

СОДЕРЖАНИЕ

К 90-ЛЕТИЮ ПРОФЕССОРА В. А. ОСТРЕЙКОВСКОГО	5
--	---

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

Северцев Н. А., Петровский В. С. ОСНОВОПОЛАГАЮЩИЕ ПОКАЗАТЕЛИ И ПАРАМЕТРЫ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ ФИНАНСОВЫЙ ЛИМИТ, КАК РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ И МОДЕЛЕЙ БЕЗОПАСНОСТИ, ЭФФЕКТИВНОСТИ, УСТОЙЧИВОСТИ И УПРАВЛЯЕМОСТИ РАЗВИТИЯ ФЛОТА И ЕГО ВООРУЖЕНИЯ.....	6
Борщев Н. О. ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАДАЮЩЕГО ТЕПЛОВОГО ПОТОКА КАК ФУНКЦИЯ ОТ ВРЕМЕНИ И КООРДИНАТЫ МЕТОДОМ ИТЕРАЦИОННОЙ РЕГУЛЯРИЗАЦИИ.....	15
Ширинкина Е. В. МЕХАНИЗМ ПРИМЕНЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ОБУЧЕНИИ	24
Михеев М. Ю., Прокофьев О. В., Хилал С. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОТРЕБНОСТИ В ИНФОРМАЦИОННОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ СИСТЕМЫ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ АЛЖИРА.....	31
Смагин В. А., Лавров Р. О., Литвиненко С. Ф. ОБОБЩЕНИЕ ПОНЯТИЯ РЕСУРСА НАДЕЖНОСТИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА Н. М. СЕДЯКИНА	40

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ И ПРОИЗВОДСТВО ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Агеев А. М., Буков В. Н. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПАРНОГО АРБИТРАЖА В ИЗБЫТОЧНЫХ КОМПЛЕКСАХ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ	48
--	----

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Нестеров М. Ю. КОМПЕНСАЦИЯ ДОПЛЕРОВСКОГО СМЕЩЕНИЯ РАДИОВЫСОТОМЕРА НА ВЫСОКОСКОРОСТНОМ НОСИТЕЛЕ.....	67
Ергалиев Д. С., Зуев Д. В., Кочетков А. А., Лысенко А. В., Кошелев Н. Д. МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ЗУБЧАТОГО СОЕДИНЕНИЯ ДЛЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ЗАМЕРА ТЯГИ ВИНТА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА	76

Дарьина А. Н., Прокопьев И. В.

ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМИ
ОБЪЕКТАМИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ..... 82

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Иванов А. И., Иванов А. П., Савинов К. Н., Еременко Р. В.

ВИРТУАЛЬНОЕ УСИЛЕНИЕ ЭФФЕКТА РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ
ПРИ ПЕРЕХОДЕ ОТ БИНАРНЫХ НЕЙРОНОВ К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ
Q-АРНЫХ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОНОВ 89

Борщев Н. О.

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ
ВЫСОКОПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ
ФАКТОРОВ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА..... 98

Бабкин А. В., Подольский А. Г., Прокофьев О. В., Савочкин А. Е.

РОЛЬ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ЦЕН
В ВЛИЯНИИ НА НАУЧНУЮ И НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКУЮ ПРОДУКЦИЮ ВОЕННОГО
НАЗНАЧЕНИЯ В ОБЕСПЕЧЕНИИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ГОСУДАРСТВА 110

Гурлев И. В., Маслобоев А. В., Малыгин И. Г.

СИТУАЦИОННАЯ ОСВЕДОМЛЕННОСТЬ О СОСТОЯНИИ ПОРТОВ
СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ТРАНСПОРТНОГО КОРИДОРА
В УПРАВЛЕНИИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ АРКТИКИ..... 120

Воронин Е. А.

ОЦЕНКА И ОПТИМИЗАЦИЯ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ РЕСУРСАМИ СТРАТЕГИЙ
РАЗВИТИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
И СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА В РОССИИ В УСЛОВИЯХ РЫНОЧНОЙ ЭКОНОМИКИ 135

Masloboev A. V., Tsygichko V. N.

A MULTI-LEVEL ORGANIZATIONAL SYSTEM ENGINEERING FRAMEWORK
FOR MANAGING REGIONAL SECURITY AND RESILIENCE..... 143

RELIABILITY AND QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

№ 4 (40) 2022

CONTENT

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

Severtsev N.A., Petrovsky V.S.

FUNDAMENTAL INDICATORS AND PARAMETERS THAT PROVIDE
A FINANCIAL LIMIT, SUCH AS THE DEVELOPMENT OF METHODS
AND MODELS OF SAFETY, EFFICIENCY, STABILITY AND MANAGEABILITY
OF THE DEVELOPMENT OF THE FLEET AND ITS WEAPONS.....6

Borshchev N.O.

PARAMETRIC IDENTIFICATION OF THE INCIDENT HEAT FLOW AS A FUNCTION
OF TIME AND COORDINATES BY ITERATIVE REGULARIZATION15

Shirinkina E.V.

THE MECHANISM OF APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN LEARNING24

Mikheev M.Yu., Prokofiev O.V., Helal S.

MODELING AND FORECASTING THE NEEDS FOR INFORMATION SUPPORT
OF THE HEALTH CARE SYSTEM OF ALGERIA.....31

Smagin V.A., Lavrov R.O., Litvinenko S.F.

GENERALIZATION OF THE CONCEPT OF RELIABILITY RESOURCE INFORMATION
AND MEASUREMENT SYSTEMS BASED ON THE PRINCIPLE OF N.M. SEDYAKIN.....40

DESIGN, CONSTRUCTION AND AIRCRAFT MANUFACTURING

Ageev A.M., Bukov V.N.

THE EFFECTIVENESS OF THE PAIRED ARBITRATION
IN REDUNDANT COMPLEXES OF ON-BOARD EQUIPMENT48

DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

Nesterov M.Yu.

COMPENSATION OF THE DOPPLER SHIFT OF THE RADIO ALTIMETER
ON A HIGH-SPEED CARRIER.....67

Ergaliev D.S., Zuev D.V., Kochetkov A.A. Lysenko A.V., Koshelev N.D.

MODELING AND CALCULATION OF GEAR JOINT FOR UNIVERSAL DEVICE
FOR MEASURING UAV PROPELLER THRUST76

Daryina A.N., Prokopyev I.V.

FAULT-TOLERANT CONTROL SYSTEMS FOR DYNAMIC SPECIAL-PURPOSE OBJECTS.....82

DIAGNOSTIC METHODS FOR ENSURING RELIABILITY AND QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

Ivanov A.I., Ivanov A.P., Savinov K.N., Eremenko R.V.

VIRTUAL ENHANCEMENT OF THE EFFECT OF PARALLELIZATION OF CALCULATIONS
IN THE TRANSITION FROM BINARY NEURONS TO THE USE OF Q-ARY ARTIFICIAL NEURONS 89

Borshchev N.O.

PARAMETRIC IDENTIFICATION OF THERMAL CONDUCTIVITY OF HIGHLY
POROUS MATERIALS UNDER THE INFLUENCE OF SPACE FACTORS 98

Babkin A.V., Podolsky A.G., Prokofiev O.V., Savochkin A.E.

THE ROLE OF THE INFORMATION AND ANALYTICAL PRICE MONITORING SYSTEM
IN INFLUENCING THE SCIENTIFIC AND SCIENTIFIC-TECHNICAL PRODUCTS
FOR MILITARY PURPOSES TO ENSURE STATE ECONOMIC SECURITY 110

Gurlev I.V., Masloboev A.V., Malygin I.G.

SITUATIONAL AWARENESS ON PORTS STATE OF THE NORTHERN SEA ROUTE
IN ENVIRONMENTAL SAFETY MANAGEMENT OF ARCTIC REGION 120

Voronin E.A.

EVALUATION AND OPTIMIZATION OF RESOURCE ENDOWMENT STRATEGIES
FOR THE DEVELOPMENT OF INDIVIDUAL INDUSTRIES
AND AGRICULTURE IN RUSSIA IN A MARKET ECONOMY 135

Masloboev A.V., Tsygichko V.N.

A MULTI-LEVEL ORGANIZATIONAL SYSTEM ENGINEERING FRAMEWORK
FOR MANAGING REGIONAL SECURITY AND RESILIENCE 143

К 90-ЛЕТИЮ ПРОФЕССОРА В. А. ОСТРЕЙКОВСКОГО

20 сентября профессору Владиславу Алексеевичу Острейковскому исполнилось 90 лет. Коллектив журнала искренне поздравляет со столь славным юбилеем нашего постоянного автора, члена редколлегии журнала и просто чудесного человека и ученого, желает долгих лет творческой деятельности.

Заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, доктор технических наук, профессор В. А. Острейковский родился 20 сентября 1932 г. в Москве. Годы учебы, военная служба, научные изыскания, преподавательская деятельность – во всех сферах проявился дар талантливого исследователя, наставника и учителя.

В. А. Острейковский окончил Краснознаменную военно-воздушную инженерную академию имени профессора Н. Е. Жуковского по специальности «Эксплуатация самолетов и авиадвигателей» в начале 50-х гг. прошлого века. После службы в стратегическом полку дальней авиации поступил адъюнктом в свою академию, где в 1964 г. защитил кандидатскую диссертацию, а также стал начальником кафедры эксплуатации специальной техники



Пермского высшего военного командно-инженерного училища ракетных войск.

Имеет 28 лет календарной выслуги, из них 21 год летной деятельности на самолете ТУ-95 МС. Полковник в отставке.

Надежность и безопасность сложных технических систем – область научных интересов профессора Острейковского. В 1975 г. он переезжает в Обнинск, где сразу возглавил факультет кибернетики Обнинского филиала МИФИ, а через шесть лет и кафедру автоматизированных систем управления. Докторскую диссертацию по проблемам теории надежности и безопасности применительно к летательным аппаратам и атомной энергетике он успешно защитил в 1984 г. В Обнинске он создал научную школу и воспитал целую плеяду учеников. А преподавательскую и научную деятельность ведет с 1964 г.

Почти четверть века ученый трудится в Сургутском госуниверситете. Активно занимается наукой, читает лекции и тщательно следит за физической активностью и здоровьем. Академик Международной академии информатизации, Академии науки и образования РАЕ, работает на кафедре информатики и вычислительной техники Политехнического института СурГУ. Коллеги и ученики ценят и уважают Владислава Алексеевича за интеллигентность, оптимизм, ценный совет. Значителен его вклад в развитие науки и высшего образования.

Он заведовал кафедрой информационно-вычислительной техники и автоматизированных систем управления, ныне – профессор кафедры. Преподает теорию надежности, а аспирантам – кибернетику и системный анализ.

На сегодняшний день им подготовлены 31 кандидат и 13 докторов наук. Из-под его пера вышло в свет около 550 работ, из них более двух десятков монографий, посвященных вопросам надежности и безопасности сложных систем. Владислав Алексеевич Острейковский – автор многократно переизданного учебника «Информатика», которым пользуются студенты вузов и средних технических учебных заведений всей России. За последние годы ученый также выпустил учебники по эксплуатации атомных станций, теории надежности, теории систем, технике разработки программ, теоретическим основам автоматизированного управления, теории катастроф и асимметрии внутреннего времени объектов сложных динамических систем.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

УДК 004.056:658(075)
doi:10.21685/2307-4205-2022-4-1

ОСНОВОПОЛАГАЮЩИЕ ПОКАЗАТЕЛИ И ПАРАМЕТРЫ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ ФИНАНСОВЫЙ ЛИМИТ, КАК РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ И МОДЕЛЕЙ БЕЗОПАСНОСТИ, ЭФФЕКТИВНОСТИ, УСТОЙЧИВОСТИ И УПРАВЛЯЕМОСТИ РАЗВИТИЯ ФЛОТА И ЕГО ВООРУЖЕНИЯ

Н. А. Северцев¹, В. С. Петровский²

¹ Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук
(Вычислительный центр им. А. А. Дородницына РАН), Москва, Россия

² ВПК «НПО машиностроения», Реутов, Московская обл., Россия

¹severs@ccas.ru, ²desnavp@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Представлена обобщенная методика с показателями и параметрами развития технологий, конструкций и необходимых финансов для модернизации и содержания флота на техническом и стратегическом уровне, адекватном существующим и прогнозируемым угрозам. Решаемая в рамках настоящей методики задача заключается в определении рационального боевого состава морских сил общего назначения (МСОН) и боевого оснащения в рамках заданных лимитов ассигнований на базе параметров и показателей опорного варианта их развития. *Материалы и методы.* Предлагаемая методика заключается в выполнении следующих мероприятий: задание начальных условий для проведения расчетов, таких как: декомпозиция системы вооружения МСОН, боевой состав на начало планового периода, динамика его деградации без учета мероприятий государственной программы вооружений (ГПВ), перечень и граничные уровни решения задач силами и средствами МСОН, потребный для этого боевой состав сил и средств флота, стоимостные параметры мероприятий ГПВ; формирование матрицы состояния сил и средств МСОН, исходя из начальных условий и условий на конец планового периода; определение рационального соотношения расходов на развитие морского ударного компонента и другие средства МСОН исходя из объемов ассигнований, выделяемых на МСОН в целом; решение оптимизационной задачи выбора рационального варианта трансформации потребного боевого (корабельного) состава МСОН под выделенный лимит ассигнований с формированием перечня основных мероприятий ГПВ на базе потребного (опорного) варианта; оценка последствий реализации развития МСОН в формате матрицы состояний. *Результаты.* Результатом применения методики является возможность формирования значений параметров, характеризующих систему вооружения МСОН, в том числе боевой состав морской ударной компоненты МСОН, а также значения показателей решения задач по флотам силами МСОН на конец программного периода. *Выводы.* Проведение указанных выше работ позволяет снизить общий объем ассигнований, выделенный на МСОН на программный период, в том числе по стадиям жизненного цикла. Основные программные мероприятия ГПВ обеспечивают полученные значения боевого состава флотов и достигаемые уровни решения задач, при этом значительно повышаются показатели устойчивости предлагаемого варианта развития морской ударной компоненты МСОН.

Ключевые слова: основополагающие показатели и параметры, финансовый лимит, морские силы общего назначения

Для цитирования: Северцев Н. А., Петровский В. С. Основополагающие показатели и параметры, обеспечивающие финансовый лимит, как развитие методов и моделей безопасности, эффективности, устойчивости и управляемости развития флота и его вооружения // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 4. С. 6–14. doi:10.21685/2307-4205-2022-4-1

FUNDAMENTAL INDICATORS AND PARAMETERS THAT PROVIDE A FINANCIAL LIMIT, SUCH AS THE DEVELOPMENT OF METHODS AND MODELS OF SAFETY, EFFICIENCY, STABILITY AND MANAGEABILITY OF THE DEVELOPMENT OF THE FLEET AND ITS WEAPONS

N.A. Severtsev¹, V.S. Petrovsky²

¹ Federal research center «Computer science and control» of RAS (Dorodnitsyn computer center of the Russian Academy of Sciences), Moscow, Russia

² VPK "NPO Mashinostroyeniya", Reutov, Moscow region, Russia

¹severs@ccas.ru, ²desnavp@mail.ru

Abstract. *Background.* The article presents a generalized methodology with indicators and parameters for the development of technologies, structures and the necessary finances for the modernization and maintenance of the fleet at a technical and strategic level that is adequate to existing and predicted threats. The problem to be solved within the framework of this methodology is to determine the rational combat composition of general-purpose naval forces (GPNF) and combat equipment within the given limits of appropriations based on the parameters and indicators of the basic variant of their development. *Materials and methods.* The proposed methodology consists in performing the following activities: setting the initial conditions for carrying out calculations, such as: the decomposition of the weapons system of the GPNF, the combat strength at the beginning of the planning period, the dynamics of its degradation without taking into account the activities of the state armaments program (SAP), the list and boundary levels for solving problems by the forces and means of the GPNF, required for this the combat composition of the forces and means of the fleet, the cost parameters of the SAP measures; formation of a matrix of the state of forces and means of the GPNF, based on the initial conditions, and conditions at the end of the planning period; determination of a rational ratio of expenses for the development of the maritime strike component and other means of the GPNF based on the amount of appropriations allocated to the GPNF as a whole; solving the optimization problem of choosing a rational option for transforming the required combat (ship) composition of the GPNF under the allocated appropriation limit with the formation of a list of the main activities of the SAP based on the required (reference) option; assessment of the consequences of the implementation of the development of the GPNF in the format of the state matrix. *Results.* The result of the application of the methodology is the possibility of forming the values of the parameters that characterize the system of weapons of the GPNF, including the combat composition of the marine strike component of the GPNF, as well as the values of the indicators for solving problems for the fleets by the forces of the GPNF at the end of the program period. *Conclusions.* Carrying out the above works allows to reduce the total amount of appropriations allocated to the GPNF for the program period, including by life cycle stages. The main program activities of the SAP provide the obtained values of the combat strength of the fleets and the achieved levels of problem solving, while significantly increasing the stability indicators of the proposed option for the development of the marine strike component of the GPNF.

Keywords: basic indicators and parameters, financial limit, general-purpose naval forces

For citation: Severtsev N.A., Petrovsky V.S. Fundamental indicators and parameters that provide a financial limit, such as the development of methods and models of safety, efficiency, stability and manageability of the development of the fleet and its weapons. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(4):6–14. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-4-1

Формализация задачи

С учетом изложенного замысла задача оценки влияния варианта программных мероприятий развития (ВППМ) на показатели системы вооружений морских сил общего назначения (МСОН) формализована следующим образом.

Дано [1]: $n = \overline{1, N}$ – множество задач, стоящих перед МСОН ВМФ; Π_n – показатели решения задач $\forall n = \overline{1, N}$; $f = \overline{1, F}$ – множество флотов; P_{nf} – признак участия f -го флота в n -й задаче $[0; 1]$; $r = \overline{1, R}$ – множество типов кораблей; M_{nfr}^{mp} – требуемое количество кораблей r -го типа в f -м флоте для решения n -й задачи $\forall n = \overline{1, N}$; $f = \overline{1, F}$; $r = \overline{1, R}$; $M_{nfr}^{\min}$ – минимально допустимое количество кораблей r -го типа в f -м флоте для решения n -й задачи $\forall n = \overline{1, N}$; $f = \overline{1, F}$; $r = \overline{1, R}$; M_{nfr}^{mek} – текущий боевой состав кораблей r -го типа в f -м флоте для решения n -й задачи $\forall n = \overline{1, N}$; $f = \overline{1, F}$; $r = \overline{1, R}$; M_r^{mek} – суммарный текущий боевой состав кораблей r -го типа на всех флотах $\forall r = \overline{1, R}$; $\bar{M}_r$ – количество кораблей r -го типа, находящихся в боевом составе на конец программного периода

из числа существующих на начало программного периода $\forall r = \overline{1, R}$; K_{nf}^{tr} – требуемое значение показателя решения n -й задачи на f -м флоте $\forall n = \overline{1, N}$; $f = \overline{1, F}$; $K_{nf}^{мд}$ – минимально допустимое значение показателя решения n -й задачи на f -м флоте $\forall n = \overline{1, N}$; $f = \overline{1, F}$; K_{nf}^{mek} – текущее значение показателя решения n -й задачи на f -м флоте $\forall n = \overline{1, N}$; $f = \overline{1, F}$; C_r^{cn} – средняя стоимость строительства одного нового корабля r -го типа $\forall r = \overline{1, R}$; C_r^{okp} – средняя стоимость НИОКР по созданию одного нового корабля r -го типа $\forall r = \overline{1, R}$; C_r^p – средняя стоимость ремонта данного корабля r -го типа $\forall r = \overline{1, R}$; $C_{выд}$ – объем ассигнований, выделяемых на развитие вооружения и военной техники (ВВТ) МСОН.

Требуется: при заданных ассигнованиях на развитие МСОН определить рациональный боевой состав и уровни решения задач, обеспечиваемые системой вооружения МСОН [2].

Допущения и ограничения, используемые при решении задачи [3]:

- Базовый вариант декомпозиции структуры системы вооружения МСОН на функциональные подсистемы основывается на подходе, принятом научно-исследовательскими организациями (НИО) Минобороны при научном обосновании проекта государственной программы вооружений (ГВП). Он включает морской ударный компонент – надводные корабли (далее – НК), подводные лодки (далее – ПЛ) и их вооружение, а также другие средства – морскую авиацию, береговые войска, автоматизированные системы управления (АСУ), средства связи, средства разведки, средства освещения обстановки, средства технического и тылового обеспечения [4].

- Потребный (опорный) вариант мероприятий по развитию ВВТ МСОН формируется НИО Минобороны заранее в рамках исследований по обоснованию проекта ГВП. При этом проводится уточнение и верификация значений показателей, используемых в частных методиках для уточнения параметров развития структурных элементов (функциональных подсистем) МСОН.

- В оптимизационных расчетах по методике задействуется только ударная компонента МСОН (НК и ПЛ). Определение рационального состава ВПМР под заданный лимит ассигнований в части других средств МСОН и их оценка осуществляется по «Методике оценки влияния ВПМР на показатели системы вооружения сил общего назначения» [5].

- При изменении (сокращении) объема ассигнований на развитие МСОН относительно потребного (опорного) уровня расходы на другие силы и средства МСОН изменяются пропорционально сокращению состава морской ударной компоненты через поправочные коэффициенты.

- Затраты на головные проекты НК и ПЛ учитывают мероприятия ГВП, направленные как на строительство их корпусов, так и на разработку необходимого вооружения. Указанные работы объединяются в виде комплексных целевых программ (далее – КВЦ) [6].

Учитывая изложенный замысел, порядок решения задачи оценки влияния ВПМР на показатели системы вооружения МСОН включает следующие этапы [7]:

1. Задается объем ассигнований на развитие МСОН – $C_{выд}$.
2. В рамках принятой декомпозиции системы вооружения МСОН определяется объем ассигнований на развитие морского ударного компонента:

$$C_{выд}^{уд} = C_{выд} K^{уд}, \quad (1)$$

где $K^{уд}$ – доля ассигнований на морской ударный компонент МСОН.

Для этой цели используется зависимость доли ассигнований на морской ударный компонент от соотношений выбранного и потребного объема ассигнований на развитие МСОН (рис. 1). Указанная зависимость может быть построена по результатам экспертных оценок, имитационного моделирования или на основании экстраполяции параметров потребного и опорных вариантов развития МСОН.

3. Объем ассигнований, направляемых на развитие других средств МСОН, при этом составит:

$$C_{выд}^{др} = C_{выд} - C_{выд}^{уд}. \quad (2)$$

Это значение является исходными данными для расчетов по «Методике оценки влияния ВПМР на показатели системы вооружения сил общего назначения» (в части номенклатуры ВВТ других средств МСОН).

4. Вычисляется требуемое количество M_r^{mp} кораблей r -го типа:

$$M_r^{tp} = \bar{M}_r + M_r^p + M_r^{okp} + M_r^{cn}, \quad (3)$$

где M_r^p – требуемое количество кораблей r -го типа, ремонтируемых за программный период; M_r^{okp} – требуемое количество головных проектов кораблей r -го типа, вводимых в боевой состав МСОН за программный период; M_r^{cn} – требуемое количество серийных кораблей r -го типа, вводимых в боевой состав МСОН за программный период.

5. Вычисляется требуемый объем ассигнований, необходимый для обеспечения в боевом составе МСОН требуемого количества кораблей r -го типа:

$$C_r^{tp} = M_r^p C_r^p + M_r^{okp} C_r^{okp} + M_r^{cn} C_r^{cn}. \quad (4)$$

6. Вычисляется требуемый объем ассигнований на развитие морского ударного компонента МСОН:

$$C_{tp}^{уд} = \sum_{r=1}^R C_r^{tp}.$$

7. Сравнивается требуемый $C_{tp}^{уд}$ и выделяемый $C_{выд}^{уд}$ объем ассигнований на развитие морского ударного компонента МСОН (рис. 1):

- если $C_{tp}^{уд} \leq C_{выд}^{уд}$, то переходим к формированию результатов;
- если $C_{tp}^{уд} > C_{выд}^{уд}$, то дефицит ассигнований составляет:

$$\Delta C = C_{tp}^{уд} - C_{выд}^{уд}. \quad (6)$$

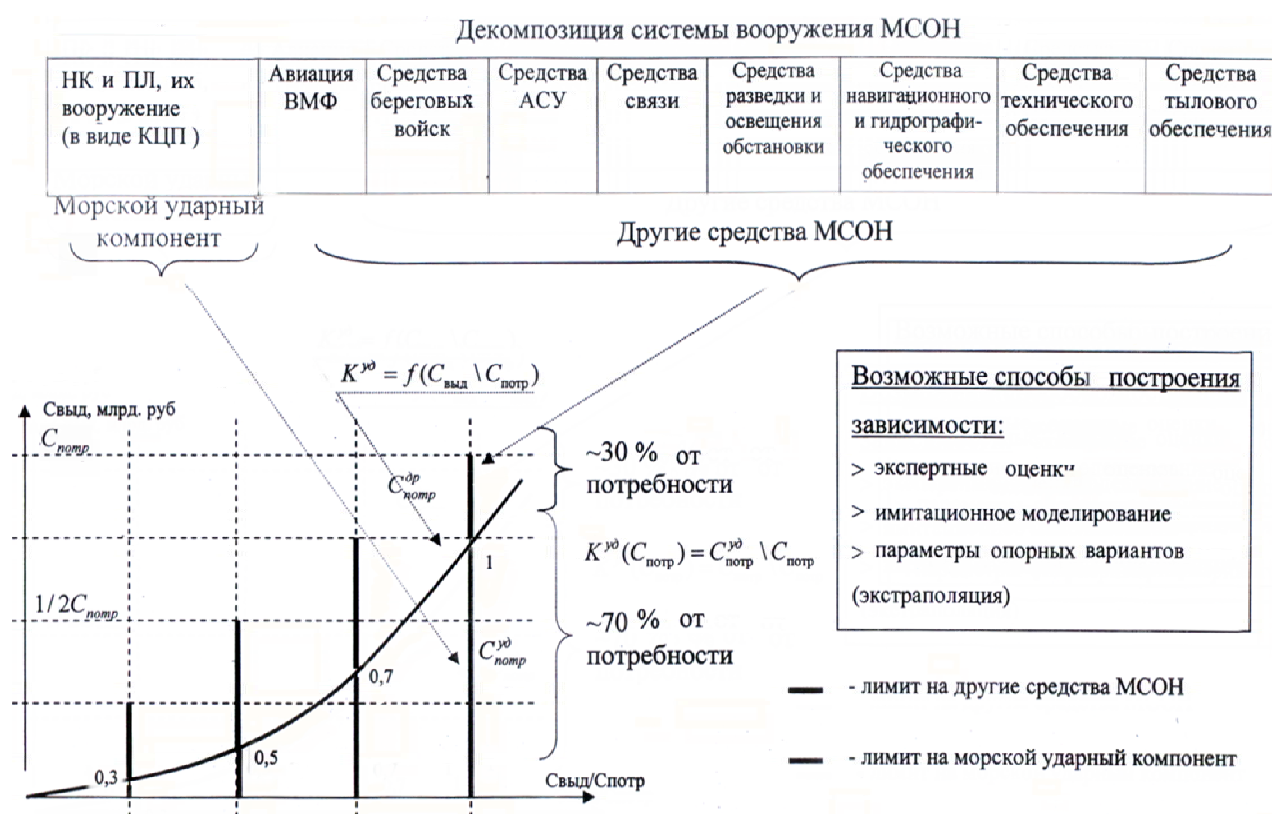


Рис. 1. Общий вид зависимости доли ассигнований на морской ударный компонент от соотношений выделенного и требуемого объема ассигнований на развитие МСОН

8. Распределение ΔC по типам кораблей с учетом (3) предполагает реализацию итерационной процедуры трансформации потребного боевого состава ударной компоненты МСОН под выделенный лимит ассигнований, в результате которой должны быть выполнены следующие условия [8]:

$$\Delta C = \sum_{r=1}^R \Delta C_r, \quad (7)$$

$$\text{т.е. } \Delta C = M_r^p C_r^p + M_r^{okp} C_r^{okp} + M_r^{cn} C_r^{cn}, \quad (8)$$

где M_r^p , M_r^{okp} , M_r^{cn} – количество ремонтируемых, создаваемых и серийно строимых кораблей r -го типа за плановый период соответственно.

Итерационная процедура включает три этапа [9].

На 1-м этапе формируется массив исходных данных, включающих:

- перечень задач, возлагаемых на морскую ударную компоненту МСОН, их приоритеты, потребности и минимально допустимые уровни решения;
- матрицы состояния сил и средств морского ударного компонента МСОН на конец планового периода, одна из которых характеризует потребный корабельный состав, а вторая – прогнозируемый в случае отсутствия мероприятий ГВП.

На 2-м этапе производится последовательное уменьшение значения показателя выполнения задачи с требуемого до минимально допустимого уровня, переходя от менее приоритетной задачи к более приоритетной. При этом на каждом переходе происходит сравнение выделенных лимитов ассигнований с ограничением вида (2), т.е. $C_{\text{выд}}^{\text{др}} = C_{\text{выд}} - C_{\text{выд}}^{\text{уд}}$.

Если на каком-либо шаге выполняется условие $\Delta C \leq C_{\text{выд}}^{\text{уд}}$, то осуществляется переход к этапу формирования результатов. Если уровень решения всех задач снижен до минимально допустимого, но при этом значение превышает лимит, то осуществляется переход к 3-му этапу [10].

По результатам этапа фиксируется боевой состав морской ударной компоненты, соответствующей минимально допустимому уровню решения всех задач МСОН.

На 3-м этапе проводится последовательный «отказ» от решения задач, возложенных на МСОН, начиная с наименее приоритетной задачи. При этом на каждом шаге выполняется сравнение ΔC и лимитов ассигнований $C_{\text{выд}}^{\text{уд}}$. При их равенстве итерационная процедура останавливается и проводится вывод результатов расчетов [11].

При реализации итерационной процедуры трансформации потребного боевого состава ударной компоненты МСОН под выделенный лимит ассигнований лицо, принимающее решение, имеет возможность задать дополнительные условия вида [12]:

$$\Delta M_r^{cn} \geq 0,3 M_r^{cn}, \quad (9)$$

которое содержательно означает необходимость обеспечения за плановый период обновления не менее 30 % корабельного состава ВМФ, что позволяет избежать «провалов» в боевом составе за гранью планового периода. При этом на каждом шаге процедуры производится проверка выполнения условия (9).

Алгоритм, реализующий изложенную процедуру трансформации потребного боевого состава ударной компоненты МСОН под выделенный лимит, включает следующие шаги [13]:

1. Задается Π_{nf} – приоритетность решения n -й задачи f -м флотом:

$$\forall n = \overline{1, N}; f = \overline{1, F};$$

$$U_{nfr} = K_{nfr}^{\text{тф}}. \quad (10)$$

2. Для $n = \overline{1, N}$ и $f = \overline{1, F}$ проводится поиск минимального элемента матрицы

$$\Pi_{nf} = \min \{ \Pi_{nf} \} = \Pi_{n^* f^*}^{\min}. \quad (11)$$

По номерам индексов матрицы определяется флот и задача, с которой начинается процедура трансформации.

3. Для $r = \overline{1, R}$, n^* и $f^*(P_{n^*f^*} = 1)$ значения показателя решения задачи уменьшаются на величину шага дискретности:

$$U_{n^*f^*r} = U_{n^*f^*r} - \Delta U_r. \quad (12)$$

Шаг дискретности вычисляется по формуле

$$\Delta U_r = 1 - e^{-(\Delta M_r / \Delta M_r^0)}, \quad (13)$$

где $\Delta M_r = 1, 2, 3, \dots$; ΔM_r^0 – количество кораблей r -го типа для решения n -й задачи с требуемым значением показателя $K_{nfr}^{t\Phi}$.

4. Проверяется выполнение условия: существует ли задача f^* флота, для решения которой требуется большее количество кораблей r -го типа, чем для решения n^* -й задачи. Если так, то п. 3 вычисляется для следующего типа кораблей ($r = r + 1$).

5. Текущий боевой состав f^* -го флота в r -м типе кораблей сокращается на величину ΔM_r .

6. Вычисляется значение максимально возможного сокращения дефицита ассигнований в r -м типе кораблей с учетом стадии жизненного цикла (СЖЦ):

$$\Delta M_{nfr}^{\min} \geq 0. \quad (14)$$

При невыполнении условия (14) выполняется шаг «3» этого алгоритма.

7. Проверяется выполнение условия:

$$\Delta M_r C^{cn} \geq \Delta C. \quad (15)$$

Если условие (15) выполняется, то процедура перебора завершается.

Если нет, то проверяется выполнение условия:

$$\Delta M_r C^p \geq \Delta C. \quad (16)$$

Если условие (16) выполняется, то процедура перебора завершается.

Если нет, то осуществляется переход к следующему шагу итерации:

$$\Delta N_r = \Delta N_r + 1 \text{ или } r = r + 1. \quad (17)$$

8. Если дефицит ассигнований сохраняется при достижении максимально допустимого сокращения количества кораблей f^* -го флота при решении n -й задачи, то осуществляется переход к анализу большей по приоритетности задачи:

$$\Pi_{nf} = \Pi_{n^*f^*}^{\min} + 1. \quad (18)$$

Алгоритм трансформации закончен.

В условиях, когда объемы финансирования программы кораблестроения являются весьма далекими от потребных и данная тенденция в обозримой перспективе сохраняется, поступательное развитие флота требует прогнозирования расходования средств с «прицелом» на более далекую, чем 10 лет, перспективу [14].

В методике в качестве условия, позволяющего избежать «провалов» боевого состава морской ударной компоненты в перспективе на 20–30 лет, использовано правило вида (9), означающее выбор лицом, принимающим решение, стратегии обновления за программный период не менее 30 % существующего корабельного состава. Вместе с тем это условие может быть не всегда выполнимым в силу ограниченности лимитов, выделяемых на развитие вооружения и военной техники [15].

Учитывая изложенное, в качестве показателя устойчивости предлагаемого к реализации варианта развития ударной компоненты МСОН в методике использован показатель доли построенных за программный период кораблей в общей численности боевого корабельного состава [16].

При обновлении боевого состава за программный период на 30 % и более развитие морской ударной компоненты МСОН следует считать устойчивой. При снижении доли вновь созданных кораблей до уровня 20–30 % считается, что это развитие имеет неустойчивый характер. Если же пока-

затель снижается до уровня менее 20 %, то имеет место деградация морской ударной компоненты МСОН [17].

Для оценки степени деградации в методике использован дополнительный параметр – коэффициент старения корабельного состава $K_{ст}$, определение которого основывается на распределении корабельного состава по срокам службы: менее 10, 11–20 и более 20 лет [18].

В методике приняты допущения, что для корабля, срок нахождения которого в боевом составе составляет 30 лет, значение $K_{ст} = 1$. В этом случае выделяются три временных диапозона и соответствующие им значения $K_{ст}$:

– диапазон от 0 до 10 лет – $K_{ст}^{Д1} = 0,165$;

– диапазон от 10 до 20 лет – $K_{ст}^{Д2} = 0,5$;

– диапазон более 20 лет – $K_{ст}^{Д3} = 0,835$.

Суммарный коэффициент старения корабельного состава в этом случае определяется выражением

$$K_{ст} = \frac{M_{Д1}K_{ст}^{Д1} + M_{Д2}K_{ст}^{Д2} + M_{Д3}K_{ст}^{Д3}}{M_{Д1} + M_{Д2} + M_{Д3}}, \quad (19)$$

где $M_{Д1}$, $M_{Д2}$, $M_{Д3}$ – количество кораблей, имеющих срок службы до 10, от 10 до 20 и более 20 лет соответственно.

Значение $K_{ст} > 0,7$ характеризует устойчивый (прогрессирующий) характер деградации боевого морского состава морской ударной компоненты МСОН.

Заключение

Таким образом, по результатам применения методики формируются значения следующих параметров, характеризующих систему вооружения МСОН:

- 1) боевой состав морской ударной компоненты МСОН на конец программного периода по типам кораблей;
- 2) достигаемые значения показателей решения задач по флотам силами МСОН на конец программного периода;
- 3) общий объем ассигнований, выделенный на МСОН на программный период, в том числе по стадиям жизненного цикла;
- 4) основные программные мероприятия ГВП, проведение которых в программный период обеспечивают полученные значения боевого состава флотов и достигаемые уровни решения задач;
- 5) показатели устойчивости предлагаемого к реализации варианта развития морской ударной компоненты МСОН.

Список литературы

1. Баранов Н. А., Северцев Н. А. Основы теории безопасности динамических систем. М. : РАН, ВЦ им. А. А. Дородницына, 2008. 237 с.
2. Ильичев А. В. Основы анализа эффективности и рисков целевых программ. М. : Научный мир, 2009. 326 с.
3. Дегтярев Ю. И. Методы оптимизации. М. : Сов. радио, 1980.
4. Северцев Н. А., Дарьина А. Н. Применение критериев подобия при ресурсной отработке сложных технических систем и изделий // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 4. С. 5–14.
5. Васильев Ф. П. Численные методы решения экстремальных задач. М. : Наука, 1989.
6. Могилевский В. Д. Формализация динамических систем. М. : Вузовская книга, 1999.
7. Акофф Р., Эмери Ф. О целеустремленных системах. М. : Сов. радио, 1974.
8. Бурков В. Н. Основы математической теории активных систем. М. : Наука, 1986.
9. Петухов Г. Б., Якунин В. И. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целенаправленных систем. М. : АСТ, 2006.
10. Острейковский В. А., Лысенкова С. А. Концепция современных подходов к уровням описания процессов старения структурно и функционально сложных критически важных систем с длительными сроками активного существования // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 3. С. 5–12.
11. Пригожин И. От существующего к возникающему. М. : Наука, 1985.
12. Серов М. И. Основы функциональной теории организационных систем. М. : Наука, 1972.
13. Васильев Ф. П. Численные методы решения экстремальных задач. М. : Наука, 1989.

14. Masloboev A. V., Masloboev V. A. Regulatory ensuring of the environmental safety in the Arctic region of Russia // Reliability and quality of complex systems. 2021. № 3. P. 98–108.
15. Акофф Р., Эмери Ф. О целеустремленных системах. М. : Сов. радио, 1974.
16. Бурков В. Н. Основы математической теории активных систем. М. : Наука, 1986.
17. Судаков Р. С. Матрицы, векторы и линейные экономические модели. М. : МГНУ им. В. П. Горячкина, 1998.
18. Половко А. М. Надежность, живучесть и безопасность технических систем. Л. : Знание, 1992.

