194 20,096 21,020 17,735 17,996 17,009 12,429 13,452 14,958 — — — — —	1,2596 1,3458 1,3441 0,1617 1,0451 1,2965 1,2989 1,1842 1,0522 1,1347 1,0890 1,3517 1,5494 1,3061 1,0835 — — — — —

Рис. 5. Значения деформации для мембран размером 2×2 мм различной толщины

Давление, Па	Толщина мембраны, мкм	Перемещение, мкм	Коэффициент запаса прочности
60 63 100 160 250 400 600 630 1000 1600 2500 4000 6000 6300 10000	20	0,18898 0,19843 0,31496 0,50394 0,78741 0,2599 1,8898 1,9843 3,1496 5,0394 7,8741 12,599 18,898 19,843 31,496	15
16000 25000	30	15,100 23,593	15 12,862
40000 60000 63000 1,0×10 ⁰⁵	40 50	16,129 24,193 25,403 20,927	13,630 9,086 8,654 8,195

Рис. 6. Значения деформации для мембран размером 4×4 мм различной толщины

Давление, Па	Толщина мембраны, мкм	Перемещение, мкм	Коэффициент запаса прочности
$2,5 \times 10^{08}$			
$4,0 \times 10^{08}$	250	6,6989	1,5542
$6,0 \times 10^{08}$	280	8,5259	1,2013
$6,3 \times 10^{08}$	320	9,5629	1,0655
$6,3 \times 10^{08}$	320	10,041	1,0148
$1,0 \times 10^{09}$	400	10,033	1,008

Рис. 7. Значения деформации для мембран размером 1×1 мм различной толщины

Приведенные рисунки показывают зависимость перемещения центра мембраны от давления, толщины и габаритных размеров мембраны [3]. За критерий добротности мембраны под нагрузкой можно принять зависимость величины перемещения мембраны от коэффициента запаса прочности: чем выше коэффициент, тем меньше механических напряжений регламентируют ход мембраны, а это гарантия стабильной линейной характеристики. Оптимальная величина перемещения в пределах от 5 до 12 мкм. Монокристаллический кремний обладает идеальной упругостью и в то же время хрупкостью. Поэтому в определенных пределах мембрана кристалла обеспечивает линейную характеристику на прямом и обратном ходе и возвращение начального сигнала в первоначальное значение с точностью до 0,005 мВ. Но если механические напряжения, вызванные величиной перемещения, превысят предел упругих напряжений, мембрана сразу разрушится [4]. В конструкции датчика величина перемещения зависит от усилия Q , а усилие Q зависит от размера эффективной площади защитной мембраны и рабочего давления: $Q = PF\Delta\phi$.

Заключение

В статье содержится ответ на вопрос, каким путем нужно двигаться в разработке высокоточных, малогабаритных датчиков на высокие давления, работающих в сильноагрессивных средах. Точность измерения и долговременную стабильность сигнала способны обеспечить пьезорезистивные чувствительные элементы при условии, если в конструкции объединить на равных правах три составляющие: защитную мембрану, рабочую кремниевую мембрану и правильно рассчитанный объем рабочей жидкости. Правда, по опыту выпуска датчиков типа ИПДМА на высокие давления нужно отметить одну деталь: жидкость при заполнении должна быть тщательно отвакуумирована, а корпус быть абсолютно герметичным.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке по гранту РФФИ №17-07-00689.

Библиографический список

1. Адамов, А. П. Методы обеспечения надежности в беспроводных сенсорных сетях по критерию сетевой нагрузки / А. П. Адамов, А. А. Адамова, М. Н. Юлдашев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 1. – С. 197–199.
2. Пономарев, С. Д. Расчет упругих элементов машин и приборов / С. Д. Пономарев, Л. Е. Андреева. – Москва : Машиностроение, 1980. – С. 279–283.
3. Андреев, К. А. Математические модели гибридных чувствительных элементов датчиков давления / К. А. Андреев, Ю. Н. Тиняков, В. А. Шахнов // Датчики и системы. – 2013. – № 9. – С. 2–9.
4. Готра, З. Ю. Технология микроэлектронных устройств / З. Ю. Готра. – Москва : Радио и связь, 1991. – 527 с.
5. Адамов, А. П. Методологические основы обеспечения технологичности электронных средств / А. П. Адамов, Г. Х. Ирзаев, А. А. Адамова. – Санкт-Петербург : Политехника, 2008. – 312 с.
6. Адамов, А. П. Классификация состояний беспроводной сенсорной сети с использованием методов машинного обучения / А. П. Адамов, М. Н. Юлдашев // VII Всерос. науч.-техн. конф. в области САПР (МЭС-2016). – Москва, 2016. – С. 248–251.
7. Адамов, А. П. Методика оценки технологичности электронных изделий на этапах проектирования и производства / А. П. Адамов, А. А. Адамова, В. А. Шахнов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 2. – С. 352–356.

References

1. Adamov A. P., Adamova A. A., Yuldashev M. N. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2016, vol. 1, pp. 197–199. [In Russian]
2. Ponomarev S. D., Andreeva L. E. *Raschet uprugikh elementov mashin i priborov* [Calculation of elastic elements of machines and devices]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1980, pp. 279–283. [In Russian]
3. Andreev K. A., Tinyakov Yu. N., Shakhnov V. A. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2013, no. 9, pp. 2–9. [In Russian]
4. Gotra Z. Yu. *Tekhnologiya mikroelektronnykh ustroystv* [Microelectronic device technology]. Moscow: Radio i svyaz', 1991, 527 p. [In Russian]
5. Adamov A. P., Irzaev G. Kh., Adamova A. A. *Metodologicheskie osnovy obespecheniya tekhnologichnosti elektronnykh sredstv* [Methodological bases for ensuring the technological effectiveness of electronic means]. Saint-Petersburg: Politehnika, 2008, 312 p. [In Russian]
6. Adamov A. P., Yuldashev M. N. *VII Vseros. nauch.-tekhn. konf. v oblasti SAPR (MES-2016)* [VII all-Russian scientific and technical conference in the field of CAD (MEA-2016)]. Moscow, 2016, pp. 248–251. [In Russian]
7. Adamov A. P., Adamova A. A., Shakhnov V. A. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2015, vol. 2, pp. 352–356. [In Russian]

Адамов Александр Петрович

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки Республики Дагестан,
кафедра микроэлектроники,
Дагестанский государственный
технический университет
(Россия, Республика Дагестан,
г. Махачкала, ул. Шамиля, д. 70)
E-mail: arinaadamova75@gmail.com

Адамова Арина Александровна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра проектирования и технологии
производства электронной аппаратуры,
Московский государственный технический
университет им. Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, 2-ая Бауманская, 5)
E-mail: arina.adamova@rambler.ru

Семенцов Станислав Григорьевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра проектирования и технологии
производства электронной аппаратуры,
Московский государственный технический
университет им. Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, 2-ая Бауманская, 5)
E-mail: siemens_off@mail.ru

Темиров Алибулат Темирбекович

кандидат технических наук, доцент,
декан факультета радиоэлектроники,
телекоммуникаций и мультимедийных
технологий,
Дагестанский государственный
технический университет
(Россия, Республика Дагестан,
г. Махачкала, ул. Шамиля, д. 70)
Email: ali.temirov@rambler.ru

Adamov Alexander Petrovitch

doctor of technical sciences, professor,
honored scientist of the Republic of Dagestan,
sub-department of microelectronics,
Dagestan State Technical University
(70 Shamil street, Makhachkala, Dagestan, Russia)

Adamova Arina Aleksandrovna

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of design and production technology
of the electronic equipment,
Bauman Moscow State Technical University
(5 2-ya Baumanskaya street, Moscow, Russia)

Sementsov Stanislav Grigorievich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of design and production technology
of the electronic equipment,
Bauman Moscow State Technical University
(5 2-ya Baumanskaya street, Moscow, Russia)

Temirov Alibulat Temirbekovich

candidate of technical sciences, associate professor,
dean of the faculty of radioelectronics,
telecommunications and multimedia technologies,
Dagestan State Technical University
(70 Shamil street, Makhachkala, Dagestan, Russia)

Цивинская Татьяна Анатольевна

главный технолог,
кафедра проектирования и технологии
производства электронной аппаратуры,
Московский государственный технический
университет им. Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, 2-ая Бауманская, 5)
E-mail: info@bmstu.ru

Tsivinskaya Tatiana Anatolievna

chief process engineer,
sub-department of design and production technology
of the electronic equipment,
Bauman Moscow State Technical University
(5 2-ya Baumanskaya street, Moscow, Russia)

Образец цитирования:

Замеры давления в условиях агрессивных сред / А. П. Адамов, А. А. Адамова, С. Г. Семенцов, А. Т. Темиров, Т. А. Цивинская // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 1 (29). – С. 67–75. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-1-8.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

TECHNOLOGICAL BASES OF IMPROVING THE RELIABILITY AND QUALITY OF PRODUCTS

УДК 658.562

DOI 10.21685/2307-4205-2020-1-9

В. П. Перевертов, И. К. Андрончев, М. В. Иванкова

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

V. P. Perevertov, I. K. Andronchev, M. V. Ivankova

TECHNOLOGICAL CAPABILITIES OF CONCENTRATED ENERGY FLOWS FOR FORMING MACHINE PARTS

Аннотация. *Актуальность и цели.* Формообразование деталей (изделий) из различного материала с помощью традиционных и аддитивных (3D) технологий в условиях «умных» производственных систем (УПС) представляет сложную динамическую систему, оптимизация управления которой позволяет повысить качество продукции. *Материалы и методы.* Гибкость и экономичность разработки новой качественной продукции создается путем создания УПС на основе ГПС с цифровым моделированием с применением синтеза традиционных и аддитивных технологий. *Результаты.* В качестве источника энергии для технологий «умных» производственных систем рекомендуется применять концентрированные потоки энергии на основе: электронного луча и лазерного излучения; плазменного и ионного воздействия с системами адаптивного (интеллектуального) управления с контролем и диагностикой параметров технологического процесса. *Выводы.* Контроль и диагностика показателей качества продукции с помощью лазерных, инфракрасных, волоконно-оптических датчиков и устройств и т.д., системы индустриальной компьютерной томографии обеспечивают высокое качество, безопасность и экологичность работы «умной» производственной системы.

Abstract. *Background.* The shaping of parts (products) from various materials using traditional and additive (3D) technologies in the conditions of “smart” production systems (UPS) is a complex dynamic system that needs to be managed with high quality. *Materials and methods.* Flexibility and economy of developing new high-quality products by creating UPS based on GPS with digital modeling using a synthesis of traditional and additive technologies. *Results.* It is recommended to use concentrated energy flows based on: an electron beam and laser radiation as an energy source for the technologies of “smart” production systems (UPS); plasma and ionic exposure with adaptive (intelligent) control systems with monitoring and diagnostics of technological process parameters. *Conclusions.* Monitoring and diagnostics of product quality indicators using laser, infrared, fiber-optic sensors and devices, etc., an industrial computed tomography system will ensure the high quality, safety and environmental friendliness of the “smart” production system.

Ключевые слова: аддитивные технологии, энергия, лазер, плазма, качество, надежность, материал, датчики, контроль, диагностика, система, оборудование.

Keywords: additive technologies, energy, laser, plasma, quality, reliability, material, sensors, control, diagnostics, system, equipment.

В машиностроении применяют как металлические, так и неметаллические материалы и сплавы, конструкционные и инструментальные стали, порошки из титана, алюминия, кобальта, никеля, молибдена, керамики, лития и т.д. и их порошковые композиции с заданными физико-химическими свойствами.

Для успешной конкурентоспособности в условиях рыночных отношений необходимо обновление высокотехнологичной продукции путем модернизации производства – перехода от трудоемких технологий (**традиционных**) к наукоемким (**аддитивным** АТ технологиям – 3D печать) и создание на их стыке **альтернативных (гибридных)** технологий типа spray forming, объединяющих в себя:

- 1) литейные технологии (плавка металла);
- 2) технологии распыливания металла (порошковая металлургия);
- 3) технологии металлографии (металловедения) и т.д.

Формообразование заготовки (детали) возможно традиционными технологиями обработки материала заготовки методами резания (ОМР) и давления (ОМД), лазерного излучения и плазменного воздействия и т.д. Альтернативные (гибридные) технологии позволяют изготавливать как новые материалы и сплавы, имеющие высокую однородность микро- и макроструктуры материала, так и производство суперпроводников и высокопрочного инструментального, штампового, литейного инструментов и т.д., посредством послойного напыления (атомизации) материала и формообразования заготовки для последующей обработки традиционными технологиями.

Гибридные и аддитивные АТ технологии [1–10] используют различные методы послойного синтеза, что сближает их технологии, позволяющие получать заготовки (детали) из конструкционных и специальных сплавов.

Оснащение технологического оборудования (литейное и вакуумные печи, устройства термообработки и порошковой металлургии) для изготовления порошковых композитов, оснащенное системой диагностического управления с быстродействующим исполнительным устройством и высокоэффективными, бесконтактными волоконно-оптическими датчиками контроля и диагностики позволит устранить потери материала до 20 % при распылении (атомизации и осаждении металла), наличие микропор в структуре материала и получать качественные заготовки типа ленты, цилиндра, кольца (труба), турбинных дисков диаметром до 1400 мм, изготовления инструмента и т.д. [1–5, 9–14].

Большинство технологий «умных» производственных систем (УПС) находится на этапе своего развития в виде гибких производственных систем (ГПС), состоящих из:

- 1) литейного, кузнечно-штамповочного, сварочного, лазерного и плазменного, переработки пластмасс и композитов, термического производства и т.д.;
- 2) механического производства, включая технологии финишной обработки материалов резанием (ОМР);
- 3) сборочного производства, объединенного логистической и информационно-управляющей системами, связанного с САПР конструкций и технологий, для создания условий интеграции технологических процессов [1–5, 8–10, 15–18].

Классификация технологических процессов формообразования заготовок в машиностроении по методу исполнения подразделяет их на **традиционные** и **аддитивные** технологии (АТ), или цифровые 3D-технологии (3D-печать), на основе цифровой модели методом послойного добавления материала [1–6, 9, 10, 12–14, 16, 19].

Внедрение цифровых технологий в области проектирования (CAD), моделирования (CAE) и обработки материалов резанием (CAM), обработки материалов давлением (CAD) и т.д., находящихся в единой цифровой технологической системе CAD/CAM/CAE, элементами которой необходимо качественно управлять, вызвало развитие технологий 3D-печати: 3D-модели, параметры которой необходимо контролировать и диагностировать (рис. 1) технологическими датчиками и устройствами о сечениях CAD-модели (рис. 1,в) до построения физической модели [5, 6, 9, 10].