References

1. Baranov N.A., Severtsev N.A. *Osnovy teorii bezopasnosti dinamicheskikh system = Fundamentals of the security theory of dynamic systems*. Moscow: RAN, VTs im. A. A. Dorodnitsyna, 2008:237. (In Russ.)
2. Il'ichev A.V. *Osnovy analiza effektivnosti i riskov tselevykh program = Fundamentals of the effectiveness and risks of target programs*. Moscow: Nauchnyy mir, 2009:326. (In Russ.)
3. Degtyarev Yu.I. *Metody optimizatsii = Optimization methods*. Moscow: Sov. radio, 1980. (In Russ.)
4. Severtsev N.A., Dar'ina A.N. Application of similarity criteria for resource testing of complex technical systems and products. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(4): 5–14. (In Russ.)
5. Vasil'ev F.P. *Chislennyye metody resheniya ekstremal'nykh zadach = Numerical methods for solving extreme problems*. Moscow: Nauka, 1989. (In Russ.)
6. Mogilevskiy V.D. *Formalizatsiya dinamicheskikh system = Formalization of dynamical systems*. Moscow: Vuzovskaya kniga, 1999. (In Russ.)
7. Akoff R., Emeri F. *O tselestremennyykh sistemakh = About purposeful systems*. Moscow: Sov. radio, 1974. (In Russ.)
8. Burkov V.N. *Osnovy matematicheskoy teorii aktivnykh system = Fundamentals of the mathematical theory of active systems*. М. : Nauka, 1986. (In Russ.)
9. Petukhov G.B., Yakunin V.I. *Metodologicheskie osnovy vneshnego proektirovaniya tselenapravlennykh protsessov i tselenapravlennykh system = Methodological foundations of external design of purposeful processes and purposeful systems*. Moscow: AST, 2006. (In Russ.)
10. Ostreykovskiy V.A., Lysenkova S.A. The concept of modern approaches to the levels of description of aging processes of structurally and functionally complex critical systems with long periods of active existence. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(3):5–12. (In Russ.)
11. Prigozhin I. *Ot sushchestvuyushchego k voznikayushchemu = From existing to emerging*. Moscow: Nauka, 1985. (In Russ.)
12. Serov M.I. *Osnovy funktsional'noy teorii organizatsionnykh system = Fundamentals of functional theory of organizational systems*. Moscow: Nauka, 1972. (In Russ.)
13. Vasil'ev F.P. *Chislennyye metody resheniya ekstremal'nykh zadach = Numerical methods for solving extreme problems*. Moscow: Nauka, 1989. (In Russ.)
14. Masloboev A.V., Masloboev V.A. Regulatory ensuring of the environmental safety in the Arctic region of Russia. *Reliability and quality of complex systems*. 2021;(3):98–108.
15. Akoff R., Emeri F. *O tselestremennyykh sistemakh = About purposeful systems*. Moscow: Sov. radio, 1974. (In Russ.)
16. Burkov V.N. *Osnovy matematicheskoy teorii aktivnykh system = Fundamentals of the mathematical theory of active systems*. Moscow: Nauka, 1986. (In Russ.)
17. Sudakov R.S. *Matritsy, vektory i lineynye ekonomicheskie modeli = Matrices, vectors and linear economic models*. Moscow: MGNU im. V.P. Goryachkina, 1998. (In Russ.)
18. Polovko A.M. *Nadezhnost', zhivuchest' i bezopasnost' tekhnicheskikh system = Reliability, survivability and safety of technical systems*. Leningrad: Znanie, 1992. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Николай Алексеевич Северцев

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник отдела управления
робототехническими устройствами,
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

Nikolay A. Severtsev

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

Владимир Степанович Петровский

кандидат технических наук,
главный научный сотрудник,
ВПК «НПО машиностроения»
(Россия, Московская обл., г. Реутов, ул. Гагарина, 33)
E-mail: desnavp@mail.ru

Vladimir S. Petrovsky

Candidate of technical sciences,
chief researcher,
VPK "NPO Mashinostroyeniya"
(33 Gagarina street, Reutov, Moscow region, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 15.02.2022

Поступила после рецензирования/Revised 14.03.2022

Принята к публикации/Accepted 11.04.2022

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАДАЮЩЕГО ТЕПЛОВОГО ПОТОКА КАК ФУНКЦИЯ ОТ ВРЕМЕНИ И КООРДИНАТЫ МЕТОДОМ ИТЕРАЦИОННОЙ РЕГУЛЯРИЗАЦИИ

Н. О. Борщев

Астрокосмический центр Учреждения Российской академии наук
Физического института имени П. Н. Лебедева, Москва, Россия
moriarty93@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассмотрен метод восстановления падающего теплового потока как функции от времени на примере виртуальной модели параллелепипеда. Цель данного метода состоит в отыскании глобального минимума параметрической величины теплового потока из задачи минимизации среднеквадратичной ошибки между теоретическим и экспериментальным полем температур в местах установки датчиков температур. *Материалы и методы.* Задачи такого типа являются некорректными из-за зашумленности или неоднозначности входных данных, таких как теплофизические свойства материалов, адекватность выбранной постановки «прямой» задачи теплообмена и т.д. Для этого в этой работе используется метод итерационной регуляризации для преодоления этой некорректности, где в качестве регуляризируемого параметра выступает номер итерации. Сама задача поиска глобального экстремума решается методом сопряженных направлений как наиболее точного метода первого порядка сходимости. *Результаты и выводы.* Разработан алгоритм параметрической идентификации.

Ключевые слова: граничная обратная задача теплопроводности, итерационная регуляризация, метод сопряженных направлений, базисная функция

Для цитирования: Борщев Н. О. Параметрическая идентификация падающего теплового потока как функция от времени и координаты методом итерационной регуляризации // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 4. С. 15–23. doi:10.21685/2307-4205-2022-4-2

PARAMETRIC IDENTIFICATION OF THE INCIDENT HEAT FLOW AS A FUNCTION OF TIME AND COORDINATES BY ITERATIVE REGULARIZATION

N.O. Borshchev

Astro Space Center Institutions of the Russian Academy
of Sciences P.N. Lebedev Institute of Physics, Moscow, Russia
moriarty93@mail.ru

Abstract. *Background.* The method of restoring the incident heat flow as a function of time is considered on the example of a virtual model of a parallelepiped. The purpose of this method is to find the global minimum of the parametric value of the heat flow from the problem of minimizing the root-mean-square error between the theoretical and experimental temperature field in the places where temperature sensors are installed. *Materials and methods.* Tasks of this type are incorrect due to the noise or ambiguity of the input data, such as the thermophysical properties of materials, the adequacy of the chosen formulation of the "direct" heat transfer problem, etc. To do this, this paper uses the method of iterative regularization to overcome this incorrectness, where the iteration number acts as the regularized parameter. The very problem of finding a global extremum is solved by the conjugate directions method, as the most accurate method of the first order of convergence. *Results and conclusions.* An algorithm of parametric identification has been developed.

Keywords: boundary inverse heat conduction problem, iterative regularization, conjugate directions method, basis function

For citation: Borshchev N.O. Parametric identification of the incident heat flow as a function of time and coordinates by iterative regularization. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(4):15–23. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-4-2

Введение

При проектировании теплового режима космических аппаратов необходимо иметь информацию о коэффициентах теплопереноса внутри материала, значения начально-граничных условий и источников тепловыделений. При моделировании теплового режима изделий ракетно-космической техники важным вопросом является адекватное задание его геометрических и теплофизических характеристик исходя из характерных приходящих тепловых нагрузках.

Отсюда следует, что определение падающей тепловой нагрузки на примере при совершении им механической работы является актуальной задачей в обеспечении штатного теплового режима изделия. Огромный вклад в развитие методов идентификации задач теплопроводности внесли такие известные личности, как Алифанов О. М., Ненарокомов А. В., Сенкевич Е. А., Формалев В. Ф.

Задача данной работы состоит в восстановлении падающего теплового потока от пространства и времени, конкретнее, в отыскании его параметризованных величин при их аппроксимации кусочно-постоянными базисными функциями [1–4], описывающими его зависимость от времени, а также линейно-непрерывными базисными функциями, описывающими его зависимость от температуры. На основе разработанного алгоритма на примере виртуальной тепловой модели образца про- извести апробацию данного метода.

Для этого сперва необходимо решить постановку «прямой» задачи прогрева изделия.

Постановка задачи исследования в приближении двумерного нагрева в ортотропном приближении [8–10] имеет следующий вид:

$$C(T) \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_{xx}(T) \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_{yy}(T) \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial y} \right] + q_w(\tau).$$

Граничные условия будут иметь вид, характерный для теплофизических испытаний в естественных условиях:

$$\lambda_{xx}(T) \frac{\partial T(0, y, \tau)}{\partial x} = q_{\text{пад}}(x, y, \tau) - \varepsilon(T) (\sigma T(0, y, \tau)^4 - T_{\text{ср}}^4) - \alpha_k(T(0, y, \tau)) (T(0, y, \tau) - T_{\text{ср}});$$

$$\frac{\partial T(l_x, y, \tau)}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial T(x, 0, \tau)}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial T(x, l_y, \tau)}{\partial y} = 0;$$

$$q_{\text{пад}}(T) \approx \sum_{m=1}^M q_{\text{пад}} N_m(x) N_m(\tau).$$

В данной постановке задачи введены следующие обозначения: $C_{\text{эф}}(T)$ – эффективная объемная теплоемкость материала, $\frac{\text{Дж}}{\text{К}}$; $\lambda_{xx}(T), \lambda_{yy}(T)$ – эффективная теплопроводность материала, $\frac{\text{Вт}}{\text{мК}}$; $T(x, y, \tau)$ – температура, К; σ – постоянная Стефана – Больцмана, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}$; q_w – объемный источник тепловыделения, задаваемый по известной циклограмме, Вт; $q_{\text{пад}}$ – падающий удельный тепловой поток, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$; $\alpha_k(T(0, y, \tau))$ – коэффициент теплоотдачи материала к окружающей среде, $\frac{\text{Вт}}{\text{К} \cdot \text{м}^2}$.

Зависимость, по которой вычисляется коэффициент теплоотдачи, имеет следующий вид:

$$\alpha_k(T) = Nu_l(T) \frac{\lambda_b(T_c)}{l_{\text{эф}}},$$

где λ_b – коэффициент теплопроводности воздуха, $\frac{\text{Вт}}{\text{мК}}$; $l_{\text{эф}}$ – характерный размер (размер, вдоль которого движется тепловой конвективный поток, м; T_c – температура окружающей среды, К; $Nu_l(T)$ – критерий Нуссельта.

Схематичный вид объекта исследований представлен на рис. 1.

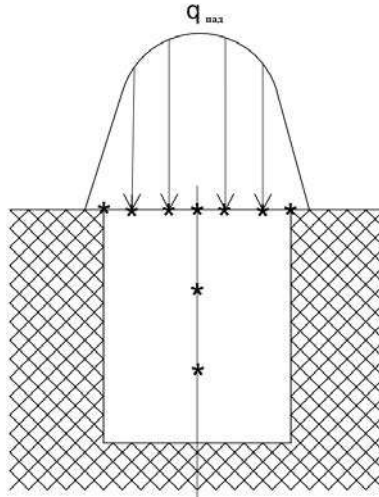


Рис. 1. Схематичный вид объекта исследований (звездочками показаны места расположения термодатчиков)

Представим восстанавливаемый падающий удельный тепловой поток в виде

$$q_w(T) \approx \sum_{m=1}^M q_w N_m(T),$$

где $N_m(T)$ – базисные функции, описывающие зависимость падающего теплового потока от координаты. В данной работе для координатной зависимости используются линейно-непрерывные базисные функции, имеющие следующий вид:

$$x = \begin{cases} \frac{x - x_0}{x_m - x_0}, & x \leq x \leq x_m; \\ \frac{x_l - x}{x_l - x_m}, & x_m \leq x \leq x_l. \end{cases}$$

Для временной зависимости используются кусочно-постоянные базисные функции, имеющие следующий вид:

$$N_m(\tau) = \begin{cases} 1, & T < T_{m-1}, \\ 0, & T > T_m, \quad m = 1, M. \end{cases}$$

Рассмотрим восстановление искомых характеристик на основе среднеквадратичного функционала невязки между теоретическим и экспериментальным полем температур [12–17]:

$$S(q_{\text{пад}}) = \frac{1}{2} \int_0^{\tau_{\text{max}}} \sum_{m=1}^M [T(q_{\text{пад}}) - \tilde{T}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{\tau})]^2 d\tau.$$

В работе используется метод безусловной минимизации функционала $S(q_{\text{пад}})$ с помощью метода сопряженных градиентов [14, 15] как наиболее точного метода первого порядка точности, позволяющего достичь требуемой сходимости за минимальное число итераций.

Последовательный алгоритм метода сопряженных градиентов можно представить в следующем виде на примере параметризованного коэффициента теплопроводности:

$$q_{\text{пад}}^{n+1} = q_{\text{пад}}^n + \Delta q_{\text{пад}}^{n+1},$$

где $\Delta q_{\text{пад}}^{n+1} = -\beta_k p^{(n)}$;

Направление спуска определяется из

$$\vec{p}^n = \text{grad}S(q_{\text{пад}}^n) + \beta_n \vec{p}^{n-1}; \quad \beta_0 = 0, \quad p^{(0)} = \text{grad}S(q_{\text{пад}}^{(0)}); \quad \beta_n = \frac{|\text{grad}S(q_{\text{пад}}^{(n)})|^2}{|\text{grad}S(q_{\text{пад}}^{(n-1)})|^2}.$$

Критерием останова итерационного процесса является выражение:

$$\left| \text{grad} S(q_{\text{пад}}^{(0)}) \right| = \sqrt{\sum_{p=1}^3 \left[\frac{\partial S(q_{\text{пад}}^{(n)})}{\partial q_{\text{пад}}} \right]^2} \leq \delta_{\text{sum}},$$

где δ_{sum} – погрешность входных данных, вычисленная в той же метрике, что и целевой функционал;

$$\delta_{\text{sum}} = \delta_a + \delta_f + \delta_{\text{окр}} + \delta_x,$$

где δ_f – погрешность входных температур, определяемая следующими выражением:

$$\delta_f = \int_0^{\tau_{\text{max}}} \sum_{i=1}^M \delta_L(\tau) d\tau.$$

Градиент целевого функционала имеет вид

$$\text{grad} S(q_{\text{пад}}^{(n)}) = \int_0^{\tau_{\text{max}}} \sum_{m=1}^M [T(q_{\text{пад}}) - \tilde{T}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{\tau})] \frac{\partial T(q_{\text{пад}})}{\partial q_{\text{пад}}} d\tau.$$

Для поиска компоненты градиента целевого функционала достаточно продифференцировать искомую постановку «прямой» задачи прогрева по параметрическому значению падающего теплового потока в каждом временном блоке. Получим

$$\begin{aligned} \frac{\partial C(T)}{\partial T} \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial \tau} w(x, y, \tau) + C(T) \frac{\partial \omega(x, y, \tau)}{\partial \tau} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_{xx}(T) \frac{\partial \omega(x, y, \tau)}{\partial x} + \omega(x, y, \tau) \frac{\partial \lambda_{xx}(T)}{\partial T} \right] + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_{yy}(T) \frac{\partial \omega(x, y, \tau)}{\partial y} + \omega(x, y, \tau) \frac{\partial \lambda_{yy}(T)}{\partial T} \right]. \end{aligned}$$

Граничные условия будут иметь следующий вид, характерный для низковакуумных испытаний:

$$\begin{aligned} \omega(0, y, \tau) \frac{\partial \lambda_{xx}(T)}{\partial T} + \lambda_{xx}(T) \frac{\partial \omega(0, y, \tau)}{\partial x} &= \sum_{m=1}^M N_m(x) N_m(\tau) - 4\epsilon(T) \sigma T(0, y, \tau)^3 \omega(0, y, \tau) + \\ &+ \omega(0, y, \tau) \frac{\partial \epsilon(T)}{\partial T} \sigma T(0, y, \tau)^4 - [\alpha_k(T(0, y, \tau)) \omega(0, y, \tau) + \frac{\partial \alpha_k(T(0, y, \tau))}{\partial T} \omega(0, y, \tau)]; \\ \frac{\partial \omega(l_x, y, \tau)}{\partial x} &= 0; \quad \frac{\partial \omega(x, 0, \tau)}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial \omega(x, l_y, \tau)}{\partial x} = 0. \end{aligned}$$

Данная постановка задачи решается конечно-разностным методом явной схемы, где конечно-разностная аппроксимация температур в узлах уже известна из решения «прямой» задачи прогрева.

Для нахождения шага спуска, исходя из метода итерационной регуляризации [16–19], запишем выражение целевого функционала на следующей итерации:

$$\begin{aligned} S(q_{\text{пад}} + \Delta q_{\text{пад}}) &= S(q_{\text{пад}}) - \alpha_{\text{сп}} \left[\frac{\partial S(q_{\text{пад}})}{\partial q_{\text{пад}}} \right]^2; \\ S(q_{\text{пад}} + \Delta q_{\text{пад}}) &= \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \int_0^{\tau_{\text{max}}} \left[T(q_{\text{пад}}) - \alpha_{\text{сп}} \frac{\partial T(q_{\text{пад}})}{\partial q_{\text{пад}}} \right]^2 - \tilde{T}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{\tau}) d\tau. \end{aligned}$$

Откуда согласно принципу глобального минимума необходимо и достаточно приравнять полученное выражение к нулю и выразить шаг спуска. Получим

$$\alpha_{\text{сп}} = \sum_{m=1}^M \int_0^{\tau_{\text{max}}} \frac{T(q_{\text{пад}}) - \tilde{T}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{\tau})}{\frac{\partial T(q_{\text{пад}})}{\partial q_{\text{пад}}}} d\tau.$$

Таким образом, данный алгоритм включает в себя следующую последовательность действий:

- 1) задание начального приближения теплового падающего потока;
 - 2) решение «прямой» задачи прогрева конструкции в одномерном приближении, моделируя условия наземной тепловой обработки изделия;
 - 3) получение виртуального (экспериментального) температурного поля изделия в местах установки датчиков температур;
 - 4) составление среднеквадратичной интегральной ошибки между теоретическим и экспериментальным температурным полем в местах установки датчиков температур;
 - 5) решение сопряженной задачи по поиску компоненты градиента целевого функционала невязки между теоретическим и экспериментальным температурным полем;
 - 6) вычисление шага спуска в методе сопряженных направлений на основе метода итерационной регуляризации;
 - 7) получение следующего итерированного значения падающей тепловой нагрузки;
 - 8) проверка критерия останова итерационного процесса. В случае его выполнения, параметризованные величины считаются искомыми, иначе необходимо повторно выполнить пункты 1–7.
- Реализация решения данного алгоритма проиллюстрирована на блок-схеме на рис. 2.

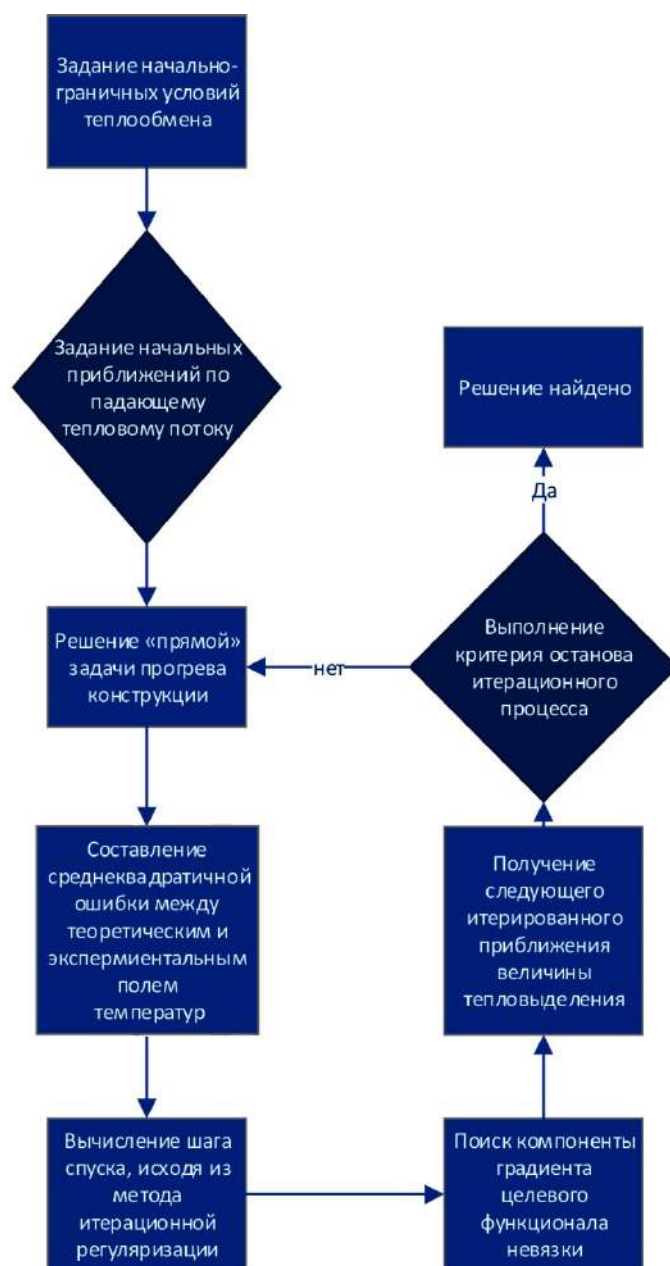


Рис. 2. Блок-схема алгоритма восстановления падающего теплового потока

Результаты виртуальной экспериментальной тепловой отработки изделия

Для апробации данного алгоритма была создана конечно-элементная модель образца, выполненного в виде параллелепипеда, имитирующая постановку «прямой» задачи прогрева конструкции. На всем протяжении исследований данные о температуре поступают от двух конечных элементов (термодатчиков) по оси ординат и 13 конечным элементам (датчикам) по оси абсцисс. Показания термодатчиков фиксируются. Результаты замеров температур в зонах замера вдоль направления x показаны на рис. 3 для каждого из четырех временных блоков.

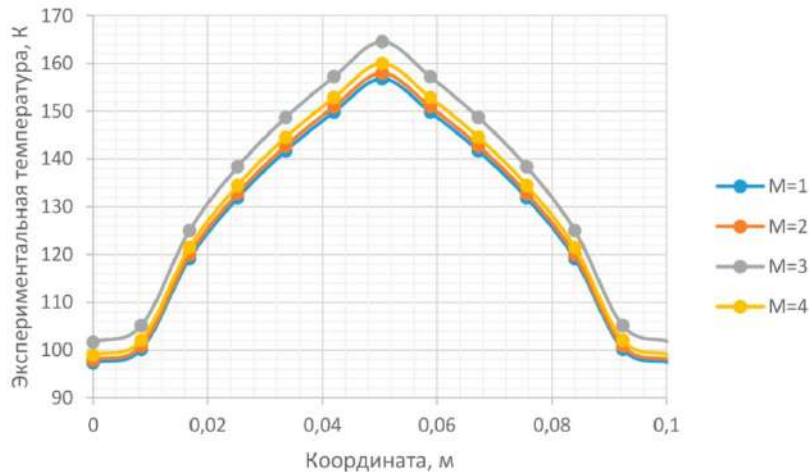


Рис. 3. Результаты замеров температурного поля в точках установки датчиков температур

Результаты идентификации теплового падающего потока от времени и координаты методом итерационной регуляризации

Ниже на рис. 4 представлены температурные поля в каждом из временных блоков в точках установки датчиков температур, по которым оценивается разница температурного теоретического и экспериментального поля. Температурные различия с экспериментом обусловлены неточностью задания гранично-начальных условий расчета, а также критерием останова итерационного процесса.

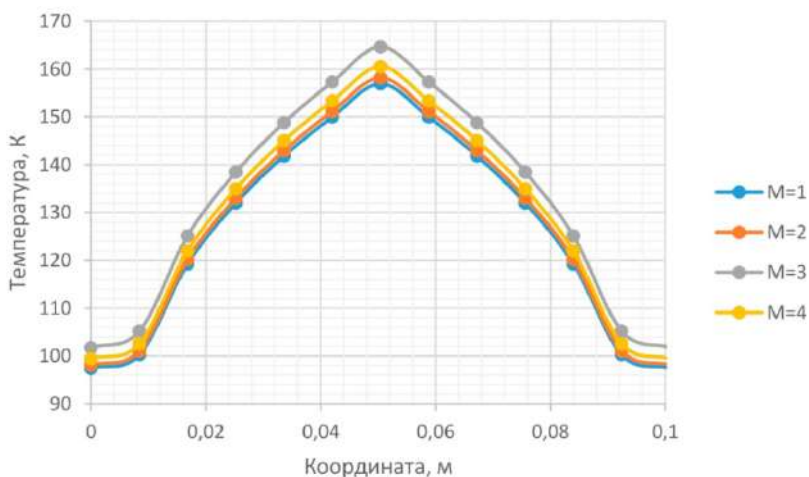


Рис. 4. Результаты теоретического температурного поля в точках установки датчиков температур

На рис. 5 представлены значения среднеквадратичной ошибки, по которой наглядно видна сходимость теоретического температурного поля к экспериментальному в местах установки датчиков температур.

Как видно из графика, начиная со второй итерации, идет выход среднеквадратичного отклонения на свое постоянное значение, что говорит о приближении теоретического температурного поля к экспериментальному.

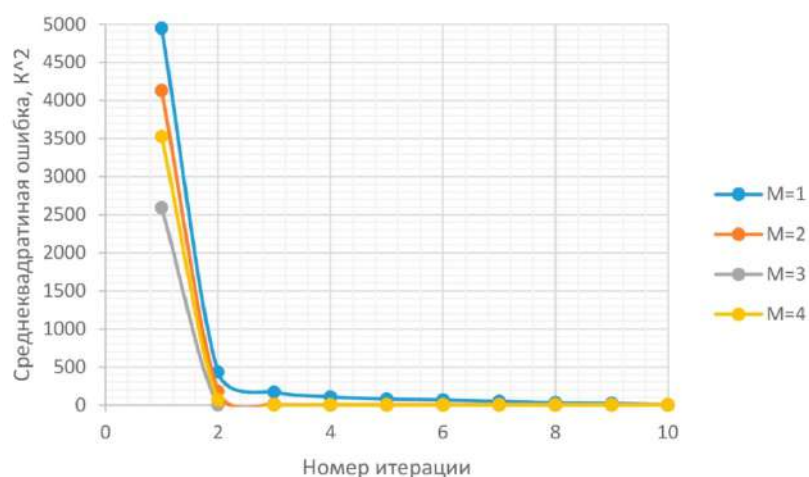


Рис. 5. Среднеквадратичная ошибка между теоретическим и экспериментальным температурным полем

На рис. 6 представлены итерационные изменения падающего удельного теплового потока в каждом временном блоке в зависимости от номера итерации.

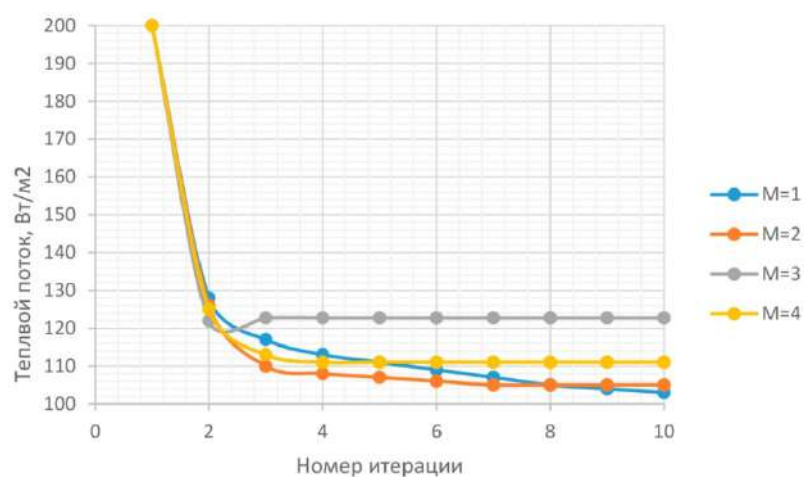


Рис. 6. Итерационные изменения параметризированной величины теплового падающего потока

Из графика видно, что параметризированная величина теплового потока начинает сходиться к своему постоянному значению, начиная со второй итерации.

На рис. 7 представлена полученная циклограмма падающего теплового удельного потока объекта исследования от времени для всех четырех временных блоков.

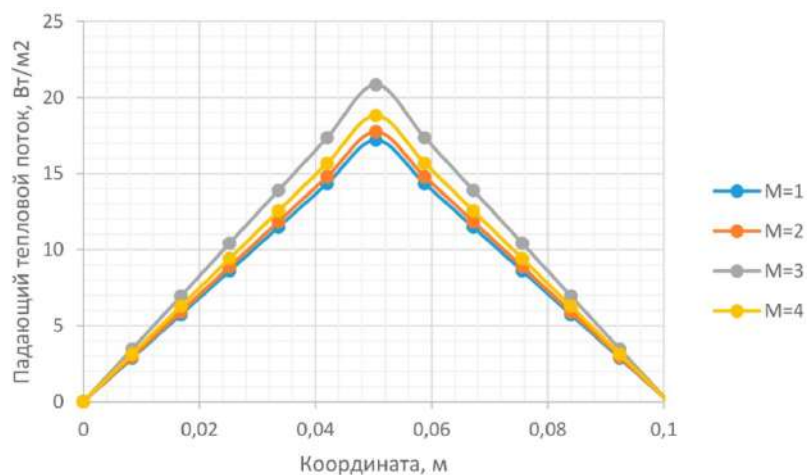


Рис. 7. Значения восстановленного падающего удельного теплового потока от координаты для каждого временного блока

Заключение

1. Разработан алгоритм параметрической идентификации падающего теплового потока как функции от времени и координаты методом итерационной регуляризации.
2. Произведена апробация разработанного алгоритма на примере виртуальной тепловой модели образца, выполненного в форме параллелепипеда.
3. Результаты показали, что значения падающего теплового потока в зависимости от координаты и времени будут лежать в пределах $0\text{--}23 \text{ Вт/м}^2$.

Список литературы

1. Крейн С. Г., Прозоровская О. И. Аналитические полугруппы и некорректные задачи для эволюционных уравнений // Доклады Академии наук СССР. 1960. Т. 133, № 2. С. 277–280.
2. Басистов Ю. А., Яновский Ю. Г. Некорректные задачи в механике (реологии) вязкоупругих сред и их регуляризация // Механика композиционных материалов и конструкций. 2010. Т. 16, № 1. С. 117–143.
3. Бакушинский А. Б., Кокурин М. Ю., Кокурин М. М. Прямые и обратные теоремы для итерационных методов решения нерегулярных операторных уравнений и разностных методов решения некорректных задач Коши // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2020. Т. 60, № 6. С. 939–962.
4. Фанов В. В., Мартынов М. Б., Карчаев Х. Ж. Летательные аппараты НПО им. С.А. Лавочкина (к 80-летию предприятия) // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. 2017. № 2/36. С. 5–16.
5. Блох А. Г., Журавлев Ю. А., Рыжков Л. Н. Теплообмен излучением. М. : Энергоатомиздат, 1991.
6. Тулин Д. В., Финченко В. С. Теоретико-экспериментальные методы проектирования систем обеспечения теплового режима космических аппаратов. М. : МАИ-ПРИНТ, 2014. Т. 3. С. 1320–1437.
7. Цаплин С. В., Болычев С. А., Романов А. Е. Теплообмен в космосе. Самара : Самарский университет, 2013. 53 с.
8. Алифанов О. М., Артюхин Е. А., Румянцев С. В. Экстремальные методы решения некорректных задач. М. : Наука, 1988. 288 с.
9. Алифанов О. М. Обратные задачи теплообмена. М. : Машиностроение, 1988. 280 с.
10. Формалев В. Ф. Теплоперенос в анизотропных твердых телах. М. : Физматлит, 2015. 238 с.
11. Васин В. В. Модифицированный метод наискорейшего спуска для нелинейных регулярных операторных уравнений // Доклады Академии наук. 2015. Т. 462, № 3. С. 264.
12. Голичев И. И. Модифицированный градиентный метод наискорейшего спуска решения нелениаризованной задачи для нестационарных уравнений Навье-Стокса // Уфимский математический журнал. 2013. Т. 5, № 4. С. 60–76.
13. Формалев В. Ф., Ревизников Д. Л. Численные методы. М. : Физматлит, 2004. 400 с.
14. Формалев В. Ф. Анализ двумерных температурных полей в анизотропных телах с учетом подвижных границ и большой степени анизотропии // Теплофизика высоких температур. 1990. Т. 28, № 4. С. 715–721.
15. Формалев В. Ф. Идентификация двумерных тепловых потоков в анизотропных телах сложной формы // Инженерно-физический журнал. 1989. Т. 56, № 3. С. 382–386.
16. Формалев В. Ф., Колесник С. А. Аналитическое решение второй начально-краевой задачи анизотропной теплопроводности // Математическое моделирование. 2003. Т. 15, № 6. С. 107–110.

References

1. Kreyn S.G., Prozorovskaya O.I. Analytical semigroups and ill-posed problems for evolutionary equations. *Doklady Akademii nauk SSSR = Reports of the Academy of Sciences of the USSR*. 1960;133(2):277–280. (In Russ.)
2. Basistov Yu.A., Yanovskiy Yu.G. Incorrect problems in mechanics (rheology) of viscoelastic media and their regularization. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsey = Mechanics of composite materials and structures*. 2010;16(1):117–143. (In Russ.)
3. Bakushinskiy A.B., Kokurin M.Yu., Kokurin M.M. Direct and inverse theorems for iterative methods for solving irregular operator equations and difference methods for solving ill-posed Cauchy problems. *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki = Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2020;60(6):939–962. (In Russ.)
4. Fanov V.V., Martynov M.B., Karchaev Kh.Zh. Lavochkin NGO (to the 80th anniversary of the enterprise). *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina = Bulletin of S. A. Lavochkin NGO*. 2017;(2/36):5–16. (In Russ.)
5. Blokh A.G., Zhuravlev Yu.A., Ryzhkov L.N. *Teploobmen izlucheniem = Heat exchange by radiation*. Moscow: Energoatomizdat, 1991. (In Russ.)
6. Tulin D.V., Finchenko V.S. *Teoretiko-eksperimental'nye metody proektirovaniya sistem obespecheniya teplovogo rezhima kosmicheskikh apparatov = Theoretical and experimental methods of designing systems for ensuring the thermal regime of spacecraft*. Moscow: MAI-PRINT, 2014;3:1320–1437. (In Russ.)

7. Tsaplin S.V., Bolychev S.A., Romanov A.E. *Teploobmen v kosmose = Heat transfer in space*. Samara: Samar-skiy universitet, 2013:53. (In Russ.)
8. Alifanov O.M., Artyukhin E.A., Rumyantsev S.V. *Ekstremal'nye metody resheniya nekorrektnykh zadach = Ex-treme methods for solving ill-posed problems*. Moscow: Nauka, 1988:288. (In Russ.)
9. Alifanov O.M. *Obratnye zadachi teploobmena = Inverse heat transfer problems*. Moscow: Mashinostroenie, 1988:280. (In Russ.)
10. Formalev V.F. *Teploperenos v anizotropnykh tverdykh telakh = Heat transfer in anisotropic solids*. Moscow: Fizmatlit, 2015:238. (In Russ.)
11. Vasin V.V. Modified steepest descent method for nonlinear regular operator equations. *Doklady Akademii nauk = Reports of the Academy of Sciences*. 2015;462(3):264. (In Russ.)
12. Golichev I.I. Modified gradient method of the steepest descent of the solution of the non-linearized problem for unsteady Navier-Stokes equations. *Ufimskiy matematicheskiy zhurnal = Ufa Mathematical Journal*. 2013;5(4):60–76. (In Russ.)
13. Formalev V.F., Reviznikov D.L. *Chislennyye metody = Numerical methods*. Moscow: Fizmatlit, 2004:400. (In Russ.)
14. Formalev V.F. Analysis of two-dimensional temperature fields in anisotropic bodies taking into account moving boundaries and a large degree of anisotropy. *Teplofizika vysokikh temperatur = Thermophysics of high tempera-tures*. 1990;28(4):715–721. (In Russ.)
15. Formalev V.F. Identification of two-dimensional heat flows in anisotropic bodies of complex shape. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal = Engineering and Physics journal*. 1989;56(3):382–386. (In Russ.)
16. Formalev V.F., Kolesnik S.A. Analytical solution of the second initial boundary value problem of anisotropic ther-mal conductivity. *Matematicheskoe modelirovanie = Mathematical modeling*. 2003;15(6):107–110. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Никита Олегович Борщев

кандидат технических наук, ведущий инженер,
Астрокосмический центр
Учреждения Российской академии наук
Физического института имени П. Н. Лебедева
(Россия, г. Москва, Ленинский пр-т, 53)
E-mail: moriarty93@mail.ru

Nikita O. Borshchev

Candidate of technical sciences, leading engineer,
Astro Space Center Institutions of the Russian Academy
of Sciences P.N. Lebedev Institute of Physics
(53 Leninsky avenue, Moscow, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 16.03.2022

Поступила после рецензирования/Revised 11.04.2022

Принята к публикации/Accepted 13.05.2022

МЕХАНИЗМ ПРИМЕНЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ОБУЧЕНИИ

Е. В. Ширинкина

Сургутский государственный университет, Сургут, Россия
shirinkina86@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Путь к использованию искусственного интеллекта не закрыт методологам и преподавателям, которые не разбираются в моделях обучения искусственного интеллекта и не являются дата-сайентистами. Актуальное состояние области говорит о том, что участникам сферы образования необходимо повышать свою технологическую грамотность, понимать принципы работы технологий, их ограничения и возможности применения, чтобы было легче управлять технической командой. Цель исследования – представить эффективные инструменты искусственного интеллекта на разных этапах образовательного проектирования. *Материалы и методы.* Эмпирической базой послужили исследования компаний ИИТО ЮНЕСКО, исследования авторов: Р. Лакина, У. Холмса "Intelligence Unleashed: An argument for AI in Education", У. Холмс, М. Бялик, Ч. Фейдел «Искусственный интеллект в образовании. Перспективы и проблемы для преподавания и обучения», Ф. Шелли «Заменит ли нас искусственный интеллект?» и International Journal of Artificial Intelligence in Education. В процессе исследования использовались методы социологического и статистического исследования. *Результаты.* Проведена аналитика лучших практик, опыта и результатов внедрения искусственного интеллекта. Научная новизна исследования заключается в обосновании гипотезы о том, что искусственный интеллект позволит давать персонализированную и своевременную обратную связь как студентам, так и преподавателям; предоставлять эмпирические данные об успехе примененных педагогических инноваций; делать учебный процесс более прозрачным, видимым. *Выводы.* На примерах разобранных приложений ИИ к обучающим задачам можно убедиться, что их использование является уже не просто любопытным прорывным направлением, а способно зарекомендовать себя как рабочий и эффективный подход к решению прикладных задач.

Ключевые слова: искусственный интеллект, направления, образование, педагогический дизайн, система обучения, педагогическая модель

Благодарности: статья содержит результаты исследований, проводимых в рамках государственного задания Ханты-Мансийского автономного округа – Югры.

Для цитирования: Ширинкина Е. В. Механизм применения искусственного интеллекта в обучении // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 4. С. 24–30. doi:10.21685/2307-4205-2022-4-3

THE MECHANISM OF APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN LEARNING

E.V. Shirinkina

Surgut State University, Surgut, Russia
shirinkina86@yandex.ru

Abstract. *Background.* The path to the use of artificial intelligence is not closed to methodologists and teachers who do not understand artificial intelligence learning models and are not data scientists. The current state of the field suggests that participants in the field of education need to improve their technological literacy, understand the principles of technology operation, their limitations and applicability in order to make it easier to manage a technical team. The purpose of the study is to present effective artificial intelligence tools at different stages of educational design. *Materials and methods.* The empirical base was the research of the UNESCO IITE companies, the research of the authors: R. Lakin, W. Holmes. Intelligence Unleashed: An argument for AI in Education, W. Holmes, M. Bialik, C. Feidel. Artificial intelligence in education. Perspectives and problems for teaching and learning, F. Shelley. Will artificial intelligence replace us? and International Journal of Artificial Intelligence in Education. In the process of research, methods of sociological and statistical research were used. *Results.* An analysis of the best practices, experience and results of the implementation of artificial intelligence was carried out. The scientific novelty of the study lies

in substantiating the hypothesis that artificial intelligence will allow giving personalized and timely feedback to both students and teachers; provide empirical data on the success of applied pedagogical innovations; make the learning process more transparent and visible. *Conclusions.* Using the examples of analyzed AI applications to learning tasks, we can see that their use is no longer just a curious breakthrough direction, but can prove itself as a working and effective approach to solving applied problems.

Keywords: artificial intelligence, directions, education, pedagogical design, education system, pedagogical model

Acknowledgments: the article contains the results of research conducted within the framework of the state task of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra.

For citation: Shirinkina E.V. The mechanism of application of artificial intelligence in learning. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(4):24–30. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-4-3

Введение

При внедрении элементов искусственного интеллекта (ИИ) в образовательный процесс центральными агентами являются преподаватели, педагогические дизайнеры и методологи – те, кто наиболее тесно связаны с разработкой учебной программы и взаимодействием с обучающимися. Именно они принимают активное участие в целеполагании, определении потребностей и запросов аудитории и заказчиков [1–3].

ИИ-решение, таким образом, конструируется отчасти по запросу педагогического дизайнера и должно быть комфортным для него – автоматизация рутинных задач, улучшение обучающих процессов средствами ИИ позволяет освободить время и уделить внимание творческой составляющей работы [4–6]. Однако здесь мы сталкиваемся с ключевой проблемой ИИ: на настоящий момент невозможно предоставить такие технологии, как готовый сервис, доступный и понятный конечному пользователю.

Не существует готовых решений, позволяющих методологу просто взять и применить какие-либо технологии ИИ «из коробки». На текущий момент применение ИИ, скорее, похоже на конструктор: необходимо искать подходящие модели, настраивать их, адаптировать под конкретные потребности и задачи. ИИ хорош в автоматизации рутинной интеллектуальной работы, например, для генерации неправильных вариантов ответа. При этом стоит помнить, что такое применение ИИ рентабельно только при большом масштабе, когда уже есть накопленные массивы данных. При малых объемах данных и задач ручной труд остается более выгодным, а внедрение ИИ – невозможным.

Ниже перечислим основные направления действий, которые может предпринять любой методолог и педагогический дизайнер, желающий призвать на помощь силу ИИ.

1. Взаимодействовать с большой командой специалистов.

Путь к использованию ИИ не закрыт методологам и преподавателям, которые не разбираются в моделях обучения искусственного интеллекта и не являются дата-сайентистами. Актуальное состояние области говорит о том, что участникам сферы образования необходимо повышать свою технологическую грамотность, понимать принципы работы технологий, их ограничения и возможности применения, чтобы было легче управлять технической командой.

Развитием искусственного интеллекта в образовании не может заниматься какая-то приглашенная команда разработчиков ИИ. Результат достигается за счет слаженных действий нескольких специалистов. Задача методолога сводится к тому, чтобы курировать действия команды и идейно их направлять.

Типы специалистов, участвующих в разработке ИИ-решений [7–9]:

- ведущий методолог (руководитель проекта);
- дата-аналитики;
- дата-лингвисты и специалисты NLP;
- образовательные дата-инженеры и ED-дизайнеры;
- дата-инженеры и специалисты по базам данных;
- знаниевые инженеры и разметчики;
- дата-сайентисты и специалисты по машинному обучению.

2. Понимать возможности систем, созданных на основе ИИ.

Говоря об искусственном интеллекте в обучении, нужно иметь в виду элементы искусственного интеллекта – алгоритмы и «ансамбли алгоритмов» из предобученных нейросетей, которые помогают решать задачи в основном в трех направлениях [6, 10, 11]:

- автоматизация распознавания (изображений, эмоций, текста, слов и др.);
- построение рекомендательной системы (методы и алгоритмы, которые помогают в процессе обучения за счет создания ранжированного списка объектов рекомендации (например, электронных курсов), наиболее подходящих обучающемуся с нужной потребностью и в нужном контексте);
- построение сложной метасистемы, которая может не просто рекомендовать курсы или уроки в нужном количестве и контексте, но и генерировать их, структурировать, автоматически создавать.

Искусственный интеллект сегодня развит в рамках первого направления. Алгоритмы в третьем направлении пока очень ограничены и примитивны. Поэтому сейчас стоит прикладывать усилия ко второму направлению – построению рекомендательных систем.

Методика исследования

Шаги по созданию рекомендательной системы

Невооруженный техническими навыками педагогический дизайнер может начать с достаточно простых действий. Эти усилия принесут пользу и в моменте, и в долгосрочной перспективе.

1. Проработка описания образовательной программы. В этот шаг входит построение, создание и наполнение рубрикатора терминов, которые связаны с образовательными результатами. Это может быть детальный перечень всех терминов, относящихся к образовательным результатам программы, подробное описание программы на основе таксономии (знать, уметь, владеть) или иерархический список терминов.

2. Анализ и разметка реальных результатов деятельности участников образовательного процесса. Сюда входит анализ цифрового следа, отзывов и рефлексий.

3. Сопоставление результатов анализа с ранее разработанной образовательной программой. На этом шаге происходит уточнение программы, построение логики в формате «если..., то...», которая поможет сформировать связи между контентом программы и образовательным фокусом.

В итоге может получиться рекомендательная система курсов, которая будет подбирать релевантный контент под образовательный запрос обучающегося.

Интеллектуальную обучающую систему целесообразно строить на трех моделях: области знаний, педагогики и обучающегося.

1. Область знаний. Эта модель будет содержать сведения о предметной области, например, логарифмах, уравнениях, теоремах и других строго определенных категориях.

2. Педагогика. Здесь будут содержаться представления о способах обучения – задания разных типов, упражнения, тренажеры, а также педагогические методики.

3. Обучающийся. Эта модель будет содержать данные об опыте конкретного обучающегося, а также о похожем опыте других обучающихся.

Интеллектуальная система обучения действует по базовой схеме:

- использование данных о моделях;
- адаптивное обучение (строится на основе данных; содержащихся в каждой из моделей);
- сбор новых данных после адаптивного обучения и их анализ;
- обновление моделей;
- переход к шагу 1.

Такая итеративная схема призвана производить постоянные улучшения системы, предоставить индивидуальный опыт каждому обучающемуся, оптимизировать учебные материалы и структуру.

В образовании, как правило, мы видим два подхода к искусственному интеллекту: система как учитель и система как учебник [12, 13].

Подход 1. Взять лучшие практики, хорошо их упаковать и сделать их доступными каждому. С философской точки зрения это выглядит как попытка из неживого сделать живое.

Подход 2. Развивать систему как умный учебник – такой, который знает об опыте прошлых пользователей, учитывает его и дает рекомендации на основе многих данных.

Ключевая ценность образования – это контакт между учеником и учителем. Технологии призваны снять с учителя косвенную нагрузку, такую как аналитику и мониторинг, и передать ее системе.

Построение системы можно рассмотреть в соответствии с основными этапами педагогического проектирования адаптивного обучения (табл. 1).

Таблица 1

Этапизация внедрения искусственного интеллекта при проектировании адаптивного обучения

Этап	Схема	Описание и комментарии
Определение поля образовательных результатов	Анализ компетенций → Индикаторы достижения компетенций → Дескрипторы (результаты обучения) → Ядро образовательных результатов	Индикаторы достижения компетенций – это набор характеристик, раскрывающих компетенцию в виде конкретных измеряемых действий. Для каждого индикатора определяются дескрипторы. Дескрипторы – это конкретные и диагностируемые результаты обучения по дисциплине. Они описывают наблюдаемые проявления индикаторов. Формулируются с указанием таксономии целей обучения (например, таксономии Блума); это позволит шкалировать дескрипторы с точки зрения уровня освоения
Создание профиля обучающегося	Нормативные параметры обучения → Индивидуальные характеристики → Выбор и модификация методик оценки характеристик → Распределение параметров профиля по уровням.	Профиль обучающегося должен быть открыт и модифицируем. В качестве индивидуальных характеристик можно выбрать личностные особенности студентов, их психологические особенности, свойства характера, темперамента, языкового аспекта (уровень знания языка, на котором изучается дисциплина)
Структурирование и создание образовательного контента	Графы и гиперграфы понятий → Термы образовательного контента → Ядро термов дисциплины → Онлайн– и офлайн–компоненты термов	На этом этапе выделяются понятия предметной области. Построение графов и гиперграфов позволит получить последовательность изучения дисциплины и структурировать контент в виде микропорций
Создание средств диагностики результатов обучения и обратной связи	Средства формирующего оценивания → Средства диагностического оценивания → Средства итогового оценивания → Средства обратной связи	Средства формирующего оценивания определяются для каждого терма; средства итогового оценивания – для каждой совокупности термов
Построение механизмов управления обучением	Стратегия адаптации контента → Средства вовлечения → Средства персональной обратной связи → Персонализированная адаптивная обучающая система	–
Педагогическая рефлексия	Предварительная оценка результатов педагогического проектирования, в том числе и по результатам коррекции на предыдущих этапах; критическое осмысление проекта	

ИИ для работы с этой моделью необходимы знания об эффективных подходах к преподаванию: предоставление обратной связи, оценивание, рекомендации последующего контента.

Схематично изобразим типичное устройство интеллектуальной системы обучения, чтобы точнее понять, как в ней взаимодействуют представленные модели (рис. 1).

Алгоритмы ИИ обрабатывают данные трех моделей. Результаты обработки представляются в интерфейсе обучающегося в виде адаптивного обучающего контента (текст, звук, видео, анимация, задания). Как только обучающийся приступает ко взаимодействию с контентом, он оставляет цифровой след, который также анализируется с помощью методов ИИ. Результаты анализа цифрового следа служат основой для обратной связи и для новой адаптации обучающего контента.

В ходе этого процесса собираются большие объемы данных, которые циклически используются системой для динамической оптимизации и самосовершенствования. Цикл повторяется до тех пор, пока обучающийся не достигнет образовательного результата либо не изучит всю область предметного знания.

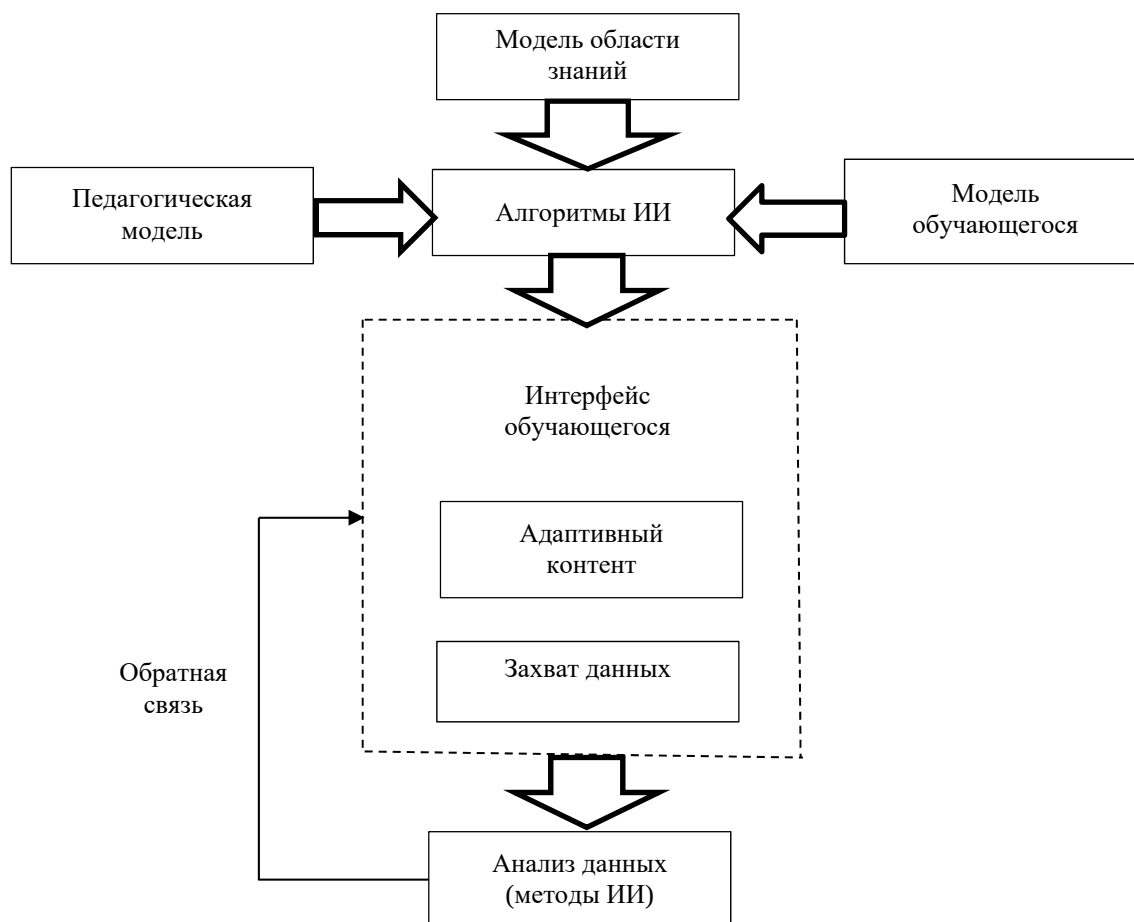


Рис. 1. Интеллектуальная система обучения

Такой подход позволяет принимать обоснованные педагогические решения. Если методами машинного обучения обработать тысячи учебных занятий, можно лучше понять структуру обучения, выявить слабые и сильные места, сформировать гипотезы по оптимизации.

Заключение

1. Автором представлены направления применения искусственного интеллекта в образовании для восприятия новых знаний, систематизация реализующихся в российском образовательном ландшафте примеров применения искусственного интеллекта.

2. Рассмотрены кейсы в трех крупных сферах AIED: интеллектуальных обучающих системах, поддержке совместного обучения и формировании адаптивной учебной группы, а также автоматизации проверки письменных заданий.

3. Практическая значимость данного исследования заключается в том, что позволит давать персонализированную и своевременную обратную связь как студентам, так и преподавателям; предоставлять эмпирические данные об успехе примененных педагогических инноваций; делать учебный процесс более прозрачным, видимым.

4. На примерах разобранных приложений ИИ к обучающим задачам можно убедиться, что их использование является уже не просто любопытным прорывным направлением, а способно зарекомендовать себя как рабочий и эффективный подход к решению прикладных задач.

Список литературы

1. Донина И. А., Воднева С. Н., Михайлова М. Н. Искусственный интеллект в современном образовании: возможности и угрозы // Психолого-педагогический поиск. 2021. № 1. С. 17–29.
2. Luckin R., Holmes W. [и др.]. Intelligence Unleashed: An argument for AI in Education. 2016. URL: <http://sber.me/?p=vMd6R> (дата обращения: 20.08.2022).
3. Холмс У., Бялик М., Фейдел Ч. Искусственный интеллект в образовании. Перспективы и проблемы для преподавания и обучения. 2022. URL: <http://sber.me/?p=MGT33> (дата обращения: 20.08.2022).

4. Ахтямова И. М. Искусственный интеллект в образовании 21 века – пространство для новых возможностей преподавания // Бюллетень науки и практики. 2021. Т. 7, № 2. С. 330–338.
5. Ширинкина Е. В. Платформы обучения в условиях цифровой трансформации // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 1. С. 42–48.
6. International Journal of Artificial Intelligence in Education. URL: <http://sber.me/?p=9Kz46> (дата обращения: 20.08.2022).
7. Владарский И. В., Буров С. А. Искусственный интеллект, помощник или конкурент в современном образовании // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. 2021. № 3. С. 68–74.
8. Коляда М. Г., Бугаева Т. И. Искусственный интеллект как движущая сила совершенствования и инновационного развития в образовании и педагогике // Информатика и образование. 2019. № 10. С. 21–30.
9. Часовских Е. А. Искусственный интеллект в образовании // Наука и образование транспорту. 2019. № 2. С. 92–95.
10. Искусственный интеллект в образовании: изменение темпов обучения. Аналитическая записка ИИТО ЮНЕСКО. 2020. URL: <http://sber.me/?p=13dTf> (дата обращения: 20.08.2022).
11. Шелли Ф. Заменит ли нас искусственный интеллект? URL: <http://sber.me/?p=F1NkG> (дата обращения: 20.08.2022).
12. Ширинкина Е. В. Управление обучением на рабочем месте: инновационные технологии // Инновации в менеджменте. 2020. № 4. С. 74–79.
13. Ширинкина Е. В. Экосистема как трансформация бизнес-моделей в цифровой экономике // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2021. Т. 1. С. 267–269.

References

1. Donina I.A., Vodneva S.N., Mikhaylova M.N. Artificial intelligence in modern education: opportunities and threats. *Psikhologo-pedagogicheskiy poisk = Psychological and pedagogical search*. 2021;(1):17–29. (In Russ.)
2. Luckin R., Holmes W. et al. *Intelligence Unleashed: An argument for AI in Education*. 2016. Available at: <http://sber.me/?p=vMd6R> (accessed 20.08.2022).
3. Kholms U., Byalik M., Feydel Ch. *Iskusstvennyy intellekt v obrazovanii. Perspektivy i problemy dlya prepodavaniya i obucheniya = Artificial intelligence in education. Perspectives and challenges for teaching and learning*. 2022. (In Russ.). Available at: <http://sber.me/?p=MGT33> (accessed 20.08.2022).
4. Akhtyamova I.M. Artificial intelligence in education of the 21st century – a space for new teaching opportunities. *Byulleten' nauki i praktiki = Bulletin of science and practice*. 2021;7(2):330–338. (In Russ.)
5. Shirinkina E.V. Learning platforms in conditions of digital transformation. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(1):42–48. (In Russ.)
6. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*. Available at: <http://sber.me/?p=9Kz46> (accessed 20.08.2022).
7. Vladarskiy I.V., Burov S.A. Artificial intelligence, assistant or competitor in modern education. *Vestnik Luganskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Vladimira Dallya = Bulletin of Lugansk State University named after Vladimir Dal*. 2021;(3):68–74. (In Russ.)
8. Kolyada M.G., Bugaeva T.I. Artificial intelligence as a driving force of improvement and innovative development in education and pedagogy. *Informatika i obrazovanie = Informatics and education*. 2019;(10):21–30. (In Russ.)
9. Chasovskikh E.A. Artificial intelligence in education. *Nauka i obrazovanie transport = Science and Education for Transport*. 2019;(2):92–95. (In Russ.)
10. *Iskusstvennyy intellekt v obrazovanii: izmenenie tempov obucheniya. Analiticheskaya zapiska IITO YuNESKO = Artificial intelligence in education: changing the pace of learning. UNESCO IITE Analytical Note*. 2020. (In Russ.). Available at: <http://sber.me/?p=13dTf> (accessed 20.08.2022).
11. Shelli F. *Zamenit li nas iskusstvennyy intellekt? = Will artificial intelligence replace us?* (In Russ.). Available at: <http://sber.me/?p=F1NkG> (accessed 20.08.2022).
12. Shirinkina E.V. Management of workplace training: innovative technologies. *Innovatsii v menedzhmente = Innovations in management*. 2020;(4):74–79. (In Russ.)
13. Shirinkina E.V. Ecosystem as a transformation of business models in the digital economy. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2021;1:267–269. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Елена Викторовна Ширинкина

доктор экономических наук, доцент,
заведующий кафедрой менеджмента и бизнеса,
Сургутский государственный университет
(Россия, г. Сургут, ул. Гагарина, 12)
E-mail: shirinkina86@yandex.ru

Elena V. Shirinkina

Doctor of economical sciences, associate professor,
head of the sub-department
of management and business,
Surgut State University
(12 Gagarina street, Surgut, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 04.04.2022

Поступила после рецензирования/Revised 12.05.2022

Принята к публикации/Accepted 06.06.2022

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОТРЕБНОСТИ В ИНФОРМАЦИОННОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ СИСТЕМЫ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ АЛЖИРА

М. Ю. Михеев¹, О. В. Прокофьев², С. Хилал³

^{1, 2, 3} Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия
¹mix1959@gmail.com, ²prokof_ow@mail.ru, ³sonya.nina.helal@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Система здравоохранения Алжира, как и других стран, претерпела значительные изменения за последние десятилетия. Изменились потоки финансирования, численность населения, продолжительность жизни граждан. Одновременно с этим выросли требования по информационному обеспечению: мобильной доступности, формату и безопасности хранения данных, облачному хранению и облачным вычислениям. Поэтому авторы поставили целью выполнить краткосрочные прогнозы основных социально-экономических показателей Алжира и предложить перспективные оценки объемов персональных медицинских данных, необходимых для страны в ближайшие годы. Кроме того, авторы предложили рекомендации по выбору криптографических алгоритмов для безопасной работы с персональными данными из облачного хранилища. *Материалы и методы.* Использованы статистические данные Алжира из официальных источников и научных публикаций, данные о скорости мобильных криптографических вычислений их научных публикаций. Использованы методы корреляционно-регрессионного анализа, метод построения модели Бокса – Дженкинса для временного ряда. *Результаты.* Представлены математические модели, проверка адекватности моделей и результаты прогнозирования. *Выводы.* Даны оценки объема конфиденциальной медицинской информации в ближайшие годы, служащие для разработки планов развития информационной инфраструктуры страны, а также рекомендации к выбору метода криптографического закрытия мобильных данных.

Ключевые слова: модель временного ряда, здравоохранение Алжира, медицинские персональные данные, облачное хранилище данных

Для цитирования: Михеев М. Ю., Прокофьев О. В., Хилал С. Моделирование и прогнозирование потребности в информационном обеспечении системы здравоохранения Алжира // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 4. С. 31–39. doi:10.21685/2307-4205-2022-4-4

MODELING AND FORECASTING THE NEEDS FOR INFORMATION SUPPORT OF THE HEALTH CARE SYSTEM OF ALGERIA

M.Yu. Mikheev¹, O.V. Prokofiev², S. Helal³

^{1, 2, 3} Penza State Technological University, Penza, Russia
¹mix1959@gmail.com, ²prokof_ow@mail.ru, ³sonya.nina.helal@gmail.com

Abstract. *Background.* Algeria's healthcare system, like that of other countries, has undergone significant changes over the past decades. Financing flows, population size, life expectancy of citizens have changed. At the same time, the requirements for information support have grown: mobile accessibility, format and security of data storage, cloud storage and cloud computing. Therefore, the authors set out to make short-term forecasts of the main socio-economic indicators of Algeria and to offer forward estimates of the amount of personal health data needed for the country in the coming years. In addition, the authors offered recommendations on the choice of cryptographic algorithms for secure work with personal data from cloud storage. *Materials and methods.* The statistical data of Algeria from official sources and scientific publications, data on the speed of mobile cryptographic computations of their scientific publications are used. The methods of correlation-regression analysis, the method of constructing the Box-Jenkins model for the time series were used. *Results.* Mathematical models, model adequacy checks and forecasting results are presented. *Conclusions.* Estimates of the volume of confidential medical information in the coming years are given, which serve to develop plans for the development of the country's information infrastructure, as well as recommendations for choosing a method for cryptographic closing of mobile data.

Keywords: time series model, health care in Algeria, medical personal data, cloud data storage

For citation: Mikheev M.Yu., Prokofiev O.V., Helal S. Modeling and forecasting the needs for information support of the health care system of Algeria. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(4):31–39. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-4-4

Введение

После обретения независимости Алжира принятие политики бесплатной медицины в 1973 г. привело к появлению значительного спроса и ускорению потребления медицинских услуг, к появлению потребности к расширению инфраструктуры здравоохранения. Источниками финансирования системы являются вклад государства, взносы фонда социального страхования и расходы домохозяйств, которые характеризуются высокой динамикой [1, 2]. Растущее население, изменения в уровне жизни, появление пандемии и других патологий привели к созданию существенного потока информации о здоровье и, в частности, персональных медицинских данных. Целью авторов является перспективная оценка спроса на персональную медицинскую информацию, которая является основой планов новых инфраструктурных проектов страны и частных инвестиций. Кроме того, авторы были ориентированы на выработку рекомендаций относительно структурных решений в области построения современного облачного медицинского сервиса, предусматривающих в том числе достаточно высокий уровень защиты персональных данных.

Материалы и методы

Ниже представлено определение исходных данных для моделирования. Для множественного регрессионного анализа, согласно справочным данным [1, 2], были использованы следующие данные за 2000–2014 гг.:

- ожидаемая продолжительность жизни при рождении, всего (лет, Y);
- население, всего (человек);
- внутренний валовый продукт (ВВП, по текущему курсу в долларах США);
- вклад Фонда социального страхования в финансирование расходов на здравоохранение (миллионов динар, X_2);
- вклад государства в финансирование сферы здравоохранения (миллиардов динар, X_3).

В модель был введен фактор X_1 – внутренний валовый продукт на одного человека населения (по текущему курсу в долларах США), полученный из расчета по приведенным выше данным. Кроме того, был использован временной ряд – население (человек), охватывающий интервал времени 1960–2021 гг.

Следует отметить, что данные для модели множественной регрессии могут иметь общий временной тренд и учет этого обстоятельства может привести к выводу о ложной корреляции между факторами, а также к мультиколлинеарности модели. Поэтому частью исследования должен быть этап по исключению незначимых и статистически связанных между собой факторов.

Моделирование и эксперименты

Матрица парных линейных коэффициентов корреляции представлена на рис. 1 (выборка за 2000–2014 гг.).

Корреляции		Y	X_1	X_2	X_3
Y	Корреляция Пирсона	1	,969**	,930**	,868**
	Знач. (двухсторонняя)		,000	,000	,000
	N	15	15	15	15
X_1	Корреляция Пирсона	,969**	1	,913**	,885**
	Знач. (двухсторонняя)	,000		,000	,000
	N	15	15	15	15
X_2	Корреляция Пирсона	,930**	,913**	1	,901**
	Знач. (двухсторонняя)	,000	,000		,000
	N	15	15	15	15
X_3	Корреляция Пирсона	,868**	,885**	,901**	1
	Знач. (двухсторонняя)	,000	,000	,000	
	N	15	15	15	15

** . Корреляция значима на уровне 0,01 (двухсторонняя).

Рис. 1. Матрица парных корреляций для переменных Y , X_1 , X_2 , X_3

Согласно рис. 1, любая пара факторов имеет существенную связь с силой связи более 0,8, т.е. подтверждено предположение о наличии явления мультиколлинеарности. По этой причине был построен набор моделей частной корреляции между результативным признаком Y и каждым из факторов (рис. 2).

Корреляции

Переменные управления			Y	X1
X2 & X3	Y	Корреляция	1,000	,795
		Значимость (двухсторонняя)	.	,001
		ст.св.	0	11
	X1	Корреляция	,795	1,000
		Значимость (двухсторонняя)	,001	.
		ст.св.	11	0

а)

Корреляции

Переменные управления			Y	X2
X3 & X1	Y	Корреляция	1,000	,472
		Значимость (двухсторонняя)	.	,104
		ст.св.	0	11
	X2	Корреляция	,472	1,000
		Значимость (двухсторонняя)	,104	.
		ст.св.	11	0

б)

Корреляции

Переменные управления			Y	X3
X1 & X2	Y	Корреляция	1,000	-,167
		Значимость (двухсторонняя)	.	,586
		ст.св.	0	11
	X3	Корреляция	-,167	1,000
		Значимость (двухсторонняя)	,586	.
		ст.св.	11	0

в)

Рис. 2. Матрицы частных корреляций:

а – корреляция между Y и $X1$ с исключением влияния $X2$, $X3$;б – корреляция между Y и $X2$ с исключением влияния $X1$, $X3$;в – корреляция между Y и $X3$ с исключением влияния $X1$, $X2$

Из рис. 2 следует, что корреляционная связь между Y и $X1$ является сильной положительной и статистически значимой на уровне 0,001.

Тот же результат показывает и пошаговый метод отбора факторов (рис. 3).

Коэффициенты^а

Модель	Нестандартизованные коэффициенты		Стандартизованные коэффициенты	t	Значимость	Статистика коллинеарности	
	B	Стандартная ошибка	Бета			Допуск	VIF
1 (Константа)	69,460	,319		217,660	,000		
X1	,001123	,000	,969	14,044	,000	1,000	1,000

а. Зависимая переменная: Y

Исключенные переменные^а

Модель	Бета-включения	t	Значимость	Частная корреляция	Статистика коллинеарности		
					Допуск	VIF	Минимальный допуск
1 X2	,277 ^b	1,771	,102	,455	,167	5,987	,167
X3	,050 ^b	,323	,752	,093	,216	4,622	,216

а. Зависимая переменная: Y

б. Предикторы в модели: (константа), X1

Рис. 3. Модель Y(X1), выбранная пошаговым методом

Рассматривая временной ряд численности населения за 1960–2021 гг. объем данных и инерционный характер развития процесса позволили перейти к модели Бокса – Дженкинса, представленной на рис. 4 (краткий отчет).

Описание модели

			Тип модели
ИД модели	P	Модель_1	ARIMA(1,3,1)

Параметры модели АРПСС^а

					Оценка	Ст. ош.	t	Значимость
P-Модель_1	P	Без преобразования	AR	Лag 1	,746	,090	8,298	,000
			Дифференциальный	3				
			CC	Лag 1	-,726	,100	-7,277	,000

а. Модели наилучшего согласия, соответствующие стационарному R-квадрат (чем больше значения, тем лучше подгонка).

Прогнозируемые значения^а

Модель		2022	2023	2024	2025
P-Модель_1	Прогнозируемые значения	45346852	46039517	46692978	47306006
	UCL	45351593	46061243	46751735	47429661
	LCL	45342111	46017791	46634220	47182351

Рис. 4. Модель АРПСС (1, 3, 1)

На рис. 4 изображено уравнение модели авторегрессии 1-го порядка, проинтегрированного ряда до 3-й конечной разности, скользящего среднего 1-го порядка:

$$Y_t = 0,746Y_{t-1} - 0,726\epsilon_{t-1} + u_t,$$

где ϵ_{t-1} – разность между уровнем ряда и модельным значением в момент $(t - 1)$; u_t – случайная составляющая в момент t .

Интервальный прогноз численности населения Алжира на рис. 4 проиллюстрирован диаграммой на рис. 5.

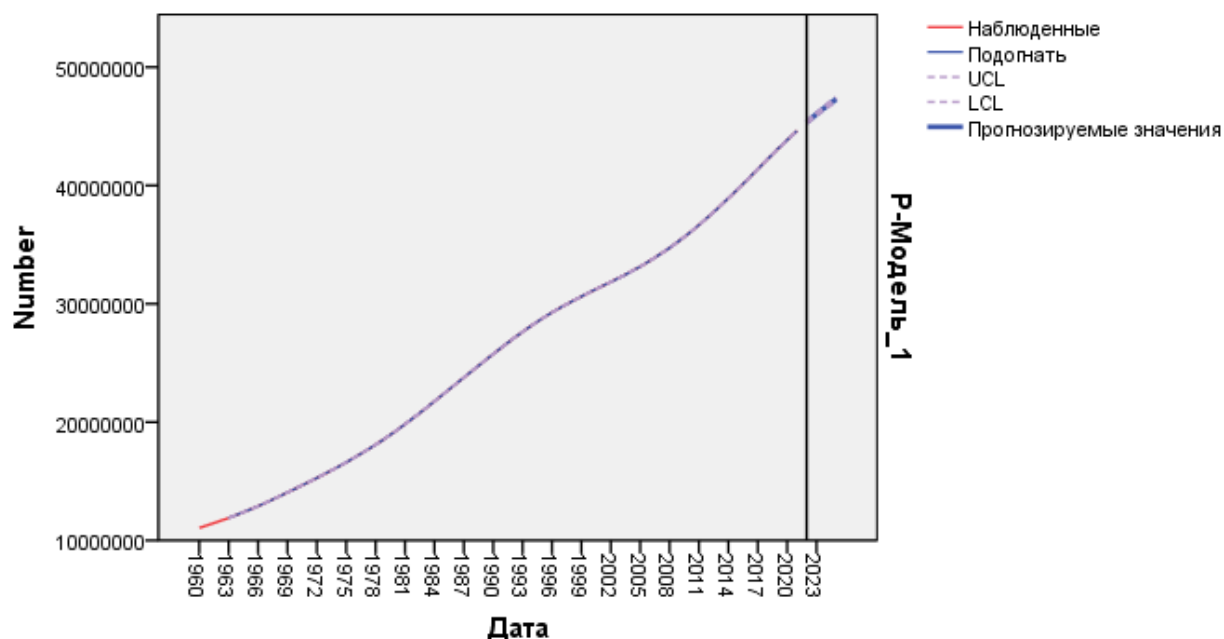


Рис. 5. Численность населения Алжира с прогнозом на 2022–2025 гг.

Помимо численности населения авторами была предложена модель продолжительности жизни, так как обращение к медицинским услугам практически будет производиться на протяжении всех лет жизни. Использован временной ряд величины Z за 1960–2020 гг. [1]. Модель Бокса – Дженкинса и краткосрочные прогнозы показаны на рис. 6.

На рис. 6 изображено уравнение модели авторегрессии 1-го порядка, проинтегрированного ряда до 3-й конечной разности, скользящего среднего 10-го порядка:

$$Z_t = 0,784Z_{t-1} - 0,381\varepsilon_{t-1} + 0,371\varepsilon_{t-10} + u_t,$$

где ε_{t-1} – разность между уровнем ряда и модельным значением в момент $(t-1)$; u_t – случайная составляющая в момент t .

Описание модели

			Тип модели
ИД модели	Y1	Модель_1	ARIMA(1,3,10)

Параметры модели АРПСС^а

				Оценка	Ст. ош.	t	Значимость
Y1-Модель_1	Y1	Без преобразования	AR	Лаг 1	,784	,088	8,865
			Дифференциальный		3		
			CC	Лаг 1	-,381	,130	-2,937
				Лаг 10	,371	,136	2,726

а. Модели наилучшего согласия, соответствующие стационарному R-квадрат (чем больше значения, тем лучше подгонка).

Прогнозируемые значения^а

Модель		2021	2022	2023	2024	2025
Y1-Модель_1	Прогнозируемые значения	77,25	77,43	77,62	77,82	78,02
	UCL	77,26	77,50	77,80	78,20	78,70
	LCL	77,23	77,36	77,44	77,44	77,34

Рис. 6. Модель АРПСС (1, 3, 10)

Интервальный прогноз продолжительности жизни населения Алжира проиллюстрирован диаграммой на рис. 7.

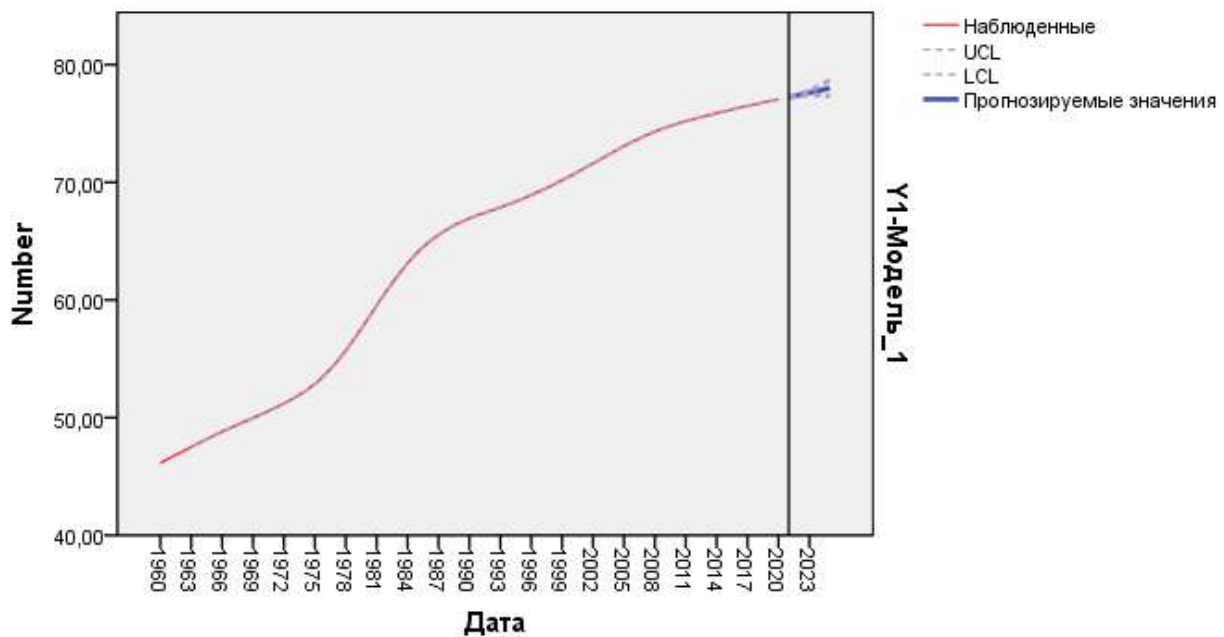


Рис. 7. Продолжительность жизни населения Алжира с прогнозом на 2022–2025 гг.

В то же время не все макроэкономические показатели Алжира, влияющие на продолжительность жизни, можно описать как инерционный процесс, близкий к линейной закономерности. Примером иного варианта с изменением структуры временного ряда является временной ряд внутреннего валового продукта на одного жителя страны, изображенного на рис. 8.