Анализ технологических особенностей применения 3D-печати для изготовления изделий (деталей) по цифровой модели [1–6, 15] показал, что в результате внедрения аддитивного технологического оборудования – 3D-принтеров, включая роторные 3D-принтерные технологические машины [1–5, 8–20], появились новые технологии, вытесняющие традиционные технологии производства литейных деталей и штампового инструмента, деталей самолетов и ракет, НТТС и высокоскоростного подвижного состава и т.д., являющихся трудоемкой и дорогостоящей частью технологического процесса формообразования.

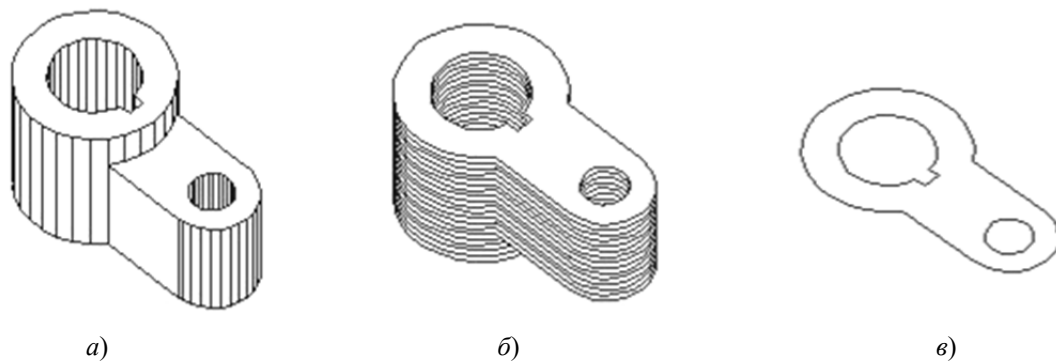


Рис. 1. Алгоритм построения физической модели:

а – считывание трехмерной геометрии; *б* – разбиение модели на горизонтальные сечения (слои);
в – построение сечений детали слой за слоем снизу-вверх

Технологические процессы формообразования заготовок являются основой различных типов технологического оборудования для производства деталей методами лазерного наплавления, спекания и т.д., включая 3D-принтеры, и должны отвечать требованиям:

- 1) габариты изготавливаемого изделия ограничены размерами «строительной камеры» машины (до 600×500×600 мм);
- 2) производительность зависит от размера изделия, используемых материалов, программного обеспечения;
- 3) материалы различаются по степени прочности и качеству образуемой структуры и др.;
- 4) точность изделия (степень соответствия CAD-модели) определяется технологическими факторами, которые нужно контролировать и диагностировать;
- 5) стоимость зависит от быстродействия машин, объема камеры.

В машиностроении цифровая 3D-печать (3D-модель) позволяет осуществлять контроль и диагностирование, проверку различных параметров изделий, чтобы заранее устранить вероятные дефекты (неисправности), приводящие к отказам при изготовлении, ремонте и замене изношенных деталей, которые уже готовы к эксплуатации в условиях РЖД.

Термины АF(АМ) – технологии, **обозначающие** аддитивный технологический (АТ) процесс, охватывают синтез продукции от прототипа (опытный образец) до серийного изделия (деталь) путем фиксации и соединения слоев материала между собой спеканием, сплавлением, склеиванием, полимеризацией и т.д. в зависимости от конкретной технологии [5, 10, 19].

Технология «трехмерной печати» позволила разработать не только лазерные порошковые технологические машины типа (SLA) и (SLS), но и другие машины на основе новых методов энергии, путем формирования и фиксации слоя при формообразовании изделий (деталей) сложной геометрии для мелкосерийного производства в авиационной и железнодорожной промышленности, космической индустрии и т.д. [1–7, 9–20].

Алгоритм технологии формообразования заготовки (рис. 2): CAD-модель → АМ(АF) машина → деталь – означает переход к «бесбумажным» технологиям.

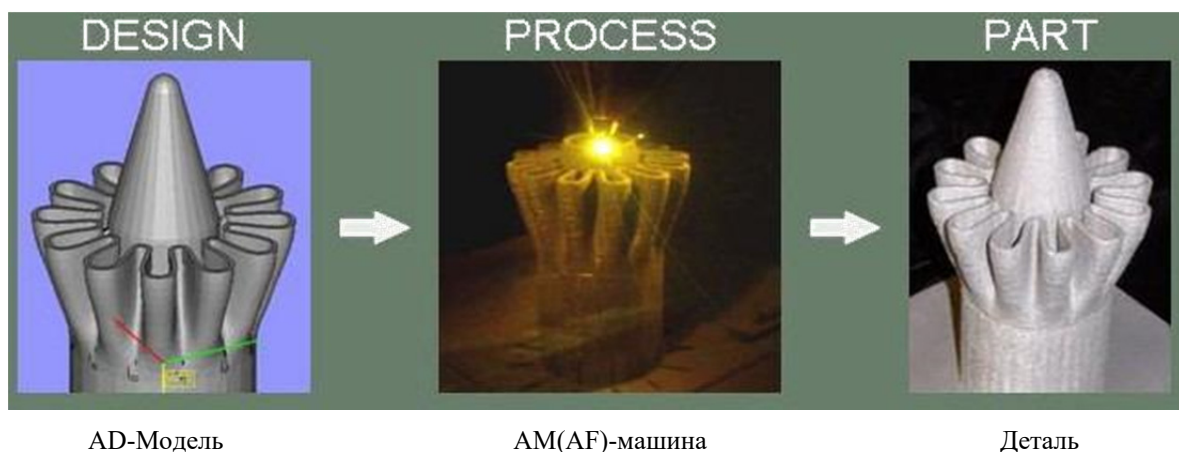


Рис. 2. Алгоритм аддитивных технологий

В технологиях АФ (АМ) используют современные научные разработки в области теории обработки материалов резанием (ОМР) и давлением (ОМД), литья и сварки, металлостроения и порошковой металлургии, лазерной и плазменной энергии, оптике и электронике, системам диагностики и управления, датчикам и устройствам контроля и т.д., которые реализуются в 3D-принтерах, включая роторные 3D-принтерные системы для мелкосерийного производства изготовления изделий, специальных приспособлений, шаблонов для технологического оборудования. Мотивацией применения АМ (АФ)-технологий является экономическая целесообразность (эффективность) формообразования изделия, так как зависит от затрат на технологическую подготовку и является альтернативой традиционным технологическим методам для производства продукции.

Экономическая целесообразность технологий АМ (АФ) для производства и ремонта изделий (деталей) рабочих органов турбин ГТД, валов, а также для нанесения защитных и износостойких покрытий и т.д. [1–4, 8, 16, 19] достигается перед традиционными технологиями за счет сокращения времени и стоимости при проведении опытно-конструкторских вариантных исследований (изготовление опытных образцов, новой продукции).

Технологическое оборудование условно можно разделить на две группы:

- 1) вид использования материала:
 - а) металлопорошковые композиционные материалы;
 - б) листовые (прутковые) композиции материалов;
- 2) источник энергии для формообразования деталей [1, 5, 15].

В качестве источника энергии для АМ(АФ)-технологий являются энергии электронного луча и лазерного излучения; плазменного и ионного воздействия или их сочетания (ионно-лазерное, ионно-плазменное и др.), которое применяется для традиционных технологий. Технологическое оборудование представляет сложную динамическую систему, оснащенную диагностической системой управления, технологическими датчиками и быстродействующим исполнительным рабочим органом и др. [1–5, 8–19].

Особенностью технологий АФ(АМ), использующих лучевой источник тепловой энергии, является необходимость применения специального программного обеспечения для редактирования конфигурации поддержек и технологии их удаления, включая термическое оборудование для снятия остаточных напряжений и т.д.

Электронно-лучевая энергия используется в технологических машинах (Arcam) для сплавления порошковых композитов (ЕВМ-технология) с контролем тепловой энергии и параметров металлического порошка при сплавлении (рис. 3).

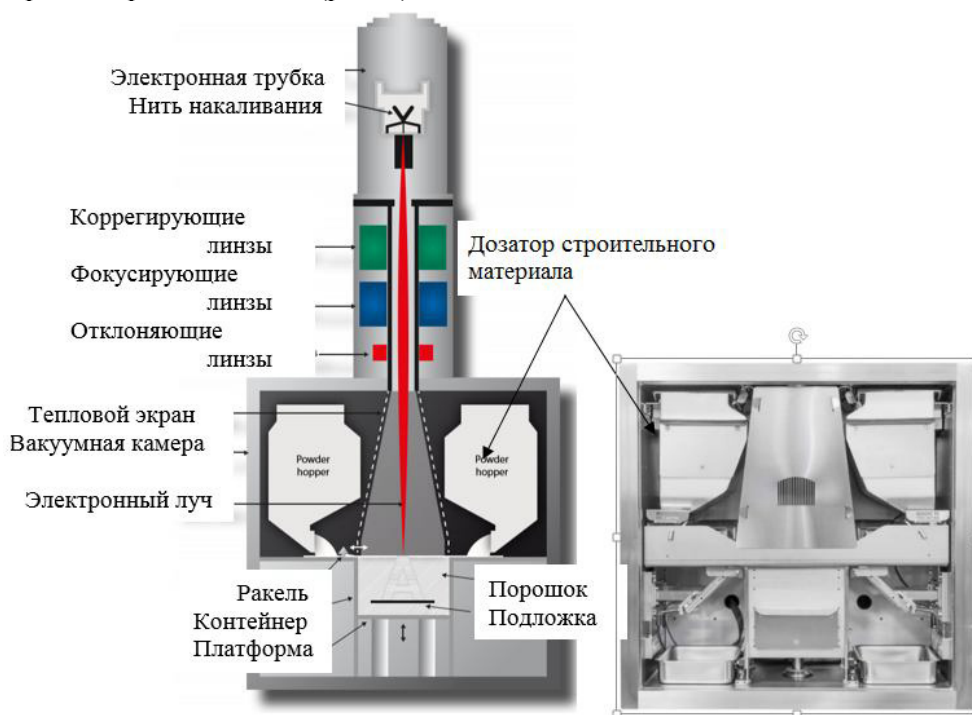


Рис. 3. Рабочий процесс в технологических машинах Arcam

В технологическом оборудовании для осуществления аддитивной технологии типа IFF (Sciaky) в качестве источника энергии для плавления композитных материалов используется низкотемпературная высокочастотная плазма (факельный разряд) [1–5, 10, 18].

Плазменные технологии, протекающие при температуре рабочего газа 8000–10000 °С, когда вещество находится в состоянии низкотемпературной плазмы, необходимо контролировать и управлять высокими температурами.

Данные компактные агрегаты нашли применение в плазменных технологиях в металлургии, машиностроении, химии и т.д. В металлургии в плазмотронах получают материалы композитные с новыми свойствами. В машиностроении плазменное напыление (нанесение) на поверхность деталей упрочняющих, термостойких, антикоррозионных, защитных и других покрытий, восстанавливает изношенные поверхности деталей, повышает качество и надежность машин; плазмотроны производят плазменную резку любого материала толщиной до 250 мм; в заготовительном кузнечно-штамповочном производстве нагревают заготовки низкотемпературной высокочастотной плазмой (факельным разрядом) [10] и применяют традиционные технологии обработки давлением для изготовления отверстий в материале, основанные на внедрении пуансона КШМ в матрицу (штамповый инструмент) с предварительным формированием отверстия в материале заготовки факельным разрядом (ФР).

При оптимальном воздействии низкотемпературной плазмы (ФР) на любой материал заготовки (металл, диэлектрик и др.) устраняется образование трещин и снижается усилие деформирования, улучшается качество и повышается производительность технологического процесса в диапазоне частот 6–3000 МГц и мощности 50–250 кВт. Нижний диапазон частоты факельного разряда (ФР) 6 МГц выбран в связи с граничной частотой образования ФР. Выбор частоты ФР более 3000 МГц приводит к усложнению устройства и требует дополнительных мер повышения техники безопасности [8–10, 14, 16–18, 20]. Изменяя частоту и мощность высокочастотного генератора (плазмотрона), можно регулировать площадь (апертуру) пятна воздействия и производить нагрев (резку, пробивку) заготовок с различного диаметра. Плазменная технология имеет невысокую стоимость по сравнению с лазерной, но при этом обладает высокой скоростью протекания процессов и высокую энергоемкостью производства.

Для контроля ФР (низкотемпературной плазмы) разработано новое инвариантное волоконно-оптическое устройство контроля температуры типа ИРТ-3, ИРТ-4 [7, 9, 10].

В зависимости от вида концентрированной энергии классифицируют плазменные, электродуговые, лазерные, электронно-лучевые технологии напыления или их сочетания, представляющие собой равномерное осаждение на поверхность изделия тонкого слоя заданного вещества с целью придания изделию дополнительной прочности, электропроводности, износоустойчивости в зависимости от вида и геометрии изделия, условий его эксплуатации, вида материала продукции (изделия) и его массы и т.д. Поэтому технология отрабатывается в ходе многовариантных исследований. На основе ионно-плазменной энергии разработаны технологии (методы) плазменной и ионной обработки материала заготовки.

Технологическое лазерное излучение позволяет увеличить производительность и качество обработки и получать новые свойства поверхности материала, недоступные традиционным методам обработки материалов. Возможность управления параметрами лазерного луча как источника нагрева материалов позволила разработать методы поверхностной лазерной обработки с контролем и диагностикой качества структуры поверхностного слоя: твердость и износостойкость, шероховатость и геометрические размеры, «транспортировку» лазерного излучения и подвода в труднодоступные места и производить обработку, когда другие источники энергии нагрева применить невозможно. Гибкие лазерные технологии в сочетании с традиционными методами обработки материалов в автоматизированном режиме позволяют осуществлять обработку заготовки (детали) резкой, пробивкой, сваркой из листов металла, композита, полимера, керамики малыми партиями в многономенклатурном производстве машиностроения.

Энергия лазерного излучения в гибридной технологии позволяет получать технологическую, инструментальную оснастку литейных и штамповых пресс-форм, порошки и материалы (наноматериалы) и различные сплавы широкого спектра по CAD-модели на установке SLA с лазерным излучением мощностью от 1 до 5 кВт с удалением облоя, обработки заготовки в размер по посадочным поверхностям, а также термообработку и получать качественные изделия из материалов с увеличенным содержанием лития и керамики [1–5, 7, 19].

В процессе формообразования для автоматического контроля и диагностики размеров, линейных перемещений, качества материалов и изделий и других альтернативных (гибридных) технологий применяют измерительную быстродействующую диагностику (неразрушающий контроль), обеспечивающую точность до 0,01 % при размерах от 1–100 микрон; определять скорость объектов в диапазоне от 0,0001 до 50 м/с. Лазерные методы бесконтактной диагностики, основанные на принципах голографии, позволяют обнаруживать дефекты размером до 1 мкм, определять статические и динамические деформации различных деталей. Для устранения брака и дефектов деталей, приводящих к отказам, применяются системы компьютерной томографии технологических параметров, позволяющие получать трехмерный скан детали – наглядное изображение любого сечения объекта и 3-мерной модели в целом, которая также может быть сопоставлена с исходной САД-моделью, и использовать в качестве контрольно-диагностической машины: разрешение до 1 мкм, точность измерений 10 мкм. Для обработки данных томографирования, контрольно-диагностических измерений и анализа применяется программа VGStudio Max 2.1.

Заключение

1. Гибкость и скорость внедрения новых технологий являются основными факторами качественной работы «умных» производственных систем на основе ГПС, составными элементами которых являются гибкие модули (комплексы) с цифровым адаптивным управлением, построенные на основе транспортной и энергетической инфраструктур, что обеспечивает совершенствование заготовительного производства (кузнечно-штамповочное, литейное, сварочное, переработки пластмасс и порошковых композитов, термическое производство и др.).

2. Наиболее перспективны в машиностроении альтернативные (гибридные) технологии AF(AM) и синтез аддитивных и традиционных технологических процессов ОМД и ОМР порошковых материалов (композитов) и спеченных порошковых заготовок и другие технологические процессы, позволяющие сократить расход материалов, энергии за счет совершенствования технологических процессов и максимального приближения форм и размеров заготовок к готовым деталям, уменьшения объемов ОМР (механическая обработка) на основе контроля и диагностического управления потоками энергии электронного луча, лазерного излучения, плазменного и ионного воздействия.

3. Формообразование деталей в транспортной и ракетно-космической промышленности отличается выбором материалов, технологией и энергией, которой необходимо управлять. Создание модели (детали) основывается на послойном наращивании детали (изделия) в трехмерные изделия по цифровой модели изделия, что позволяет изготавливать качественные детали любой сложности с контролем и диагностикой параметров индустриальными томографическими системами.

Библиографический список

1. Bourella, D. L. A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing / D. L. Bourella, J. J. Beaman, M. C. Leub, D. W. Rosen // TURKEY Workshop On Rapid Technologies (September 24, 2009). – 2009. – P. 5–11. – URL: www.rapidtech.itu.edu.tr
2. Beaman, J. J. Solid Freeform Fabrication: An Historical Perspective / J. J. Beaman. – Austin, Texas : The University of Texas, 1998.
3. Greul, M. Metal and ceramic prototypes using the Multiphase Jet Solidification(MJS) process Metallische und keramische Prototypen mit dem Multiphasejet Solidification (MJS) Verfahren. Fraunhofer IFAM / M. Greul // Conference onRapid Tooling & Manufacturing. – 1997.
4. Techel, A. Laser Additive Manufacturing of Turbine Components, Precisely and Repeatable. Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology(IWS) / A. Techel et al. // Laser Institute of America. – URL: www.lia.org/blog/category/laser-insights-2/laser-additivemanufacturing
5. Campanelli, S. L. Capabilities and Performances of the SelectiveLaser Melting Process / S. L. Campanelli. – URL: <http://cdn.intechweb.org/pdfs/12285.pdf>
6. ГОСТ Р 57558 Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения. – Москва, 2017. – 18 с.
7. Осокин, Е. Н. Процессы порошковой металлургии. Версия 1.0 : курс лекций / Е. Н. Осокин, О. А. Артемьева. – Красноярск : ИПК СФУ, 2008.
8. Перевертов, В. П. К вопросу выбора инновационных технологий формообразования деталей в умных производственных системах / В. П. Перевертов, И. К. Андрончев, Н. К. Юрков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2019. – Т. 1. – С. 42–45.

9. *Перевертов, В. П.* Качество управления альтернативными технологиями формообразования деталей в «умных» производственных системах / В. П. Перевертов, И. К. Андрончев, И. Ю. Семочкина // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 4 (28). – С. 102–110.
10. *Перевертов, В. П.* Качество управления гибкими технологиями : монография / В. П. Перевертов. – Самара : СамГУПС, 2019. – 269 с.
11. Патент 1303207 Устройство для контроля температуры при обработке материалов / В. П. Перевертов, Ю. А. Бочаров, Н. Е. Конюхов, А. П. Андреев, Н. Д. Мишанин, Ю. М. Афонин ; опубл. 15.04.87, Бюл. № 14.
12. Патент 1402383 Способ нагрева заготовок перед штамповкой / В. П. Перевертов, Ю. А. Бочаров, Н. Е. Конюхов, И. Г. Гуляев, М. Е. Маркушин, Н. Д. Мишанин, В. Ф. Нелюбин, Ю. Н. Фадеев ; зарег. 27.12.85 ; опубл. 15.06.88, Бюл. № 22.
13. Патент 1696914 Устройство для контроля максимальной деформации кузнечно-штамповочных машин / В. П. Перевертов, Ю. А. Бочаров, А. В. Герасимов, А. П. Андреев, Е. Б. Безпалько ; зарег. 19.01.88 ; опубл. 07.12.91, Бюл. № 45.
14. *Перевертов, В. П.* Технологии обработки материалов концентрированным потоком энергии / В. П. Перевертов, И. К. Андрончев, М. М. Абулкасимов // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 3 (11). – С. 69–79.
15. *Безобразов, Ю. А.* Анализ структуры образцов, полученных DMLS-и SLM-методами быстрого прототипирования / Ю. А. Безобразов, М. А. Зленко, О. Г. Зотов, Н. Г. Колбасников. – Санкт-Петербург : ГПУ, 2014. – С. 154–157.
16. *Перевертов, В. П.* Система умной инфраструктуры РЖД и нанотехнологии / В. П. Перевертов, Н. К. Юрков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2018. – Т. 1. – С. 100–102.
17. *Мишанов, Р. О.* Выбор электрических параметров интегральных микросхем специального назначения для проведения индивидуального прогнозирования показателей качества и надежности / Р. О. Мишанов, М. Н. Пиганов, В. П. Перевертов // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 2 (22). – С. 43–54.
18. *Перевертов, В. П.* Система диагностирования и технического обслуживания НТТС и ПС в условиях РЖД / В. П. Перевертов, И. К. Андрончев, Н. К. Юрков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2018. – Т. 2. – С. 93–95.
19. *Зленко, М. А.* Аддитивные технологии в машиностроении : пособие для инженеров / М. А. Зленко. – Москва : ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. – 220 с.
20. *Перевертов, В. П.* Качество продукции и услуг РЖД в сочетании с качеством управления / В. П. Перевертов, И. К. Андрончев, М. М. Абулкасимов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2017. – Т. 2. – С. 116–120.

References

1. Bourella D. L., Beaman J. J., Leub M. C., Rosen D. W. *TURKEY Workshop On Rapid Technologies (September 24, 2009)*. 2009, pp. 5–11. Available at: www.rapidtech.itu.edu.tr
2. Beaman J. J. *Solid Freeform Fabrication: An Historical Perspective*. Austin, Texas: The University of Texas, 1998.
3. Greul M. *Conference on Rapid Tooling & Manufacturing*. 1997.
4. Techel A. et al. *Laser Institute of America*. Available at: www.lia.org/blog/category/laser-insights-2/laser-additivemanufacturing
5. Campanelli S. L. *Capabilities and Performances of the Selective Laser Melting Process*. Available at: <http://cdn.intechweb.org/pdfs/12285.pdf>
6. GOST R 57558 *Additivnye tekhnologicheskie protsessy. Bazovye printsipy. Chast' 1. Terminy i opredeleniya* [GOST R 57558 Additive manufacturing processes. Basic principle. Part 1. Terms and definitions]. Moscow, 2017, 18 p. [In Russian]
7. Osokin E. N., Artem'eva O. A. *Protsessy poroshkovoy metallurgii. Versiya 1.0: kurs lektsiy* [Processes of powder metallurgy. Version 1.0: a course of lectures]. Krasnoyarsk: IPK SFU, 2008. [In Russian]
8. Perevertov V. P., Andronchev I. K., Yurkov N. K. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2019, vol. 1, pp. 42–45. [In Russian]
9. Perevertov V. P., Andronchev I. K., Semochkina I. Yu. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2019, no. 4 (28), pp. 102–110. [In Russian]
10. Perevertov V. P. *Kachestvo upravleniya gibkimi tekhnologiyami: monografiya* [Quality of flexible technology management: monograph]. Samara: SamGUPS, 2019, 269 p. [In Russian]
11. Патент 1303207 *Ustroystvo dlya kontrolya temperatury pri obrabotke materialov* [Patent 1303207 Device for temperature control during material processing]. V. P. Perevertov, Yu. A. Bocharov, N. E. Konyukhov, A. P. Andreev, N. D. Mishanin, Yu. M. Afonin; publ. 15.04.87, bull. no. 14. [In Russian]
12. Патент 1402383 *Sposob nagreva zagotovok pered shtampovkoy* [Patent 1402383 Method of heating workpieces before stamping]. V. P. Perevertov, Yu. A. Bocharov, N. E. Konyukhov, I. G. Gulyaev, M. E. Markushin, N. D. Mishchanin, V. F. Nelyubin, Yu. N. Fadeev; reg. 27.12.85; publ. 15.06.88, bull. no. 22. [In Russian]

13. Patent 1696914 *Ustroystvo dlya kontrolya maksimal'noy deformatsii kuznechno-shtampovochnykh mashin* [Patent 1696914 Device for monitoring the maximum deformation of forging and stamping machines]. V. P. Perevertov, Yu. A. Bocharov, A. V. Gerasimov, A. P. Andreev, E. B. Bezpalko; reg. 19.01.88; publ. 07.12.91, bull. no. 45. [In Russian]
14. Perevertov V. P., Andronchev I. K., Abulkasimov M. M. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2015, no. 3 (11), pp. 69–79. [In Russian]
15. Bezobrazov Yu. A., Zlenko M. A., Zotov O. G., Kolbasnikov N. G. *Analiz struktury obraztsov, poluchennykh DMLS-i SLM-metodami bystrogo prototipirovaniya* [Analysis of the structure of samples obtained by DMLS and SLM rapid prototyping methods]. Saint-Petersburg: GPU, 2014, pp. 154–157. [In Russian]
16. Perevertov V. P., Yurkov N. K. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2018, vol. 1, pp. 100–102. [In Russian]
17. Mishanov R. O., Piganov M. N., Perevertov V. P. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 2 (22), pp. 43–54. [In Russian]
18. Perevertov V. P., Andronchev I. K., Yurkov N. K. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2018, vol. 2, pp. 93–95. [In Russian]
19. Zlenko M. A. *Additivnye tekhnologii v mashinostroenii: posobie dlya inzhenerov* [Additive technologies in mechanical engineering: a Handbook for engineers]. Moscow: GNTs RF FGUP «NAMI», 2015, 220 p. [In Russian]
20. Perevertov V. P., Andronchev I. K., Abulkasimov M. M. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2017, vol. 2, pp. 116–120. [In Russian]

Перевертов Валерий Петрович

кандидат технических наук, профессор,
кафедра наземных
транспортно-технологических средств,
Самарский государственный университет
путей сообщения
(Россия, г. Самара, ул. Свободы, 2 В)
E-mail: vperevertov@yandex.ru

Андрончев Иван Константинович

доктор технических наук, профессор,
кафедра электрического транспорта,
ректор Самарского государственного
университета путей сообщения
(Россия, г. Самара, ул. Свободы, 2 В)
E-mail: rektoratSamgups@mail.ru

Иванкова Марина Владимировна

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: arina.iv94@yandex.ru

Perevertov Valeriy Petrovich

candidate of technical sciences, professor,
sub-department of ground transportation
and technology tools,
Samara State University of Railway Transport
(2V Svobody street, Samara, Russia)

Andronchev Ivan Constantinovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of electric transport,
Rector Samara State University
of Railway Transport
(2V Svobody street, Samara, Russia)

Ivankova Marina Vladimirovna

postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Перевертов, В. П. Технологические возможности концентрированных потоков энергии для формообразования деталей машиностроения / В. П. Перевертов, И. К. Андрончев, М. В. Иванкова // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 1 (29). – С. 76–83. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-1-9.

А. П. Адамов, А. А. Адамова, С. Г. Семенцов

СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В КОНСТРУКЦИИ ДАТЧИКОВ ДЛЯ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

A. P. Adamov, A. A. Adamova, S. G. Sementsov

MODERN MATERIALS IN THE CONSTRUCTION OF SENSORS FOR AEROSPACE VEHICLES

Аннотация. В области авиастроения и разработках космических аппаратов наступил предел, когда исчерпаны все ресурсы, заложенные в конструкции летательных аппаратов. А развитие технического прогресса требует повышения скоростей, расширения потолка полетов, увеличения грузоподъемности и при этом сокращения себестоимости при изготовлении и расходов при эксплуатации. Частичная модернизация конструкции старых моделей с внедрением новых материалов способна внести дисбаланс в стройную структуру конструкции, а частичная замена приборов в системах управления и контроля снижает скорость срабатывания систем из-за различия точностных характеристик приборов. Конфликт между старым и новым проявляется в участившихся в последнее время авариях. В статье проведен анализ разработок в области технологий получения перспективных материалов, используемых в конструировании нового поколения контрольно-измерительных сенсоров, и показано, как появление новых датчиков может повлиять на безопасность полетов.

Ключевые слова: автоматизированные системы контроля, углепластики, композитные материалы, интерметаллиды, гибкие платы, пьезорезистивные сенсоры.

Abstract. In the field of aircraft construction and spacecraft development, the limit has come when all the resources inherent in the design of aircraft have been exhausted. And the development of technological progress requires increasing speeds, expanding the ceiling of flights, increasing carrying capacity and at the same time reducing production costs and operating costs. Partial modernization of the design of old models with the introduction of new materials can imbalance the slender structure of the structure, and partial replacement of devices in control and monitoring systems reduces the response speed of systems due to differences in the accuracy characteristics of devices. The conflict between the old and the new is manifested in the increasingly frequent accidents. The article analyzes the developments in the field of technologies for producing promising materials used in the design of a new generation of control and measuring sensors and shows how the appearance of new sensors can affect flight safety.

Keywords: automated control systems, carbon plastics, composite materials, intermetallic compounds, flexible boards, piezoresistive sensors.

Введение

Разработка нового поколения летательных аппаратов обходится во много раз дороже налаженного производства по его выпуску. Поэтому подчиняясь требованиям времени, с целью улучшения технических характеристик проводятся модернизации модели. Процесс модернизации столь сложного объекта прямолинейно зависит от процесса изменения надежности конструкции. Зависимость показана на рис. 1.