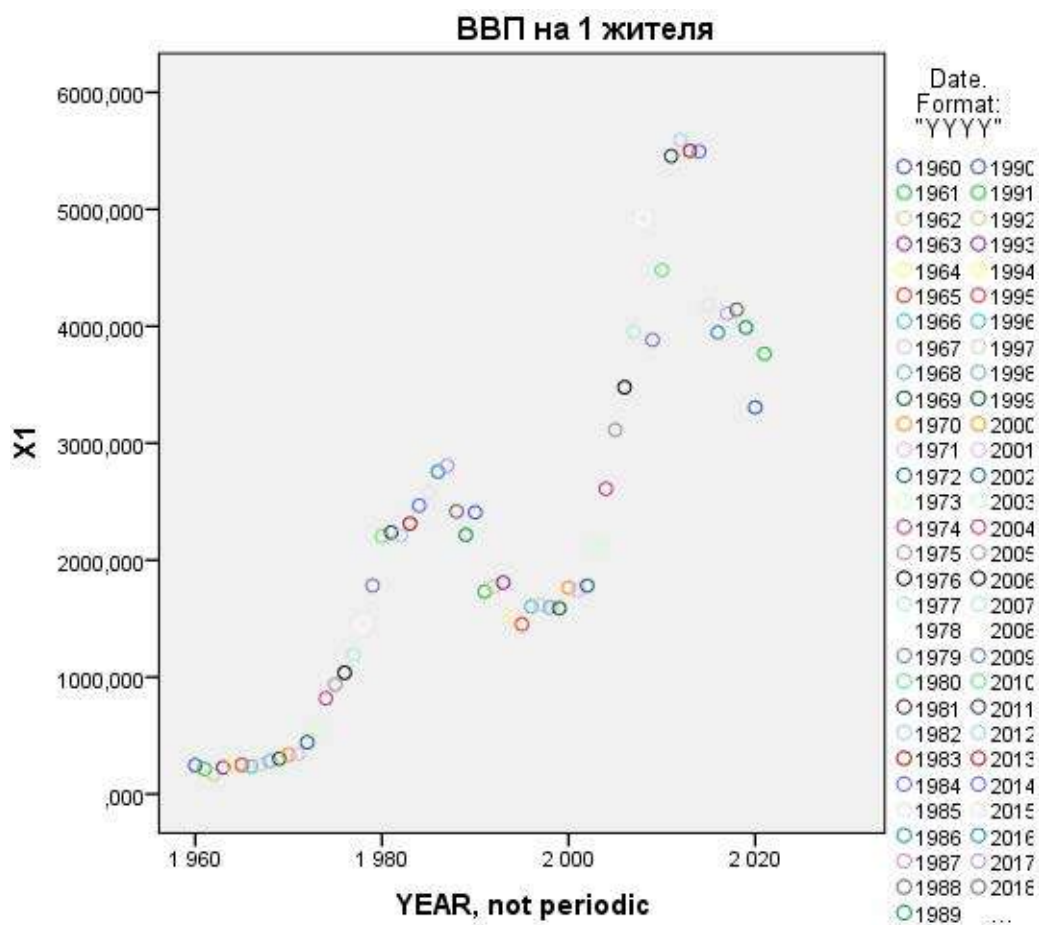


Рис. 8. ВВП Алжира на душу населения за 1960–2021 гг.

Результаты

Существенным фактором, влияющим на продолжительность жизни, является значение ВВП на душу населения. В среднем на каждую тысячу долларов дохода продолжительность жизни жителя Алжира увеличивается на 1,1 года. С малой вероятностью ошибки можно считать, что в 2025 г. численность населения составит более 47 миллионов человек. Средняя ожидаемая продолжительность жизни к 2025 г. достигнет 78 лет, есть аргументы в пользу адекватности этой модели. Таким образом, объем медицинской информации, необходимый для обслуживания населения, будет возрастать по причинам роста численности населения, продолжительности жизни. К этому следует добавить высокие требования к объему данных, предъявляемые современными стандартами персональной медицинской информации, например, требования стандарта DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) [3] и их реализация в HIS (Hospital Information Systems), PACS (Picture Archiving and Communication Systems), EHR/EMR (Electronic Health Records/Electronic Medical Records).

В то же время высокая динамика важнейшего фактора (ВВП на душу населения) показывает нестабильное состояние доходов населения, что делает возможной коррекцию приводимых моделей.

Заключение

В 2012 г. исследователями [4] было обнаружено, что 30 % всех электронных хранилищ данных в мире занято отраслью здравоохранения. Они также опросили ряд поставщиков медицинских услуг, и 45 % респондентов заявили, что их учреждения намерены увеличить емкость хранения цифровых данных как минимум на один терабайт или более в течение года. Как минимум, каждый пациент будет добавлять 4 Мб данных в свою электронную медицинскую карту в год, но если при этом объединять текстовые записи и изображения, то около 80 Мб в год. Авторы [4] приводят пример. Предположим, что имеется 100 пациентов, которые посещают поликлинику в течение 4 лет. Это равняется приблизительно 32 Гб. В следующем году для тех же 100 пациентов потребуется 40 Гб. Всего за десятилетие вы получите 80 Гб только для этой группы пациентов. В этом примере не учитываются данные, необходимые для новых пациентов. Данный пример дает представление о порядке объема информации, с учетом будущей численности и продолжительности жизни населения Алжира. Результат в примере нужно увеличить в 470 000 раз, причем для данных, собранных за 10 лет.

Важным вопросом доступности данных является скорость считывания и, одновременно, конфиденциальность данных. Эксперименты с криптографической защитой облачных данных, проведенные исследователями [5], показывают эффективность алгоритма AES (табл. 1).

Таблица 1

Продолжительность шифрования/дешифрации файла, с

Показатель		AES	DES	3 DES	Blowfish	RSA	ElGamal
Размер ключа, бит		256	64	192	256	2048	1024
Размер файла (МБ)	1	0,03	0,03	0,09	0,03	332	2936
	10	0,32	0,32	0,77	0,24		
	50	1,61	1,89	4,49	2,13		
	100	4,27	5,50	7,96	5,64		

Перечисленные расчеты показывают необходимость разработки стратегической программы развития электронных ресурсов здравоохранения государством и коммерческими фирмами Алжира. С учетом стадии развития медицинского информационного обеспечения и системы здравоохранения в целом представляют интерес мобильные приложения по оказанию первичной парамедицинской помощи, диагностике, записи на прием, диалоговых систем опроса будущих пациентов. Сертифицированные системы поддержки принятия решений будут полезным вспомогательным средством до доставки пациента в стационар и поликлинику, дополнением в процессе лечения [6–13].

Список литературы

1. Rapport National sur le Developpement Humain 2013–2015. Algeria – Conseil National Économique et Social, CNES (National Economic and Social Council). URL: <https://socialprotection.org/discover/publications/rapport-national-sur-le-developpement-humain-2013-2015>
2. Mohammed A. D. The Financing Health System Problem in Algeria // The Financing Health System Problem in Algeria. 2016. Vol. 3, iss. 7. P. 48–53. doi:10.21744/irjmis.v3i7.150

3. DICOM Standard. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/DICOM>
4. Brown N. Healthcare Data Growth: An Exponential Problem. URL: <https://www.nextech.com/blog/healthcare-data-growth-an-exponential-problem>
5. Al-Qasrawi I. S. A Security Scheme for Providing AIC Triad in Mobile Cloud Computing // International Journal of Computer Science and Information Security (IJCSIS). 2016. Vol. 14, № 4. P. 32–36.
6. Михеев М. Ю., Прокофьев О. В., Семочкина И. Ю. Древовидные карты для повышения качества поддержки решений // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 4. С. 98–108.
7. Михеев М. Ю., Прокофьев О. В., Савочкин А. Е., Семочкина И. Ю. Моделирование и трансфер агротехнологий на основе системы поддержки принятия решений // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2021. Т. 1. С. 180–183.
8. Доросинский А. Ю., Прокофьев О. В., Линкова М. А., Семочкина И. Ю. Деревья решений на основе технологии мемристоров // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 2. С. 53–60.
9. Power D. J., Heavin C. Decision Support, Analytics, and Business Intelligence. Third Edition. New York : Business Expert Press, LLC, 2017. P. 196.
10. What is a decision tree? URL: <https://www.lucidchart.com/pages/decision-tree>
11. Phillips-Wren G. E., Carlsson S., Respício A. DSS 2.0 – Supporting Decision Making With New Technologies. IOS Press, 2014. P. 604.
12. Goldberg J. H., Helfman J. Enterprise Network Monitoring Using Treemaps // Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings. 2005. P. 671–675. doi:10.1177/154193120504900508
13. International Federation For Information Processing. Technical Committee 8. Working Group 8.3. URL: <http://ifiptc8.dsi.uminho.pt/index.php/events?wg=8.3>

References

1. *Rapport National sur le Developpement Humain 2013–2015. Algeria – Conseil National Économique et Social, CNES (National Economic and Social Council)*. Available at: <https://socialprotection.org/discover/publications/rapport-national-sur-le-developpement-humain-2013-2015>
2. Mohammed A.D. The Financing Health System Problem in Algeria. *The Financing Health System Problem in Algeria*. 2016;3(7):48–53. doi:10.21744/irjmis.v3i7.150
3. DICOM Standard. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/DICOM>
4. Brown N. *Healthcare Data Growth: An Exponential Problem*. Available at: <https://www.nextech.com/blog/healthcare-data-growth-an-exponential-problem>
5. Al-Qasrawi I.S. A Security Scheme for Providing AIC Triad in Mobile Cloud Computing. *International Journal of Computer Science and Information Security (IJCSIS)*. 2016;14(4):32–36.
6. Mikheev M.Yu., Prokofev O.V., Semochkina I.Yu. Tree maps for improving the quality of decision support. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(4):98–108. (In Russ.)
7. Mikheev M.Yu., Prokofev O.V., Savochkin A.E., Semochkina I.Yu. Modeling and transfer of agrotechnologies based on a decision support system. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2021;1:180–183. (In Russ.)
8. Dorosinskiy A.Yu., Prokofev O.V., Linkova M.A., Semochkina I.Yu. Decision trees based on the technology of memristors. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(2):53–60. (In Russ.)
9. Power D.J., Heavin C. *Decision Support, Analytics, and Business Intelligence. Third Edition*. New York: Business Expert Press, LLC, 2017:196.
10. *What is a decision tree?* Available at: <https://www.lucidchart.com/pages/decision-tree>
11. Phillips-Wren G.E., Carlsson S., Respício A. *DSS 2.0 – Supporting Decision Making With New Technologies*. IOS Press, 2014:604.
12. Goldberg J.H., Helfman J. Enterprise Network Monitoring Using Treemaps. *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings*. 2005:671–675. doi:10.1177/154193120504900508
13. *International Federation For Information Processing. Technical Committee 8. Working Group 8.3*. Available at: <http://ifiptc8.dsi.uminho.pt/index.php/events?wg=8.3>

Информация об авторах / Information about the authors

Михаил Юрьевич Михеев

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой информационных
технологий и систем,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, проезд Байдукова / ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: mix1959@gmail.com

Mikhail Yu. Mikheev

Doctor of technical sciences, professor,
head of the sub-department of informational
technologies and systems,
Penza State Technological University
(1a/11 Baidukov's passage /Gagarina street, Penza, Russia)

Олег Владимирович Прокофьев

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры информационных технологий и систем,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, пр. Байдукова / ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: prokof_ow@mail.ru

Соня Хилал

аспирант,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, проезд Байдукова / ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: sonya.nina.helal@gmail.com

Oleg V. Prokofiev

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of informational technologies and systems,
Penza State Technological University
(1a/11 Baidukov's passage / Gagarina street, Penza, Russia)

Sonya Helal

Postgraduate student,
Penza State Technological University
(1a/11 Baidukov's passage / Gagarina street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 15.12.2021

Поступила после рецензирования/Revised 10.01.2022

Принята к публикации/Accepted 15.02.2022

ОБОБЩЕНИЕ ПОНЯТИЯ РЕСУРСА НАДЕЖНОСТИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА Н. М. СЕДЯКИНА

В. А. Смагин¹, Р. О. Лавров², С. Ф. Литвиненко³

^{1, 2, 3} Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
¹ va_smagin@mail.ru, ² 9432923@mail.ru, ³ 89818438422@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Статья посвящена 100-летию со дня рождения профессора Н. М. Седякина, который является пионером в области теории надежности. Им впервые сформулирован основной закон теории надежности, который гласит, что надежность системы зависит от величины выработанного ею ресурса надежности и не зависит от того, как он был выработан. *Материалы и методы.* В работе рассматриваются измерительные системы, метрологические комплексы с аппаратным и программным. Показано, что 80-е годы прошлого века были годами рождения и развития надежности программных средств. При этом работы в области надежности сложной техники были связаны с повышением надежности. *Результаты.* Показано, что величина выработанного полного ресурса работоспособности программного обеспечения наблюдается тем меньше, чем большее значение у предварительно введенного потенциального ресурса. Важно отметить, что существует прямая зависимость величины потенциального ресурса, введенного до применения программного обеспечения, и способности сохранять величину вырабатываемого ресурса. *Выводы.* Предложено количественное обобщение частных показателей надежности в один общий показатель – ресурс работоспособности объекта, а также даны рекомендации по его дальнейшему использованию на различных этапах жизненного цикла информационно-измерительных систем.

Ключевые слова: надежность, ресурс, информационно-измерительная система, программные средства, работоспособность, обобщенный показатель надежности

Для цитирования: Смагин В. А., Лавров Р. О., Литвиненко С. Ф. Обобщение понятия ресурса надежности информационно-измерительных систем на основе принципа Н. М. Седякина // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 4. С. 40–47. doi:10.21685/2307-4205-2022-4-5

GENERALIZATION OF THE CONCEPT OF RELIABILITY RESOURCE INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEMS BASED ON THE PRINCIPLE OF N.M. SEDYAKIN

V.A. Smagin¹, R.O. Lavrov², S.F. Litvinenko³

^{1, 2, 3} Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky, Saint Petersburg, Russia
¹ va_smagin@mail.ru, ² 9432923@mail.ru, ³ 89818438422@mail.ru

Abstract. *Background.* The article is dedicated to the 100th anniversary of the birth of Professor N.M. Sedyakin, who is a pioneer in the field of reliability theory. He was the first to formulate the basic law of the theory of reliability, which states that the reliability of a system depends on the value of the reliability resource developed by it and does not depend on how it was developed. *Materials and methods.* The paper deals with measuring systems, metrological complexes with hardware and software. It is shown that the 80s of the last century were the years of the birth and development of software reliability. At the same time, work in the field of reliability of complex equipment was associated with an increase in reliability. *Results.* It is shown that the value of the developed full resource of software operability is observed the less, the greater the value of its previously introduced potential resource. It is important to note that there is a direct relationship between the value of the potential resource introduced before the application of the software and the ability to maintain the value of the produced resource. *Conclusions.* A quantitative generalization of private indicators of reliability into one general indicator is proposed - the resource of the object's operability, and recommendations are given for its use and further at various stages of the life cycle of information-measuring systems.

Keywords: reliability, resource, information-measuring system, software, performance, generalized indicator of reliability

For citation: Smagin V.A., Lavrov R.O., Litvinenko S.F. Generalization of the concept of reliability resource information and measurement systems based on the principle of N.M. Sedyakin. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(4):40–47. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-4-5

Введение

19 апреля 2022 г. исполнилось 100 лет со дня рождения выдающегося ученого, доктора технических наук, профессора Николая Михайловича Седякина, начальника кафедры эксплуатации автоматизированных систем управления и связи Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского (в настоящее время кафедры метрологического обеспечения вооружения, военной и специальной техники), известного ученого в теории случайных импульсных потоков, теории эксплуатации сложных систем и теории надежности. В 1965 г. им сделан доклад на тему «Об одном физическом принципе теории надежности и его приложениях», а 1966 г. опубликована статья в журнале «Известия АН СССР. Техническая кибернетика» [1]. Сущность его работы сводится к тому, что им впервые сформулирован основной закон теории надежности, который гласит, что надежность системы зависит от величины выработанного ею ресурса надежности и не зависит от того, как он был выработан. Ресурс надежности количественно определялся в виде

$$r(t, \epsilon) = \int_0^t \lambda(z, \epsilon) dz, \quad (1)$$

где $\lambda(t, \epsilon)$ – интенсивность отказа системы, работающей в течение времени t в условиях физического нагружения ϵ .

Закон многократно проверялся экспериментально на различных технических элементах и устройствах, и было установлено, что он выполнялся при недостаточно сильных физических нагружениях. Но при сильных нагружениях его выполнение не наблюдалось. Тем не менее на основе этого закона было написано большое количество научных работ по теории надежности, и он использовался при ускоренных и форсированных испытаниях элементов и систем на надежность.

В работе [2] представлен ряд научных исследований и опубликовано предложение с теоретическим обобщением закона. Сущность этого предложения заключалась в необходимости учета при расчетах надежности перепадов величин нагружений и времени их наблюдения. Если ранее вероятность безотказной работы объекта определялась по формуле

$$P(t, \epsilon) = e^{-\int_0^t \lambda(z, \epsilon) dz}, \quad (2)$$

то после теоретического обобщения было рекомендовано вводить относительное условное нагружение и выполнять расчеты надежности с применением не только интегральной формы расчета (2), но и с переходом к интегрально-дифференциальной форме расчета.

В качестве объекта применения в данной статье рассмотрим измерительные системы, метрологические комплексы с аппаратным и программным обеспечением или информационно-измерительные системы (ИИС), предназначенные для получения измерительной информации о значениях различных параметров аппаратуры военного и гражданского назначения [4].

Надежность программного обеспечения и формула D. Musa

Если 60-е гг. прошлого столетия были годами появления и становления теории надежности аппаратных средств, то 80-е гг. были годами рождения и развития надежности программных средств. Конечно, доработки на технике были связаны с повышением надежности и готовности на первом этапе развития этой науки. Но они не были столь характерными, как на втором этапе развития, а именно, периоде развития надежности программного обеспечения. Поэтому первый характеризуется появлением понятия ресурса надежности и формулы Н. М. Седякина для него, второй этап характеризуется появлением модели доработок в программном обеспечении в виде тестирования и формулы D. Musa для него [5].

В своей работе D. Musa показал, какого эффекта в надежности программного обеспечения можно достичь, если до его применения по назначению многократно подвергать тестированию с целью обнаружения и устранения дефектов в нем. Он предложил простейшую математическую модель расчета безошибочности работы программного обеспечения с учетом его предварительного

тестирования до использования по назначению [5]. Если воспользоваться понятием ресурса надежности Н. М. Седякина, то в обобщенном виде можно записать выражение для вероятности его безошибочного функционирования:

$$P(r, \rho) = e^{-r} \cdot e^{-\rho}, \quad (3)$$

где r – обычный ресурс надежности программного обеспечения после его изготовления; ρ – ресурс, потраченный на предварительное тестирование. Используя временные обозначения для времени использования программного обеспечения по назначению t и времени его тестирования τ , можно записать

$$P(t, \tau) = e^{-\int_0^t \lambda(z) dz} \cdot e^{-\int_0^{\tau} v(z) dz}, \quad (4)$$

где λ – интенсивность возникновения ошибки в программном коде; v – интенсивность обнаружения и устранения дефекта в программном обеспечении при его тестировании до применения.

Если ранее вероятность безошибочной работы программного обеспечения обозначали как $P(t)$ и называли ее безотказностью, то в условиях получения формулы (4) будем вероятность $P(t, \tau)$ называть вероятностью работоспособности программы. С ней свяжем понятие ресурса $r(t, \tau)$ работоспособности программы, который в отличие от ресурса надежности будем понимать так:

$$r(t, \tau) = \int_0^t \lambda(z) dz + \int_0^{\tau} v(z) dz. \quad (5)$$

В приведенных выражениях временные показатели надежности (работоспособности) следует сопровождать показателями условий их получения или, точнее, физического нагружения, как это, например, делается в формуле ресурса надежности введением величины нагружения ε .

Исследование влияния процесса тестирования программного обеспечения информационно-измерительных систем на их работоспособность

Расчет надежности программного обеспечения рассматривается как один из возможных объектов расчета надежности в сложных технических системах. Рассмотрим упражнение в виде выполнения численных расчетов простого примера программного обеспечения ИИС с применением обобщенной формулы Д. Муса с целью ее графического представления. Итак, мы имеем выражение для определения вероятности безошибочного функционирования программного обеспечения:

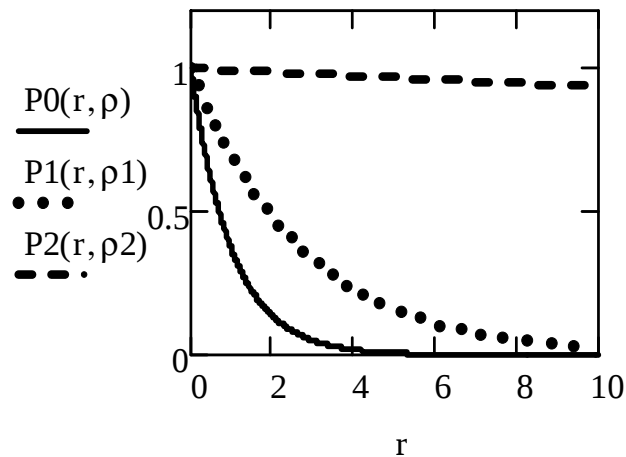
$$P(r, \rho) = e^{-r} \cdot e^{-\rho}, \quad (6)$$

где r – ресурс надежности программного кода в смысле Н. М. Седякина; ρ – дополнительный потенциальный ресурс работоспособности, вводимый в разработанную программу в процессе ее предварительных доработок или тестирования. Формальное количественное представление ρ выражается так же, как и ресурс r , но имеет совершенно другое смысловое содержание.

В выполняемом примере полагаем, что значения r изменяются непрерывно в некотором диапазоне значений, а значения ρ принимают значения $\rho = 0, \rho_1 = 1, \rho_2 = 5$. При этих значениях ρ вероятности успешной работоспособности, соответственно, принимают следующие выражения:

$$P_0(r, \rho) = e^{-r} e^{-\rho}, \quad P_1(r, \rho_1) = e^{-r} e^{-\rho_1}, \quad P_2(r, \rho_2) = e^{-r} e^{-\rho_2}. \quad (7)$$

На рис. 1 представлены вероятности (7). Из данного рисунка следует, что вероятность сохранения успешной работоспособности программного обеспечения в зависимости от величины предварительно введенного потенциального ресурса ρ до начала его применения возрастает с его увеличением.


 Рис. 1. Характер изменения вероятностей $P(0)$, $P(1)$, $P(2)$

Далее рассмотрим зависимость полного ресурса работоспособности программного обеспечения от ресурса надежности Н. М. Седякина при различных значениях введенного потенциального ресурса.

Полный ресурс работоспособности программного обеспечения представляется следующими выражениями:

$$R(r, \rho) = r \cdot e^{-\rho}, \quad R(t, \tau) = \left(\int_0^t \lambda(z) dz \right) \cdot e^{-\int_0^{\tau} \mu(u) du}. \quad (8)$$

Рассмотрим три значения величины полного ресурса работоспособности программного обеспечения при указанных выше значениях потенциального ресурса $\rho = 0, \rho_1 = 1, \rho_2 = 5$ по первой формуле из (7).

Они представляются такими выражениями:

$$R0(r) = re^{-\rho}, \quad R1(r) = re^{-\rho_1}, \quad R2(r) = re^{-\rho_2}. \quad (8)$$

На рис. 2 представлены графики зависимостей (8).

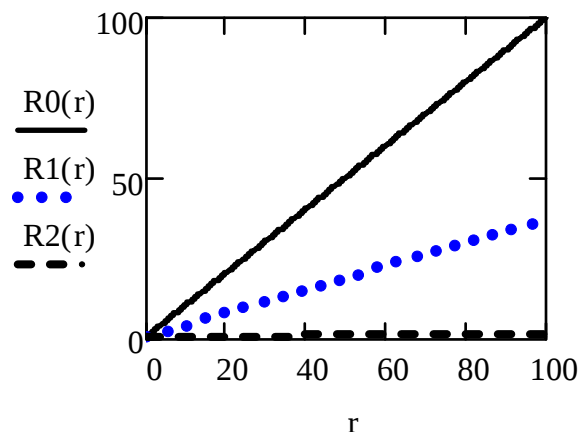


Рис. 2. Изменение полного ресурса работоспособности программного обеспечения

Они позволяют сделать вывод о том, что в зависимости от значения величины ресурса надежности Н. М. Седякина программного обеспечения значения полного ресурса его работоспособности увеличиваются. Это определяется тем, что величина выработанного программного обеспечения ресурса увеличивается. При этом величина выработанного полного ресурса работоспособности про-

граммного обеспечения наблюдается тем меньше, чем большее значение у него предварительно введенного потенциального ресурса. Иначе можно утверждать, что чем больше величина предварительно введенного в него потенциального ресурса до применения программного обеспечения по назначению, тем больше у него способность сохранять меньшую величину вырабатываемого его ресурса при эксплуатации. Для простоты восприятия эффекта рассмотрим простой расчетный пример. Пусть величина ресурса надежности изготовленного программного обеспечения (ресурса Н. М. Седякина) без его профилактического обслуживания (тестирования) равна $r = 0,5$. Рассмотрим, какой результат мы получим, если будем вводить в него потенциальный ресурс величиной ρ . На рис. 3 показана зависимость вероятности успешной реализации программного обеспечения в данном случае, которая вычислена по формуле

$$P(r, \rho) = e^{-re^{-\rho}}, \quad (10)$$

где $r = 0,5$, $\rho = 0, 0,1, \dots, 10$.

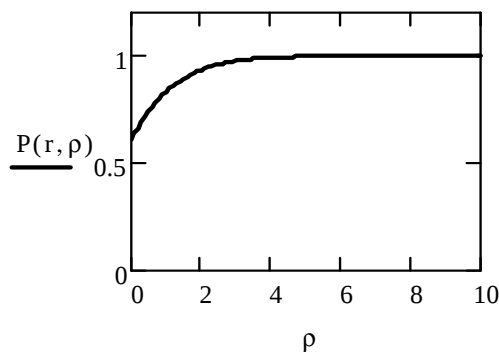


Рис. 3. Зависимость вероятности реализации

Обобщение понятия ресурса надежности Н. М. Седякина на основе вероятностной модели D. Musa до понятия ресурса работоспособности современных информационно-измерительных систем и его значение

Подведем условный вывод о кратком поэтапном развитии теории надежности, представленном в виде дух последовательных этапов, соответствующих появлению двух количественных характеристик или показателей Н. М. Седякина и D. Musa. Надежность – это свойство объекта сохранять его работоспособность в определенных условиях в течение определенного времени [1]. Имевшееся ранее различие к подходу теории надежности в формах математического и физического считаем несущественным, так как они преследовали одну и ту же цель и только дополняли и обогащали друг друга.

На первом этапе развития теории надежности профессор Н. М. Седякин предложил обобщенный интегральный показатель надежности технических систем, названный им ресурсом надежности на основе существования реальных физических и вероятностных (статистических) данных.

На втором этапе развития теории надежности, связанном с такими процессами, как доработка объектов по выявлению и устранению дефектов техники до ее применения по назначению, а также тестирование сложных программных средств, зарубежный ученый D. Musa предложил новую математическую модель, включающую количественный учет дополнительного экспериментального исследования объектов с целью повышения их работоспособности в процессе применения по назначению.

Рассмотрение двух совместных этапов количественного оценивания надежности аппаратных и программных средств позволило нам ввести обобщенный показатель работоспособности в виде формулы (5). С нашей точки зрения этот показатель может быть применен и для информационно-измерительных систем [6]. Действительно, данные системы в определенных условиях реализации различных этапов жизненного цикла определяются конечным статистическим (вероятностным) ресурсом. Его можно определить количественно в смысле ресурса надежности Н. М. Седякина. Работоспособность при данном ресурсе будет существенно зависеть от режима эксплуатации, проведения текущего ремонта и технического обслуживания объектов.

Как можно трактовать рассматриваемый обобщенный показатель работоспособности программного обеспечения информационно-измерительных систем? Предприятия промышленности

производят информационно-измерительные системы с определенным ресурсом надежности. Этот ресурс количественно статистически конечен из-за воздействия внешних и внутренних факторов. Выбирая жизненную стратегию, переходя ко второму этапу, он может управлять величиной потенциально вводимого ресурса работоспособности, вводя «доработки» и «процесс тестирования и устранения» этим некоторых определенных нежелательных событий жизни информационно-измерительных систем. В формуле (5) введен в показателе степени у ресурса надежности Седякина Н. М. множитель e^{-p} , означающий уменьшение утраченного ресурса надежности Седякина Н. М. тем больше, чем больше величина введенного предварительно потенциального ресурса. Физически это означает прореживание существующих вредоносных событий по мере введения значения и величины потенциального ресурса. Величина этого потенциального ресурса уже не может содержать дополнительного экспоненциального множителя, который мог бы только реально ухудшить ситуацию с наступлением новых по времени этапов жизненного цикла информационно-измерительных систем. Величина этого потенциального ресурса может быть представлена только суммой частных составляющих потенциального ресурса, вводимых в процессе его эксплуатации. Формально это представимо так:

$$\rho = \sum_{i=1}^{\hat{n}} \rho_i, \quad (11)$$

где $\hat{n}$ – случайное число событий; ρ_i – величина частного жизненного ресурса. Если бы мы ввели величину для множителя показателя ресурса ρ в виде $e^{+\gamma}$, то пришли бы к нереальному выводу о единичной вероятности эксплуатации объекта. Если ρ представить в виде суммы частных ресурсов, то это может позволить решать новые, реальные для работоспособности информационно-измерительных систем задачи обеспечения его работоспособности с учетом различных затрат и факторов жизненного цикла.

Заключение

В статье выделено двухэтапное событие, имевшее место в процессе развития теории надежности систем. Первый этап связан с введением Седякиным Н. М. понятия ресурса надежности объекта как основного показателя надежности систем, который объект имеет и вырабатывает во время применения по назначению.

Второй этап связан с явлением увеличения продолжительности действия объекта за счет устранения его возможных отказов и дефектов благодаря доработкам технического объекта и тестирования функционирования программного обеспечения объекта перед применением по назначению.

На основе выделения этих двух этапов предложено количественное обобщение их частных показателей в один общий показатель – ресурс работоспособности объекта. Выполнено исследование свойств этого показателя и предложены рекомендации по его использованию и дальнейшему развитию в стратегиях реализации исправного технического состояния на различных этапах жизненного цикла информационно-измерительных систем с целью повышения их работоспособности.

Список литературы

1. Седякин Н. М. Об одном физическом принципе теории надежности // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. 1966. № 3. С. 80–87.
2. Смагин В. А. Обобщение физического принципа теории надежности профессора Н. М. Седякина // Информация и космос. 2006. № 3. С. 71–78.
3. Смагин В. А. Модели оценивания надежности элементов на основе форсирования испытаний // Техническая синергетика. Вероятностные модели сложных систем : монография. СПб., 2004. 171 с.
4. Смагин В. А., Лавров Р. О., Пихтов А. И. Информационный подход оценивания точности метрологических систем // Информация и космос. 2010. № 1. С. 42–44.
5. Полтавский А. В., Тюгашев А. А., Юрков Н. К. Оптимизация информационно-измерительной системы беспилотного воздушного судна // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 4. С. 44–55.
6. Musa J. A theory of software reliability and its application // IEEE Trans. on software Eng. 1975. Vol. SE-1. P. 312–327.

7. Смагин В. А., Лавров Р. О., Богданец А. В., Ширямов О. А. Расчет показателя вероятности выполнения измерительной задачи информационно-измерительной системой с временной избыточностью // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9, № 4. С. 42–47.
8. Ильин А. С., Плаксунов Р. Ф., Юрков Н. К. [и др.]. Модель обеспечения комплексной защиты информационно-измерительной системы поверки киловольтметров // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2022. Т. 2. С. 220–221.
9. Рыбаков И. М., Юрков Н. К., Баннов В. Я. Информационно-измерительная система на основе кибернетического модуля дистанционной коммутационной сети // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2022. Т. 2. С. 77–80.

References

1. Sedyakin N.M. On one physical principle of reliability theory. *Izvestiya AN SSSR. Tekhnicheskaya kibernetika = Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Technical cybernetics*. 1966;(3):80–87. (In Russ.)
2. Smagin V.A. Generalization of the physical principle of the reliability theory of Professor N.M. Sedyakin. *Informatsiya i kosmos = Information and Cosmos*. 2006;(3):71–78. (In Russ.)
3. Smagin V.A. Models for estimating the reliability of elements based on forcing tests. *Tekhnicheskaya sinergetika. Veroyatnostnye modeli slozhnykh sistem: monografiya = Technical Synergetics. Probabilistic models of complex systems : monograph*. Saint Petersburg, 2004:171. (In Russ.)
4. Smagin V.A., Lavrov R.O., Pikhtov A.I. Informational approach to assessing the accuracy of metrological systems. *Informatsiya i kosmos = Information and Cosmos*. 2010;(1):42–44. (In Russ.)
5. Poltavskiy A.V., Tyugashev A.A., Yurkov N.K. Optimization of the information and measurement system of an unmanned aircraft. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(4):44–55. (In Russ.)
6. Musa J.A theory of software reliability and its application. *IEEE Trans. on software Eng.* 1975;SE-1:312–327.
7. Smagin V.A., Lavrov R.O., Bogdanets A.V., Shiryamov O.A. Calculation of the probability of performing a measuring task by an information-measuring system with time redundancy. *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli = High-tech technologies in space exploration of the Earth*. 2017;9(4):42–47. (In Russ.)
8. Il'in A.S., Plaksunov R.F., Yurkov N.K. et al. A model for providing integrated protection of an information and measuring system for checking kilovoltmeters. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2022;2:220–221. (In Russ.)
9. Rybakov I.M., Yurkov N.K., Bannov V.Ya. Information and measurement system based on a cybernetic module of a remote switching network. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2022;2:77–80. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Александрович Смагин

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры метрологического обеспечения
вооружения, военной и специальной техники,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: va_smagin@mail.ru

Роман Олегович Лавров

кандидат технических наук, доцент,
заместитель начальника кафедры
метрологического обеспечения вооружения,
военной и специальной техники,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: 9432923@mail.ru

Vladimir A. Smagin

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department of metrological support
of weapons, military and special equipment,
Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky
(13 Zhdanovskaya street, Saint Petersburg, Russia)

Roman O. Lavrov

Candidate of technical sciences, associate professor,
deputy head of the sub-department of metrological
support of weapons, military and special equipment,
Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky
(13 Zhdanovskaya street, Saint Petersburg, Russia)

Сергей Федорович Литвиненко

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры метрологического обеспечения
вооружения, военной и специальной техники,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: 89818438422@mail.ru

Sergey F. Litvinenko

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of metrological support of weapons,
military and special equipment,
Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky
(13 Zhdanovskaya street, Saint Petersburg, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 17.05.2022

Поступила после рецензирования/Revised 13.06.2022

Принята к публикации/Accepted 04.07.2022

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ И ПРОИЗВОДСТВО ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

DESIGN, CONSTRUCTION AND AIRCRAFT MANUFACTURING

УДК 519.873

doi:10.21685/2307-4205-2022-4-6

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПАРНОГО АРБИТРАЖА В ИЗБЫТОЧНЫХ КОМПЛЕКСАХ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

А. М. Агеев¹, В. Н. Буков²

¹ Военно-воздушная академия имени проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, Воронеж, Россия,

² Научно-исследовательский институт авиационного оборудования, Жуковский, Московская обл., Россия

¹ ageev_bbc@mail.ru, ² v_bukov@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Методической основой высоконадежной техники при ограниченной по надежности ее составных частей является реконфигурирование избыточных систем. Задача статьи состоит в изложении и анализе результатов статистического моделирования системы, реализующей развиваемый авторами подход к управлению избыточностью комплекса бортового оборудования на основе супервизоров конфигураций с оценкой различных вариантов организации их арбитража. *Материалы и методы.* Предложены структура и основные положения стохастической модели, воспроизводящей процессы парного арбитража конфигураций с использованием супервизоров конфигураций, а также имитирующей случайные неисправности (отказы) различных компонентов конфигураций и ошибки (сбои) модулей анализа, формирующих решение о предпочтении той или иной конфигурации технической системы, условно неограниченной по объему ресурсов. Модель воспроизводит три варианта алгоритма арбитража: упрощенный бинарный, полный бинарный (индексы предпочтения – бинарные переменные) и триплексный (индексы предпочтения – триплексные переменные), а также алгоритм простого компаратора для сравнительного анализа по критериям достоверности выбора предпочтения и полноты диагностирования ошибок модулей анализа. *Результаты.* Сравнение моделируемых алгоритмов показало изменчивость статистических показателей по мере накопления неисправляемых ошибок, содержащихся в супервизорах конфигураций. Для относительно небольшого количества ошибок (в пределах первой тысячи) показано определенное преимущество бинарных алгоритмов над триплексным и подавляющее – над компаратором. *Выводы.* Использование алгоритмов парного арбитража предложенного типа позволит реализовывать требуемые уровни надежности бортовых комплексов с избыточным числом разнородных ресурсов.

Ключевые слова: оценка надежности, реконфигурирование, управление избыточностью, супервизор конфигураций, распределение отказов, достоверность предпочтений, полнота диагностирования

Для цитирования: Агеев А. М., Буков В. Н. Эффективность парного арбитража в избыточных комплексах бортового оборудования // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 4. С. 48–66. doi:10.21685/2307-4205-2022-4-6

THE EFFECTIVENESS OF THE PAIRED ARBITRATION IN REDUNDANT COMPLEXES OF ON-BOARD EQUIPMENT

A.M. Ageev¹, V.N. Bukov²

¹ N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russia

² Research Institute of Aviation Equipment, Zhukovsky, Moscow region, Russia

¹ ageev_bbc@mail.ru, ² v_bukov@mail.ru

Abstract. *Background.* The methodological basis of highly reliable equipment with limited reliability of its components is the reconfiguration of redundant systems. The task of the article is to present and analyze the results of

statistical modeling of the system, that implements the approach developed by the authors to control the redundancy of the on-board equipment complex based on configuration supervisors with an assessment of various options for organizing their arbitration. *Materials and methods.* The structure and main provisions of a stochastic model reproducing the processes of paired arbitration of configurations using configuration supervisors, as well as simulating random malfunctions (failures) of various configuration components and errors (failures) of analysis modules forming a decision on the preference of a particular configuration of a technical system, conditionally unlimited in terms of resources, are proposed. The model reproduces three arbitration algorithm variants: simplified binary, full binary (preference indexes – binary variables) and triplex (preference indexes – triplex variables), as well as the algorithm of a simple comparator for comparative analysis by criteria of reliability of preference selection and completeness of error diagnosis of analysis modules. *Results.* Comparison of the simulated algorithms showed the variability of statistical indicators with the accumulation of uncorrectable errors contained in the configuration supervisors. For a relatively small number of errors (within the first thousand), a certain advantage of binary algorithms over triplex and overwhelming over comparator is shown. *Conclusions.* The use of proposed type paired arbitration algorithms will make it possible to implement the required levels of reliability of on-board complexes with an excessive number of heterogeneous resources.

Keywords: assessment of reliability, reconfiguration, redundancy management, supervisor of configuration, distribution of failures, reliability of preferences, completeness of diagnosis

For citation: Ageev A.M., Bukov V.N. The effectiveness of the paired arbitration in redundant complexes of on-board equipment. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(4):48–66. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-4-6

Введение

Один из путей создания высоконадежных отказоустойчивых комплексов бортового оборудования связан с реализацией идей управляемой избыточности [1, 2]. Соответствующие подходы позволяют, во-первых, парировать организационными методами естественную ограниченность надежностных характеристик составляющих элементов, а во-вторых, обеспечить гибкость применения таких систем в различных условиях и под воздействием различных неблагоприятных факторов [3, 4].

К числу подходов к построению систем с управляемой избыточностью относится супервизорный подход [5, 6], подразумевающий наличие специальных программных объектов по числу заранее отработанных конкурентоспособных конфигураций избыточных ресурсов технической системы. Каждый из этих объектов, названных супервизорами конфигураций (СК), периодически осуществляет определенную совокупность процедур, обеспечивающую мониторинг готовности, верификацию, участие в межсупервизорном арбитраже и реализацию (в случае обретения предпочтения в сложившихся условиях) соотносенной с ним конфигурации.

Центральным ядром такого подхода является так называемый парный арбитраж конфигураций (ПАК), выполняемый по определенным правилам [7]. Конфигурация, предпочтительность которой выявляется попарным сравнением всех доступных конфигураций, подлежит реализации на протяжении текущего цикла управления избыточностью.