По оси X можно наблюдать степень изменения надежности, а по оси Y – нарастание процесса модернизации. С началом эксплуатации начинается и процесс модернизации, связанный с устранением дефектов, отмеченных при полетах в условиях эксплуатации, и которые невозможно смоделировать при контрольных испытаниях. Отрезок AB отмечает возрастание надежности в результате устранения отмеченных дефектов. Отрезок BC характеризует процесс модернизации с целью улучшения технических характеристик улучшением эргономики, усовершенствования отдельных узлов. На данном этапе результаты доработок контролируются расчетами, программами моделирования, стендовыми и натурными испытаниями и поэтому на фактор надежности не влияют. Но наступает момент, когда ресурсы данной конструкции исчерпаны полностью. В современном мире на фоне

технической революции изделия устаревают морально быстрее, чем наступает износ физический. Тогда наступает этап модификации, который характеризуется отрезком CD : идет частичная замена агрегатов, узлов и приборов на изделия, изготовленные с использованием новых технологий. Доработка позволяет решить задачи по доводке технических характеристик до уровня современных требований, но соединение в одной конструкции элементов, изготовленных по разным технологиям, приводит к возникновению в материалах конструкции очагов механических напряжений и резкому снижению надежности летательного аппарата. На отрезке DE надежность резко снижается и стремится к нулевой отметке. Здесь особо актуальна проблема обеспечения контроля за техническим состоянием летательного аппарата.

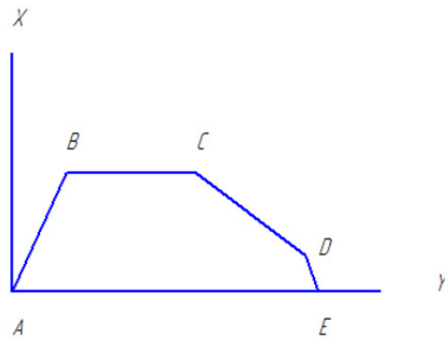


Рис. 1. График зависимости надежности конструкции от степени модернизации

Для обеспечения безопасности полета необходимо обеспечить контроль в режиме реального времени за состоянием конструкции, конструкционных материалов и рабочими параметрами оборудования. Кроме того, сделать качественный рывок в оптимизации технических характеристик отдельных систем и агрегатов, например двигателей (удельный расход топлива, полнота сгорания топлива, изменение габаритных размеров, применение новых конструкционных материалов, присадок к топливу повышающих КПД и т.п.), можно только при разностороннем и углубленном изучении процессов, происходящих во время работы двигателя в установившемся, форсированном и аэродинамическом режимах. Анализ собранных данных позволит повысить надежность конструкции, сократить расход топлива, повысить грузоподъемность, увеличить сроки эксплуатации и в результате уменьшить себестоимость обслуживания самолета. Но чтобы отследить и зафиксировать скоротечно протекающие процессы, необходимо оснастить летательный аппарат высокочувствительными датчиками давления, измерений напряжений, температуры, состава жидкостей, газоанализаторов, вибрации и т.д. В настоящее время данным требованиям отвечают контрольно-измерительные датчики на основе кристаллов из монокристаллического кремния.

Технологии МЭМС в развитии высокочувствительных сенсоров

Высокий темп развития технологий МЭМС позволяет при уменьшении габаритных размеров кристаллов увеличить чувствительность измерительных элементов к измеряемому параметру. Активно ведутся разработки многослойных кристаллов, объединяющих на своей поверхности функции измерения, обработки и передачи сигнала в цифровом формате. Ведутся интенсивные работы по усовершенствованию многослойных и гибких печатных плат с внедрением технологий получения новых видов полимерных и композитных материалов. В результате данных поисков уменьшаются габариты, повышается надежность печатных плат и в конечном итоге создаются предпосылки разработок малогабаритных изделий точного приборостроения. Это становится особенно актуально в настоящее время, когда постоянно совершенствуются и активно внедряются технологии БСС (беспроводной сенсорная сеть). Все вместе наработки позволяют разработать линейку датчиков для контроля различных параметров, обеспечивающих автоматизированный контроль за состоянием летательного аппарата, и разработать схему расположения датчиков с охватом даже самых труднодоступных мест. Причем датчики должны иметь высокую чувствительность к измеряемому параметру, малые габариты, возможность надежного крепления на поверхности без нарушения целостности материала объекта и возможность передавать информацию, используя протоколы радиочастотной связи, без укладки проводов. Учитывая сложные условия эксплуатации летательных ап-

паратов: резкие перепады температур, высокие механические нагрузки, радиационные излучения и т.п., увеличивается количество параметров, необходимых для разработки системы автоматизированного контроля, отображающей объемную картину технического состояния систем, отдельных агрегатов и корпуса аппарата в режиме реального времени. В ходе решения данной задачи возрастают требования к точности измерения параметров, скорости обработки и передачи информации на главный компьютер. Выполнение данных требований возлагается на высокоточные датчики. Малая погрешность измерения и высокая надежность датчика определяются качеством чувствительного элемента и печатной платы схемы обработки сигнала. Существует определенная закономерность в конструировании высокоточных датчиков: чем выше чувствительность измерительного элемента, тем выше точность измерения датчика. Пьезорезистивные чувствительные элементы обладают настолько высокой чувствительностью к механическим внутренним напряжениям контактирующих материалов, что разработчики датчиков сталкиваются с проблемой стабильности замеров. Для обеспечения высокой точности замеров и долгосрочной стабильности показаний датчика необходимо конструктивно защитить чувствительный элемент от влияния физико-механических изменений в окружающих материалах. Разработки новых классов конструкционных материалов позволяют эффективно решать возникающие проблемы. Современный уровень разработки новых поколений материалов на базе нанокomпонентов, технологии тонкопленочного напыления и высокоэффективного вакуумного оборудования расширяют возможности применения в приборостроении комбинации различных материалов, которые в конструкции будут взаимно улучшать свойства.

Сенсоры для автоматизированной системы контроля

Для разработки автоматизированной системы контроля за работой систем и состоянием конструкционных материалов летательного аппарата во время полета необходимо создать сеть объемного отображения характеристик отдельных блоков, узлов, трубопроводов и т.д. в режиме реального времени. Выполнить данное условие можно, поместив одновременно в определенных точках измерительные сенсоры замера группы параметров, например, давления, температуры, вибрации, перепад давлений, величину внутреннего напряжения материала или газоанализатор. Особую сложность представляет организация контроля за работой двигателей. Машинная обработка нескольких параметров одновременно даст возможность определить слабое звено на начальной стадии и своевременно принять меры. Таких сенсоров понадобится большое количество. Отсюда вытекают основные требования: малые габариты, минимальный вес, адаптация к использованию в составе беспроводной сенсорной сети и высокая чувствительность к измеряемому параметру. Высокая чувствительность позволяет проводить замеры давления, перепада давлений, скорости движения жидкости или газа в трубопроводе по давлению звука, а также определять координаты локальной разгерметизации корпуса по изменению внутренних напряжений в материале. Главное условие, чтобы для их установки не требовалось повреждать поверхность обшивки, трубопровода или корпусов блоков. Помочь могут пьезорезистивные сенсоры. Они обладают высокой чувствительностью за счет тензорезистивных свойств монокристаллического кремния и у них отсутствует зона нечувствительности измерения в начале шкалы измерения. Указанные свойства позволяют разработать конструкцию датчиков давления, деформации монтируемых методов наложения на поверхность трубы, емкости или конструкции корпуса. Технологии изготовления кристаллов пьезорезистивных чувствительных элементов отработаны и при серийном производстве обеспечивается низкая себестоимость. К недостаткам кремниевых структур можно отнести диапазон рабочих температур от -60 до $+125$ °C, что недостаточно для их установки на авиационных и ракетно-космических двигателях, где температуры достигают 900 °C. Повысить теплостойкость чувствительных элементов позволяют разработки функционального материала для высокотемпературных и радиационно-устойчивых структур: монокристаллический карбид кремния. Величина энергии связи между Si и C обеспечивает высокую термическую, радиационную и химическую стойкость как самому материалу, так и приборам на его основе [1]. Использование карбида кремния в изготовлении чувствительных элементов для контрольно-измерительных датчиков позволит уменьшить размеры кристалла и повысить механическую прочность.

Перспективные материалы для разработки перспективных сенсоров

Чувствительный элемент нуждается в защите от механических повреждений и воздействия окружающей среды. Эту функцию выполняют элементы конструкции датчика, которые как бы об-

волакивают чувствительный элемент слой за слоем. Причем материалы этих слоев подбираются с максимально близкими механическими характеристиками с целью минимизировать влияние локальных механических напряжений, возникающих в зонах соединений материалов, на погрешность измерения чувствительного элемента. В настоящее время конструкционными материалами являются нержавеющая сталь 12Х18Н10Т, алюминиевые сплавы или конструкционные пластмассы. Они способны обеспечить работоспособность датчика, но не соответствуют современным требованиям по габаритным размерам, массе, способам крепления в точках измерения, долговременной стабильности сигнала, технологиям передачи информации. Наступает время пересмотреть концепцию проектирования контрольно-измерительных датчиков. Ввиду широкого внедрения технологий получения композитных материалов, обладающих прочностными характеристиками, не уступающими металлам, но имеющим преимущества в удельном весе, простоте получения сложных конструкций малых форм и более низкой стоимости. Кроме того, стало возможным получать материалы с заданными свойствами: прозрачными для радиоволн, защитными от радиационного излучения, от теплового излучения и т.д. Преимущество композитных материалов заключается в объединении нескольких различных по своей структуре материалов в одну структуру со строго индивидуальными свойствами. А это меняет отношение разработчика к разработкам новых моделей контрольно-измерительных датчиков: позволяет изначально строить конструкцию, адаптированную на установку в конкретной точке конструкции летательного аппарата, т.е. не подбирать материалы, которые одновременно обеспечат заданные техническим заданием характеристики датчика и органически впишутся в конструкцию аппарата, а в ходе конструирования создавать материалы деталей, узлов датчика, которые не только позволят создать конструкцию, соответствующую требованиям внешнего вида, крепления на объекте, электросоединений, обмена информацией, но и повысить надежность датчика, долговременную стабильность выходного сигнала и точность измерения за счет подбора свойств материалов, соединяющихся между собой единицы сборки с близкими физико-механическими свойствами и позволяющими подобрать технологии соединений с минимальным уровнем образования внутренних механических напряжений. Эта особенность композитов играет ключевую роль в проектировании автоматизированных систем контроля и управления системами летательных аппаратов, где требуются тысячи датчиков, работающих в различных условиях и потому имеющих различные конструкции корпусов: с резьбовыми штуцерами на большие давления и механические нагрузки в гидро- и пневмосистемах, малогабаритные корпуса без штуцеров с креплением с помощью клеевого соединения на поверхности внутри летательного аппарата и тонкопленочные на базе гибких плат для установки на внешней поверхности летательного аппарата. В настоящее время имеются серьезные наработки композитных материалов, пригодных для использования в проектировании датчиков. На замену нержавеющей стали приходят интерметаллиды (химические соединения металлов), которые по своей структуре занимают промежуточное положение между металлом и керамикой, и углепластики. Интерметаллиды системы титан-алюминий интересны в узлах, где требуется герметичность и стабильность структуры при большом температурном диапазоне от -253 до $+850$ °С, резкие перепады давлений, глубокий вакуум, вибрационные нагрузки, радиационное воздействие. Подобная структура материала, кроме защиты от внешних воздействий, играет роль демпфера, нивелируя в своем объеме механические напряжения, возникающие в материалах, контактирующих со штуцером датчика. А вот для изготовления корпусов, которые выполняют роль защиты электронных компонентов схем обработки и передачи сигнала от чувствительного элемента, по своим свойствам наиболее подходят – углепластики, материалы, состоящие из полимерной матрицы и углеродных волокон, полученных из синтетических и природных волокон на основе целлюлозы, сополимеров акрилонитрила, нефтяных и каменноугольных пеков и т.д. В этой композиции прочностные характеристики на растяжение обеспечиваются в основном за счет углеродных волокон, а за прочность на сжатие и сдвиг и физико-химические свойства – связующее. Один из лучших на сегодняшний день вариантов связующего для композитных материалов – цианат-эфирные связующие. В ООО «Научно-исследовательский институт космических и авиационных материалов» разработали связующее НИИКАМ-РС и экспериментальные образцы нового адамантан-олигоциануратного типа. Испытания экспериментальных образцов показали, что коэффициент линейного температурного расширения (КЛТР) на 25 % ниже, чем эпоксидного связующего и на 12 % ниже, чем у НИИКАМ-РС. По показателям влагопоглощения, которые характеризуют размеростабильность образцов, эпоксидные связующие на порядок проигрывают цианат-эфирным. Отличительная особенность адамантан-

олигоциануратного связующего обоснована наличием в его мономерных звеньях фрагмента адамантана, повторяющего структурную решетку алмаза, что придает особую жесткость полимерным молекулам, температурную стойкость, также гидрофобность вследствие малой полярности [2]. Подобная комбинация материалов гарантирует стабильность геометрических размеров корпуса и защиту чувствительного элемента от воздействия радиационного излучения, химически агрессивной среды, механических повреждений и важная деталь, материал корпуса пропускает радиоволны и, следовательно, датчик может передавать и получать информацию по протоколам беспроводной связи. Данный материал также допустимо использовать для разработки малогабаритных корпусов, где не требуется герметичность. Для герметичных корпусов лучшим вариантом является керамика 22ХС и при необходимости отвода большого количества тепла бериллиевая керамика. Из керамики легко получают конструкции различной конфигурации. Спаи керамики и металла образуют герметичные выводы для передачи электрических сигналов. Датчики в данном исполнении удобно использовать в различных труднодоступных местах внутри летательного аппарата при минимальной доработке поверхности места установки, но для установки на наружной поверхности аппарата они имеют недопустимые размеры по толщине. Приповерхностные датчики должны размещаться в приповерхностном слое обтекаемого объекта на строго определенную высоту. Выступление датчика выше норматива даже на доли миллиметра может исказить величину измерения, а также попасть в зону тепловых или механических нагрузок, превышающих верхний предел допустимых нагрузок на датчик. В экспериментальных исследованиях хорошо зарекомендовали себя емкостные пленочные датчики. Но из всех физических параметров, контролируемых такими датчиками, наименее эффективно решается задача об измерении полей давления вблизи поверхности объекта [3]. Повысить эффективность измерений давления способны высокочувствительные пьезорезистивные чувствительные элементы. За последние десять лет технологии по выпуску кристаллов для измерения давления позволили уменьшить габаритные размеры до 2×2 мм и толщины до 200 мкм, а на кристаллах 4×4 мм формируются схемы обработки сигнала и передачи в цифровом виде [4]. Победить хрупкость кристаллов помогли технологии соединения отдельных кристаллов со стеклянной подложкой и напыления на кремний методом магнетронного напыления стекла толщиной до 50 мкм. Стеклянная подложка благодаря структуре стекла нивелирует внутренние напряжения в системе кремний-стекло и тем самым увеличивает прочность конструкции и уменьшает погрешность измерения [5]. Описанная конструкция чувствительного элемента обеспечивает адаптацию тщательно отработанной сотрудниками ЦАГИ технологии сборки и крепления пленочных датчиков на объекте [3] к технологии сборки пленочных датчиков на базе пьезорезистивных чувствительных элементов и микроэлектроники нового поколения: органической и печатной электроники [6].