Для оценки работоспособности и эффективности системы, реализующей предложенные алгоритмы парного арбитража, было выполнено статистическое моделирование такой системы в условиях случайных отказов компонентов избыточной системы, отражаемых в СК, и ошибок модулей анализа (МА), входящих в состав СК и осуществляющих собственно распределение предпочтений СК (и соотносенных конфигураций).

Цели проведения исследования:

- определение особенностей реализации алгоритмов,
- сравнительная оценка характеристик достоверности выбора предпочтений,
- сравнительная оценка полноты диагностирования ошибок арбитража,
- выработка практических рекомендаций по применению алгоритмов в вычислительных системах.

Описание стохастической модели процессов арбитража

Модель отражает процессы, протекающие в гипотетической системе с условно бесконечным количеством устройств, находящихся в горячем резерве, предполагающим одновременное старение всех компонентов на всем интервале работы системы.

Модель содержит:

- модель состояний СК, осуществляющую формирование состояния их исправности (готовности) и показателей эффективности;

- модель ошибок модулей анализа (МА);
 - модель системы арбитража, формирующую индексы готовности (ИГ), матрицы предпочтений (МП) с учетом ошибок МА и принимаемое решение с использованием таблиц предпочтения в соответствии с исследуемым вариантом алгоритма арбитража;
 - блок статистического анализа получаемых результатов.
- Структура модели представлена на рис. 1.

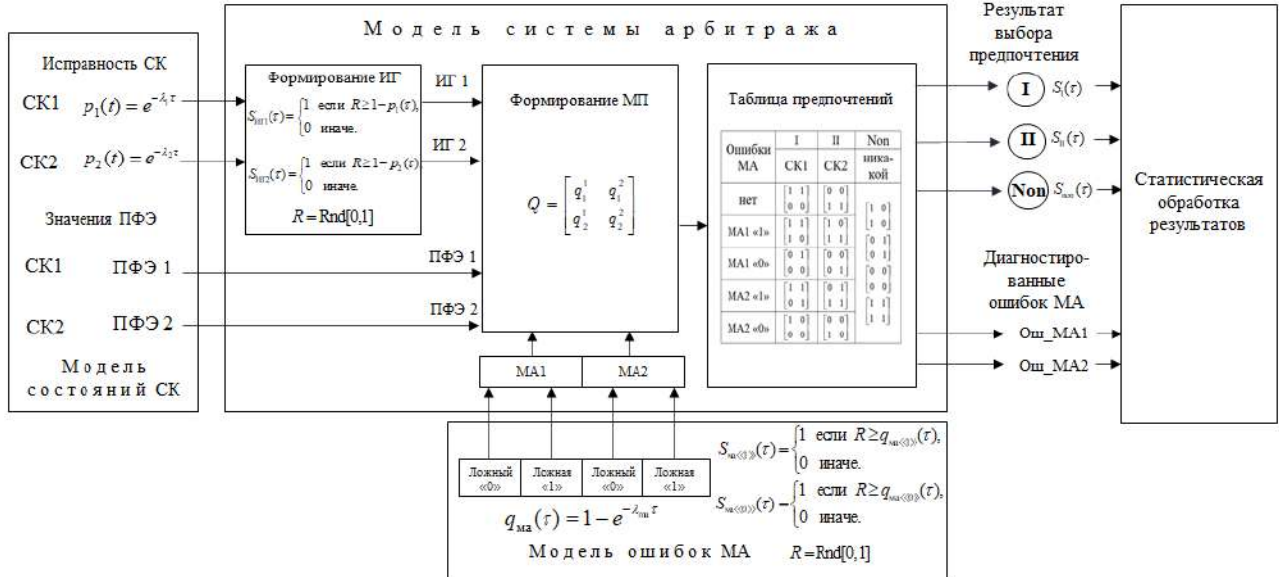


Рис. 1. Стохастическая модель системы арбитража конфигураций

Состояния исправности СК моделировались случайными событиями с экспоненциальным законом распределения отказов вида

$$p_k(\tau) = e^{-\lambda_k \tau}$$

с интенсивностями возникновения отказов λ_k , где k – номер СК в сравниваемой паре (1 или 2); τ – время моделирования, $\tau \in [0, T]$; T – интервал моделирования.

Аналогично ошибки МА моделировались случайными событиями с вероятностями их возникновения вида

$$q_{МАk\langle\langle*\rangle\rangle}(\tau) = 1 - e^{-\lambda_{МАk\langle\langle*\rangle\rangle} \tau}$$

с одинаковыми интенсивностями $\lambda_{МАk}$ возникновения ошибок МА типа «ложный 0» и «ложная 1», на 1–2 порядка меньшими интенсивностей отказов СК, $\langle\langle*\rangle\rangle$ – тип ошибки МА («0» или «1»).

Случайные значения готовности СК и исправности МА формировались как бинарные случайные оценки с независимыми значениями по правилам [8]:

$$S_{игk}(\tau) = \begin{cases} 1 & \text{при } R \geq 1 - p_k(\tau), \\ 0 & \text{иначе} \end{cases} \quad \text{и} \quad S_{маk\langle\langle*\rangle\rangle}(\tau) = \begin{cases} 1 & \text{при } R < q_{маk\langle\langle*\rangle\rangle}(\tau), \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases}$$

где R – равномерно распределенная на отрезке $[0,1]$ случайная величина: $R = \text{Rnd}[0,1]$. Чертой над символами $\overline{S_{игk}}(\tau)$ и $\overline{S_{маk\langle\langle*\rangle\rangle}}(\tau)$ далее обозначаются инверсии указанных случайных бинарных оценок.

Формирование индексов готовности, оценок состояний, матриц предпочтений, а также содержание логических таблиц предпочтения осуществляется в соответствии с алгоритмами функционирования каждого из исследуемых вариантов арбитража.

Разработанная модель работает циклически с шагом τ на интервале от 0 до T . На каждом указанном шаге выполняется совокупность операций, включающая:

- а) случайное однократное возникновение и накопление ошибок в состояниях СК и МА, с интенсивностями, учитывающими старение устройств, включая их системы контроля;
- б) выполнение отнесенного к паре СК одного полного цикла алгоритма арбитража с учетом не накапливающихся однократных ошибок представления или обработки данных, присущих их МА¹.

Выходные параметры

Частными результатами работы модели являются:

- оценки выбора предпочтительных СК $S_{пр}(\tau)$ в паре, принимающие значения: «0» – при отсутствии предпочтения какого-либо СК в паре, «1» – при выборе СК1, «2» – при выборе СК2;
 - диагностические оценки состояния МА $S_{МАk\langle(*)\rangle}^d(\tau)$, принимающие бинарные значения: «0» – при выявлении соответствующей ошибки МА, «1» – в противном случае.
- Обобщенными результатами (на каждом шаге τ) работы модели являются:

а) *статистика отказов СК и ошибок МА:*

- число возникающих отказов СК:

$$N_{отк.k}(\tau) = N_{отк.k}(\tau-1) + \overline{S_k}(\tau);$$

- число одновременных отказов СК1 и СК2:

$$N_{отк.1,2}(\tau) = N_{отк.1,2}(\tau-1) + [\overline{S_1}(\tau) + \overline{S_2}(\tau)];$$

- число возникающих ошибок МА типа «ложный 0» и «ложная 1»:

$$N_{ош.МАk\langle(*)\rangle}(\tau) = \begin{cases} 1 & \text{при } \overline{S_{МАk\langle(*)\rangle}}(\tau) = 1, \\ 0 & \text{иначе;} \end{cases}$$

- общее число всех ошибок МА:

$$N_{ош.МА}(\tau) = N_{ош.МА}(\tau-1) + [N_{ош.МА1\langle(1)\rangle}(\tau) + N_{ош.МА1\langle(0)\rangle}(\tau) + N_{ош.МА2\langle(1)\rangle}(\tau) + N_{ош.МА2\langle(0)\rangle}(\tau)];$$

б) *статистика оценок предпочтений:*

- число состояний выбора предпочтений:

$$N_{(X)}(\tau) = \begin{cases} N_{(X)}(\tau-1) + 1 & \text{при } S_{пр}(\tau) = (X), \\ N_{(X)}(\tau-1) & \text{иначе,} \end{cases}$$

где (X) – вариант предпочтения (1, 2, 0);

- вероятность наступления выбора предпочтений:

$$P_{(X)}(\tau) = \frac{N_{(X)}(\tau)}{\tau};$$

в) *статистика диагностирования ошибок МА:*

- число диагностируемых ошибок МА:

$$N_{ош.МАk\langle(*)\rangle}^d(\tau) = N_{ош.МАk\langle(*)\rangle}^d(\tau-1) + \begin{cases} 1 & \text{при } \overline{S_{МАk\langle(*)\rangle}^d}(\tau) = 1, \\ 0 & \text{иначе;} \end{cases}$$

- общее число всех диагностируемых ошибок МА:

$$N_{ош.МА}^d(\tau) = N_{ош.МА}^d(\tau-1) + [N_{ош.МА1\langle(1)\rangle}^d(\tau) + N_{ош.МА1\langle(0)\rangle}^d(\tau) + N_{ош.МА2\langle(1)\rangle}^d(\tau) + N_{ош.МА2\langle(0)\rangle}^d(\tau)];$$

¹ Здесь подразумевается, что на одном цикле моделирования может возникнуть только одна ошибка МА одного из возможных типов: ложный «0» или ложная «1». При этом ошибки МА не накапливаются, т.е. носят характер случайных сбоев, пропадающих на следующем шаге моделирования.

г) статистика возникновения конфликтных значений МП:

– числа конфликтных значений МП типа $\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ и $\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$:

$$N_{00}(\tau) = N_{00}(\tau-1) + \begin{cases} 1 & \text{при } \text{МП}(\tau) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \\ 0 & \text{иначе;} \end{cases}$$

$$N_{11}(\tau) = N_{11}(\tau-1) + \begin{cases} 1 & \text{при } \text{МП}(\tau) = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}; \\ 0 & \text{иначе;} \end{cases}$$

– общее число всех конфликтных ситуаций МП:

$$N_{\Sigma\text{конфл}}(\tau) = N_{\Sigma\text{конфл}}(\tau-1) + [N_{\Sigma 00}(\tau) + N_{\Sigma 11}(\tau)];$$

– число конфликтных ситуаций МП типа $\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, связанных с отказами обоих СК:

$$N_{00}^{\text{отк.1,2}}(\tau) = N_{00}^{\text{отк.1,2}}(\tau-1) + \begin{cases} 1 & \text{при } \text{МП}(\tau) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ и } (S_1(\tau) = 0) \text{ и } (S_2(\tau) = 0); \\ 0 & \text{иначе;} \end{cases}$$

– число конфликтных ситуаций МП типа $\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, связанных с ошибками МА:

$$N_{00}^{\text{МА}}(\tau) = N_{00}(\tau) - N_{00}^{\text{отк.1,2}}(\tau);$$

д) статистика возникновения ошибок арбитража различного рода¹, условия возникновения и учета которых определяются следующим образом:

Ошибки I рода (ложная отбраковка предпочтения) – годное состояние СК ошибочно признается негодным, т.е. ошибочно СК не выбирается предпочтительным, будучи в реальности таковым.

В данном случае к ошибкам I рода относятся все ситуации, когда:

а) СК1 исправен, но не выбирается (с учетом того, что при исправности обоих СК действует дискриминационное правило выбора первого), при этом предпочтение отдается СК2, число таких ошибок определяется по формуле

$$N_{\text{ош.I.a}}(\tau) = N_{\text{ош.I.a}}(\tau-1) + \begin{cases} 1 & \text{при } (S_1(\tau) = 1) \text{ и } (S_{\text{пр}}(\tau) \neq 1), \\ 0 & \text{иначе;} \end{cases}$$

б) СК1 неисправен, СК2 исправен, но он не выбирается, при этом бракуются оба СК, число таких ошибок определяется как

$$N_{\text{ош.I.б}}(\tau) = N_{\text{ош.I.б}}(\tau-1) + \begin{cases} 1 & \text{при } (S_2(\tau) = 1) \text{ и } (S_1(\tau) \neq 1) \text{ и } (S_{\text{пр}}(\tau) \neq 2), \\ 0 & \text{иначе;} \end{cases}$$

¹ Здесь применяется принятая в области систем контроля и диагностики классификация на ошибки I (ложная отбраковка) и II (ложный выбор) рода. Однако, несмотря на схожий понятийный смысл, имеются особенности трактования таких ошибок применительно к решаемой задаче: ложные отбраковка и выбор предпочтительного СК связываются исключительно с ошибками определения их готовности. Дополнительно в силу специфичности задачи вводится понятие ошибок III рода, обусловленных ложными результатами сопоставления их эффективности.

в) СК1 и СК2 исправны, но бракуются оба СК, число таких ошибок определяется как

$$N_{\text{ош. I. в}}(\tau) = N_{\text{ош. I. в}}(\tau-1) + \begin{cases} 1 & \text{при } (S_1(\tau)=1) \text{ и } (S_2(\tau)=1) \text{ и } (S_{\text{пр}}(\tau)=0), \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases}$$

Общее число ошибок I рода в итоге определяется формулой

$$N_{\text{ош. I}}(\tau) = N_{\text{ош. I. а}}(\tau) + N_{\text{ош. I. б}}(\tau) + N_{\text{ош. I. в}}(\tau).$$

Ошибки II рода (ложный выбор предпочтения) – негодное состояние СК ошибочно признается годным, т.е. предпочтение ошибочно отдается СК, который в реальности оказывается негодным.

К ошибкам II рода относятся следующие ситуации:

а) выбирается СК1 при его отказном состоянии, число ошибок определяется формулой

$$N_{\text{ош. II. а}}(\tau) = N_{\text{ош. II. а}}(\tau-1) + \begin{cases} 1 & \text{при } (S_1(\tau)=0) \text{ и } (S_{\text{пр}}(\tau)=1), \\ 0 & \text{иначе;} \end{cases}$$

б) выбирается СК2 при его отказном состоянии

$$N_{\text{ош. II. б}}(\tau) = N_{\text{ош. II. б}}(\tau-1) + \begin{cases} 1 & \text{при } (S_2(\tau)=0) \text{ и } (S_{\text{пр}}(\tau)=2), \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases}$$

Общее число ошибок II рода определяется формулой

$$N_{\text{ош. II}}(\tau) = N_{\text{ош. II. а}}(\tau) + N_{\text{ош. II. б}}(\tau).$$

Ошибки III рода¹ (ошибка оценки эффективности) – ошибки, связанные с ошибочным выбором СК, уступающего по эффективности. К этому роду ошибок относятся следующие ситуации:

а) СК1 исправен, СК2 исправен, ПФЭ1 > ПФЭ2, но ошибочно выбирается СК2, при этом число ошибок составляет

$$N_{\text{ош. III. а}}(\tau) = N_{\text{ош. III. а}}(\tau-1) + \begin{cases} 1 & \text{при } [(S_1(\tau)=1) \text{ и } (S_2(\tau)=1)] \text{ или } [(ПФЭ1 > ПФЭ2) \text{ и } (S_{\text{пр}}(\tau)=2)], \\ 0 & \text{иначе;} \end{cases}$$

б) СК1 исправен, СК2 исправен, ПФЭ1 < ПФЭ2, но ошибочно выбирается СК1, при этом число ошибок составляет

$$N_{\text{ош. III. б}}(\tau) = N_{\text{ош. III. б}}(\tau-1) + \begin{cases} 1 & \text{при } [(S_1(\tau)=1) \text{ и } (S_2(\tau)=1)] \text{ или } [(ПФЭ1 < ПФЭ2) \text{ и } (S_{\text{пр}}(\tau)=1)], \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases}$$

Общее число ошибок III рода определяется формулой

$$N_{\text{ош. III}}(\tau) = N_{\text{ош. III}}(\tau-1) + [N_{\text{ош. III. а}}(\tau) + N_{\text{ош. III. б}}(\tau)].$$

В процессе моделирования вычисляются также вероятности возникновения ошибок выбора предпочтений по формулам

$$P_{\text{ош. I}}(\tau) = \frac{N_{\text{ош. I}}(\tau)}{\tau}, \quad P_{\text{ош. II}}(\tau) = \frac{N_{\text{ош. II}}(\tau)}{\tau}, \quad P_{\text{ош. III}}(\tau) = \frac{N_{\text{ош. III}}(\tau)}{\tau}.$$

При статистической обработке результатов определяются значения:

1) параметры достоверности выбора предпочтений:

– доли событий выбора предпочтений в соответствии с формулами

$$K_{\text{пр (1)}} = \frac{N(S_{\text{пр}}(\tau)=1)}{T}, \quad K_{\text{пр (2)}} = \frac{N(S_{\text{пр}}(\tau)=2)}{T}, \quad K_{\text{пр (1, 2)}} = \frac{N((S_{\text{пр}}(\tau)=1) \text{ или } N(S_{\text{пр}}(\tau)=2))}{T},$$

где $N(*)$ – число указанных событий на интервале моделирования;

¹ Ошибки III рода рассматриваются в вариантах арбитража со сравнением ПФЭ.

– доля событий отсутствия выбора предпочтений

$$K_{\text{пр (Non)}} = \frac{N(S_{\text{пр}}(\tau) = 0)}{T};$$

– доли событий достоверного выбора предпочтений по формулам

$$K_{\text{пр (1)}}^{\text{д}} = \frac{N(S_{\text{пр}}(\tau) = 1 \text{ и } \overline{S_1}(\tau) = 0)}{T}, \quad K_{\text{пр (2)}}^{\text{д}} = \frac{N(S_{\text{пр}}(\tau) = 2 \text{ и } \overline{S_2}(\tau) = 0)}{T},$$

$$K_{\text{пр (Non)}}^{\text{д}} = \frac{N(S_{\text{пр}}(\tau) = 0 \text{ и } \overline{S_1}(\tau) = 1 \text{ и } \overline{S_2}(\tau) = 0)}{T};$$

– доля благополучного выбора предпочтения СК1 или СК2

$$K_{\text{пр (1, 2)}}^{\text{д}} = \frac{N(S_{\text{пр}}(\tau) = 1 \text{ и } \overline{S_1}(\tau) = 0) + N(S_{\text{пр}}(\tau) = 2 \text{ и } \overline{S_2}(\tau) = 0)}{T};$$

– доли ошибок выбора предпочтения I, II и III рода

$$K_{\text{ош. I}} = \frac{N_{\text{ош. I}}(T)}{T}, \quad K_{\text{ош. II}} = \frac{N_{\text{ош. II}}(T)}{T}, \quad K_{\text{ош. III}} = \frac{N_{\text{ош. III}}(T)}{T};$$

– доля всех ошибок выбора предпочтения

$$K_{\Sigma \text{ош}} = K_{\text{ош. I}} + K_{\text{ош. II}} + K_{\text{ош. III}};$$

– достоверность выбора предпочтений (вероятность достоверного определения предпочтений)

$$P_{\text{д}}(\tau) = 1 - [P_{\text{ош. I}}(\tau) + P_{\text{ош. II}}(\tau) + P_{\text{ош. III}}(\tau)];$$

2) параметры полноты диагностирования МА:

– доля ошибок МА указанных типов

$$K_{\text{диагн (k \langle \langle * \rangle \rangle)}}(\tau) = \frac{N_{\text{ош. МАk \langle \langle * \rangle \rangle}}^{\text{д}}(\tau)}{N_{\text{ош. МАk \langle \langle * \rangle \rangle}}(\tau)};$$

– доля всех ошибок (полнота диагностирования) МА

$$K_{\text{диагн}}(\tau) = \frac{N_{\text{ош. МА}}^{\text{д}}(\tau)}{N_{\text{ош. МА}}(\tau)};$$

3) параметры конфликтных ситуаций определения предпочтений:

– доля возникновения конфликтных ситуаций предпочтения

$$K_{\text{конфл}}(\tau) = \frac{N_{\Sigma \text{конфл}}(\tau)}{\tau};$$

– доли конфликтных ситуаций типа $\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ и $\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ среди всех конфликтов

$$K_{00}(\tau) = \frac{N_{\Sigma 00}(\tau)}{N_{\Sigma \text{конфл}}(\tau)}, \quad K_{11}(\tau) = \frac{N_{\Sigma 11}(\tau)}{N_{\Sigma \text{конфл}}(\tau)};$$

– доля конфликтов типа $\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, связанных с отказами обоих СК

$$K_{00}^{\text{отк. 1, 2}}(\tau) = \frac{N_{00}^{\text{отк. 1, 2}}(\tau)}{N_{\Sigma 00}(\tau)}.$$

Выходные параметры формируются в содержащемся в модели блоке статистической обработки результатов.

Условия моделирования

Рассматривались следующие алгоритмы арбитража [7]:

1. Упрощенный вариант с бинарными оценками предпочтения в соответствии с логикой, представленной в табл. 1.

Таблица 1

Формирование первичных оценок предпочтений
при упрощенном бинарном варианте парного арбитража

Комбинация	ИГ1	ИГ2	Описание
I	1	1	Производится оценка ПФЭ путем анализа МП
II	1	0	Предпочтение СК1
III	0	1	Предпочтение СК2
IV	0	0	Нет предпочтений

Напоминаем, что при упрощенном бинарном варианте сравнение ИГ выносится в качестве предварительной операции и в силу простоты его результат не подвергается сомнению.

В случае комбинации I производится углубленное обоснование предпочтения путем сравнения соответствующих ПФЭ с использованием матрицы предпочтений (МП) вида

$$Q_{\text{ПАК.Б}} = \begin{pmatrix} & \text{МА1} & \text{МА2} \\ \text{ОА1} & \begin{bmatrix} q_1^1 & q_1^2 \end{bmatrix} \\ \text{ОА2} & \begin{bmatrix} q_2^1 & q_2^2 \end{bmatrix} \end{pmatrix},$$

где q_i^j – индекс предпочтения i -го СК, определенный j -м МА, в соответствии с табл. 2.

Таблица 2

Формирование индексов предпочтений при упрощенном бинарном варианте парного арбитража

Итог сравнения ПФЭ	Предпочтение	Индексы предпочтения	
		q_1^j	q_2^j
ПФЭ1 > ПФЭ2	СК1	1	0
ПФЭ1 < ПФЭ2	СК2	0	1
ПФЭ1 = ПФЭ2	СК1*	1	0

Примечание. * Для однозначности выбора применяется дискриминационное правило по меньшему порядковому номеру в паре.

Анализ МП осуществляется с использованием табл. 3, предложенной в работе [7].

Методика использования таблиц анализа МП заключается в следующем: по значению МП осуществляется вход в таблицу, где по строкам и столбцам считываются соответствующие этому значению МП предпочтения СК и возможные ошибки МА.

Было принято следующее упрощение использования табл. 3.

Показанные в табл. 3 ошибки МА типа $\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ и $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ связаны с особым видом «перемежа-

ющихся» отказов, когда оба МА на одном такте работы системы ошибочно выдают «мерцающую» ошибку («0» и «1»). Даже учитывая потенциальную возможность возникновения факта таких отказов (например, из-за сбоев электронных триггерных компонентов) в одном МА с вероятностью $\lambda = 10^{-5}$ (на один порядок меньше обычной ошибки «залипания»), вероятность одновременного возникновения аналогичной ошибки и в первом и во втором сравниваемом СК равна приблизительно $2\lambda = 10^{-10}$, что является событием практически невероятным. В связи с этим принято предположение о невозможности возникновения «перемежающихся» отказов. По этой причине в алгоритме арбитража конфигураций не моделировался второй акт арбитража.

Таблица 3

Анализ значений МП при бинарном варианте парного арбитража

1 акт арбитража			2 акт арбитража			
Предпочтение			Ошибки МА	Предпочтение		Ошибки МА
СК1	СК2	Конфликты		СК1	СК2	
$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	нет	Нет	Предпочтение однозначно выявлено на 1-м акте		
	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$		МА1 ₀			
	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$		МА1 ₁			
	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$		МА2 ₀			
	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$		МА2 ₁			
$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$			МА2 ₀			
$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$			МА2 ₁			
$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$			МА1 ₀			
$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$			МА1 ₁			
Нет		$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	МА1 ₁	Отсутствие предпочтения, однозначно выявлено на 1-м акте		
		$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	МА2 ₁			
		$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	нет или МА1 ₀ , или МА2 ₀			
		$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	МА1 ₁ и МА2 ₁			
Переход ко 2-му акту арбитража		$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	Сложные ошибки МА	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$		МА2 ₀
					$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	МА1 ₀
		$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$			$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	МА2 ₀
					$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	МА1 ₀
Общее число значений МП – 16, 1 акт: СК1 – 5, СК2 – 5, нет предпочтений – 4, 2 акт: СК1 – 2, СК2 – 2, серым фоном подняты итоговые значения МП.						

2. Полный вариант с бинарными оценками предпочтений, предусматривающий одновременный анализ как ИГ, так и ПФЭ. Он проводился по табл. 3 в соответствии с логикой, представленной в табл. 4.

Таблица 4

Формирование индексов предпочтений при полном бинарном варианте парного арбитража

Итог сравнения ИГ		Итог сравнения ПФЭ	Предпочтение	Индексы предпочтения	
ИГ1	ИГ2			q_1^j	q_2^j
1	0	не проводится	СК1	1	0
0	1	не проводится	СК2	0	1
1	1	ПФЭ1 > ПФЭ2	СК1	1	0
		ПФЭ1 < ПФЭ2	СК2	0	1
		ПФЭ1 = ПФЭ2	СК1*	1	0
0	0	не проводится	никакой	0	0

Примечание. * Применяется дискриминационное правило.

3. Вариант с триплексными оценками предпочтений в соответствии с логикой, представленной в табл. 5.

Таблица 5

Формирование индексов предпочтений при триплексном варианте парного арбитража

Итог сравнения ИГ		Итог сравнения ПФЭ	Предпочтение	Индексы предпочтения	
ИГ1	ИГ2			q_1^j	q_2^j
1	0	не проводится	СК1	1	1
0	1	не проводится	СК2	2	2
1	1	ПФЭ1 > ПФЭ2	СК1	1	1
		ПФЭ1 < ПФЭ2	СК2	2	2
		ПФЭ1 = ПФЭ2	СК1*	1	1
0	0	не проводится	никакой	0	0

Примечание. * Применяется дискриминационное правило.

Анализ значений МП

$$Q_{\text{пак.т}} = [q^1 \quad q^2],$$

где q^j – триплексный индекс предпочтения, сформированный j -м МА (0 – никакой СК, 1 – первый СК, 2 – второй СК), осуществлялся с использованием табл. 6, предложенной в работе [7].

Таблица 6

Таблица предпочтений при триплексном варианте парного арбитража

1 акт арбитража			Конфликты 1-го акта	2 акт арбитража			
Предпочтение				Предпочтение			Оценка ошибок МА
СК1	СК2	нет		СК1	СК2	нет	
1	2	3	4	5	6	7	8
[1 1]	[2 2]	[0 0]	[0 1]	–	–	[1 0]	МА2 ₁
				[1 1]	–	–	МА2 ₁
				–	–	[1 2]	МА2 ₁
				–	–	[0 0]	МА1 ₀
			[0 2]	–	–	[2 0]	МА2 ₂
				–	–	[2 1]	МА2 ₂
				–	[2 2]	–	МА2 ₂
				–	–	[0 0]	МА1 ₀

Окончание табл. 6

1	2	3	4	5	6	7	8
			[1 0]	–	–	[0 1]	MA2 ₀
				–	–	[0 0]	MA2 ₀
				–	–	[0 2]	MA2 ₀
				–	–	[1 1]	MA1 ₁
			[1 2]	–	–	[2 1]	MA2 ₂
				–	–	[2 0]	MA2 ₂
				–	[2 2]	–	MA2 ₂
				–	–	[1 1]	MA1 ₁
			[2 0]	–	–	[0 2]	MA2 ₀
				–	–	[0 0]	MA2 ₀
				–	–	[0 1]	MA2 ₀
				–	–	[2 2]	MA1 ₂
			[2 1]	–	–	[0 2]	MA2 ₁
				–	–	[1 2]	MA2 ₁
				[1 1]	–	–	MA2 ₁
				–	–	[2 2]	MA1 ₂

4. *Вариант выбора компаратором*, реализующим простейшую совокупность правил предпочтений [9], заключающуюся в сопоставлении внешним устройством величин ИГ и ПФЭ, сведенных в табл. 7.

Таблица 7

Таблица предпочтений при сравнении СК компаратором

Значения ИГ		Итог сравнения ПФЭ	Индексы сравнения на выходе компаратора	Предпочтение
ИГ1	ИГ2			
1	0	не проводится	1	СК1
0	1	не проводится	2	СК2
1	1	ПФЭ1 > ПФЭ2	1	СК1
		ПФЭ1 < ПФЭ2	2	СК2
		ПФЭ1 = ПФЭ2	1	СК1*
0	0	не проводится	0	никакой

П р и м е ч а н и е. * Применяется дискриминационное правило.

При сравнении компаратором оценивание ошибок МА не производится.

В дальнейшем используются краткие названия указанных вариантов алгоритма арбитража (выбора предпочтений): упрощенный, полный, триплексный и компаратор.

Моделирование проводилось для следующих условий:

- интенсивности отказов СК $\lambda_1 = \lambda_2 = 10^{-3}$;
- интенсивности ошибок МА $\lambda_{\text{MAK}} = 10^{-4}$ с учетом нормирования¹, обусловленного числом состояний возможных ошибок анализаторов;

¹ Каждый ложный «0» или «1» (или «2» в триплексном подходе) имитируется отдельно, в результате чего вычисляемое число «залипаний» для различных алгоритмов определения предпочтений получается пропорциональным числу моделируемых сравниваемых элементов. Для нивелирования этого эффекта (для обеспечения сопоставимости результатов моделирования) введены нормирующие коэффициенты при λ_{MAK} : 1/6 – для триплексного МА, 1/4 – для полного бинарного МА, 1/3 – для компаратора, 1/2 – для упрощенного бинарного МА.

– ПФЭ1 = ПФЭ2 (если не оговорено другое).

Параметры моделирования:

– число тактов моделирования $T = 10000$;

– шаг моделирования $\Delta\tau = 1$.

Потоки отказов и ошибок были одинаковы для всех исследуемых вариантов арбитража.

Результаты моделирования

Общая статистика на 10000 тактах функционирования модели выглядит следующим образом:

– число отказов СК1 $N_{\text{отк.1}} = 1003$;

– число отказов СК2 $N_{\text{отк.2}} = 1070$;

– общее число отказов $N_{\text{отк.1,2}} = 2073$.

По мере продолжения экспериментов происходили накопление отказов, возникновение сложных одновременных отказов и как результат изменялась общая картина распределения результатов предпочтения, иллюстрируемая посредством рис. 2 (для наглядности количество точек разрежено в 10 раз).

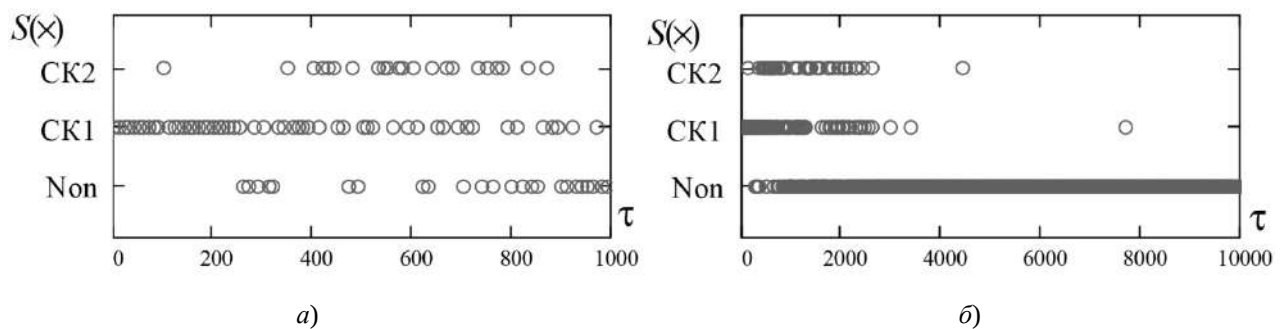


Рис. 2. Иллюстрация распределения выбора предпочтений:
а – в начале работы системы; б – на всем интервале экспериментов

На рис. 3 в качестве примера представлены графики распределения числа выбранных предпочтений и вероятности состояний выбора СК бинарными алгоритмами арбитража.

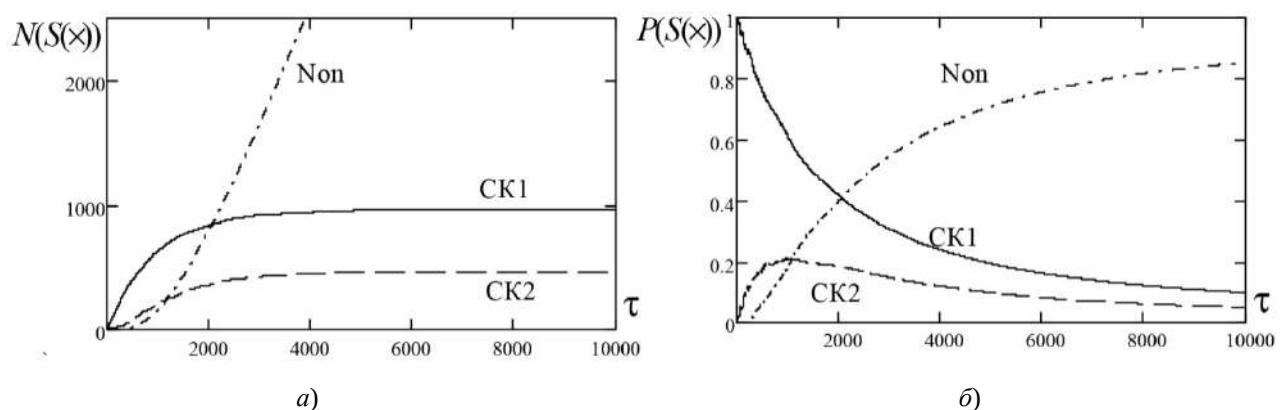


Рис. 3. Характеристики распределения выбора предпочтений:
а – число состояний; б – вероятности возникновения состояний

Обобщенные результаты численного моделирования для рассматриваемых алгоритмов арбитража представлены в табл. 8–10 и на рис. 4–8.