Заключение

В статье проанализированы новые направления в разработках конструкционных материалов, позволяющие сблизить технологии МЭМС и точного приборостроения. Слияние данных технологий открывает путь к созданию новой отрасли в приборостроении: разработка и производство линейки высокоточных микродатчиков для авиационных и космических аппаратов. Набор подобных микродатчиков станет базой для отработки автоматизированных систем мониторинга рабочих параметров оборудования и обратной связи управления. Для обеспечения безопасности полета самостоятельная система мониторинга с контролем деформации материала корпуса, давления, состава воздуха, температуры и т.д. датчики можно частично объединить в беспроводную сенсорную сеть. Малые габариты и вес датчиков, а также частичный отказ от проводов позволят повысить грузоподъемность летательного аппарата.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке по гранту РФФИ №17-07-00689.

Библиографический список

1. Лучинин, В. В. Отечественный полупроводниковый карбид кремния: шаг к паритету / В. В. Лучинин, Ю. М. Таиров // Современная электроника. – 2009. – № 7. – С. 12–15.
2. Вихров, И. А. Адамантан-олигоциануратные связующие для размеростабильных углепластиковых конструкций космических аппаратов / И. А. Вихров, В. Ф. Аристов, Д. А. Гуров // Решетневские чтения. – Красноярск : Изд-во Сиб. гос. ун-та науки и технологий им. акад. М. Ф. Решетнева, 2015. – С. 91–93.

3. Исследование методов синтеза распределенных сенсорных систем по критерию минимизации сетевой нагрузки / А. А. Адамова, А. Н. Алфимцев, А. И. Власов, С. Г. Семенцов, Т. А. Цивинская, М. Н. Юлдашев. – Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. – 75 с.
4. Адамов, А. П. Методологические основы обеспечения технологичности электронных средств / А. П. Адамов, Г. Х. Ирзаев, А. А. Адамова. – Санкт-Петербург : Политехника, 2008. – 312 с.
5. Сергеева, С. Н. Конотрольно-измерительные МЭМС с использованием малогабаритных чувствительных элементов из монокристаллического кремния для аэрокосмической отрасли / С. Н. Сергеева, В. А. Шахнов, Т. А. Цивинская // Датчики и системы. – 2016. – № 2. – С. 32–39.
6. Адамов, А. П. Методы обеспечения надежности в беспроводных сенсорных сетях по критерию сетевой нагрузки / А. П. Адамов, А. А. Адамова, М. Н. Юлдашев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 1. – С. 197–199.

References

1. Luchinin V. V., Tairov Yu. M. *Sovremennaya elektronika* [Modern electronics]. 2009, no. 7, pp. 12–15. [In Russian]
2. Vikhrov I. A., Aristov V. F., Gurov D. A. *Reshetnevskie chteniya* [Reshetnev readings]. Krasnoyarsk: Izd-vo Sib. gos. un-ta nauki i tekhnologii im. akad. M. F. Reshetneva, 2015, pp. 91–93. [In Russian]
3. Adamova A. A., Alfimtsev A. N., Vlasov A. I., Sementsov S. G., Tsivinskaya T. A., Yuldashev M. N. *Issledovanie metodov sinteza raspredelennykh sensorykh sistem po kriteriyu minimizatsii setevoy nagruzki* [Research of methods of synthesis of distributed sensor systems by the criterion of network load minimization]. Moscow: MGТУ im. N. E. Bauman, 2017, 75 p. [In Russian]
4. Adamov A. P., Irzaev G. Kh., Adamova A. A. *Metodologicheskie osnovy obespecheniya tekhnologichnosti elektronnykh sredstv* [Methodological bases for ensuring the technological effectiveness of electronic means]. Saint-Petersburg: Politehnika, 2008, 312 p. [In Russian]
5. Sergeeva S. N., Shakhnov V. A., Tsivinskaya T. A. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2016, no. 2, pp. 32–39. [In Russian]
6. Adamov A. P., Adamova A. A., Yuldashev M. N. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2016, vol. 1, pp. 197–199. [In Russian]

Адамов Александр Петрович

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки Республики Дагестан,
кафедра микроэлектроники,
Дагестанский государственный
технический университет
(Россия, Республика Дагестан,
г. Махачкала, ул. Шамиля, д. 70)
E-mail: arinaadamova75@gmail.com

Адамова Арина Александровна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра проектирования и технологии
производства электронной аппаратуры,
Московский государственный технический
университет им. Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, 2-ая Бауманская, 5)
E-mail: arina.adamova@rambler.ru

Семенцов Станислав Григорьевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра проектирования и технологии
производства электронной аппаратуры,
Московский государственный технический
университет им. Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, 2-ая Бауманская, 5)
E-mail: siemens_off@mail.ru

Adamov Alexander Petrovitch

doctor of technical sciences, professor,
honored scientist of the Republic of Dagestan,
sub-department of microelectronics,
Dagestan State Technical University
(70 Shamil street, Makhachkala, Dagestan, Russia)

Adamova Arina Aleksandrovna

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of design and production technology
of the electronic equipment,
Bauman Moscow State Technical University
(5 2-ya Baumanskaya street, Moscow, Russia)

Sementsov Stanislav Grigorievich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of design and production technology
of the electronic equipment,
Bauman Moscow State Technical University
(5 2-ya Baumanskaya street, Moscow, Russia)

Образец цитирования:

Адамов, А. П. Современные материалы в конструкции датчиков для аэрокосмических аппаратов / А. П. Адамов, А. А. Адамова, С. Г. Семенцов // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 1 (29). – С. 84–90. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-1-10.

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS

УДК 004.75, 004.89

DOI 10.21685/2307-4205-2020-1-11

А. В. Маслобоев

СРЕДСТВА ПОДДЕРЖКИ ИНТЕРОПЕРАБЕЛЬНОСТИ СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ

A. V. Masloboev

INTEROPERABILITY SUPPORT FACILITIES FOR NETWORK-CENTRIC CONTROL SYSTEMS OF REGIONAL SECURITY

Аннотация. *Актуальность и цели.* Целью исследования является повышение эффективности функционирования и взаимодействия информационно-управляющих систем региональных ситуационных центров. *Материалы и методы.* Объектами исследования являются архитектура и технологии реализации сетевых систем информационно-управляющих систем ситуационных центров региона, ориентированных на решение задач управления региональной безопасностью, а также свойство интероперабельности этих систем. Рассмотрены проблемы и средства обеспечения интероперабельности распределенных информационных систем ситуационных центров на технологическом, семантическом и организационном уровнях взаимодействия. *Результаты и выводы.* Предложены технологические решения по обеспечению интероперабельности компонентов сетевых систем управления региональной безопасностью, основанные на сервис-ориентированном подходе и совместном использовании мультиагентных технологий и семантических моделей представления знаний. Это обеспечивает интеграцию системных компонентов в единую виртуальную сетевую среду и унификацию представления совместно используемых информационных ресурсов и сервисов, что способствует повышению эффективности управления региональной безопасностью на базе системы распределенных ситуационных центров.

Abstract. *Background.* The objective of our research is functioning and intercommunication efficiency enhancement of information-management system of the regional situational centers. *Materials and methods.* The subjects of inquiry are architecture and implementation technologies of the network-centric information system of situational centers of the region, oriented to regional security management problem-solving, as well as its interoperability characteristics. Interoperability support problems and facilities of the distributed information system of situational centers at technological, semantic and organizational interaction level are considered. *Results and conclusions.* Engineering solutions for component interoperability support of the network-centric control system of regional security based on service-oriented methodology and joint use of multi-agent technologies and knowledge representation semantic models are proposed. That provides system component integration within the unified virtual network-centric environment and representation unification of shared information resources and services that further regional security management efficiency enhancement on the basis of distributed situational centers.

Ключевые слова: сетевая система, управление, региональная безопасность, интероперабельность, архитектура, информационное взаимодействие, ситуационный центр.

Keywords: network-centric system, control, regional security, interoperability, architecture, intercommunication, situational center.

Введение

Стратегической задачей государственного значения является интенсификация широкомаштабных процессов автоматизации и информатизации различных отраслей экономики и жизнедеятельности населения страны на основе внедрения и комплексного использования новых информационно-аналитических систем и технологий обработки больших данных. В современных условиях темпы данных процессов определяют уровень развития цифровой экономики страны. В настоящее время важная роль в реализации государственных программ перехода к цифровой экономике и в решении проблем обеспечения национальной безопасности отводится системе распределенных ситуационных центров, функционирующих в режиме повседневной деятельности по единому регламенту взаимодействия. Эта система строится по сетевому принципу из разнотипных по своей структуре и ведомственной принадлежности ситуационных центров (СЦ) различного уровня – федерального, регионального, муниципального, отраслевого и корпоративного. Интеграция распределенных СЦ в единую систему и организация их взаимодействия на основе общих организационных и технических регламентов нацелены на совершенствование системы государственного управления и структуры обеспечения комплексной безопасности за счет проблемно-ориентированной информационно-аналитической поддержки принятия управленческих решений в условиях возникновения кризисных ситуаций в социально-экономической и военно-политической сферах развития страны.

Большинство СЦ, созданных в регионах страны, являются уникальными, как с точки зрения информационно-технологической архитектуры, так и программно-аппаратной реализации аналитического обеспечения ситуационного управления критически важными объектами региональной экономики. Вместе с тем сегодня наблюдаются потребности в проектировании новых и модернизации существующих СЦ, а также в их последующей интеграции и адаптации в рамках уже созданной сети СЦ. Это является серьезной проблемой, которая до сих пор остается недостаточно проработанной с научно-методической точки зрения, что на практике приводит к снижению эффективности управления социально-экономическими системами с использованием существующих и вновь создаваемых СЦ.

На этапе интеграции информационных и функциональных компонентов различных СЦ в рамках распределенной информационной среды возникает множество проблем, связанных с обеспечением их интероперабельности (совместимости) на концептуальном, модельном, программно-техническом и организационном уровнях детализации. Это порождает увеличение временных и ресурсных затрат на «стыковку» СЦ и адаптацию их инструментария к динамически меняющейся внешней среде, а также на корректировку системотехнических и методических ошибок, выявленных в процессе эксплуатации компонентов СЦ, и согласование форматов информационного взаимодействия.

Работа посвящена вопросам обеспечения интероперабельности компонентов ведомственных информационных систем и их интеграции в единую инфраструктуру региональных ситуационных центров на базе сетевого подхода, мультиагентных технологий и онтологий.

Основные понятия и определения

Под интероперабельностью в общепринятом смысле понимается способность к интеграции двух или более информационных систем или их компонентов в единую информационную среду (систему). Согласно утвержденному стандарту [1] при этом должны обеспечиваться обмен информацией между всеми элементами интегрированной среды и возможность использования информации, полученной в результате интеграции и обмена. Для обеспечения свойства интероперабельности гетерогенных систем на практике применяются современные стандарты информационно-коммуникационных технологий. Интероперабельность – это одно из свойств открытых систем [2].

Анализ отечественных и зарубежных исследований проблем интеграции распределенных информационно-управляющих систем для решения задач в разных областях, как в гражданской, так и

в военной сферах показывает, что интероперабельность является ключевым системообразующим принципом построения сетецентрических систем управления сложными объектами различной природы и масштаба – от технических до социально-экономических. Этот принцип служит основой современной концепции горизонтального и вертикального информационно-технологического сопряжения существующих и вновь создаваемых систем сетецентрического управления, предназначенных для реализации перспективных государственных проектов и программ в области цифровой экономики, промышленности, энергетики, космосе, здравоохранении, транспорте, национальной безопасности и в других стратегических сферах.

Сетецентрическая система представляет собой объединение всех субъектов, объектов и средств управления в единое информационное пространство (виртуальную сетецентрическую среду управления), в рамках которой обеспечивается полная функциональная совместимость всех элементов, координация децентрализованного принятия решений и свободный обмен информацией на всех уровнях иерархии управления независимо от выполняемых элементами функций. Виртуальная среда ориентирована не только на интеграцию человеческих и технических ресурсов для задач управления, но и средств автоматизации получения, обработки и анализа информации для принятия решений в процессе управления, что обеспечивает повышение эффективности совместной деятельности субъектов управления и согласованное информационное взаимодействие между ними. Под взаимодействием понимается не только обмен информацией в системе для поддержания ситуационной осведомленности, но и выработка общей стратегии и координации совместных действий в интересах решения некоторой целевой задачи.

Базовые функции и структура типовой сетецентрической среды управления изложены в концепции Net-Centric Environment Joint Functional Concept [3]. Сетецентрические системы управления, согласно работе [4], характеризуются слабой иерархией в контуре принятия решений, способностью порождать цели внутри себя, а также открытостью и самоорганизацией. При этом достоинством сетецентрического способа управления по сравнению с иерархическим является то, что при таком подходе к управлению уменьшается совокупная ошибка принятия неверного решения в условиях неопределенности, что приводит к стабильности и способности системы адаптироваться к динамически изменяющейся внешней среде, а также обеспечивает рациональное распределение ресурсов в процессе децентрализованного управления системой.

В настоящей работе рассматривается система сетецентрического управления региональной безопасностью, построенная на базе сети СЦ региона. Региональные СЦ представляют собой комплексный инструмент ситуационного управления, обеспечивающий проблемный мониторинг, прогнозирование рисков и стратегическое планирование устойчивого социально-экономического развития региона для поддержки принятия эффективных управленческих решений как в стабильных условиях, так и в критических ситуациях.

Сетецентрическое управление региональной безопасностью заключается в реализации сетевой структуры организационного управления с выделенными управляющими СЦ, взаимодействие между которыми осуществляется на базе интеграции их компонентов (средств мониторинга, субъектов управления, исполнительных ресурсов и т.д.) в единое региональное информационное пространство [5]. СЦ региона как центры группового принятия решений (пункты ситуационного управления), являясь узлами сетецентрической системы управления региональной безопасностью, реализуются физически в определенной точке пространства, а также виртуально, когда отдельные компоненты СЦ локализованы на других узлах сети. При этом в процессе решения конкретной задачи управления центры принятия решений способны перемещаться между узлами виртуальной среды. Решение о миграции центра принимается на основе координирующих сигналов и оценки степени ситуационной осведомленности [6] всех участников процесса управления безопасностью.