Таблица 8

Оценка параметров достоверности выбора предпочтений

Параметр	Вариант алгоритма арбитража			
	упрощенный	полный	триплексный	компаратор
$N_{(CK1)}$	1967	1002	1475	1872
$N_{(CK2)}$	559	568	1103	1715
$N_{(Non)}$	7473	8429	6031	6412
$N_{\text{ош I}}$	44	11	107	130
$N_{\text{ош II}}$	982	0	1098	2117
$N_{\text{ош III}}$	7	0	6	13
$N_{\Sigma\text{ош}}$	1033	11	1211	2260
$K_{\text{ош I}}, \%$	0,44	0,11	1,07	1,3
$K_{\text{ош II}}, \%$	9,82	0	10,98	21,17
$K_{\text{ош III}}, \%$	0,07	0	0,06	0,13
$K_{\Sigma\text{ош}}, \%$	10,33	0,11	12,11	22,6
P_I не менее, %	98,397	99,752	96,69	94,286
P_{II} не менее, %	90,179	100	89,017	78,828
P_{III} не менее, %	99,624	100	99,031	98,737
P_d не менее, %	89,668	99,752	87,886	77,397

Таблица 9

Оценка параметров диагностирования ошибок МА

Параметр	Вариант алгоритма арбитража			
	упрощенный	полный	триплексный	компаратор
$N_{\text{ош.МА}}$	4617	3955	3923	Нет функции
$N_{\text{ош.МА}}^d$	18	1792	2236	
$K_{\text{диагн}}, \%$	0,39	45,31	56,97	

Таблица 10

Оценка параметров конфликтов МА

Параметр	Вариант алгоритма арбитража	
	полный	триплексный
$N_{\Sigma\text{конфл}}$	6890	6336
N_{00}	6756	6336
N_{11}	134	—
$N_{00}^{\text{отк.1,2}}$	6754	6311
$N_{00}^{\text{МА}}$	2	25
$K_{\text{конфл}}, \%$	68,9	63,36
$K_{00}, \%$	98,06	100
$K_{11}, \%$	1,945	—
$K_{00}^{\text{отк.1,2}}, \%$	99,97	99,605
$K_{00}^{\text{МА}}, \%$	0,03	0,395

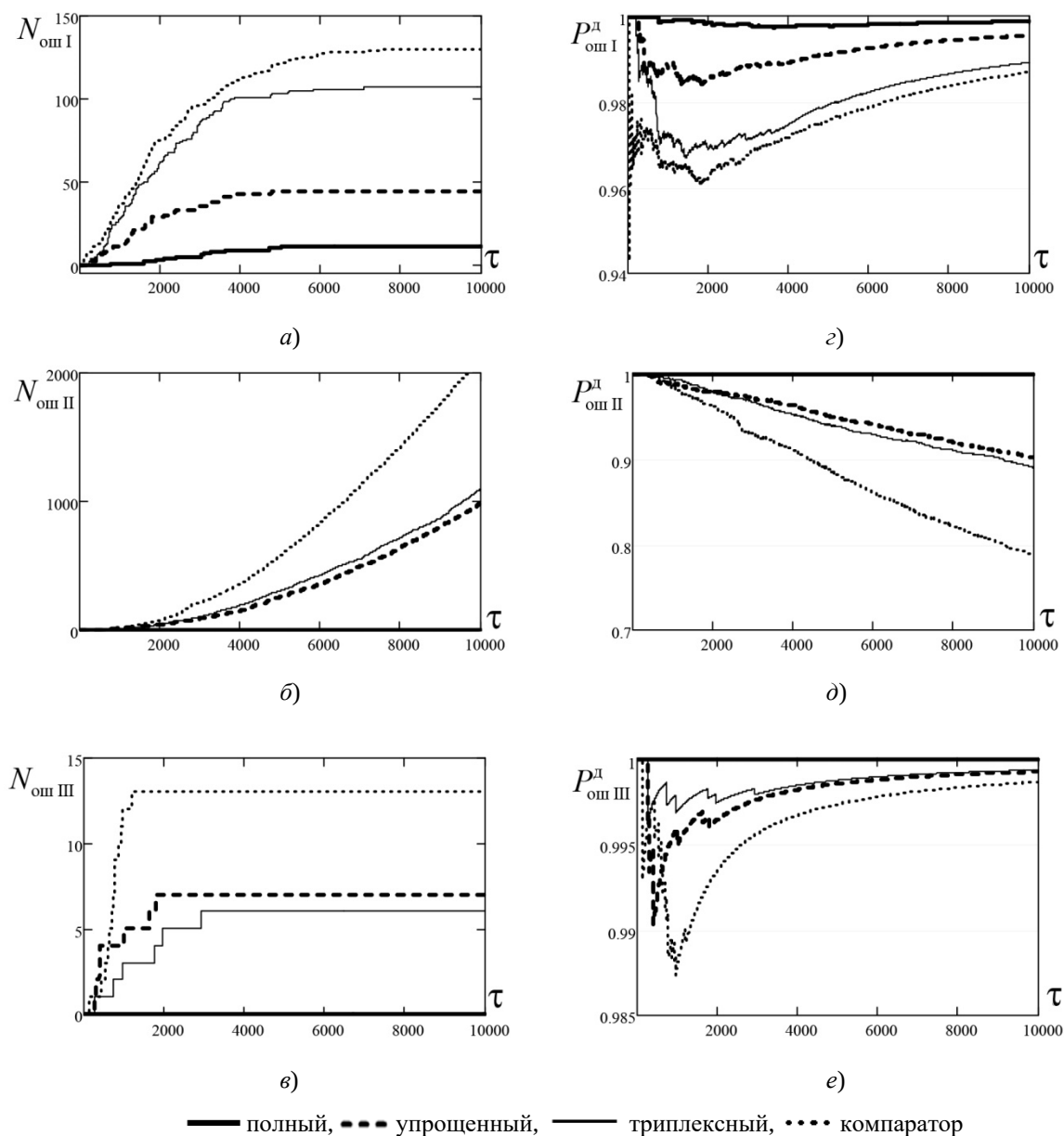


Рис. 4. Количество ошибок трех родов (а, б, в) и вероятности их успешного диагностирования (з, д, е)

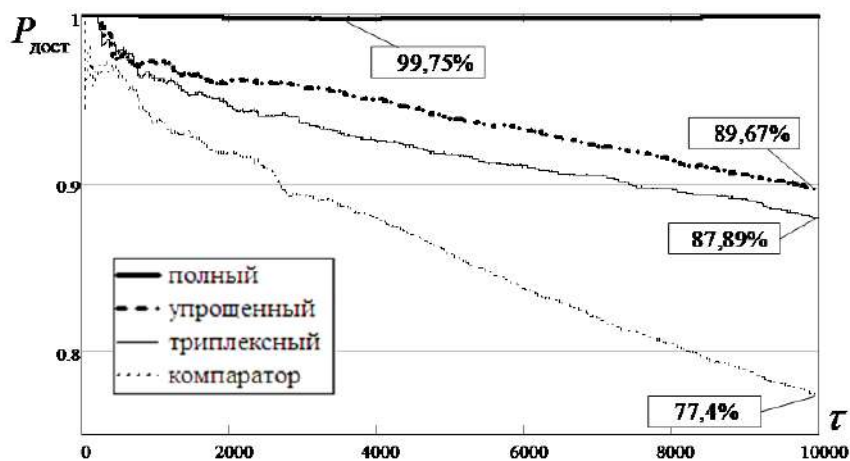


Рис. 5. Обобщенная вероятность достоверного выбора предпочтений (достоверность предпочтений)

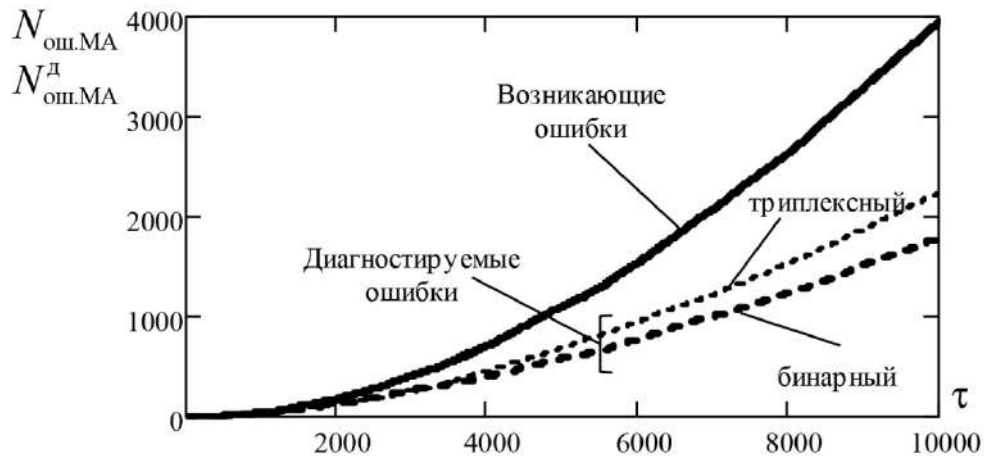


Рис. 6. Количество возникающих и диагностируемых ошибок МА

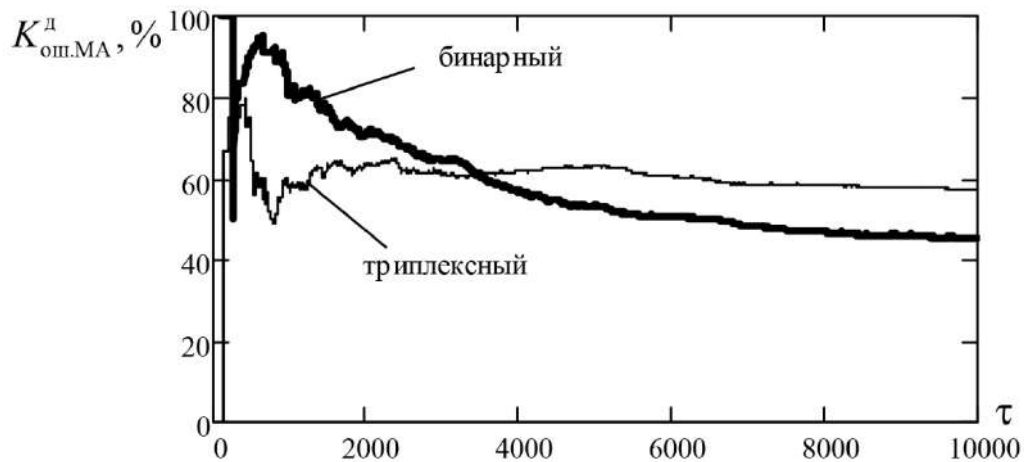


Рис. 7. Доля успешно диагностируемых ошибок МА (полнота диагностирования)

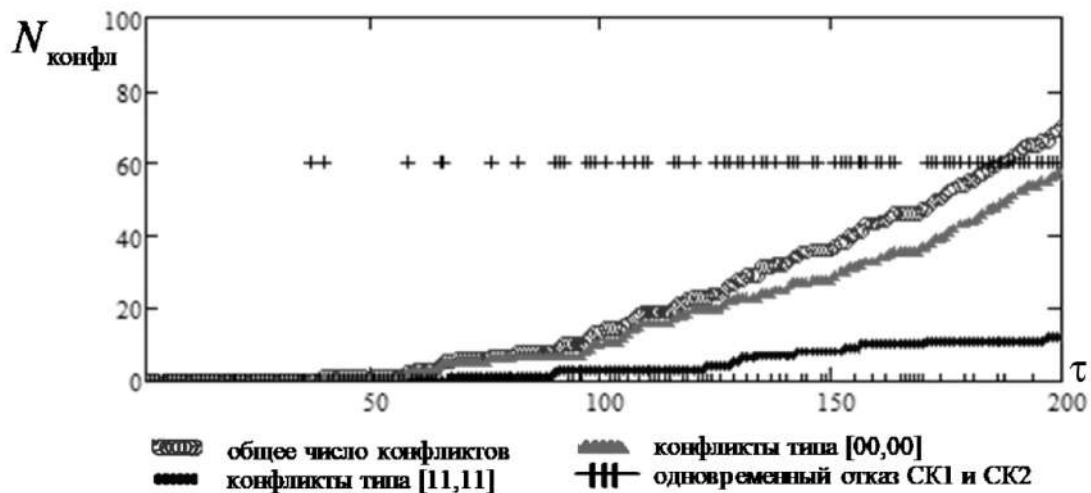


Рис. 8. Анализ конфликтов МП бинарных вариантов алгоритма

Полученные при моделировании и представленные оценки эффективности алгоритмов арбитража формировались в условиях полной независимости всех событий, связанных с отказами компонентов, входящих в конфигурации, и ошибок модулей анализа, содержащихся в СК. Учет возможной зависимости указанных событий требует соответствующего развития описанной стохастической модели.

Обсуждение результатов

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы:

1. Предлагаемые алгоритмы ПАК с бинарными оценками предпочтения в среднем на 20 % эффективнее по сравнению с известным способом сравнения компаратором в задаче обеспечения выбора предпочтительного СК в паре (достоверность выбора в 99 % относительно исходных 77 %).
2. Алгоритмы ПАК успешно парируют ошибки, возникающие при выборе предпочтения, наиболее эффективно устраняя ошибки I рода (ложное решение об отказе). Не обнаруживаемая часть ошибок такого рода связана с неопределенностями конфликтных значений матриц предпочтений.
3. Полный бинарный вариант обладает повышенной в среднем на 10 % достоверностью контроля в сравнении с упрощенным, полностью устраняя ошибки II и III рода (ложный выбор предпочтения), т.е. обеспечивает практически 100 % достоверность выбора предпочтения. Он обладает также повышенным (до 45 %) процентом диагностируемых ошибок МА. По совокупности преимуществ его реализация видится самой целесообразной.
4. Упрощенный вариант алгоритма ПАК, исключаящий анализ ошибок сравнения ИГ, более прост в реализации, однако уступает полному варианту ПАК по достоверности контроля, что обусловлено повышенным числом ошибок II рода. Кроме того, при упрощенном подходе 95 % решений о предпочтении определяются на предварительном этапе сравнения ИГ, на этапе же ПАК успешно определяются менее 1 % всех ошибок МА, что не позволяет использовать данный алгоритм для целей самодиагностики ошибок МА.
5. Триплексный вариант обладает меньшей достоверностью контроля (порядка 87 %), допуская больше ошибок как I, так и II рода, однако обладает большими возможностями по диагностированию ошибок МА, обнаруживая порядка 57 % от их числа. Применение триплексного варианта может быть целесообразно при разработке дополнительных систем самодиагностики, обеспечивающих углубленный анализ состояния МА.
6. Для бинарного алгоритма ПАК на относительно небольших отрезках времени диагностирования¹ (до 3000 тактов) успешно диагностируется большая (около 80–90 %) часть ошибок. При возрастании числа обрабатываемых тактов доля успешного диагностирования (полнота диагностирования) снижается примерно до 50 %. Этому в меньшей степени подвержен триплексный алгоритм, обеспечивая полноту диагностирования 60 % почти на всем интервале экспериментов.

Объяснение данному факту следующее. В начале интервала моделирования отказов мало, одновременные отказы двух СК практически отсутствуют. В этих условиях все ошибки МА хорошо диагностируются. Ближе к концу интервала возрастает число накопленных отказов СК, включая одновременные, возникают неразрешимые конфликты типа $Q_{\text{ПАК.Т}} = [1 \ 2]$ или $Q_{\text{ПАК.Т}} = [2 \ 1]$. Как результат процент успешного диагностирования МА снижается. Оба бинарных варианта алгоритма на начальном участке интервала моделирования практически идеально справляются с диагностированием ошибок МА. Это иллюстрирует рис. 9: на первых 550 тактах ими вообще диагностируется 100 % ошибок МА. К концу экспериментов картина меняется. Так как число конфликтов у триплексного алгоритма меньше, то доля успешно диагностируемых ошибок у него становится больше на 10–15 %, чем у бинарных.

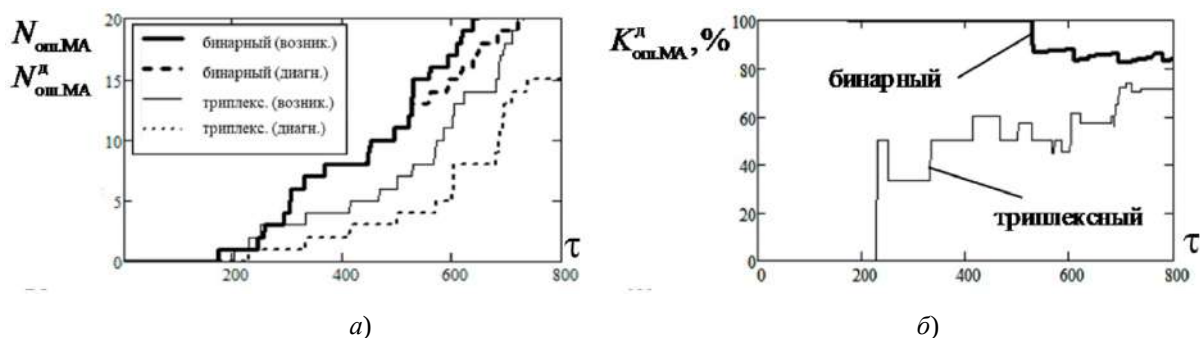


Рис. 9. Ошибки МА на начальном этапе эксплуатации:

а – количество возникающих и диагностируемых ошибок; б – полнота диагностирования

¹ Надо полагать, что именно начальный участок интервала экспериментов имеет значение для практического применения парного арбитража, когда общее число ошибок МА не превышает один – полтора десятка.

7. Большая часть всех конфликтов (примерно 98 %) бинарных вариантов – это конфликты типа $\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, связанные прежде всего с ситуациями неготовности обоих СК одновременно. Конфликты типа $\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ возникают сравнительно редко (2 % от общего числа конфликтов) по причине отказов анализаторов, вызывающих конфликт «настаивания на приоритете» и не позволяющих принять однозначное решение о предпочтении. В таких ситуациях принимается решение об исключении предпочтения обоих СК.

8. Триплексный вариант характеризуется меньшей вероятностью возникновения конфликтов (63 % по сравнению с 69 % бинарных вариантов), а также отсутствием неразрешимых ситуаций типа «настаивание на приоритете» $Q_{\text{ПАК.Т}} = \begin{bmatrix} 1 & 2 \end{bmatrix}$ или $Q_{\text{ПАК.Т}} = \begin{bmatrix} 2 & 1 \end{bmatrix}$.

Как показано в работах [10, 11], достоверность и полнота контроля оказывают существенное влияние на характеристики надежности систем. Использование алгоритмов парного арбитража предложенного типа позволит реализовывать требуемые уровни надежности бортовых комплексов с избыточным числом разнородных ресурсов, функционирование которых во многом зависит от правильности решений о выборе конфигураций.

Заключение

Предложенная стохастическая модель процесса парного арбитража конфигураций имитирует случайные отказы компонентов конфигураций и ошибки модулей анализа, осуществляющих попарное сравнение супервизоров – программно-аппаратных модулей, осуществляющих управление конфигурациями технической системы. Модель реализует алгоритмы парного арбитража конфигураций, формирующие решение о предпочтении той или иной конфигурации системы.

Исследованы три варианта алгоритма арбитража: упрощенный бинарный, полный бинарный и триплексный, а также алгоритм простого компаратора для сравнительного анализа по критериям достоверности выбора предпочтения и полноты диагностирования ошибок модулей анализа. Результаты исследований показали изменчивость статистических показателей по мере накопления ошибок, содержащихся в супервизорах. Для небольшого количества ошибок (на начальных стадиях эксплуатации) предпочтительны бинарные алгоритмы с полным взаимным контролем оценок предпочтения, обеспечивающие полное парирование ошибок определения предпочтений II (ложный выбор) и III (выбор менее эффективного) рода, и большую часть ошибок I рода (ложная отбраковка).

Использование алгоритмов парного арбитража предложенного типа позволит реализовывать требуемые уровни надежности бортовых комплексов с избыточным числом разнородных ресурсов за счет повышения достоверности и безошибочности выбора предпочтительных в текущих условиях конфигураций.

Список литературы

1. Digital Avionics Handbook / ed. by C. R. Spitzer, U. Ferrell, T. Ferrell. 3-d ed. London ; New York : CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015.
2. Клепиков В. И. Отказоустойчивость распределенных систем управления. М. : Золотое сечение, 2014.
3. Zhang Y., Jiang J. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems // Proc. the 5th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes. Washington D.C., 2003. P. 265–276.
4. Дегтярев А. Р., Киселев С. К. Отказоустойчивые реконфигурирующиеся комплексы интегрированной модульной авионики // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2016. Т. 12, № 1. С. 89–99.
5. Агеев А. М., Бронников А. М., Буков В. Н., Гамаюнов И. Ф. Супервизорный метод управления избыточностью технических систем // Известия РАН. Теория и системы управления. 2017. № 3. С. 59–69.
6. Буков В. Н., Бронников А. М., Агеев А. М. [и др.]. Концепция управляемой избыточности комплексов бортового оборудования // Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н. Е. Жуковского : материалы XVI Всерос. науч.-практ. конф. (г. Москва, 11–12 апр. 2019 г.) / гл. ред. С. П. Халютин. М. : ИД Акад. им. Н. Е. Жуковского, 2019. С. 17–33.

7. Агеев А. М., Буков В. Н., Шурман В. А. Алгоритмы управления избыточностью комплексов бортового оборудования подвижных объектов. Часть 1. Парный арбитраж конфигураций // Мехатроника, автоматизация, управление. 2022. Т. 23, № 5. С. 263–273.
8. Гельгор А. Л., Горлов А. И., Попов Е. А. Методы моделирования случайных величин и случайных процессов : учеб. пособие. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2012.
9. Шабалдин Е. Д., Смолин Г. К., Уткин В. И., Зарубин А. П. Метрология и электрические измерения : учеб. пособие / под ред. Е. Д. Шабалдина. Екатеринбург : Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2006.
10. Лубков Н. В., Спиридонов И. Б., Степаныц А. С. Влияние характеристик контроля на показатели надежности систем // Труды МАИ. 2016. № 85. С. 10. URL: https://trudymai.ru/upload/iblock/3ec/lubkov_spiridonov_stepanyants_rus.pdf.
11. Агеев А. М., Буков В. Н. Эффективность резервирования избыточной системы посредством супервизоров конфигураций // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 1. С. 67–82.

References

1. Spitzer C.R., Ferrell U., Ferrell T. (eds.). *Digital Avionics Handbook*. 3-d ed. London; New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015.
2. Klepikov V.I. *Otkazoustoychivost' raspredelennykh sistem upravleniya = Fault tolerance of distributed control system*. Moscow: Zolotoe sechenie, 2014. (In Russ.)
3. Zhang Y., Jiang J. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems. *Proc. the 5th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes*. Washington D.C., 2003: 265–276.
4. Degtyarev A.R., Kiselev S.K. Fault-tolerant reconfigurable complexes of integrated modular avionics. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy = Electrical and information complexes and systems*. 2016;12(1):89–99. (In Russ.)
5. Ageev A.M., Bronnikov A.M., Bukov V.N., Gamayunov I.F. Supervisory method of redundancy management of technical systems. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya = News of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems*. 2017;(3):59–69. (In Russ.)
6. Bukov V.N., Bronnikov A.M., Ageev A.M. et al. The concept of controlled redundancy of onboard equipment complexes. *Nauch. chteniya po aviatsii, posvyashch. pam. N.E. Zhukovskogo: materialy XVI Vseros. nauch.-prakt. konf. (g. Moskva, 11–12 apr. 2019 g.) = Scientific readings on aviation, dedicated to the memory of N.E. Zhukovsky : materials of the XVI All-Russian scientific and practical conference (Moscow, April 11-12, 2019)*. Moscow: ID Akad. im. N.E. Zhukovskogo, 2019:17–33. (In Russ.)
7. Ageev A.M., Bukov V.N., Shurman V.A. Algorithms for controlling redundancy of onboard equipment complexes of mobile objects. Part 1. Paired Configuration Arbitration. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie = Mechatronics, automation, control*. 2022;23(5):263–273. (In Russ.)
8. Gel'gor A.L., Gorlov A.I., Popov E.A. *Metody modelirovaniya sluchaynykh velichin i sluchaynykh protsessov: ucheb. posobie = Methods of modeling random variables and random processes : textbook*. Saint Petersburg: Izd-vo Politekh. un-ta, 2012. (In Russ.)
9. Shabal'din E.D., Smolin G.K., Utkin V.I., Zarubin A.P. *Metrologiya i elektricheskie izmereniya: ucheb. posobie = Metrology and electrical measurements: textbook*. Ekaterinburg: Izd-vo Ros. gos. prof.-ped. un-ta, 2006. (In Russ.)
10. Lubkov N.V., Spiridonov I.B., Stepanyants A.S. Influence of control characteristics on system reliability indicators. *Trudy MAI = Proceedings of MAI*. 2016;(85):10. (In Russ.). Available at: https://trudymai.ru/upload/iblock/3ec/lubkov_spiridonov_stepanyants_rus.pdf
11. Ageev A.M., Bukov V.N. Efficiency of redundant system redundancy through configuration supervisors. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(1):67–82. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Михайлович Агеев

кандидат технических наук, доцент, докторант,
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: ageev_bbc@mail.ru

Andrey M. Ageev

Candidate of technical sciences,
associate professor, doctoral candidate,
Military Educational and Scientific Center
of the Air Force "Air Force Academy
named after Professor N.E. Zhukovsky
and Yu.A. Gagarin"
(54a Starykh bolshevikov street, Voronezh, Russia)

Валентин Николаевич Буков

доктор технических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник
Научно-исследовательский институт
авиационного оборудования
(Россия, Московская обл.,
г. Жуковский, ул. Туполева, 18)
E-mail: v_bukov@mail.ru

Valentin N. Bukov

Doctor of technical sciences, professor,
leading researcher,
Research Institute of Aviation Equipment
(18 Tupoleva street, Zhukovsky,
Moscow region, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 16.03.2022

Поступила после рецензирования/Revised 18.04.2022

Принята к публикации/Accepted 13.05.2022

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

УДК 621.396.6(075.8):528.024
doi:10.21685/2307-4205-2022-4-7

КОМПЕНСАЦИЯ ДОПЛЕРОВСКОГО СМЕЩЕНИЯ РАДИОВЫСОТОМЕРА НА ВЫСОКОСКОРОСТНОМ НОСИТЕЛЕ

М. Ю. Нестеров

Уральское проектно-конструкторское бюро «Деталь», Каменск-Уральский, Свердловская обл., Россия
mn@list.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Одним из основных источников ошибок оценивания высоты в радиовысотомере с непрерывным зондирующим сигналом является доплеровское смещение, обусловленное вертикальной скоростью носителя. При размещении на высокودинамичных объектах эта составляющая ошибки радиовысотомера может быть доминирующей. Традиционный метод компенсации доплеровского смещения при помощи динамического запаздывания в выходном сглаживающем фильтре в этих условиях приводит к неприемлемой величине постоянной времени фильтра. Целью работы является усовершенствование алгоритма фильтрации показаний радиовысотомера. *Материалы и методы.* В алгоритм фильтрации показаний высотомера вводится процедура оценивания вертикальной скорости и использования оценки скорости для коррекции данных о текущей высоте полета. Уравнения фильтрации, полученные в работе, представляют собой вариант нелинейного сигма-точечного фильтра Калмана, где наблюдаемыми величинами являются периоды модуляции радиовысотомера. *Результаты.* Синтезированный алгоритм фильтрации верифицирован при помощи компьютерной модели радиовысотомера, включающей в себя стохастическое дифференциальное уравнение кольца слежения в динамическом режиме и корректно учитывающей основные источники ошибок измерений. *Выводы.* Синтезированный алгоритм фильтрации позволяет корректно парировать доплеровское смещение показаний радиовысотомера, являющееся основным источником ошибок в условиях размещения на высокودинамичном носителе.

Ключевые слова: радиовысотомер, доплеровское смещение частоты, высокودинамический объект, моделирование, алгоритм фильтрации

Для цитирования: Нестеров М. Ю. Компенсация доплеровского смещения радиовысотомера на высокоскоростном носителе // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 4. С. 67–75. doi:10.21685/2307-4205-2022-4-7

COMPENSATION OF THE DOPPLER SHIFT OF THE RADIO ALTIMETER ON A HIGH-SPEED CARRIER

M.Yu. Nesterov

Ural Design Bureau "Detal", Kamensk-Uralsky, Sverdlovsk region, Russia
mn@list.ru

Abstract. *Background.* One of the main error sources of a continuous-wave radar altimeter is the Doppler shift due to high vertical velocity. This kind of error dominates when altimeter is placed on a high-speed vehicle. The

© Нестеров М. Ю., 2022. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

common way which compensate Doppler shift with the dynamic delay in output averaging filter results with inappropriate value of the filter time constant. So this paper aims in improvement of the height filtering algorithm. *Materials and methods.* Height filtering algorithm is expanded with the procedure of vertical velocity estimation. Velocity estimates are used for current height data correction. Derived filtering equations are variant of nonlinear sigma-point Kalman filter where observed values are time periods of altimeter modulation. *Results.* Obtained filtering algorithm was verified with altimeter simulation model included stochastic differential equation of the dynamic tracking loop. The simulation model accounts for main sources of altimeter errors. *Conclusions.* Obtained filtering algorithm correctly eliminates Doppler shift of a continuous-wave radar altimeter readings which is one of the main error sources in high vertical velocity scenarios.

Keywords: radio altimeter, doppler frequency shift, highly dynamic object, simulation, filtering algorithm

For citation: Nesterov M.Yu. Compensation of the doppler shift of the radio altimeter on a high-speed carrier. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(4):67–75. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-4-7

Введение

Радиовысотомер с непрерывным частотно-модулированным сигналом является надежным и точным устройством измерения высоты полета. Благодаря достаточно малой постоянной времени следящего контура в кольце слежения высотомера параметры модуляции практически мгновенно подстраиваются под изменяющиеся условия полета. Одним из источников ошибок оценивания высоты в радиовысотомере с непрерывным зондирующим сигналом является доплеровское смещение, обусловленное вертикальной скоростью носителя. При размещении на высокодинамичных объектах эта составляющая ошибки радиовысотомера может быть доминирующей. Традиционным способом компенсации доплеровского смещения оценок высоты является использование динамического запаздывания. В случае линейно нарастающей пилообразной модуляции при движении с вертикальной скоростью V_y частота биений складывается из дальномерной и доплеровской составляющих:

$$f_b = \frac{2\Delta f}{cT_m} h - \frac{2V_y}{\lambda},$$

где Δf – полоса модуляции; c – скорость распространения радиоволн; T – период модуляции; λ – длина волны излучения; f_b, h – частота биений и высота в текущий момент времени t .

Будем полагать, что тем или иным способом создается задержка T_d . Тогда частота биений в момент выдачи определяется высотой, которая имела место T_d времени тому назад, следовательно, с использованием задержки имеем

$$f_{bd} = \frac{2\Delta f}{cT_m} (h + V_y T_d) - \frac{2V_y}{\lambda}.$$

Отсюда условие полной компенсации доплеровской составляющей

$$T_d = \frac{f}{\Delta f} T,$$

где f – несущая частота радиоизлучения.

Таким образом, вводя скользящее усреднение оценок высоты на выходе следящего кольца с тактом периода модуляции и с шириной окна усреднения $\lfloor f/\Delta f \rfloor$ периодов модуляции ($\lfloor \dots \rfloor$ – целая часть), можно устранить доплеровское смещение оценки высоты с помощью динамического запаздывания. Однако постоянная времени, присущая операции усреднения, на больших высотах и при значительной вертикальной скорости может оказаться неприемлемо большой и привести к существенному динамическому запаздыванию показаний радиовысотомера на начальном участке его работы. Уменьшить постоянную времени фильтра высоты можно, вводя оценивание вертикальной скорости в алгоритм фильтрации показаний высотомера и используя оценку скорости для коррекции данных о текущей высоте полета. В следующем разделе получены уравнения состояния алгоритма фильтрации для оценок высоты и вертикальной скорости.

При анализе алгоритма фильтрации оценок высоты потребовалась разработка имитационной компьютерной модели радиовысотомера, включающей в себя кольцо слежения и корректно учитыва-

ющей как динамические свойства носителя, так и источники ошибок измерений без значительной вычислительной нагрузки. Синтез модели следящего кольца радиовысотомера приводится в разделе 3.

Алгоритм фильтрации показаний радиовысотомера

В следящем режиме высотомера с помощью регулирования крутизны перестройки частоты средняя частота сигнала биений поддерживается постоянной и равной центральной частоте дискриминатора f_0 :

$$S\tau = f_0,$$

где S – крутизна перестройки размерности [Гц/м], а τ – задержка отраженного сигнала относительно излученного.

В статическом режиме и при горизонтальном полете над зеркальной поверхностью задержка постоянна и равна

$$\tau = \frac{2h}{c},$$

где h – текущая высота.

Поскольку высота в статическом режиме не меняется, то не меняется и крутизна перестройки

$$S = \frac{\Delta f}{T},$$

где Δf – диапазон линейной перестройки частоты, а T – период модуляции сигнала.

При этом мерой текущей высоты будет являться период модуляции, линейно связанный с высотой:

$$T = k_m h,$$

причем коэффициент $k_m = 2\Delta f / cf_0$.

В динамическом режиме задержка меняется на протяжении периода модуляции сигнала:

$$\tau = \frac{2(h_0 + V_y t)}{c},$$

где V_y – вертикальная скорость; h_0 – высота на начало периода, $t = 0 \dots T$.

Крутизна перестройки частоты меняется, чтобы сохранить неизменной среднюю частоту биений:

$$S = \frac{cf_0}{2} \frac{1}{h_0 + V_y t}.$$

Интегрируя крутизну на протяжении периода модуляции, получим значение диапазона перестройки частоты:

$$\Delta f = \frac{f_0 c}{2} \int_0^T \frac{dt}{h_0 + V_y t}.$$

После аналитического интегрирования и разложения по Тейлору до второго порядка получим

$$T \approx \frac{k_m h}{1 + k_m V_y / 2}.$$

Таким образом, в динамическом режиме оценка высоты по измерению периода модуляции и при известной вертикальной скорости

$$\hat{h} = \frac{T}{k_m} \left(1 + \frac{k_m V_y}{2} \right).$$

Представляет интерес выражение для отношения двух последовательных периодов модуляции. Пусть первый из этих периодов рассчитывается по формуле

$$T_1 = \frac{k_m h}{1 + k_m V_y / 2},$$

где h – высота на конец периода T_1 . Следующий период модуляции равен

$$T_2 = \frac{k_m (h + V_y T_1)}{1 + k_m V_y / 2} = T_1 + \frac{k_m V_y T_1}{1 + k_m V_y / 2}.$$

Отсюда отношение периодов

$$q = \frac{T_2}{T_1} = \frac{1 + k_m V_y / 2}{1 - k_m V_y / 2}.$$

Следовательно, отношение двух последовательных периодов модуляции не зависит от высоты и определяется только вертикальной скоростью. По измеренному отношению периодов q можно получить оценку вертикальной скорости:

$$V_y = \frac{2}{k_m} \frac{q - 1}{q + 1}.$$

Вертикальная скорость вызывает доплеровское смещение частоты сигнала биений:

$$f_0 = S\tau + \frac{2V_y}{\lambda}.$$

После введения коэффициента доплеровского смещения $q_d = 1 - 2V/\lambda f_0$ уравнение следящего контура примет вид

$$f_0 = \frac{S\tau}{q_d}.$$

Изменится и формула для периода модуляции:

$$T = \frac{k_m h / q_d}{1 + k_m V_y / q_d}.$$

Аналогично для отношения соседних периодов

$$q = \frac{1 + k_m V_y / 2 q_d}{1 - k_m V_y / 2 q_d}.$$

Пусть наблюдаемые величины составляют последовательность периодов модуляции T_k . Отношение двух последовательных периодов остается постоянным при неизменной вертикальной скорости, поэтому система уравнений состояния (без учета шумов)

$$\begin{aligned} T_{k+1} &= q_k T_k; \\ q_{k+1} &= q_k. \end{aligned} \quad (1)$$

Оценка текущей высоты по оценкам переменных состояния:

$$\hat{h}_k = \frac{\hat{T}_k}{k_m} \hat{q}_d \left(1 + \frac{k_m \hat{V}_k}{2 \hat{q}_d} \right), \quad (2)$$

где $\hat{V}_k$ – оценка вертикальной скорости по оценке коэффициента $\hat{q}_k$:

$$\hat{V}_k = \frac{2 f_0 \lambda (\hat{q}_k - 1)}{4(\hat{q}_k - 1) + k_m f_0 \lambda (\hat{q}_k + 1)}, \quad (3)$$

а коэффициент $\hat{q}_k = 1 - 2\hat{V}_k / \lambda f_0$.

Дифференциальное уравнение следящего кольца

Радиовысотомер с непрерывным частотно-модулированным сигналом представляет собой измеритель высоты со следящим контуром, замкнутым через пространство распространения сигнала. Упрощенная структурная схема следящего контура показана на рис. 1.

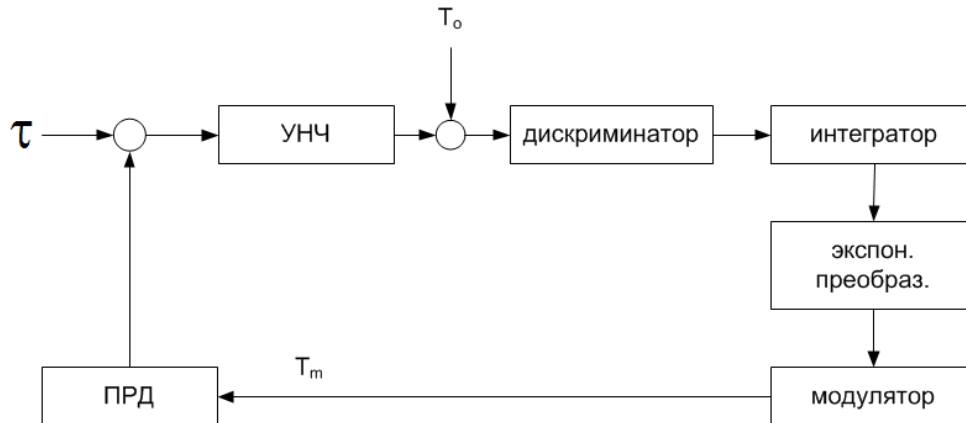


Рис. 1. Схема следящего контура

Следящий контур поддерживает постоянной частоту биений f_b посредством регулирования параметров модуляции, а именно, крутизны перестройки частоты S , при изменении задержки τ отраженного от подстилающей поверхности сигнала. Входным воздействием на контур является задержка отраженного сигнала τ . На выходе смесителя эта задержка формирует частоту биений f_b :

$$f_b = S\tau.$$

С помощью временного дискриминатора выполняется сравнение текущего периода биений T_b с эталонным периодом $T_0 = 1/f_0$ и формируется рассогласование Δ

$$\Delta = T_b - T_0,$$

которое на выходе дискриминатора производит напряжение, пропорциональное крутизне дискриминационной характеристики S_d

$$u_d = S_d \Delta.$$

С выхода дискриминатора напряжение u_d поступает на интегратор

$$u_{int} = \frac{u_d}{p\tau_{int}},$$

где τ_{int} – постоянная времени интегратора, а p – оператор Лапласа.

В следящий контур включен экспоненциальный преобразователь, формирующий управляющее напряжение

$$u_{ctrl} = RI_0 \exp(\Lambda u_{int}),$$

где I_0 – обратный ток диода, а $1/\Lambda$ – температурное напряжение (температурная разность потенциалов).

Управляющее напряжение подается на модулятор, где формируется период модуляции T , пропорциональный постоянной времени модулятора τ_{mod} и отношению амплитуды пилы u_{saw} к управляющему напряжению u_{ctrl} :

$$T = \tau_{mod} \frac{u_{saw}}{u_{ctrl}}.$$

Используя полученные соотношения и переходя от операторной формы записи к временной, нетрудно определить уравнение следящего контура в виде

$$S = A \exp \left[B \int_0^t \left(\frac{1}{S\tau} - T_0 \right) dt \right],$$

где

$$A = \frac{\Delta f R I_0}{\tau_{mod} u_{saw}} e^{BJ_0},$$

$$B = \frac{\Lambda S_d}{\tau_{int}},$$

а J_0 – начальное значение интеграла в показателе экспоненты, определяющее положение рабочей точки экспоненциального преобразователя.

В стационарном режиме при постоянной высоте $S\tau = 1/T_0$ и $S = A$, следовательно,

$$S = \frac{1}{T_0 \tau} e^{B \int_0^t \left(\frac{1}{S\tau} - T_0 \right) dt}. \quad (4)$$

В широком диапазоне задержек уравнение (4) оказывается нелинейным. Однако после линеаризации в небольшой окрестности вокруг фиксированной задержки это уравнение приобретает в операторной форме вид

$$S = \frac{S_0}{1 + p\tau_0},$$

где $S_0 = f_0 \tau$ есть крутизна на фиксированной задержке τ , а постоянная времени следящего контура равна $\tau_0 = 1/BT_0$ и определяется крутизной дискриминатора и постоянной времени интегратора.

Таким образом, следящий контур радиовысотомера в первом приближении описывается интегрирующим звеном первого порядка. Ради строгости следует заметить, что в состав следящего контура входят и другие инерционные звенья, такие как усилители и дискриминатор, но их постоянные времени, по крайней мере, на порядок меньше, что позволяет пренебречь ими.

С использованием постоянной времени τ_0 уравнение (4) приводится к виду

$$S = \frac{f_0}{\tau} e^{\frac{f_0}{\tau_0} \int_0^t \left(\frac{1}{S\tau} - T_0 \right) dt}. \quad (5)$$

Выполняя логарифмирование выражения (5) и последующее дифференцирование по времени с учетом непостоянства высоты, можно получить дифференциальное уравнение, описывающее динамический режим следящего кольца:

$$\dot{S} = - \left(\frac{1}{\tau_0} + \frac{V_y}{h(t)} \right) S + \frac{f_0}{\tau_0} \frac{c}{2h(t)}. \quad (6)$$

Уравнение (6) содержит два параметра кольца: постоянную времени τ_0 и частоту дискриминатора f_0 . Режим полета задается вертикальной скоростью V_y и начальной высотой h_0 , причем $h(t) = h_0 + V_y t$. В результате работы следящего контура, или интегрирования уравнения (6), носите-

лями информации о высоте оказываются длительности периодов модуляции, которые измеряются путем заполнения эталонными интервалами. Каждому периоду модуляции соответствует одна оценка высоты, формируемая на конец периода.

Реальные подстилающие поверхности имеют неоднородности электрических свойств и сложную геометрическую структуру, обуславливающую случайный характер отраженного сигнала. При этом сигнал биений для такой поверхности представляет собой суперпозицию множества сигналов от элементарных отражателей. Средняя частота биений на выходе приемника определяется усреднением в пределах облучаемого участка поверхности:

$$\langle f_b \rangle = S \frac{2h(1+\delta)}{c} - \frac{2V_x}{\lambda} q_x + \frac{2V_y}{\lambda} q_y, \quad (7)$$

здесь δ – погрешность смещения от типа подстилающей поверхности и тангажа (поправка по высоте); V_x , V_y – горизонтальная и вертикальная составляющие скорости полета; q_x , q_y – поправочные коэффициенты для доплеровского смещения от горизонтальной и вертикальной составляющих вектора скорости.

Поправки определяются формулами:

$$\delta = \frac{1}{p_o} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} F(\vartheta, \phi) \left(\frac{1}{\cos \vartheta} - 1 \right) d\vartheta d\phi;$$

$$q_x = \frac{1}{p_o} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} F(\vartheta, \phi) \sin \vartheta \cos \phi d\vartheta d\phi;$$

$$q_y = \frac{1}{p_o} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} F(\vartheta, \phi) \cos \vartheta \sin \phi d\vartheta d\phi,$$

где $p_o = \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} F(\vartheta, \phi) d\vartheta d\phi$, $F(\vartheta, \phi) = g_1 g_2 \sigma \sin \vartheta \cos \vartheta$; g_1 , g_2 – диаграммы направленности приемной и передающей антенны; σ – диаграмма обратного рассеяния поверхности.

В полете над рассеивающей поверхностью следящая система поддерживает частоту биений (7) постоянной, соответствующей частоте настройки дискриминатора f_0 за счет регулирования крутизны перестройки частоты. Поэтому для текущей оценки высоты на выходе следящего кольца справедлива формула

$$\hat{h} = \frac{h(1+\delta)}{1 + \frac{2V_x}{\lambda f_0} q_x - \frac{2V_y}{\lambda f_0} q_y}. \quad (8)$$

Дифференциальное уравнение следящего кольца (4) при этом примет вид

$$\dot{S} = - \left(\frac{1}{\tau_0} + \frac{V_y}{h(t)} \right) S + \frac{f_0}{\tau_0 k} \frac{c}{2h(t)}, \quad (9)$$

где коэффициент $k = (1+\delta) / (1 + 2V_x q_x / \lambda f_0 - 2V_y q_y / \lambda f_0)$.

Коэффициенты δ , q_x , q_y определяются только заданным типом подстилающей поверхности, диаграммами антенн и ориентацией носителя, поэтому могут быть рассчитаны заранее и использоваться при интегрировании (9) в процессе моделирования в виде готовых массивов данных. При этом будут корректно воспроизводиться расчетные погрешности и доплеровское смещение оценок высоты в показаниях радиовысотомера.

Кроме того, в уравнение (9) легко можно ввести дополнительные члены, учитывающие флуктуации периодов биений из-за конечной ширины спектра сигнала, обусловленной шероховатостью подстилающей поверхности, а также нелинейность крутизны перестройки частоты и фазовый шум, неизбежный для радиовысотомера с непрерывным сигналом. При этом уравнение становится стохастическим и для его интегрирования необходимо применять специфические методы [2].

При оценивании текущей высоты по средней частоте сигнала биений, в свою очередь определяемой по частоте переходов сигнала биений через ноль при усреднении на одном периоде модуляции, возникает ошибка, вызванная протяженностью спектра сигнала, как по дальномерной, так и по доплеровской частоте. Для консервативной оценки дисперсии состояния, т.е. дисперсии периода модуляции, получено выражение

$$\sigma_T^2 = \frac{T_k}{f_0} \frac{\Delta\theta_{eq}^2}{2\pi} \sqrt{1 + \frac{4f_x^2}{f_0^2}},$$

где $f_x = 2V_x/\lambda$, V_x – горизонтальная скорость; $\Delta\theta_{eq}$ – эквивалентная ширина диаграммы направленности

$$\frac{1}{\Delta\theta_{eq}^2} = \frac{1}{\Delta\theta_{2a}^2} + \frac{1}{\Delta\theta_{bs}^2},$$

причем $\Delta\theta_{2a}$ – ширина диаграммы направленности антенны при двустороннем распространении сигнала; $\Delta\theta_{bs}$ – ширина диаграммы обратного рассеяния поверхности.

Согласно полученному выражению, флуктуационная ошибка состояния при оценке высоты (или периода модуляции) растет пропорционально квадратному корню из высоты (периода модуляции), что согласуется как с экспериментальными данными, так и с результатом более строгого расчета.

Результаты моделирования

Представленная выше модель показаний высотомера была использована при верификации синтезированного алгоритма фильтрации показаний высотомера для высокоскоростного носителя. При формировании последовательности периодов биений в процессе интегрирования (10) учитывались как внутренние шумы приемника, так и флуктуационная составляющая сигнала биений, вызванная протяженностью спектра биений.

Поскольку уравнения состояния (1) нелинейные, для фильтрации показаний радиовысотомера был выбран алгоритм сигма-точечного фильтра Калмана (Unscented Kalman Filtering) [3]. Условия полета: скорость – сверхзвуковая, тангаж – минус 30° , подстилающая поверхность типа – луга. Результат применения фильтра приведен на рис. 2.

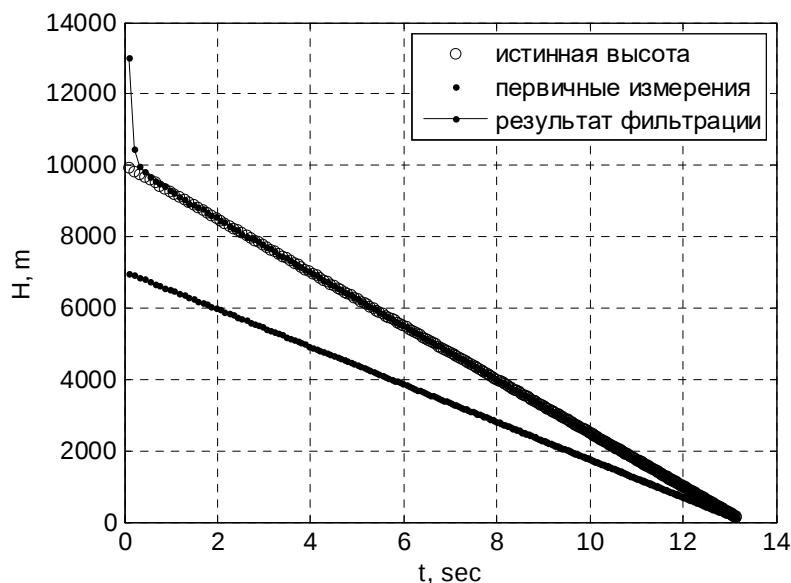


Рис. 2. Результат фильтрации данных

Приведенный график показывает, что синтезированный алгоритм фильтрации позволяет корректно парировать доплеровское смещение показаний радиовысотомера, являющееся основным источником ошибок в условиях размещения на высокодинамичном носителе.

Список литературы

1. Жуковский А. П., Оноприенко Е. И., Чижов В. И. Теоретические основы радиовысотометрии. М. : Советское радио, 1967.
2. Bayram M., Partal T., Buyukoz G. Numerical methods for simulation of stochastic differential equations // *Advances in Difference Equations*. 2018. Vol. 17. doi:10.1186/s13662-018-1466-5
3. Simon D. *Optimal State Estimation*. Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2006.
4. Баскаков А. И., Жутяева Т. С., Лукашенко Ю. И. Локационные методы исследования объектов и сред : учебник / под ред. А. И. Баскакова. М. : Академия, 2011. 384 с.
5. Егоров В. В., Мин-Хо Ка. Вопросы точности аэрокосмической альтиметрии // *Исследование Земли из космоса*. 2005. № 5. С. 48–55.
6. Боков А. С., Важенин В. Г., Дядьков Н. А. [и др.]. Оценка качественных характеристик бортовых радиовысотометров // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*. 2010. Т. 1. С. 16–18.
7. Боков А. С., Важенин В. Г. Применение факетной модели для имитации радиолокационного сигнала, отраженного от подстилающей поверхности // *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника*. 2012. Т. 7. С. 55–61.
8. Боков А. С., Важенин В. Г., Вершинин А. С., Дядьков Н. А. Формирование входного сигнала радиовысотометра с ЛЧМ, имитирующего отражение от протяженной поверхности // *Радиовысотометрия–2007 : сб. тр. Второй науч.-техн. конф. / отв. ред. А. А. Иофин, Л. И. Пономарев*. Екатеринбург : Третья столица, 2007. С. 342–348.

References

1. Zhukovskiy A.P., Onoprienko E.I., Chizhov V.I. *Teoreticheskie osnovy radiovysotometrii = Theoretical foundations of radio altimetry*. Moscow: Sovetskoe radio, 1967. (In Russ.)
2. Bayram M., Partal T., Buyukoz G. Numerical methods for simulation of stochastic differential equations. *Advances in Difference Equations*. 2018;17. doi:10.1186/s13662-018-1466-5
3. Simon D. *Optimal State Estimation*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006.
4. Baskakov A.I., Zhutyayeva T.S., Lukashenko Yu.I. *Lokatsionnye metody issledovaniya ob"ektov i sred: uchebnik = Location methods of objects and environments research : textbook*. Moscow: Akademiya, 2011:384. (In Russ.)
5. Egorov V.V., Min-Kho Ka. Questions of accuracy of aerospace altimetry. *Issledovanie Zemli iz kosmosa = Exploration of the Earth from space*. 2005;(5):48–55. (In Russ.)
6. Bokov A.S., Vazhenin V.G., Dyad'kov N.A. et al. Evaluation of the qualitative characteristics of on-board radio meters. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2010;(1):16–18. (In Russ.)
7. Bokov A.S., Vazhenin V.G. Application of a facet model to simulate a radar signal reflected from the underlying surface. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika = Proceedings of higher educational institutions of Russia. Radioelectronics..* 2012;7:55–61. (In Russ.)
8. Bokov A.S., Vazhenin V.G., Vershinin A.S., Dyad'kov N.A. Formation of the input signal of a radio altimeter with an LFM simulating reflection from an extended surface. *Radiovysotometriya–2007: sb. tr. Vtoroy nauch.-tekhn. konf. = Radio altimetry–2007 : proceedings of the Second scientific-technical. conf.* Ekaterinburg: Tret'ya stolitsa, 2007:342–348. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Михаил Юрьевич Нестеров

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

Mikhail Yu. Nesterov

Doctor of technical sciences, head of the department,
Ural Design Bureau "Detal"
(8 Pionerskaya street, Kamensk-Uralsky,
Sverdlovsk region, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 15.02.2022

Поступила после рецензирования / Revised 11.03.2022

Принята к публикации / Accepted 04.04.2022

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ЗУБЧАТОГО СОЕДИНЕНИЯ ДЛЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ЗАМЕРА ТЯГИ ВИНТА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Д. С. Ергалиев¹, Д. В. Зуев², А. А. Кочетков³, А. В. Лысенко⁴, Н. Д. Кошелев⁵

^{1,2} Академия гражданской авиации, Алматы, Казахстан
³ Научно-производственное предприятие «Рубин», Пенза, Россия
^{4,5} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
¹ DES-67@yandex.kz, ² zuex93@gmail.ru, ³ kochetkov.andrei@yandex.ru,
⁴ lysenko_av@bk.ru, ⁵ spellbinderrus@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Стремительное развитие и повсеместное использование различных беспилотных летательных аппаратов требует введения их типизации и паспортизации. Рассматривается одна из возможностей по разработке узла механической передачи для устройства замера тяги пары винт-двигатель для дальнейшего применения в метрологических целях при проектировании новых летательных аппаратов. *Материалы и методы.* Метод компьютерного моделирования построен на применении программного комплекса Autodesk Inventor для расчета нагрузок и подбора материала для будущего узла агрегата. *Результаты.* В ходе исследования было выяснено, что метод компьютерного моделирования по расчету на максимальные допустимые контактные напряжения зубчатых колес для заданного материала удовлетворяет результаты классической математической модели с некоторыми погрешностями. *Выводы.* При одинаковых результатах математических расчетов и расчетов в Autodesk Inventor программа в значительной мере упрощает работу благодаря автоматизации процесса расчетов, особенно при необходимости замены первоначальных данных.

Ключевые слова: тяга, воздушный винт, зубчатое зацепление, контактные напряжения, прочность

Для цитирования: Ергалиев Д. С., Зуев Д. В., Кочетков А. А., Лысенко А. В., Кошелев Н. Д. Моделирование и расчет зубчатого соединения для универсального устройства замера тяги винта БПЛА // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 4. С. 76–81. doi:10.21685/2307-4205-2022-4-8

MODELING AND CALCULATION OF A GEAR CONNECTION FOR A UNIVERSAL DEVICE FOR MEASURING THE THRUST OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE PROPELLER

D.S. Ergaliev¹, D.V. Zuev², A.A. Kochetkov³, A.V. Lysenko⁴, N.D. Koshelev⁵

^{1,2} Academy of Civil Aviation, Almaty, Kazakhstan
³ Scientific and Production Enterprise "Rubin", Penza, Russia
^{4,5} Penza State University, Penza, Russia
¹ DES-67@yandex.kz, ² zuex93@gmail.ru, ³ kochetkov.andrei@yandex.ru,
⁴ lysenko_av@bk.ru, ⁵ spellbinderrus@gmail.com

Abstract. *Background.* The rapid development and widespread use of various unmanned aerial vehicles requires the introduction of their typification and certification. The paper considers one of the possibilities for the development of a mechanical transmission unit for a device for measuring the thrust of a propeller-engine pair for further use for metrological purposes in the design of new aircraft. *Materials and methods.* The computer simulation method is based on the use of the Autodesk Inventor software package for calculating loads and selecting material for the future unit assembly. *Results.* In the course of the study, it was found that the computer simulation method for calculating the maximum allowable contact stresses of gear wheels for a given material satisfies the results of a classical mathematical model, with some errors. *Conclusions.* With the same results of mathematical calculations and calculations in Autodesk Inventor, the program greatly simplifies the work by automating the calculation process, especially when it is necessary to replace the original data.

Keywords: thrust, propeller, contact stresses, Autodesk Inventor, unmanned aerial vehicles

For citation: Ergaliev D.S., Zuev D.V., Kochetkov A.A., Lysenko A.V., Koshelev N.D. Modeling and calculation of gear joint for universal device for measuring UAV propeller thrust. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(4):76–81. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-4-8

Введение

Проектирование устройства замера тяги воздушного винта (УЗТ ВВ) требует комплексного подхода для его реализации. Необходимо решить ряд параметрических задач с минимальным набором начальных данных. Работа включает в себя:

- выбор силовой установки;
- выбор типа, проектирование и расчет механизма передачи крутящего момента;
- выбор типа крепления вала к раме;
- проектирование и расчет на прочность вала;
- проектирование и расчет на прочность крепежных элементов изделия.

На данном этапе усталостной прочностью, балансировкой и учетом вибраций можно пренебречь. Подбор материала для сокращения итераций исследования производится с учетом статических напряжений. На рис. 1 изображено схематичное представление основных деталей УЗТ ВВ в виде 3D-модели.

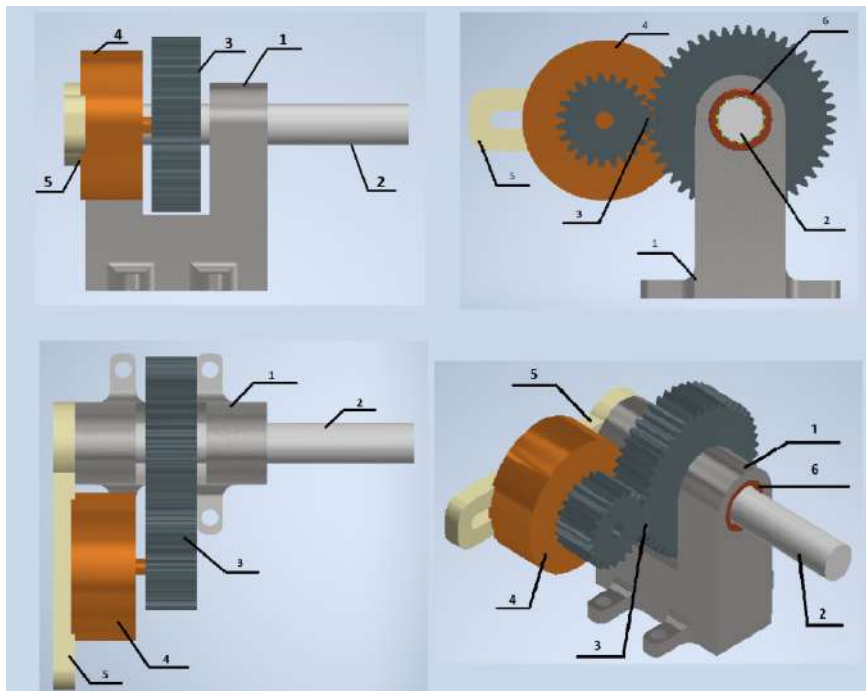


Рис. 1. Схематичное представление УЗТ

Основная часть

Выбор материалов зубчатых колес и определение допускаемых напряжений. Принимаем материал шестерни сталь 40Х, термообработка – закалка. Предел прочности $\sigma_{B1} = 1275 \text{ Н/мм}^2$ (МПа), предел текучести $\sigma_T = 1079 \text{ Н/мм}^2$, минимальная твердость поверхности $HRC_1 = 48$.

Принимаем материал колеса сталь 40Х, термообработка – закалка. Предел прочности $\sigma_{B2} = 1079 \text{ Н/мм}^2$ (МПа), предел текучести $\sigma_T = 883 \text{ Н/мм}^2$, минимальная твердость поверхности $HRC_2 = 39$ [1].

Предел контактной выносливости при базовом числе циклов нагружения для материала шестерни $\sigma_{H \lim b1} = 17HRC_1 + 100 = 17 \cdot 48 + 100 = 916 \text{ Н/мм}^2$. То же для материала колеса $\sigma_{H \lim b2} = 17HRC_2 + 100 = 17 \cdot 39 + 100 = 763 \text{ Н/мм}^2$.

Предполагая длительный срок службы передачи с числом циклов нагружения, превышающим базовое число $N_{H0} = 70 \cdot 10^6$, принимаем коэффициент долговечности при расчете по контактным напряжениям $K_{HL1} = K_{HL2} = 1$.

Коэффициент запаса прочности по контактным напряжениям $[S_H]_1 = [S_H]_2 = 1,2$.

Допускаемые контактные напряжения для материала шестерни

$$[\sigma_H]_1 = \frac{\sigma_{H \lim b1} K_{HL1}}{[S_H]_1} = \frac{916 \cdot 1}{1,1} = 832,7. \quad (1)$$

Допускаемые контактные напряжения для материала колеса

$$[\sigma_H]_2 = \frac{\sigma_{H \lim b2} K_{HL2}}{[S_H]_2} = \frac{763 \cdot 1}{1,1} = 693,6. \quad (2)$$

Расчетные допускаемые контактные напряжения

$$[\sigma_H] = \sqrt{0,5([\sigma_H]_1^2 + [\sigma_H]_2^2)} = \sqrt{0,5(832,7^2 + 693,6^2)} = 766,3. \quad (3)$$

Предел выносливости материала шестерни и колеса по напряжениям изгиба при базовом числе циклов нагружения $\sigma_{F \lim b} = 650 \text{ Н/мм}^2$.

Предполагая длительный срок службы передачи с числом циклов нагружения, превышающим базовое число $N_{F0} = 4 \cdot 10^6$, принимаем коэффициент долговечности при расчете по напряжениям изгиба $K_{FL1} = K_{FL2} = 1$. Коэффициент запаса прочности по напряжениям изгиба $[S_F]_1 = [S_F]_2 = 1,7$ [2].

Допускаемые напряжения изгиба

$$[\sigma_F]_1 = [\sigma_F]_2 = \frac{\sigma_{F \lim b1} K_{FL1}}{[S_F]_1} = \frac{650 \cdot 1}{1,7} = 382. \quad (4)$$

Принимаем коэффициент ширины зубчатого венца $\psi_{bRe} = 0,285$.

Принимаем предварительно коэффициент, учитывающий неравномерность распределения нагрузки по ширине зубчатого венца при расчете по контактным напряжениям, $K_{H\beta} = 1,4$ [3].

Принимаем круговые зубья с углом наклона $\beta = 35$.

Коэффициент, учитывающий тип зубьев при расчете по контактным напряжениям:

$$\theta_H = 0,81 + 0,15\psi = 0,81 + 0,15 \cdot 1,294 = 1. \quad (5)$$

Параметрическое проектирование зубчатого механизма.

В качестве входных параметров в программно-расчетном комплексе Autodesk Inventor (2021) необходимы данные, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Параметр	Обозначение	Единица измерения	Шестерня	Колесо
Межосевое расстояние	a_w	мм	30	30
Ширина зубчатого венца	b	мм	12	12
Угол наклона зубьев	β	град	0	0
Делительный диаметр	d	мм	19,55	39,95
Диаметр вершин зубьев	d_a	мм	21,23	42,15
Диаметр впадин зубьев	d_f	мм	17,43	38,34
Число зубьев	z	-	25	32

На рис. 2 представлена трехмерная модель шестерни по вышеприведенным параметрическим данным.

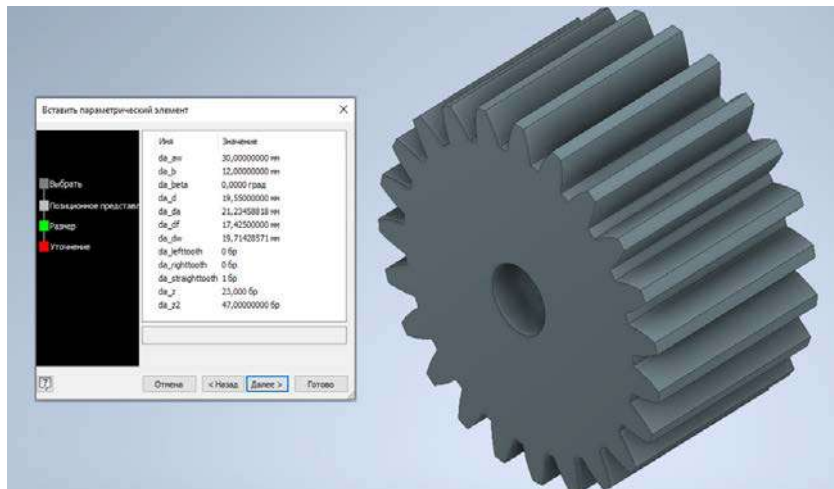


Рис. 2. Трехмерная модель шестерни

Проверочный расчет по напряжениям изгиба.

Эквивалентное число зубьев шестерни

$$z_{v1} = \frac{z_1}{\cos \delta_1 \cos^3 \beta} = \frac{25}{\cos 37^\circ 59' 55'' \cos^3 35^\circ} = \frac{25}{0,78802 \cdot 0,81915^3} = 57,7. \quad (5)$$

Коэффициент формы зуба шестерни с применением линейной интерполяции

$$Y_{F1} = 3,65 - \frac{3,65 - 3,62}{60 - 50} (57,7 - 50) = 3,63. \quad (6)$$

Эквивалентное число зубьев колеса

$$z_{v2} = \frac{z_2}{\cos \delta_2 \cos^3 \beta} = \frac{32}{\cos 52^\circ 5'' \cos^3 35^\circ} = \frac{32}{0,78802 \cdot 0,81915^3} = 94,6. \quad (7)$$

Коэффициент формы зуба колеса $Y_{F2} = 3,6$ [2].

В зубьях шестерни действуют более высокие напряжения изгиба, так как $Y_{F1} > Y_{F2}$ при одинаковых допускаемых напряжениях, поэтому проверочный расчет на изгиб выполняем для зубьев шестерни.

Коэффициент, учитывающий неравномерность распределения нагрузки между зубьями при расчете по напряжениям изгиба, $K_{F\alpha} = 1,08$.

Коэффициент, учитывающий неравномерность распределения нагрузки по ширине зубчатого венца при расчете по напряжениям изгиба, с применением линейной интерполяции [4]:

$$K_{F\beta} = 1,35 + \frac{1,7 - 1,35}{0,4 - 0,2} (0,27 - 0,2) = 1,47. \quad (8)$$

Коэффициент, учитывающий влияние вида зубчатой передачи при расчете по напряжениям изгиба, $\delta_F = 0,006$.

Удельная окружная динамическая нагрузка при расчете по напряжениям изгиба

$$W_{Fv} = \delta_F g_0 V \sqrt{\frac{d_1(u+1)}{2u}} = 0,006 \cdot 31 \cdot 24,2 \sqrt{\frac{210(1,28+1)}{2 \cdot 1,28}} = 61,6, \quad (9)$$

что не превышает максимальную удельную динамическую силу $W_{\max} = 105$ Н/мм.

Коэффициент динамичности нагрузки при расчете по напряжениям изгиба

$$K_{Fv} = 1 + \frac{W_{Fv} b d_1}{2 T_1 K_{F\alpha} K_{F\beta}} = 1 + \frac{61,6 \cdot 56 \cdot 210}{2 \cdot 1717,9 \cdot 10^3 \cdot 1,08 \cdot 1,47} = 1,13. \quad (10)$$

Коэффициент нагрузки при расчете по напряжениям изгиба

$$K_F = K_{F\alpha} K_{F\beta} K_{Fv} = 1,08 \cdot 1,47 \cdot 1,13 = 1,79. \quad (11)$$

Коэффициент, учитывающий наклон полюсной линии к основанию зуба:

$$Y_\beta = 1 - \frac{\beta}{140} = 1 - \frac{35}{140} = 0,75. \quad (12)$$

Действующие напряжения изгиба для зубьев шестерни:

$$\sigma_{F1} = \frac{F_t K_F Y_{F1} Y_\beta}{\theta_F b m_{te}} = \frac{16361 \cdot 1,79 \cdot 3,63 \cdot 0,75}{1 \cdot 56 \cdot 9,6} = 148,3 < [\sigma_F]_1. \quad (13)$$

Условие прочности по напряжениям изгиба соблюдается. Подобный расчет в программе Autodesk Inventor представлен на рис. 3.

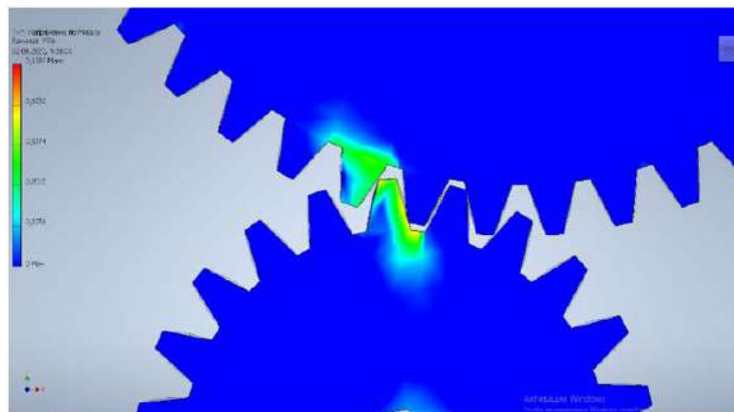


Рис. 3. Результаты анализа напряжения зубчатого зацепления

Заключение

Полностью довериться расчетам ЭВМ не представляется возможным, так как результаты разнятся от версии к версии самого программного обеспечения, но можно положиться на визуальную составляющую – эпюры по контактным напряжениям и при необходимости усилить слабые стороны конструкции. Подходит для этих целей также параметр «коэффициент запаса прочности», указывающий на слабые места, относительно предела прочности выбранного материала. Также плюсом компьютерного моделирования является возможность создания собственных материалов по введенным параметрам, что позволяет проводить более гибкие анализы.

Список литературы

1. Баранцов В. Я., Зайцева Т. Г. Методические указания к разработке и оформлению курсовых проектов и работ по дисциплинам «Механика», «Прикладная механика», «ДМ и основы конструирования». Липецк : ЛГТУ, 2002. 32 с.
2. Дунаев П. Ф., Леликов О. П. Конструирование узлов и деталей машин : учеб. пособие для техн. спец. вузов. М. : Высш. шк., 2000. 447 с.
3. Чернавский С. А. Курсовое проектирование деталей машин / под ред. С. А. Чернавского. М. : Высш. шк., 1988. 416 с.
4. Иосилевич Г. Б., Строганов Г. Б., Маслов Г. С. Прикладная механика : учебник для вузов / под ред. Г. Б. Иосилевича. М. : Высш. шк., 1989. 315 с.
5. Мусаева М. Х., Калел М. Х., Ергалиев Д. С. Интеграция систем ДЗЗ и БПЛА для предотвращения и мониторинга чрезвычайных ситуаций в Республике Казахстан // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2018. Т. 2. С. 27–29.
6. Садуахас А. К., Калманова Д. М., Хамитова Д. Р. [и др.]. Методы обработки информации и контроля стабилизации космических аппаратов и систем управления ориентации // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2021. Т. 1. С. 202–204.

References

1. Barantsov V.Ya., Zaytseva T.G. *Metodicheskie ukazaniya k razrabotke i oformleniyu kursovykh projektov i rabot po distsiplinam «Mekhanika», «Prikladnaya mekhanika», «DM i osnovy konstruirovaniya»* = Methodological guidelines for the development and design of course projects and works in the disciplines "Mechanics", "Applied Mechanics", "DM and fundamentals of design". Lipetsk: LGTU, 2002:32. (In Russ.)
2. Dunaev P.F., Lelikov O.P. *Konstruirovaniye uzlov i detaley mashin: ucheb. posobie dlya tekhn. spets. vuzov* = Designing of assemblies and machine parts : textbook for techn. spec. of universities. Moscow: Vyssh. shk., 2000:447. (In Russ.)
3. Chernavskiy S.A. *Kursovoe projektirovaniye detaley mashin* = Course design of machine parts. Moscow: Vyssh. shk., 1988:416. (In Russ.)
4. Iosilevich G.B., Stroganov G.B., Maslov G.S. *Prikladnaya mekhanika: uchebnik dlya vuzov* = Applied mechanics : textbook for universities. Moscow: Vyssh. shk., 1989:315. (In Russ.)
5. Musaeva M.Kh., Kalel M.Kh., Ergaliev D.S. Integration of remote sensing and UAV systems for prevention and monitoring of emergency situations in the Republic of Kazakhstan. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality. 2018;2:27–29. (In Russ.)

6. Saduakhas A.K., Kalmanova D.M., Khamitova D.R. et al. Methods of information processing and control of the stabilization of spacecraft and orientation control systems. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2021;1:202–204. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Дастан Сырымович Ергалиев

кандидат технических наук,
профессор кафедры авиационной техники
и технологий,
Академия гражданской авиации
(Казахстан, Алматы, ул. Ахметова, 44)
E-mail: DES-67@yandex.kz

Дмитрий Вячеславович Зуев

преподаватель
кафедры авиационной техники и технологий,
Академия гражданской авиации
(Казахстан, Алматы, ул. Ахметова, 44)
E-mail: zuex93@gmail.com

Андрей Александрович Кочетков

инженер,
Научно-производственное предприятие «Рубин»
(Россия, г. Пенза, ул. Байдукова, 2)
E-mail: kochetkov.andrei@yandex.ru

Алексей Владимирович Лысенко

кандидат технических наук, доцент кафедры
конструирования и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: lysenko_av@bk.ru

Никита Дмитриевич Кошелев

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: spellbinderrus@gmail.com

Dastan S. Ergaliev

Candidate of technical sciences,
professor of the sub-department
of aviation technology and technology,
Academy of Civil Aviation
(44 Akhmetova street, Almaty, Kazakhstan)

Dmitriy V. Zuev

Lecturer of the sub-department
of aviation technology and technology,
Academy of Civil Aviation
(44 Akhmetova street, Almaty, Kazakhstan)

Andrey A. Kochetkov

Engineer,
Scientific and Production Enterprise "Rubin"
(2 Baidukova street, Penza, Russia)

Aleksey V. Lysenko

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

Nikita D. Koshelev

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 17.05.2022

Поступила после рецензирования / Revised 13.06.2022

Принята к публикации / Accepted 04.07.2022

ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А. Н. Дарьина¹, И. В. Прокопьев²

^{1, 2} Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление»
Российской академии наук, Москва, Россия
¹daryina@ccas.ru, ²fvi2014@list.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматриваются отказоустойчивые системы управления динамическими объектами специального назначения. Управление динамическими объектами, например беспилотными транспортными системами, осуществляется на основе навигационной информации. Наиболее точными являются системы одновременной локализации и картографирования, инерциальная навигационная система, а в качестве внешних измерительных систем используется ГЛОНАСС. Коррекция системы одновременной локализации и картографирования, а также инерциальной системы проводится с помощью внешних источников информации, которые могут искажаться из-за внешних воздействий (постановки активных помех). Актуальность темы определяется проблемами систем локализации роботов, а также эффективностью средств и методов компьютерного и математического обеспечения этих систем. Важное значение отводится методам идентификации математических моделей динамических систем для коррекции системы локализации роботов. *Материалы и методы.* Рассмотрены методы живучести навигационной информации при функционировании динамического объекта в условиях сбоев в результате окклюзий и вибраций, а также из-за увеличения уровня других пассивных и активных помех. Обсуждается формальная математическая постановка задачи синтеза управления. Предложен адаптивный метод коррекции навигационной системы на основе эталонной модели, при котором может быть обеспечен запас живучести системы управления. *Результаты.* Приводятся результаты апробации предложенного метода на реальном мобильном роботе. *Выводы.* Эталонная модель, применяемая для коррекции навигационной системы, может быть также использована для построения прогнозирующих систем управления динамическими объектами. Предложенный метод используется в системе управления беспилотного транспортного средства для агрессивного вождения.

Ключевые слова: отказоустойчивые системы, динамические объекты, живучесть, математическая модель, система управления, мобильный робот

Для цитирования: Дарьина А. Н., Прокопьев И. В. Отказоустойчивые системы управления динамическими объектами специального назначения // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 4. С. 82–88. doi:10.21685/2307-4205-2022-4-9

FAULT-TOLERANT CONTROL SYSTEMS FOR DYNAMIC SPECIAL-PURPOSE OBJECTS

A.N. Daryina¹, I.V. Prokopyev²

^{1, 2} Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
¹daryina@ccas.ru, ²fvi2014@list.ru

Abstract. *Background.* The article is devoted to fault-tolerant control systems for dynamic objects of special purpose. Management of dynamic objects, such as unmanned transport systems, is carried out on the basis of navigation information. The most accurate are the systems of simultaneous localization and mapping, the inertial navigation system, and GLONASS is used as external measuring systems. The correction of the simultaneous localization and mapping system, as well as the inertial system, is carried out using external sources of information that can be distorted due to external influences (active interference). The relevance of the topic is determined by the problems of robot localization systems, as well as the effectiveness of the means and methods of computer and mathematical support for these systems. The importance is given to the methods of identification of mathematical models of dynamic systems for the correction of the system of localization of robots. *Materials and methods.* The article considers methods of survivability of navigation information during the functioning of a dynamic object in the conditions of failures as a result of occlusions and vibrations, as well as due to an increase in the level of other passive and active interference. The formal mathematical formulation of the problem of control synthesis is discussed. An adaptive method for correcting the navigation system based on a reference model is proposed, which can provide a margin of survivability of the con-

trol system. *Results.* The results of approbation of the proposed method on a real mobile robot are presented. *Conclusions.* The reference model used to correct the navigation system can also be used to build predictive control systems for dynamic objects. The proposed method is used in the control system of an unmanned vehicle for aggressive driving.

Keywords: fault-tolerant systems, dynamic objects, survivability, mathematical model, control system, mobile robot

For citation: Daryina A.N., Prokopyev I.V. Fault-tolerant control systems for dynamic special-purpose objects. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(4):82–88. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-4-9

Введение

В современном мире в различных сферах нашей жизни все чаще и чаще применяется искусственный интеллект. Все большее значение приобретают мобильная робототехника, роботизированные системы (группы роботов). Управление роботами может осуществляться человеком (оператором) различными методами. Наиболее перспективными являются супервизорный и диалоговый, при которых большую часть операций робот может выполнять в автономном режиме. Такому режиму управления необходимо придать свойство отказоустойчивости.

Для обеспечения эффективного применения робототехнических устройств, в том числе и мобильных роботов, функционирующих вместе с людьми (коботов), разрабатываются безопасные системы управления.

Одним из наиболее важных направлений в этой области является создание адаптивных систем управления для повышения интеллектуализации роботов, чтобы даже в случае частичной потери работоспособности он смог принимать решения с учетом поставленных целей и оцененного уровня повреждений (см., например, [1–3]).

В итоге получается, что проведение исследований, направленных на создание систем управления, которые обеспечивали бы безопасное продолжение функционирования при различных повреждениях мобильных роботов, является весьма актуальным.

Материалы и методы. Основные понятия

Отказоустойчивость – свойство технической системы сохранять свою работоспособность после отказа одной или нескольких ее составных частей¹. Она определяется количеством единичных отказов составных частей (элементов) системы, после наступления которых сохраняется работоспособность системы в целом. Базовый уровень отказоустойчивости подразумевает защиту от отказа одного любого элемента.

Отказоустойчивые системы можно построить двумя способами: используя только отказоустойчивые элементы или разработав методы, которые гарантируют построение системы из элементов, не являющихся отказоустойчивыми. В первом случае система продолжит функционирование, даже если один или несколько ее элементов выходят из строя. Во втором случае отказоустойчивость системы реализуется за счет введения так называемой избыточности. Избыточностью называют функциональность, в которой нет необходимости при безотказной работе системы [4].

При выполнении задания отказоустойчивая система является более безопасной, чем столь же надежная, но неотказоустойчивая [5], т.е. можно утверждать, что отказоустойчивость в некотором смысле является гарантией выполнения системой своего функционального предназначения.

Отказоустойчивость назовем статической, если в некоторый момент времени отказы могут быть отражены самой системой без прекращения функционирования. Она обеспечивается избыточностью структуры системы.

Отказоустойчивость назовем динамической, если наличие средств обнаружения, локализации и устранения неисправностей при наличии структурной избыточности позволяет восстанавливать отказавшие элементы без прекращения функционирования и характеризовать отказоустойчивость числом отказов элементов парируемых системой за время с начала функционирования до первого отказа системы в целом.

Метод обеспечения живучести

Постановка задачи состоит из математической модели объекта управления, записанной в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений и нейронных сетей, начальных условий, кри-

¹ ГОСТ Р 56111-2014 Интегрированная логистическая поддержка экспортируемой продукции военного назначения.

терия качества управления и цели управления в форме терминальных условий [6, 7]. Задача состоит в нахождении такой системы управления, при которой будет обеспечен необходимый запас живучести с учетом всех возможных изменений модели объекта.

Как отмечалось выше, основой методов обеспечения живучести являются адаптивные методы перестройки параметров системы управления, а также самой структуры системы управления. Для этого подхода необходимо разработать метод идентификации динамики объекта управления для создания эталонной модели объекта.

Например, для мобильных роботов основной проблемой является неустойчивая локализация робота при любых внешних условиях. Современные методы одновременной локализации и картографирования требуют комплексирования различных датчиков и являются дорогими и недостаточно устойчивыми к различным внешним воздействиям. Сбои в глобальной и локальной системе локализации не всегда возможно оперативно определить. Необходима эталонная модель, на основе которой система управления корректировалась бы в результате таких сбоев.

Кроме того, система управления на основе эталонных математических моделей объекта может реализовать адаптацию к новым внешним условиям. В результате внешнего воздействия может измениться сам объект управления, в этом случае должна измениться система управления, т.е. параметры и даже структура, которая может адаптироваться на основе эталонных моделей.

Для решения поставленной задачи авторы разработали метод, позволяющий идентифицировать динамику модели, а также корректировать систему управления при возникновении сбоев с помощью эталонной модели. Структурная схема метода представлена на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема метода

Динамика БТС (внутренняя модель) была реализована на структуре модели нейронной сети, имеющей следующую структуру: нейронная сеть включает два скрытых слоя с двумя нелинейностями, что означает, что общая конфигурация сети составляет 6-128-128-4. Она принимает в качестве входных данных четыре переменные состояния (угол наклона, продольную скорость, поперечную скорость, курс), а также рулевое управление и управление скоростью, и они выводят производную по времени от переменных состояния. На рис. 2 представлена обученная нейронная сеть, повторяющая линейную скорость робота и курс при ручном управлении.