Под ситуационной осведомленностью субъекта управления в СЦ понимается информация о проблемной ситуации, ориентируясь на которую при наличии необходимых у него ресурсов субъект получает возможность корректировать свое поведение и стратегию деятельности, координировать действия других участников процесса управления и тем самым влиять на функционирование объекта управления. Сеть большая, много решающих центров и всем требуется предоставить информацию, точно соответствующую ситуации. В связи с этим интероперабельность средств информационной поддержки СЦ во много определяет уровень ситуационной осведомленности на этапах выработки, реализации и контроля исполнения управленческих решений в условиях критических ситуаций.

Анализ проблем интероперабельности. Постановка задачи

Для региональных СЦ характерны следующие проблемы: ограниченная функциональность и изолированность используемых средств контроля и аналитической обработки возрастающего объема разноплановой информации о влиянии различных факторов на состояние региональных систем для управления рисками критических инфраструктур, а также необходимость координации взаимодействия пространственно-распределенных СЦ и обеспечения свойств гибкой масштабируемости и интероперабельности информационных систем СЦ. Решению этих проблем во многом препятствует смешение сфер интересов различных ведомств и организаций, участвующих в процессах управления региональным развитием через систему СЦ. Как правило, формат представления данных и регламент информационного обмена определяются локальными целями и функциональностью отдельных субъектов управления, а объем информации, необходимой для принятия решений, определяется исходя из требований к полноте знаний о критической ситуации, о состоянии функционирования объекта управления и о параметрах внешней среды. Перечисленные аспекты затрудняют совместное использование ресурсов для оценки ситуации и увеличивают время на коллективную выработку и согласование управленческих решений в критической обстановке.

Проблемы обеспечения интероперабельности информационных систем СЦ согласно эталонной модели интероперабельности [1] следует рассматривать на трех уровнях взаимодействия элементов этих систем – технологическом, семантическом и организационном (рис. 1), а также учитывать структуру взаимосвязей между ними.

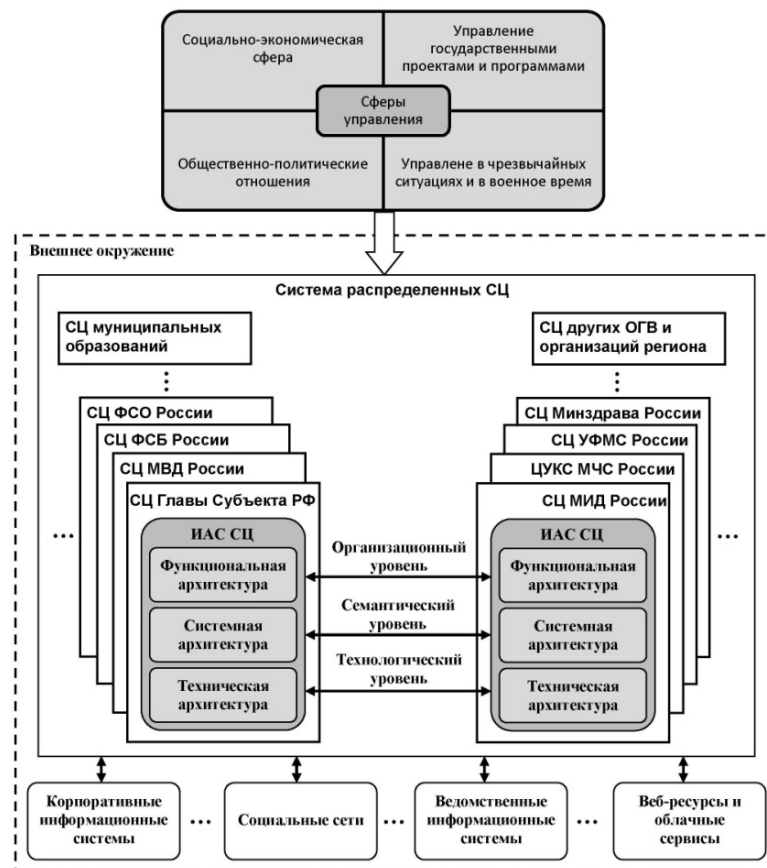


Рис. 1. Модель интероперабельности информационных систем СЦ:
ИАС – информационно-аналитическая система; ОГВ – органы государственной власти

Разнородность и территориальная распределенность субъектов управления безопасностью региона обуславливает технологическую и семантическую неоднородность сетевидной среды региональной безопасности. Для информационной поддержки СЦ управления региональной безопасностью характерна высокая степень не только технологической (использование различных форматов хранения, представления и обмена данными, разных СУБД и структур баз данных и т.д.),

но и семантической разнородности информационных ресурсов (использование профильными ведомствами собственных тезаурусов и регламентов, синонимия в именовании информационных объектов, использование различных оценочных шкал, и т.п.). Вместе с тем к работе в СЦ управления региональной безопасностью привлекаются специалисты/эксперты из разных предметных областей, использующие различную терминологическую базу и отличные ментальные модели одних и тех же понятий и процессов. Источником технологической неоднородности информационных ресурсов является организационная разнородность субъектов управления безопасностью, которые, как правило, к моменту начала совместной деятельности уже имеют и используют собственные, отличные по архитектуре и технологиям, информационные инфраструктуры. Эти особенности препятствуют развитию современной системы СЦ и созданию единой виртуальной среды для сетецентрического управления региональной безопасностью.

Еще одним обстоятельством, затрудняющим интеграционные процессы при построении виртуальной сетецентрической среды СЦ управления региональной безопасностью, является существование класса так называемых «унаследованных систем» – невзаимосвязанных гетерогенных информационных систем управления безопасностью. К ним относятся различного рода ведомственные и корпоративные информационные системы, информационно-аналитические системы СЦ, отдельные веб-сервисы и Интернет-ресурсы и т.д. Эти системы оперируют большим объемом разноплановой информации о различных аспектах региональной безопасности, объектах, процессах и событиях безопасности, инцидентах. При интеграции «унаследованных систем» в сетецентрическую среду технологическая разнородность ресурсов выражается в различных форматах хранения данных, различных технологиях создания ресурсов и, как следствие, различных способах организации пользовательской работы с ними. Семантическая разнородность заключается в использовании в рамках ресурсов различных семантических моделей, определяющих смысл содержащегося в них контента. В результате внешне (синтаксически) одни и те же понятия могут иметь различную смысловую нагрузку и, наоборот, одно понятие может обозначаться формально различными синтаксическими конструкциями, что затрудняет возможность унификации приемов оперирования информацией, содержащихся в данных ресурсах. Организационная разнородность подразумевает различную принадлежность и целеполагание при использовании информационных ресурсов, что порождает специфические проблемы регулирования доступа к информации. Все это требует обеспечения интероперабельности интегрируемых в рамках сетецентрической виртуальной среды региональной безопасности компонентов СЦ, ресурсов и сервисов для повышения эффективности систем поддержки принятия решений в этой сфере.

С учетом того, что ситуационная осведомленность лиц, принимающих решения, в сетецентрической системе управления формируется на основе восприятия элементов в окружающей среде, понимания ситуации и прогноза будущего состояния объекта управления, а также взаимного информационного обмена, на каждом уровне модели интероперабельности необходимо обеспечить:

1) использование общих протоколов, интерфейсов и форматов хранения, представления и обмена данными, единых технических регламентов совместного применения программно-аппаратных средств получения, обработки и анализа информации в рамках взаимодействия, стандартов обеспечения информационной безопасности – на уровне технологической интероперабельности;

2) способность взаимодействующих информационных систем СЦ однозначно понимать и корректно интерпретировать смысловые и содержательные аспекты полученной в процессе сбора и коммуникации информации о ситуации, проводить ее верификацию и комбинирование с другой уже имеющейся информацией в ходе совместной обработки, учет влияния человеческого фактора (психологических и культурных особенностей пользователей при работе с разными типами человеко-машинных интерфейсов) в рамках информационного обмена – на уровне семантической интероперабельности;

3) согласование параметров локальных целевых функций всех участников информационного обмена (субъектов управления) с общей глобальной целью взаимодействия региональных СЦ в зависимости от режима функционирования СЦ и ситуации в регионе, использование единых административных регламентов (договоров, соглашений и других нормативно-правовых документов), определяющих правила и обязанности субъектов и объектов информационного взаимодействия – на уровне организационной интероперабельности.

Таким образом, на основании вышесказанного можно заключить, что для достижения интероперабельности информационных систем СЦ на всех уровнях сетецентрического управления региональной безопасностью применение только согласованных наборов стандартов информационно-

коммуникационных технологий представляется необходимым, но недостаточным условием. Для получения ощутимого комплексного эффекта интероперабельность должна обеспечиваться на более высоких уровнях – семантическом и административном, связанных с восприятием, осмыслением и использованием информации в организационных контурах принятия решений. Разработка формальных процедур и средств обеспечения семантической и организационной интероперабельности в процессе координации информационного взаимодействия в сетевых системах управления является сложной задачей. Эта проблема еще до конца не решена, несмотря на ее острую актуальность для различных приложений.

При разработке средств обеспечения интероперабельности компонентов информационных систем СЦ в сетевых системах управления региональной безопасностью важную роль играет анализ архитектурных особенностей построения этих систем. Проектирование архитектуры осуществляется в трех взаимосвязанных измерениях – функциональном, системном и техническом, отражающих различные аспекты функционирования и взаимодействия информационных систем СЦ. Этим обеспечивается целостность и единообразие в формализации представления всех элементов, процессов и системы в целом.

Функциональная архитектура определяет объекты системы, их роль и функции в системе, задачи и порядок их информационного взаимодействия, эффект от коммуникации на разных уровнях системы.

Системная архитектура определяет средства информационной поддержки, необходимые для достижения цели функционирования, форматы представления данных, информационные модели и процессы обработки информации, связи между ресурсами системы.

Техническая архитектура определяет состав коммуникационной инфраструктуры системы – каналы связи, спецификации используемых технических средств обеспечения внутриуровневого и межуровневого взаимодействия между элементами системы, совокупность стандартов, протоколов и интерфейсов информационного взаимодействия систем, технические регламенты и рекомендации по эксплуатации отдельных элементов и подсистем внутри единой системы и при взаимодействии с другими системами внешнего окружения.

При решении комплекса проблем интеграции «унаследованных систем» в единую виртуальную сетевую среду необходимо сопоставлять основные параметры интероперабельности, заложенные в перечисленные типы архитектур, на начальной стадии проектирования информационных систем СЦ. К этим параметрам относятся: технико-экономические параметры, определяющие общие требования к информационно-технологической архитектуре системы и позволяющие оценить степень соответствия ее эксплуатационных возможностей и целей функционирования; внутренние и внешние параметры системы, определяющие релевантность передаваемых и обрабатываемых данных используемым программно-аппаратным средствам обработки и анализа информации и позволяющие установить зависимость эффективности информационного взаимодействия между компонентами системы от конкретных технологий их реализации, используемых протоколов или других технических решений; параметры сетевого взаимодействия, определяющие способ реализации информационного взаимодействия и степень соответствия системной архитектуры принятым стандартам и уровню развития технической архитектуры.

Нормативно-правовое обеспечение интероперабельности

К настоящему времени разработан ряд руководящих документов и методических рекомендаций по обеспечению интероперабельности в сетевых информационных системах как гражданского, так и военного назначения. Эти документы призваны стандартизировать модели и процессы интероперабельности и регламентируют механизмы их реализации в сетевых системах управления. Среди этих документов наибольшее внимание заслуживают следующие:

- Концепции по построению архитектуры Министерства обороны США – DODAF (DOD Architecture Framework);
- Концепция функционального объединения на основе сетевой среды NCE JFC (Net-Centric Environment Joint Functional Concept);
- Концепция оперативного интегрального объединения на основе сетевой среды NCOE JFC (Net-Centric Operational Environment Joint Integrating Concept);

- Стратегия построения сетецентрических объединений сил и средств в интересах Министерства обороны США (Department of Defense Net-Centric Services Strategy for a Net-Centric, Service Oriented DoD Enterprise);
- Стратегия перехода организаций Министерства обороны США к сетецентрической архитектуре (Department of Defense Enterprise Architecture Transition Strategy);
- Европейская концепция интероперабельности – EIF (European Interoperability Framework);
- Стандарты и профили интероперабельности НАТО – NISP (NATO Interoperability Standards and Profiles);
- Руководство по объединенной совместной интеграции и развитию систем – JCIDS (Joint Capability Integration and Development System);

- Концепция интероперабельности объединенных систем «Net Ready».

Вместе с тем международный консорциум NCOIC (Network-Centric Operations Industry Consortium) разработал ряд дополнительных методических рекомендаций в области интероперабельности систем сетецентрического управления:

- Рекомендации по обеспечению интероперабельности при проектировании организационно-технических систем NIF (NCOIC Interoperability Framework);
- «Основы сетецентрических систем» (Core Net-centric Principles);
- «Функциональные шаблоны для сетецентрических систем» (Operational Net-centric Patterns);
- «Средства анализа сетецентрических систем» NCAT (Network-Centric Analysis Tool);
- Белая книга по обеспечению информационной безопасности в сетецентрических системах (NCOIC White Paper on the Cybersecurity Landscape);
- Рекомендации по обеспечению интероперабельности в сложных сетецентрических системах с учетом аспектов управления, техники, экономики и культуры (NCOIC QuadTrangle).

Адаптация зарубежного опыта проектирования и разработки сетецентрических систем управления к российской специфике позволила также системно взглянуть на проблему интероперабельности и выработать концептуальные положения по ее решению в современных условиях. Эти положения легли в основу отечественных стандартов интероперабельности, среди которых следует отметить следующие:

- ГОСТ Р 55062-2012. Информационные технологии (ИТ). Системы промышленной автоматизации и их интеграция. Интероперабельность. Основные положения (2014 г.);
- ГОСТ Р 11354-1-2012. Усовершенствованные автоматизированные технологии и их применение. Требования к установлению интероперабельности процессов промышленных предприятий. Часть 1. Основа интероперабельности предприятий (2014 г.).

Разработка нормативно-технической базы для регулирования различных вопросов интеграции и обеспечения интероперабельности сетецентрических информационно-управляющих систем является отдельной самостоятельной задачей, сложность решения которой упирается в многоаспектность и несовершенство правового поля при позиционировании и использовании виртуальных сетецентрических систем как инструмента государственного управления.

Методы и подходы решения проблем интероперабельности

На сегодняшний день известно множество методов и технологий обеспечения различных аспектов интероперабельности распределенных систем. Однако эти средства применяются изолированно друг от друга и не увязаны в целостную методологическую систему. Все множество известных подходов к решению проблем интероперабельности на технологическом, концептуальном и организационном уровнях можно условно разделить на следующие категории [7]:

1) восходящий подход (подход «снизу – вверх»), который ориентирован, в первую очередь, на решение проблем технологической интероперабельности информационных систем путем использования общих стандартов и технологий передачи, хранения, представления и обработки информации на всех уровнях интеграции этих систем;

2) нисходящий подход (подход «сверху – вниз»), который сосредоточен на декомпозиции решения проблем интероперабельности с точки зрения архитектуры системы в целом, а затем с точки зрения отдельных подсистем и процессов вплоть до атомарных элементов;

3) общесистемный подход, основанный на анализе внутренних коммуникаций между компонентами внутри интегрированной системы и ориентированный на решение проблем интероперабельности путем формирования единой среды информационного взаимодействия между ними;

4) интерактивный подход, учитывающий характер сопряжения и взаимодействия различных систем между собой и внешней средой и ориентированный на достижение интероперабельности тех систем и их компонентов, уже имеющих различную технологическую реализацию и использующих отличные стандарты передачи, хранения, представления и обработки информации.

5) процессный подход, сосредоточенный на решении проблем интероперабельности с учетом идентификации, анализа и оптимизации полной группы технологических, организационных и организационно-технических факторов, запускающих на протяжении жизненного цикла систем различные процессы, влияющие на функционирование систем в целом и на изменение свойства их интероперабельности.

Выбор того или другого подхода зависит от функциональной разрозненности информационных систем, принципов их построения и технической реализации отдельных компонентов и других факторов.

Опираясь на идеологию перечисленных подходов и тот факт, что они зачастую применяются в комбинации для преодоления проблем интероперабельности, по мнению автора, эффективное решение задач интеграции технологически и семантически неоднородных совместно используемых информационно-вычислительных ресурсов СЦ в задачах информационной поддержки управления региональной безопасностью достигается на основе применения агентных технологий, программного обеспечения промежуточного слоя и онтологий. В исследовании [4] показано, что мультиагентные технологии [8] являются эффективным средством реализации сетецентрической системы СЦ управления региональной безопасностью. Это обусловливается тремя ключевыми факторами: высокой динамичностью структуры виртуальной среды взаимодействия субъектов управления, необходимостью координации децентрализованного принятия решений, а также учета человеческого фактора и организационных особенностей в процессе управления. Сетевые семантические модели представления знаний, в частности, онтологии [9] и концептуальное моделирование предметной области [10] являются эффективным средством описания и анализа семантики разнородных информационных ресурсов и сервисов. Решение проблемы семантической интероперабельности ресурсов СЦ основано на согласовании семантики через интеграцию онтологий ресурсов. Для интеграции онтологий используется дескриптивный подход [11], т.е. связывание онтологий посредством общего тезауруса, который является расширяемым. Этим обеспечивается возможность интеграции в виртуальную сетецентрическую среду новых ресурсов и компонентов без существенной перенастройки всей системы. Главная проблема интеграции онтологий – установление смысловой эквивалентности их концептов и разрешение возникающих семантических конфликтов. Для автоматизированной оценки степени смыслового соответствия пары концептов сравниваются их имена, структурное положение в онтологии и наборы необходимых и достаточных атрибутов.

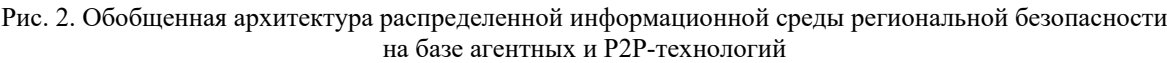
Практика показывает, что сетецентрические системы управления должны строиться только на принципах слабой связанности между компонентами. Технологическую основу слабосвязанных архитектур составляет программное обеспечение промежуточного слоя MOM (message-oriented middleware). Наиболее популярной современной разновидностью MOM являются веб-сервисы – программные системы, идентифицируемые строкой URL (Uniform Resource Locator), чьи общедоступные интерфейсы определяются на языках XML, JSON или YAML. Описание этих программных систем может быть найдено другими системами, которые могут взаимодействовать с ними согласно этому описанию посредством сообщений. На основе технологии веб-сервисов реализуются как системы с распределенной обработкой данных, так и с распределенным доступом и хранением информации. В последнем случае обеспечивается возможность децентрализованного администрирования серверных элементов информационной системы, что позволяет решать проблему организационной интероперабельности компонентов сетецентрических информационно-управляющих систем при совместном использовании и интеграции в них функционально разнородных элементов.

Архитектура сетецентрической виртуальной среды управления региональной безопасностью должна поддерживать использование в ее рамках унаследованных систем. Для этого необходимо организовать унифицированный доступ к информационным ресурсам и сервисам, используемым для решения задач управления, как к единому целому. Логическая интеграция этих ресурсов, с одной стороны, обеспечивает пользователя свободным доступом к семантически разнородным данным, хранящимся на различных технологически и организационно разнородных информационных серверах, а также прозрачный доступ к пространственно распределенным данным при реализации процедур автоматизированной обработки и анализа информации. При этом стоит отметить, что в условиях организационной разнородности субъектов управления и требований свободной расширя-

Требования к функциональности и эксплуатационным характеристикам подобной виртуальной сетевцентрической среды обуславливаются особенностями процессов управления региональной безопасностью. Эти требования приведены в табл. 1.

Требования к функциональности и архитектуре
информационной среды региональной безопасности (ИС РБ)

Исходя из табл. 1 и в соответствии с современными технологиями разработки распределенных систем с обозначенными характеристиками, виртуальная сетевая среда управления региональной безопасностью имеет гибридную одноранговую сервис-ориентированную архитектуру, общий вид которой показан на рис. 2.



Основная функциональность сетевцентрической системы управления реализуется узлами одноранговой сети (на рис. 2 – Peer), выполняющими также роль агентной платформы. Взаимодействие между агентами, функционирующими на узлах сети, симметрично: каждый из них может быть как источником информационного запроса, так и играть роль сервера, обслуживающего запрос со стороны другого агента.

Серверы 1-го и 2-го типов представляют в составе единой сетевцентрической среды СЦ существующие системы информационной поддержки управления региональной безопасностью. К первому типу относятся системы, не допускающие инсталляции на стороне сервера дополнительных программных модулей, реализующих агентов доступа к серверным данным. Для работы с серверами такого типа используются обычные механизмы и протоколы передачи запросов и получения результатов их обработки, например протокол HTTP. Согласование общесистемных форматов запросов и откликов, а также используемых схем данных осуществляется на стороне узла (Peer) в рамках интерфейса доступа к разнородным веб-ресурсам. Такой подход к интеграции унаследованных систем, очевидно, наиболее гибок, однако сопряжен с потенциально большей нагрузкой на коммуникационную сеть, так как исключает возможность предварительной обработки извлеченных данных на стороне сервера и отправки в рамках отклика более компактного результата. Второй тип сервера, напротив, допускает инсталляцию программного обеспечения агента доступа, осуществляющего все необходимые преобразования форматов данных и используемых схем локально, на стороне сервера, и взаимодействующего с другими агентами с использованием общесистемных коммуникационных протоколов и форматов данных.

Для решения проблем технологической интероперабельности неоднородных ресурсов на стороне информационных серверов СЦ используются программные адаптеры ресурсов (рис. 3), так называемые коннекторы. Адаптеры связывают интерфейсы прикладного программирования компонентов разнородных систем и обеспечивают согласование разных технологий хранения и представления данных на этапе их взаимодействия за счет реализации специфичных для каждого конкретного ресурса механизмов доступа и извлечения данных. Такие адаптеры и их функции определяются стандартом архитектуры для соединения серверов приложений JCA (Java EE Connector Architecture). Адаптеры ресурсов реализуют в том числе и алгоритм взаимодействия одноранговых узлов, основанный на спецификации JXTA (Juxtapose), имеющей статус стандарта де-факто. Применение REST-интерфейсов и стандартных протоколов обеспечивает возможность для привлечения к созданию программных адаптеров сторонних разработчиков.

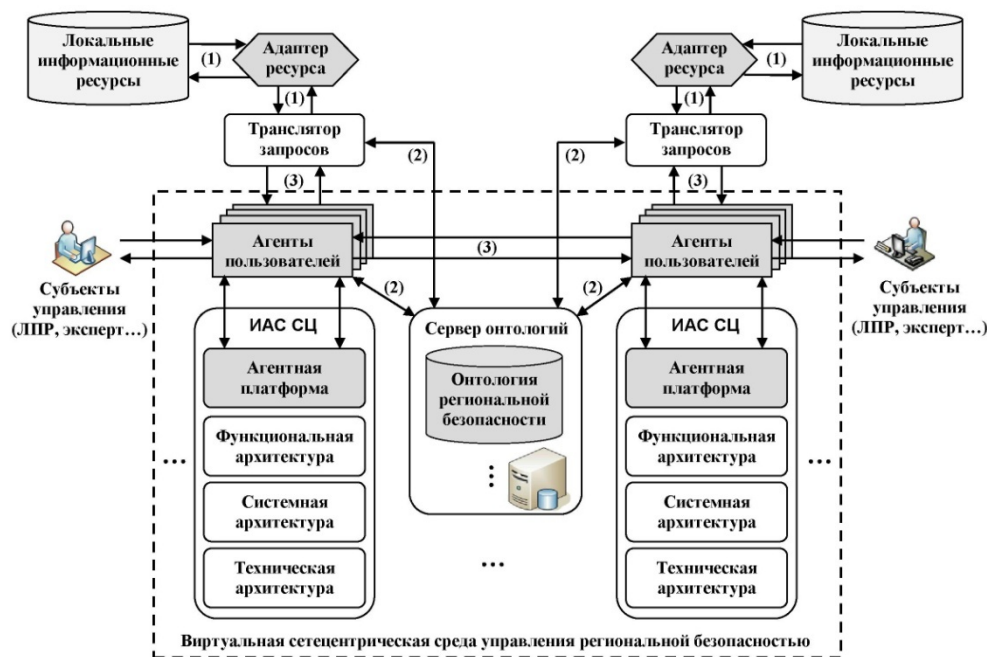


Рис. 3. Общая схема решения проблем интероперабельности ИАС СЦ региона на базе мультиагентного подхода и онтологий: ИАС – информационно-аналитическая система; ЛПР – лицо, принимающее решение; 1 – запросы и результаты в локальных терминах; 2 – согласование семантики локального и общесистемного представления; 3 – запросы и результаты в общесистемных терминах

Интерфейсные модули узлов системы, реализуемые на основе технологии веб-сервисов, описываются на языке WSDL, а в качестве коммуникационного протокола используется SOAP.

Для комплексного решения задач обеспечения семантической интероперабельности информационных систем СЦ региона разработана интегрированная онтологическая модель жизненного цикла угроз региональной безопасности [4] (позиционирована на рис. 3). Модель представляет собой разновидность неоднородной семантической сети. Отличительной особенностью данной модели является то, что в ней совмещаются формализованные модели предметной области «региональная безопасность» и исполнительной среды информационно-аналитической поддержки решения задач в этой предметной области. Модель обеспечивает как формальную основу для имитационного моделирования и автоматизации процессов управления региональной безопасностью, так и согласованное информационное взаимодействие ситуационных центров региона за счет автоматизированной обработки, унификации и интеграции семантически разнородных данных на стратегическом, тактическом и оперативном уровнях управления безопасностью. Это позволяет сформировать единое информационное поле ситуационной осведомленности для лиц, принимающих решения, в сетевцентрической системе управления региональной безопасностью.

Программная реализация модели выполнена в виде прикладной онтологии региональной безопасности. Онтология создана средствами языка онтологического моделирования OWL (*Web Ontology Language*) в инструментальной среде разработки онтологий Protégé. Созданная онтология содержит семь уровней таксономии и включает в себя более 500 классов, более 150 атрибутов, более 100 иерархических, ассоциативных и функциональных ограничений. Онтология имеет высокую степень детализации, что обеспечивает достаточную полноту концептуального описания объектов и задач обеспечения безопасности и связанных с ними информационных процессов. Так как агенты реализованы на платформе JADE, то для формирования моделей знаний агентов и обеспечения возможности агентов работы с разработанной онтологией использована специальная библиотека AgentOWL.

Для формирования интероперабельной сетевцентрической среды ситуационного управления региональной безопасностью предлагается использовать средства мультиагентной виртуализации в составе систем поддержки принятия решений СЦ региона. К этим средствам относятся мультиагентная исполнительная среда (система агентов и веб-сервисов) и семантическое пространство знаний (комплекс онтологических моделей предметных областей, для которых предназначены агенты, и сеть информационных ресурсов). Эти средства позволяют решать проблемы технологической и семантической интероперабельности на базе использования единых стандартов разработки мультиагентных систем и технологий Семантического Веба. Средства виртуализации и структурная схема, отражающая отличительные особенности подхода к построению интероперабельной сетевцентрической среды управления на базе автономных программных агентов от известных технологий, приведены на рис. 4. При таком подходе единая информационная среда для взаимодействия СЦ региона формируется в виде сети виртуальных центров управления для каждой области региональной безопасности. Преимущества виртуальных центров ситуационного управления по сравнению с традиционными СЦ представлены в табл. 2. Технически виртуальные центры управления реализуются как гибридные облачные сервисы с применением архитектуры IaaS (*Infrastructure as a service* – модель обслуживания по принципу инфраструктура как сервис) [12].

Интеграция предлагаемых решений с известными разработками в области обеспечения интероперабельности информационных систем позволит усилить эффект от совместного использования инструментов СЦ для различных задач ситуационного управления безопасностью, а также разрешить ряд противоречий, возникающих на практике при взаимодействии СЦ в условиях региональных кризисных ситуаций. Так, особое внимание заслуживает исследование [13], в котором подробно рассматривается российский и зарубежный опыт решения проблем интероперабельности разнородных сетевцентрических информационно-управляющих систем на основе разработанной в Институте радиоэлектроники им. В. А. Котельникова РАН модели интероперабельности в соответствии с ГОСТ Р 55062–2012 и совместного использования американских моделей LISI (*Levels of Information Systems Interoperability* – модель уровней интероперабельности информационных систем), SCOPE (*Systems, Capabilities, Operations, Programs, and Enterprises model for interoperability assessment* – модель оценки интероперабельности систем, возможностей, действий, программ и организаций) и концепции DODAF, а также предлагаются варианты сопряжения и адаптации этих моделей для оте-

чественных сетцентрических систем управления с учетом специфики их приложения. Представленные в работе результаты и критический анализ моделей интероперабельности сетцентрических систем [14–17] позволяют говорить о возможности комплексного решения проблем обеспечения интероперабельности информационных систем региональных СЦ в ближайшей перспективе.

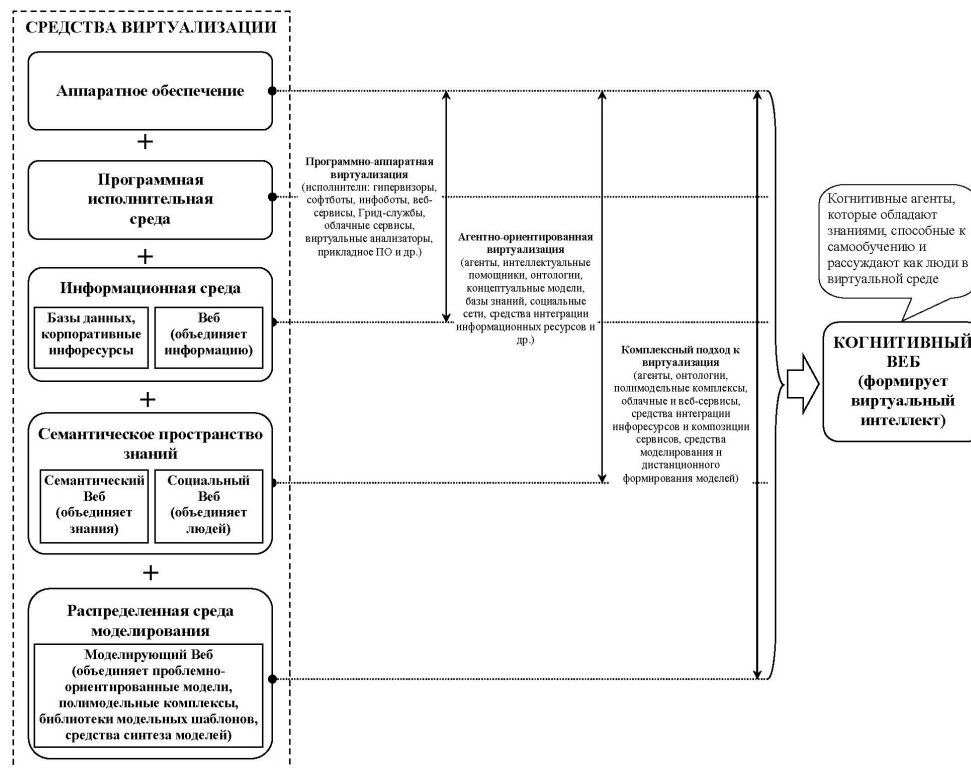


Рис. 4. Средства построения сетцентрической среды управления безопасностью региона на базе подхода мультиагентной виртуализации

Таблица 2

Преимущества виртуальных центров управления по сравнению с традиционными СЦ

Традиционный СЦ	Виртуальный центр управления
1	2
Физическая локальность, изолированность системы управления, централизация всех ресурсов в одной точке	Децентрализация субъектов управления и средств информационной поддержки, распределенный доступ к ресурсам и сервисам единой виртуальной среды
Сложность оперативного перераспределения ресурсов, сил и средств реагирования, а также формирования экспертных групп и координационных комиссий «под задачу» в условиях изменения кризисных ситуаций	Оперативная перенастройка и реконфигурация структуры и состава участников процессов обеспечения безопасности в динамических условиях обстановки, независимость локализации ситуации/объекта управления от средств мониторинга и контроля
Высокие затраты на приобретение специального оборудования, техническое сопровождение, аренду и охрану помещений	Относительно низкая стоимость развертывания/аренды облачной инфраструктуры, предоставляющей программно-аппаратные средства и специализированные сервисы субъектам управления СЦ
Централизованное администрирование и локальная настройка программно-аппаратных средств и коммуникационной инфраструктуры СЦ	Распределенное администрирование и гибкая настройка компонентов системы через общесистемный облачный интерфейс, предоставляющий унифицированный доступ к системе

Окончание табл. 2

1	2
Необходимость обеспечения конфиденциальности и контроля технических регламентов работы всех компонентов СЦ как в стабильных, так и в критических ситуациях	Информационная безопасность и защищенность компонентов СЦ обеспечивается ограниченным набором программно-технических средств администрирования и контроля доступа к ресурсам СЦ, а также надежными протоколами сетевого взаимодействия
Необходимость физического присутствия субъектов управления на территории СЦ в условиях возникновения кризисных ситуаций, временные затраты на формирование рабочих групп и комиссий под проблемную ситуацию	Оперативное согласование локальных планов и действий субъектов управления СЦ посредством переговорного процесса между их агентами в автономном режиме и алгоритмов динамического формирования проблемно-ориентированных коалиций агентов «под задачу»
Функционально фиксированный пользовательский интерфейс, зависящий от профиля деятельности и индивидуальных особенностей работы разнотипных субъектов управления СЦ	Интеллектуальный пользовательский интерфейс с возможностью автоматизированной когнитивной настройки под конкретную категорию пользователя СЦ в зависимости от входных данных о ситуации и его ситуационной осведомленности
Ограниченные возможности интеграции с другими СЦ, длительное согласование организационных и технических регламентов взаимодействия при подключении дублирующих или сторонних СЦ	Механизмы гибкой интеграции с другими СЦ в независимости от их архитектуры и уровней технической реализации, свободное подключение к сети новых СЦ и их компонентов
Относительная нормативно-техническая поддержка процесса эксплуатации СЦ на разных уровнях государственного управления	Несовершенство нормативно-правовой базы для внедрения виртуальных СЦ в систему государственного управления

Заключение

Рост сложности управления социально-экономическими системами в условиях высокой неопределенности и множественных рисков, с одной стороны, а также необходимость автоматизации и интеллектуализации средств управления этими системами в условиях перехода к цифровой экономике – с другой, обуславливают повышение требований к современной сетевцентрической системе СЦ, ориентированных на информационно-аналитическую поддержку принятия стратегических и оперативных управленческих решений на всех уровнях государственного и регионального управления. Вместе с тем проблему обостряет необходимость оперативной адаптации различных средств информационно-аналитической поддержки и обеспечения возможности их совместного использования в рамках существующей системы СЦ. Окончательное решение этой задачи пока еще не получено, и поэтому проблема обеспечения интероперабельности информационных систем региональных СЦ для нужд государственного управления и обеспечения безопасности является перспективной научно-технической задачей. Это связано сегодня с современными тенденциями в области интеграции проблемно-ориентированных информационных систем двойного назначения, а также с развитием и применением систем сетевцентрического управления для различных актуальных приложений в социально-экономической сфере.

Несмотря на то, что интеграция «унаследованных» информационных систем СЦ в единую виртуальную сетевцентрическую среду сопряжена с определенными трудностями, в работе предложены возможные пути решения проблемы обеспечения технологической, семантической и организационной интероперабельности компонентов этих систем. Улучшение этих решений может быть предметом будущих исследований и разработок. При этом для преодоления ограничивающих факторов интероперабельности технического характера с целью широкого использования всего функционала сетевцентрической системы СЦ целесообразно придерживаться единых подходов, основанных на отечественных и зарубежных методиках и открытых стандартах ИКТ, регламентирующих обеспечение функциональной совместимости компонентов сетевцентрических информационно-управляющих систем с учетом формирования профилей интероперабельности на уровне протоколов, интерфейсов и процессов в этих системах.

Результаты исследования будут использованы при реализации основных направлений государственной политики РФ в Арктике на период до 2035 г. в части разработки методов и средств поддержки принятия решений для информационно-аналитического обеспечения региональных ситуационных центров в Мурманской области.

Дальнейшие исследования направлены на совершенствование многоуровневой системы управления региональной безопасностью в части разработки новых технологий динамического конфигурирования сетцентрической среды управления безопасностью региона на концептуальном, виртуальном и организационном уровнях на базе современных стандартов интероперабельности и интеграции систем.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (тема НИР № 0226-2019-0035) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-29-03022-мк).

Библиографический список

1. ГОСТ Р 55062-2012. Информационные технологии. Системы промышленной автоматизации и их интеграция. Интероперабельность. Основные положения. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 12 с.
2. Технология открытых систем / под ред. А. Я. Олейникова. – Москва : Янус-К, 2004. – 288 с.
3. Net-Centric Environment Joint Functional Concept. – Washington : Department of Defense Washington DC, 2005. – 76 p.
4. Маслобоев, А. В. Информационное измерение региональной безопасности в Арктике / А. В. Маслобоев, В. А. Путилов. – Апатиты : КНЦ РАН, 2016. – 222 с.
5. Маслобоев, А. В. Модель и технология поддержки принятия решений в условиях сетцентрического управления региональной безопасностью / А. В. Маслобоев // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 2 (26). – С. 43–59.
6. Endsley, M. R. Final Reflections: Situation Awareness Models and Measures / M. R. Endsley // Journal of Cognitive Engineering and Decision Making. – 2015. – Vol. 9, № 1. – P. 101–111.
7. Systems, Capabilities, Operations, Programs, and Enterprises (SCOPE) Model for Interoperability Assessment. Version 1.0. – NCOIC, 2008. – 154 p.
8. Wooldridge, M. An Introduction to MultiAgent Systems. Second Edition / M. Wooldridge. – John Wiley & Sons, 2009. – 484 p.
9. Олейник, А. Г. Разработка онтологии интегрированного пространства знаний / А. Г. Олейник, П. А. Ломов // Онтология проектирования. – 2016. – Т. 6, № 4 (22). – С. 465–474.
10. Кузьмин, И. А. Распределенная обработка информации в научных исследованиях / И. А. Кузьмин, В. А. Путилов, В. В. Фильчаков. – Ленинград : Наука, 1991. – 304 с.
11. Ломов, П. А. Интеграция онтологий с использованием тезауруса для осуществления семантического поиска / П. А. Ломов, М. Г. Шишаев // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2009. – № 3. – С. 49–59.
12. Сухорослов, О. В. Интеграция вычислительных приложений и распределенных ресурсов на базе облачной программной платформы / О. В. Сухорослов // Программные системы: теория и приложения. – 2014. – Т. 5, № 4 (22). – С. 171–182.
13. Макаренко, С. И. Модели интероперабельности информационных систем / С. И. Макаренко, А. Я. Олейников, Т. Е. Черницкая // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – № 4. – С. 215–245.
14. Франгулова, Е. В. Классификация подходов к интеграции и интероперабельности информационных систем / Е. В. Франгулова // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2010. – № 2. – С. 176–180.
15. Куприянов, А. А. Сетцентрические военные действия и вопросы интероперабельности автоматизированных систем / А. А. Куприянов // Автоматизация процессов управления. – 2011. – № 3. – С. 82–97.
16. Зацаринный, А. А. Интероперабельность консолидируемых организационных систем / А. А. Зацаринный, С. В. Козлов, А. П. Шабанов // Проблемы управления. – 2017. – № 6. – С. 43–49.
17. Акаткин, Ю. М. Цифровая трансформация государственного управления: датацентричность и семантическая интероперабельность / Ю. М. Акаткин, Е. Д. Ясиновская. – Москва : ЛЕНАНД, 2019. – 724 с.

References

1. GOST R 55062-2012. *Informatsionnye tekhnologii. Sistemy promyshlennoy avtomatizatsii i ikh integratsiya. Interoperabel'nost'. Osnovnye polozheniya* [GOST R 55062-2012. Information technology.

- Industrial automation systems and their integration. Interoperability. Fundamentals]. Moscow: Standartinform, 2014, 12 p. [In Russian]
2. *Tekhnologiya otkrytykh sistem* [Open systems technology]. Ed. A. Ya. Oleynikov. Moscow: Yanus-K, 2004, 288 p. [In Russian]
 3. *Net-Centric Environment Joint Functional Concept*. Washington: Department of Defense Washington DC, 2005, 76 p.
 4. Masloboev A. V., Putilov V. A. *Informatsionnoe izmerenie regional'noy bezopasnosti v Arktike* [Information dimension of regional security in the Arctic]. Apatity: KNTs RAN, 2016, 222 p. [In Russian]
 5. Masloboev A. V. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2019, no. 2 (26), pp. 43–59. [In Russian]
 6. Endsley M. R. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*. 2015, vol. 9, no. 1, pp. 101–111.
 7. *Systems, Capabilities, Operations, Programs, and Enterprises (SCOPE) Model for Interoperability Assessment. Version 1.0*. NCOIC, 2008, 154 p.
 8. Wooldridge M. *An Introduction to MultiAgent Systems. Second Edition*. John Wiley & Sons, 2009, 484 p.
 9. Oleynik A. G., Lomov P. A. *Ontologiya proektirovaniya* [Design ontology]. 2016, vol. 6, no. 4 (22), pp. 465–474. [In Russian]
 10. Kuz'min I. A., Putilov V. A., Fil'chakov V. V. *Raspredeleennaya obrabotka informatsii v nauchnykh issledovaniyakh* [Distributed information processing in scientific research]. Leningrad: Nauka, 1991, 304 p. [In Russian]
 11. Lomov P. A., Shishaev M. G. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy* [Information technologies and computer systems]. 2009, no. 3, pp. 49–59. [In Russian]
 12. Sukhoroslov O. V. *Programmnye sistemy: teoriya i prilozheniya* [Software systems: theory and applications]. 2014, vol. 5, no. 4 (22), pp. 171–182. [In Russian]
 13. Makarenko S. I., Oleynikov A. Ya., Chernitskaya T. E. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Management, communication and security systems]. 2019, no. 4, pp. 215–245. [In Russian]
 14. Frangulova E. V. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser.: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Bulletin of the Astrakhan state technical University. Ser.: Management, computer engineering and Informatics]. 2010, no. 2, pp. 176–180. [In Russian]
 15. Kupriyanov A. A. *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya* [Automation of management processes]. 2011, no. 3, pp. 82–97. [In Russian]
 16. Zatsarinnyy A. A., Kozlov S. V., Shabanov A. P. *Problemy upravleniya* [Management problem]. 2017, no. 6, pp. 43–49. [In Russian]
 17. Akatkin Yu. M., Yasinovskaya E. D. *Tsifrovaya transformatsiya gosudarstvennogo upravleniya: datatsentrichnost' i semanticheskaya interoperabel'nost'* [Digital transformation of public administration: data-centricity and semantic interoperability]. Moscow: LENAND, 2019, 724 p. [In Russian]

Маслобоев Андрей Владимирович

доктор технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник,
Институт информатики и математического
моделирования,
Кольский научный центр
Российской академии наук
(Россия, Мурманская обл.,
г. Апатиты, ул. Ферсмана, 14)
E-mail: masloboev@imm.ru

Masloboev Andrey Vladimirovich

doctor of technical sciences, associate professor,
leading research,
Institute for Informatics and Mathematical Modeling,
Kola Science Centre of the Russian Academy
of Sciences
(14 Fersmana street, Apatity,
Murmansk region, Russia)

Образец цитирования:

Маслобоев, А. В. Средства поддержки интероперабельности сетевых систем управления региональной безопасностью / А. В. Маслобоев // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 1 (29). – С. 91–105. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-1-11.