Система коррекции представляет интеллектуальное устройство, логика которого заключается в проверке расхождения навигационной информации с информацией от внутренней модели и принятии решения коррекции при сбоях навигационной системы и перезагрузке ее в случае отказов.

Для оценки точности модели использован критерий среднеквадратического отклонения σ – отклонение прогнозируемых значений от реальных в каждом цикле прогноза:

$$\sigma = \frac{\sum_{t \in P} (y_t - \bar{y}_t)^2}{\sum_{t \in N} \bar{y}_t^2},$$

где N – число членов выборки; P – число членов прогноза; y_t , $\bar{y}_t$ – реальные и прогнозируемые величины.

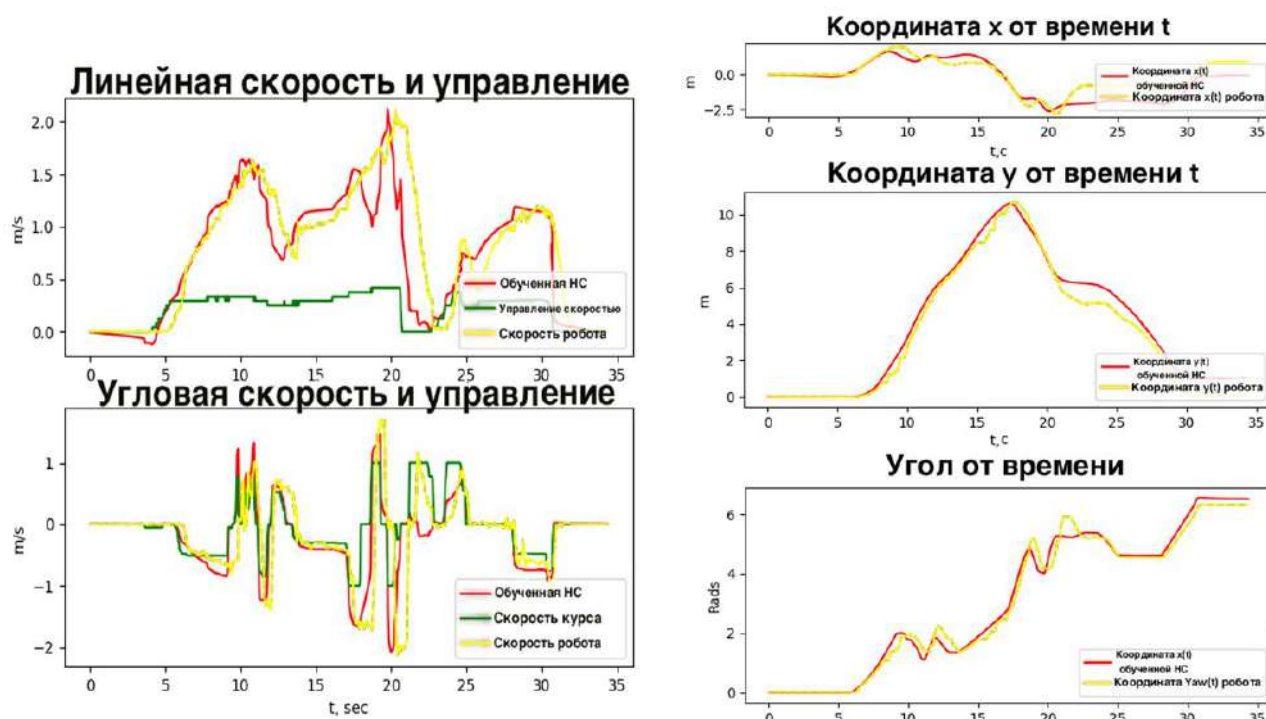
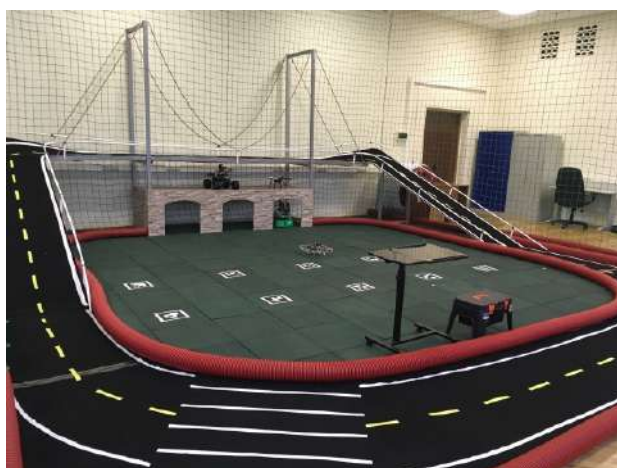


Рис. 2. Обученная нейронная сеть

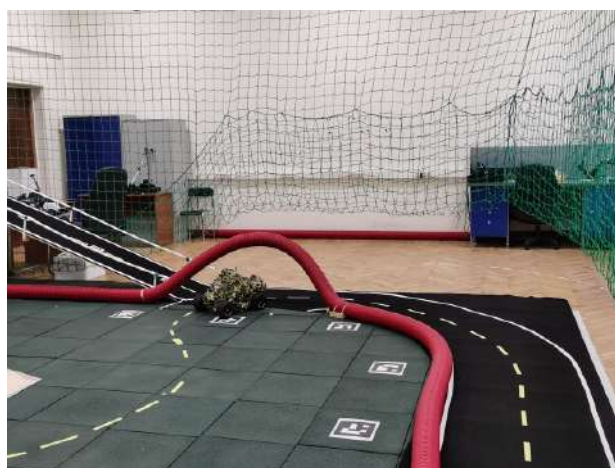
Апробация метода обеспечения живучести

Данный подход обеспечения живучести на основе эталонных моделей был разработан и апробирован в Робототехническом центре ФИЦ ИУ РАН (рис. 3,а) на трассе (рис. 3,б). Для экспериментов использовались реальные беспилотные мобильные роботы (рис. 4,а) и дроны (рис. 4,б).

Для этого в Роботоцентре был построен полигон, имитирующий сложную производственную среду, с крутыми подъемами и спусками, а также с возможностью добавления различных сложных ограничений для наземных и летающих роботов. Кроме этого, вносились помехи для датчиков роботов, вызывающие сбои и отказы.



а)



б)

Рис. 3. Разработка подхода:

а – робототехнический центр ФИЦ ИУ РАН; б – трасса для апробации предложенного метода

Беспилотный мобильный робот оснащен современной визуально-инерциальной системой локализации и картографирования, которая, как и все подобные системы, подвержена сбоям в результате окклюзий и вибраций.



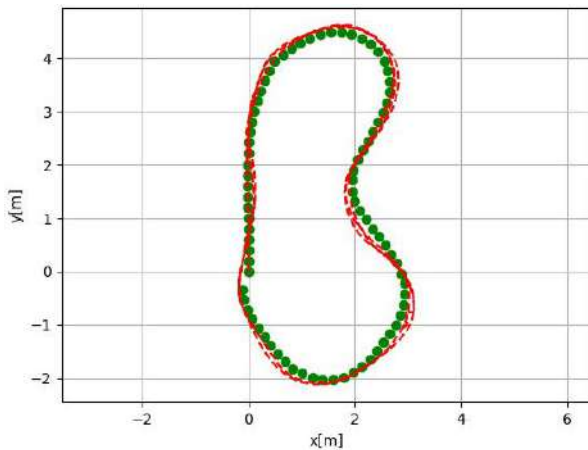
а)



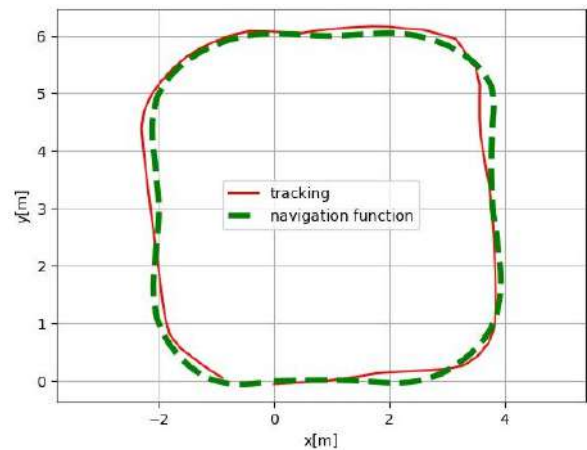
б)

Рис. 4. Используемые для эксперимента беспилотный мобильный робот (а) и дроны (б)

На рис. 5,а и б показана траектория движения реального робота (прерывистая линия) и его модели (сплошная линия). Траектория, представленная на рис. 5,б, проходила по горке (рис. 3,а) со скоростью 1,5 м/с.



а)



б)

Рис. 5. Траектория по трассе: а – рис. 3,б; б – рис. 3,а

Разработанный метод идентификации динамики беспилотного мобильного робота и метод коррекции (живучести) на основе эталонной динамической модели позволил выполнять автоматическое управление при сбоях, описанных выше.

Результаты

Разработан метод идентификации мобильных роботов с использованием регрессионных модельных структур (нейронных сетей) и дифференциальных уравнений. Разработана структурная схема (рис. 1) системы управления мобильными роботами, обладающая запасом живучести. Методом идентификации получена эталонная модель мобильного робота, на основе которой разработан метод коррекции системы навигации. Разработана программа идентификации беспилотного транспортного средства и программа коррекции системы навигации, которые апробированы на реальном мобильном роботе (рис. 4,а).

Обсуждение

Предложенный метод коррекции системы навигации может применяться для любых мобильных роботов. Кроме системы коррекции, эталонная модель может быть применена для адаптации параметров робота при других внешних воздействиях. Таким образом, может быть увеличен запас живучести. Существенным отличием предложенного метода коррекции от метода, представленного в статье [8], является способ идентификации модели.

Заключение

Полученная эталонная модель на основе нейронной сети небольшого размера и дифференциальных уравнений может быть реализована даже на маломощном устройстве. А полученный алгоритм коррекции навигационной системы достаточно точный и быстрый и может использоваться для агрессивного вождения мобильных роботов.

Список литературы

1. Дарьина А. Н., Прокопьев И. В. Метод нейросетевого управления в реальном времени на основе синтеза функции выбора // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 4. С. 41–50.
2. Дарьина А. Н., Прокопьев И. В. Метод оптимизации параметров контроллера бесплотного транспортного средства на основе оптимизации роя частиц // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 3. С. 80–87.
3. Дарьина А. Н., Прокопьев И. В. Метод активной одновременной локализации и картографирования на основе модели прогнозирующего интегрального пути для мобильных роботов // Нейрокомпьютер: разработка, применение. 2021. № 6. С. 12–23.
4. Отказоустойчивость. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki>
5. Северцев Н. А., Бецков А. В., Прокопьев И. В. Возможный метод исследования влияния надежности элементов на отказоустойчивость системы // Научный вестник МГТУ ГА. 2013. № 193. С. 70–74.
6. Прокопьев И. В. Модель интеллектуального контроллера подстройки эталонной модели для системы координатно-параметрического управления // Труды ИСА РАН. Динамика неоднородных систем. 2010. № 5. С. 80–88.
7. Полтавский А. В., Жумабаева А. С., Юрков Н. К. Информационная система: управление замещением критерия // Надежность и качество сложных систем. 2016. № 4. С. 20–25.
8. Северцев Н. А., Дарьина А. Н. Применение критериев подобия при ресурсной отработке сложных технических систем и изделий // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 4. С. 5–14.

References

1. Dar'ina A.N., Prokop'ev I.V. The method of neural network control in real time based on the synthesis of the selection function. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2019;(4):41–50. (In Russ.)
2. Dar'ina A.N., Prokop'ev I.V. Method of optimization of parameters of a controller of a non-dense vehicle based on optimization of a swarm of particles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(3):80–87. (In Russ.)
3. Dar'ina A.N., Prokop'ev I.V. Method of active simultaneous localization and mapping based on the model of predictive integral path for mobile robots. *Neyrokomp'yuter: razrabotka, primeneniye = Neurocomputer: development, application*. 2021;(6):12–23. (In Russ.)
4. *Otkazoustoichivost' = Fault tolerance*. (In Russ.). Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki>
5. Severtsev N.A., Betskov A.V., Prokop'ev I.V. A possible method for investigating the influence of the reliability of elements on the fault tolerance of the system. *Nauchnyy vestnik MGTU GA = Scientific Bulletin of MSTU GA*. 2013;(193):70–74. (In Russ.)
6. Prokop'ev I.V. Model of an intelligent controller for adjusting the reference model for a coordinate-parametric control system. *Trudy ISA RAN. Dinamika neodnorodnykh system = Proceedings of the ISA RAS. Dynamics of heterogeneous systems*. 2010;(5):80–88. (In Russ.)
7. Poltavskiy A.V., Zhumabaeva A.S., Yurkov N.K. Information system: management of substitution of a criterion. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2016;(4):20–25. (In Russ.)
8. Severtsev N.A., Dar'ina A.N. Application of similarity criteria in resource testing of complex technical systems and products. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(4):5–14. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Анна Николаевна Дарьина

кандидат физико-математических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник,
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление»
Российской академии наук
(Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 44, корп. 2)
E-mail: daryina@ccas.ru

Anna N. Daryina

Candidate of physical and mathematical sciences,
associate professor, leading researcher,
Federal Research Center "Computer Science and
Control" of the Russian Academy of Sciences
(build. 2, 44 Vavilova street, Moscow, Russia)

Игорь Витальевич Прокопьев

доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник,
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление»
Российской академии наук
(Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 44, корп. 2)
E-mail: fvi2014@list.ru

Igor V. Prokopyev

Doctor of technical sciences, leading researcher,
Federal Research Center "Computer Science and
Control" of the Russian Academy of Sciences
(build. 2, 44 Vavilova street, Moscow, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 28.02.2022

Поступила после рецензирования/Revised 30.03.2022

Принята к публикации/Accepted 25.04.2022

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

DIAGNOSTIC METHODS FOR ENSURING RELIABILITY AND QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

УДК 519.24; 53; 57.017 519

doi:10.21685/2307-4205-2022-4-10

ВИРТУАЛЬНОЕ УСИЛЕНИЕ ЭФФЕКТА РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ ПРИ ПЕРЕХОДЕ ОТ БИНАРНЫХ НЕЙРОНОВ К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ Q-АРНЫХ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОНОВ

А. И. Иванов¹, А. П. Иванов², К. Н. Савинов³, Р. В. Еременко⁴

¹ Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт, Пенза, Россия

^{2, 3, 4} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ ivan@pniei.penza.ru, ² ap_ivanov@pnzgu.ru, ³ tsib@pnzgu.ru, ⁴ tsib@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматривается проблема распараллеливания нейросетевых вычислений в неявной форме. Проблема возникает в основном при попытках ускорения вычислений на многоядерных процессорах. Аналогичная ситуация возникает при нейросетевом объединении нескольких классических статистических критериев. *Материалы и методы.* Рассматривается симметризация пяти классических статистических критериев проверки гипотезы нормального распределения малых выборок в 16 опытов. Рассматриваются классические критерии Андерсона – Дарлинга, нормированного размаха, Васичека, Фроцини и критерий четвертого статистического момента. К сожалению, их нейросетевые аналоги имеют низкую достоверность принятия решений – 0,75. Пяти бинарных нейронов недостаточно. В связи с этим выполнено моделирование результата объединения до 1000 бинарных нейронов. *Результаты.* Бинарные нейроны не могут обеспечить доверительную вероятность более 0,93. Тысяча троичных нейронов способна обеспечить доверительную вероятность 0,98. Переход к 5-арным искусственным нейронам должен позволить достичь доверительной вероятности 0,997 при объединении 40 нейронов. *Выводы.* Мы наблюдаем значительный рост качества принимаемых нейронными сетями решений при увеличении числа уровней в их выходных квантователях. Естественные нейроны живых существ обмениваются пачками импульсов, что косвенно свидетельствует о наличии у них многоуровневых квантователей. Нет необходимости синтезировать новые статистические критерии, достаточно перейти к использованию q-арных искусственных нейронов, являющихся аналогами уже известных статистических критериев.

Ключевые слова: статистические критерии, искусственные нейроны эквивалентные статистическим критериям, корректровка ошибок выходного кода нейросети

Для цитирования: Иванов А. И., Иванов А. П., Савинов К. Н., Еременко Р. В. Виртуальное усиление эффекта распараллеливания вычислений при переходе от бинарных нейронов к использованию q-арных искусственных нейронов // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 4. С. 89–97. doi:10.21685/2307-4205-2022-4-10

VIRTUAL ENHANCEMENT OF THE EFFECT OF PARALLELIZATION OF CALCULATIONS IN THE TRANSITION FROM BINARY NEURONS TO THE USE OF Q-ARY ARTIFICIAL NEURONS

A.I. Ivanov¹, A.P. Ivanov², K.N. Savinov³, R.V. Eremenko⁴

¹ Penza Research Electrotechnical Institute, Penza, Russia

^{2,3,4} Penza State University, Penza, Russia

¹ivan@pniei.penza.ru, ²ap_ivanov@pnzgu.ru, ³tsib@pnzgu.ru, ⁴tsib@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* The problem of parallelization of neural network calculations in an implicit form is considered. The problem occurs mainly when trying to speed up calculations on multi-core processors. A similar situation arises when a neural network combines several classical statistical criteria. *Materials and methods.* Summarization of five classical statistical criteria for testing the hypothesis of normal distribution of small samples in 16 experiments is considered. Classical tests of Anderson-Darling, normalized range, Vasicek, Frotsini and the test of the fourth statistical moment are considered. Unfortunately, their neural network counterparts have a low decision confidence of – 0.75. Five binary neurons are not enough. In this regard, the simulation of the result of combining up to 1000 binary neurons was performed. *Results.* Binary neurons cannot provide a confidence level greater than 0.93. A thousand ternary neurons can provide a confidence level of 0.98. The transition to 5-art artificial neurons should allow reaching a confidence level of 0.997 when combining 40 neurons. *Conclusions.* We observe a significant increase in the quality of decisions made by neural networks with an increase in the number of levels in their output quantizes. Natural neurons of living beings exchange bursts of impulses, which indirectly indicates that they have multilevel quantizes. There is no need to synthesize new statistical criteria; it is enough to switch to the use of q -ary artificial neurons, which are analogues of already known statistical criteria.

Keywords: statistical criteria, artificial neurons equivalent to statistical criteria, error correction of the neural network output code

For citation: Ivanov A.I., Ivanov A.P., Savinov K.N., Eremenko R.V. Virtual enhancement of the effect of parallelization of calculations in the transition from binary neurons to the use of q -ary artificial neurons. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(4):89–97. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-4-10

Введение

Искусственные нейронные сети удобны для ускорения вычислений путем их распараллеливания. Современные процессоры имеют от 4 до 4096 ядер. В простейшей парадигме распараллеливания вычислений можно попытаться ускорить в N раз нейросетевые вычисления, распределив эмуляцию искусственных нейронов между N ядрами процессора. Если не учитывать затраты на передачу информации между ядрами, то мы имеем линейную модель выигрыша от распараллеливания вычислений. При этом возникает вопрос о том, может ли быть достигнуто более эффективное нелинейное ускорение вычислений при реальном или виртуальном распараллеливании.

Одной из задач, решаемых большими сетями искусственных нейронов, является задача многокритериальной статистической оценки той или иной статистической гипотезы. Например, на практике часто встречается задача проверки гипотезы нормального распределения выборки. В 20 в. усилиями математической общественности было создано порядка 20 статистических критериев для проверки гипотезы нормального распределения при тех или иных условиях [1]. Однако не все классические статистические критерии достаточно хорошо работают на малых выборках в 16 опытов [2]. Как результат, удастся использовать примерно половину из созданных в 20 в. статистических критериев [3]. К сожалению, десяти классических статистических критериев прошлого века оказывается недостаточно для принятия решений с доверительной вероятностью 0,997. В связи с этим в этом веке вновь возник интерес к синтезу новых статистических критериев [4–7]. В первом приближении можно считать, что за 10 лет усилиями исследователей Пензенского государственного университета было создано примерно 20 новых статистических критериев. Если продолжить эти работы с той же интенсивностью, то к 2032 г. появится еще 20 новых статистических критериев. Итого проверять гипотезу нормальности на малых выборках мы сможем путем параллельного использования примерно 50 статистических критериев.

Как показано в работах [2–7], самым простым способом объединения множества статистических критериев является представление каждого критерия эквивалентным ему бинарным искусственным нейроном. Тогда нейросеть из 50 нейронов на каждую из проверяемых выборок будет от-

кликаться 50-битным бинарным кодом. Мы получаем классическую ситуацию возможного применения кодов с высокой избыточностью для обнаружения и устранения в них ошибок. При этом, чем выше кодовая избыточность, тем больше мы можем обнаружить и исправить ошибок. Теоретически продолжение работ по синтезу новых статистических критериев с той же интенсивностью может привести к возможности в конце этого века работать с кодами, обладающими 210-кратной избыточностью.

В связи с этим в данной статье мы попытаемся оценить желаемую кодовую избыточность, которая может дать доверительную вероятность принятия решений на уровне 0,997.

Упрощение задачи моделирования нейросетевых преобразований за счет симметризации

К сожалению, создать достаточно корректную имитационную модель даже для пяти классических искусственных нейронов достаточно сложно. Проблема состоит в низкой устойчивости задач оценки элементов корреляционных матриц 5×5 и более высокой размерности, а также задач их имитационного моделирования [8]. Эта проблема особенно остро стояла для корреляционных матриц размерности 416×416 биометрических данных среды моделирования «БиоНейроАвтограф» [9, 10]. Проблема решается замещением исходной асимметричной корреляционной матрицы на ее симметричный аналог с одинаковыми элементами, находящимися вне диагонали [11, 12].

Для определенности рассмотрим пять следующих классических статистических критериев [1, 2]:

- Андерсона – Дарлинга (1952);
- нормированного размаха (1954);
- Васичека (1976);
- Фроцини (1978);
- четвертого статистического момента (1984).

Симметризация задачи дает эквивалентные симметричные нейроны, которые имеют одинаковые вероятности ошибок первого и второго рода на уровне 0,251. Оценка выполнена через вычисление среднего геометрического всех подобных показателей по каждому из рассматриваемых критериев. Усреднение модулей коэффициентов корреляции рассматриваемых критериев дает значение 0,431. В результате мы имеем для каждого из пяти симметризованных нейронов статистическую модель, представленную на рис. 1.

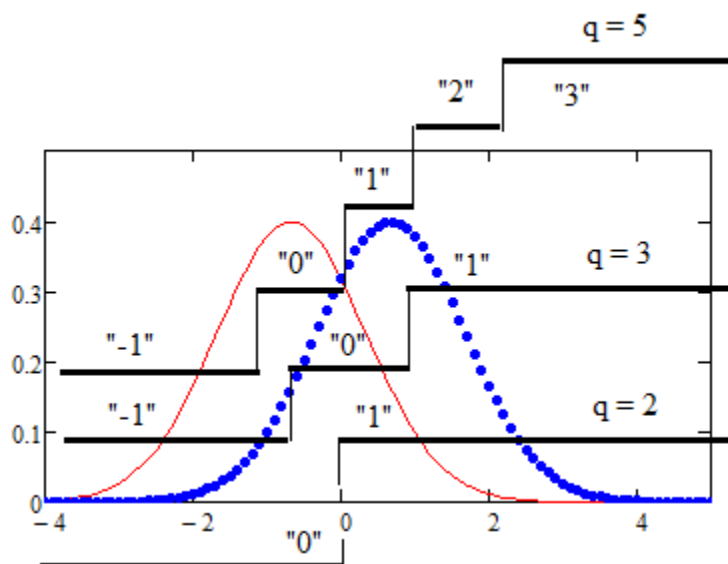


Рис. 1. Симметричная статистическая модель откликов одного из пяти нейронов на входные нормальные данные (непрерывное распределение) и равномерные входные данные (точечная линия) для малых выборок объемом в 16 опытов

Следует также отметить, что все искусственные нейроны, как правило, выполняют обогащение относительно «бедных» входных данных. Например, персептроны выполняют обогащение взвешенным суммированием в линейном пространстве. Квадратичные нейроны выполняют суммирование в квадратичном пространстве и т.д. Нейроны, эквивалентные тому или иному статистическому

скому критерию, выполняют обогащение «бедных» входных данных в том или ином нелинейном пространстве. Вид пространства, в котором происходит обогащение, зависит от конструкции эмулируемого статистического критерия, однако все обогатители являются достаточно «хорошими» нормализаторами, т.е. при росте числа входов у искусственных нейронов нормализуются отклики их входных обогащающих конструкций. В связи с этим на рис. 1 отклики симметричных нейронов представлены нормальными распределениями, хотя отклики реальных нейронов для того или иного статистического критерия существенно асимметричны [2, 3]. Замена асимметричных распределений симметричными нормальными распределениями является побочным эффектом симметризации задачи.

Оценка выигрыша от совместного использования пяти статистических критериев при их замещении пятью бинарными нейронами

Из рис. 1 видно, что для симметризованной модели бинарный квантователь ($q = 2$) должен переключаться в точке $x = 0,0$. При этом его выходное состояние «0» будет соответствовать обнаружению нейроном нормального закона распределения входных данных. Если все пять искусственных нейронов дают отклик «00000», то с высокой вероятностью мы обнаруживаем нормально распределенные входные данные. Также решение о нормальном распределении должно приниматься при обнаружении в коде четырех состояний «0» и трех состояний «0». В иных случаях мы должны отклонять гипотезу обнаружения нормального закона. Это простой алгоритм условно можно назвать «голосованием разрядов». Формально он сводится к подсчету состояний «0» или, что то же самое, к вычислению расстояний Хэмминга между выходным кодом нейросети и идеальным кодом «00000». На рис. 2 приведено распределение амплитуд вероятности появления разных значений расстояний Хэмминга для порога квантователя $k = 0,0$.

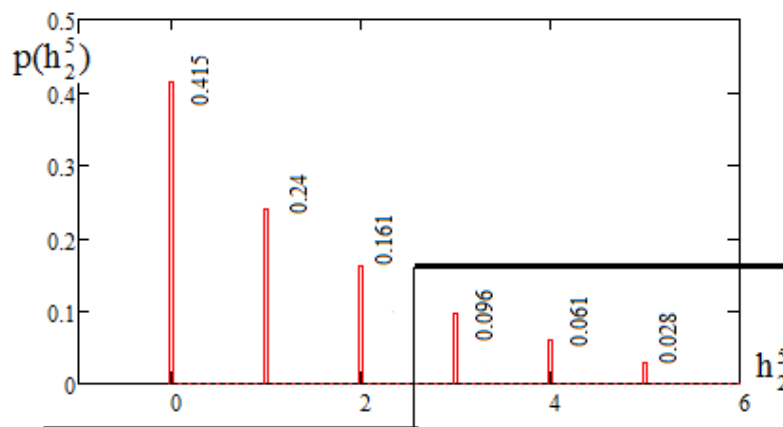


Рис. 2. Шесть спектральных линий Хэмминга для выходных бинарных кодов с 5-кратной избыточностью

Работа критерия «голосования по большинству» отображена на рис. 2 еще одним квантователем. Нулевое состояние этого квантователя соответствует обнаружению нормального распределения данных. Подсчет амплитуд вероятности появления трех последних спектральных линий дает значение вероятностей ошибок второго рода $P_2 \approx 0,191$. Если один симметричный нейрон дает вероятности ошибок $P_2 \approx 0,251$, то пять симметричных нейронов дают снижение вероятности на 31 %. Такой уровень снижения вероятности ошибок обусловлен высоким уровнем корреляционной сцепленности $r = 0,431$ между выходными состояниями симметричных нейронов. Если бы корреляционная сцепленность полностью отсутствовала $r = 0,0$, то вероятность ошибок снизилась бы практически до нуля $P_2 \approx 0,001$ (в 250 раз).

Оценка выигрыша от совместного использования пяти статистических критериев при их замещении пятью троичными нейронами

Если мы формально перейдем от бинарных нейронов к троичным с тремя выходными состояниями $\{-1, 0, 1\}$, то в бинарном коде мы должны будем их кодировать двумя битами, т.е. в пространстве бинарных кодов мы получаем 10-кратную кодовую избыточность. Это является пред-

посылкой для роста, корректирующей способность конструкций, опирающихся на применение троичных искусственных нейронов. Спектр амплитуд вероятности расстояний Хэмминга для пяти троичных нейронов приведен на рис. 3 для двух порогов троичного квантователя $k = \{-0,671; +0,671\}$.

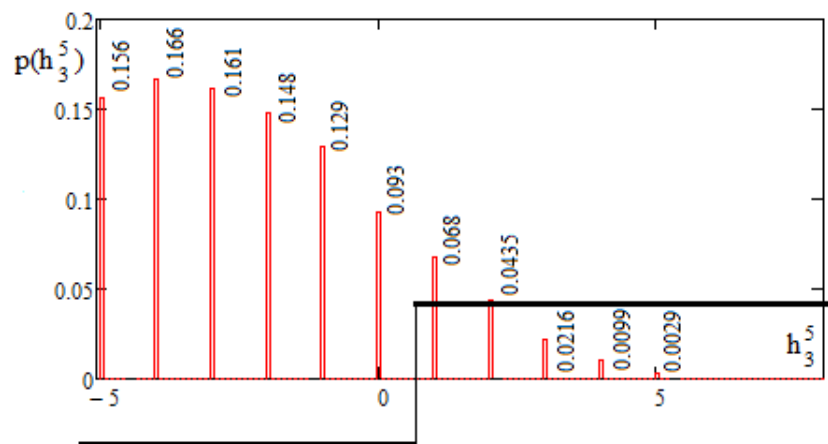


Рис. 3. Одиннадцать спектральных линий расстояний Хэмминга для пяти троичных нейронов

Из рис. 3 видно, что корректор ошибок, построенный на выходных данных троичных нейронов, позволяет уменьшить вероятность появления обнаруженных, но не исправленных ошибок до величины 0,141. Это примерно на 34 % меньше, чем для двоичных нейронов. Мы наблюдаем существенный рост снижения вероятности появления обнаруживаемых корректором, но не исправляемых ошибок. Несмотря на прежнее значение корреляционной сцепленности выходных состояний пяти обогатителей симметричных нейронов $r = 0,431$, мы имеем существенное повышение корректирующей способности троичных нейронов по сравнению с двоичными нейронами.

Оценка выигрыша от совместного использования пяти статистических критериев при их замещении 5-арными эквивалентными нейронами

При повышении числа выходных состояний у квантователя эквивалентных нейронов всегда растет кодовая избыточность. Так, если использовать 5-арные квантователи с состояниями $\{-1, 0, 1, 2, 3\}$, мы вынуждены кодировать каждое из состояний тремя битами бинарного кода, т.е. мы формально выходим для пяти нейронов на 15-кратную кодовую избыточность. Естественно, что это является предпосылкой для корректировки значительно большего числа обнаруживаемых ошибок.

Как итог, спектр расстояний Хэмминга имеет 17 линий, отображенных на рис. 4. Важным обстоятельством является то, что последние восемь спектральных линий имеют малые значения амплитуд вероятности. Кодовый корректор не может исправлять ошибки, возникающие с вероятностью 0,051. Это значение вероятности мы наблюдаем для порогов выходного квантователя $k = \{-1,0; 0,0; 0,671; 2,13\}$.

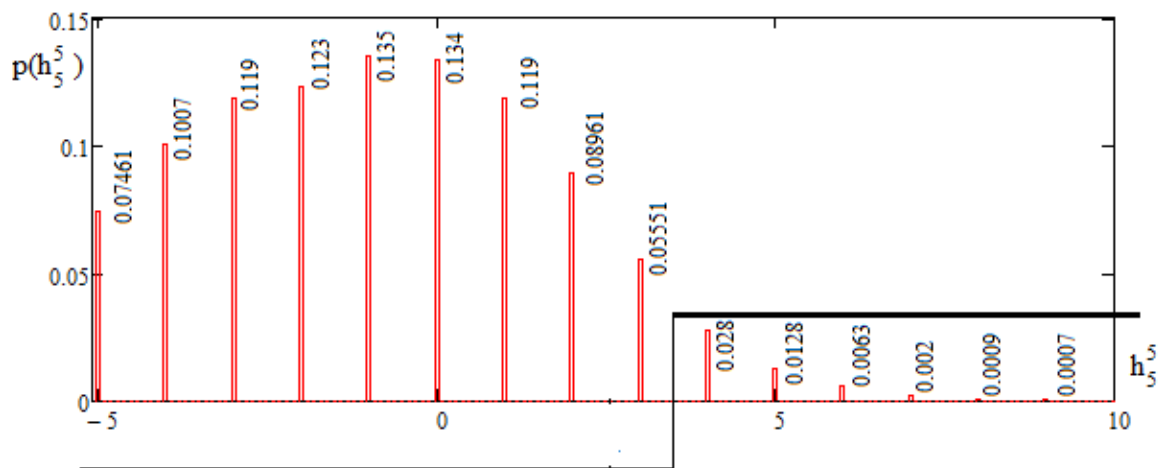


Рис. 4. Семнадцать спектральных линий расстояний Хэмминга для 5-арных эквивалентных нейронов

Прогнозирование ожидаемых значений вероятности появления не поддающихся корректировке ошибок с ростом числа искусственных нейронов

Очевидно, что синтезировать новые статистические критерии проверки гипотезы нормальности или гипотезы равномерности [3–5] достаточно сложно. Куда проще повышать число выходных состояний квантователей искусственных нейронов. Для прогнозирования достижимых вероятностей ошибок в зависимости от числа нейронов достаточно двух точек для трех типов, рассмотренных в данной статье искусственных нейронов. Прогнозирование удобно выполнять в логарифмическом масштабе по двум координатам. В простейшем случае может быть использована линейная экстраполяция, как это показано на рис. 5.

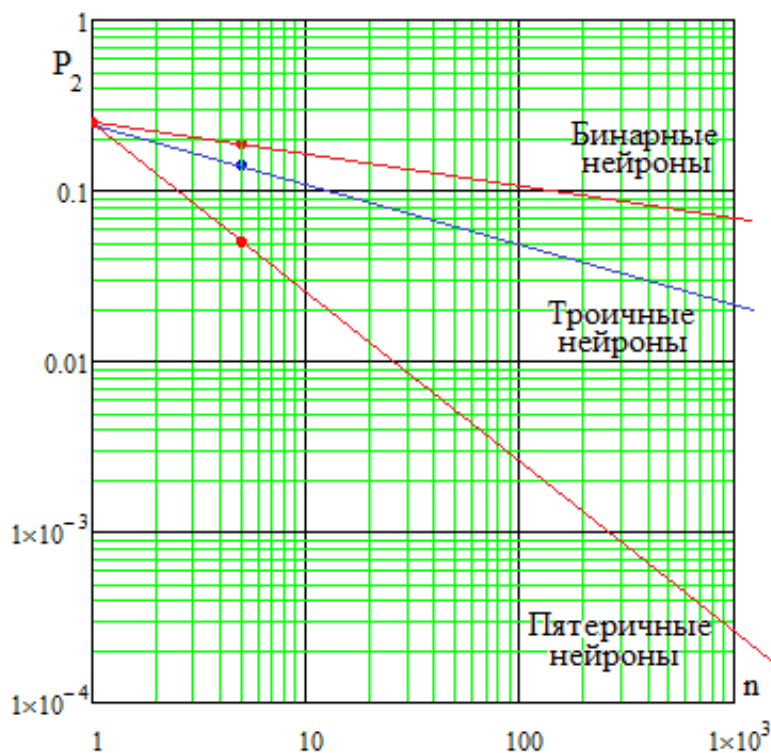


Рис. 5. Прогноз достижимых вероятностей ошибок второго рода при разном числе нейронов, имеющих многоуровневые квантователи

Из рис. 5 мы видим, что простейшие бинарные нейроны являются самыми слабыми. Даже нейросеть, состоящая из 1000 бинарных нейронов, способна обеспечить решения с ожидаемой доверительной вероятностью 0,93. Троичные нейроны гораздо сильнее. Тысяча троичных нейронов должна давать решения с доверительной вероятностью 0,98, что уже приемлемо для ряда практических применений.

В случае использования нейросетевых преобразователей биометрии в код длиной в 256 бит желательно принимать решения с доверительной вероятностью 0,997. Как видно из прогноза рис. 5, такую доверительную вероятность могут обеспечить уже 40 5-арных искусственных нейронов.

Заключение

Естественно, что выполненные нами приближения (симметризация искусственных нейронов, линейная экстраполяция в координатах двойного логарифмирования) могут приводить к существенным ошибкам предсказания. Однако авторы этой статьи убеждены, что переход от простейших бинарных нейронов к более сложным q -арным нейронам дает значительные технические преимущества. Наша статья является подтверждением ранее полученных положительных результатов по перспективам применений искусственных нейронов с выходными многоуровневыми квантователями [13, 14].

Исследования физиологов показывают, что естественные нейроны живых существ обмениваются между собой пачками импульсов. Это косвенно подтверждает наличие в естественных нейронах эффектов многоуровневого квантования. Видимо, переход от простейших бинарных нейронов к более сложным q -арным нейронам является копированием давно используемых живой природой эффектов.

Для нас принципиально важным является то, что распараллеливание вычислений с использованием бинарных нейронов путем их распределения по множеству ядер современных процессоров дает линейное ускорение вычислений. Переход от бинарных нейронов к q -арным нейросетевым конструкциям позволяет заменить 1000 относительно слабых бинарных нейронов на 40 более сильных пятиричных нейронов. Очевидно, что в этом случае мы должны наблюдать дополнительное нелинейное (виртуальное) ускорение вычислений примерно в 25 раз. Для эмуляции 40 5-арных искусственных нейронов требуется существенно меньше ядер, чем для эмуляции 1000 бинарных нейронов.

Список литературы

1. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М. : Физматлит, 2006. 816 с.
2. Иванов А. П., Иванов А. И., Малыгин А. Ю. [и др.]. Альбом из девяти классических статистических критериев для проверки гипотезы нормального или равномерного распределения данных малых выборок // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 1. С. 20–29. doi:10.21685/2307-4205-2022-1-3
3. Иванов А. П., Иванов А. И., Безяев А. В. [и др.]. Обзор новых статистических критериев проверки гипотезы нормальности и равномерности распределения данных малых выборок // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 2. С. 33–44. doi:10.21685/2307-4205-2022-2-4
4. Иванов А. И., Иванов А. П., Куприянов Е. Н. Интегрально-дифференциальное расширенные номенклатуры статистических критериев семейства Колмогорова – Смирнова для проверки гипотезы нормального распределения данных малых выборок // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2022. Т. 1. С. 10–13.
5. Иванов А. И., Куприянов Е. Н. Синтез новых более мощных статистических критериев через мультипликативное объединение классических критериев Фроцини и Мурота – Такеучи с критерием Херста для проверки гипотезы нормальности малых выборок // Надежность. 2022. Т. 22, № 1. С. 52–55. doi:10.21683/1729-2646-2022-22-1-52-55
6. Иванов А. И., Иванов А. П., Куприянов Е. Н. Мультипликативно-нейросетевое объединение статистических критериев Херста и Мурота – Такеучи при проверке гипотезы нормальности малых выборок // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 4. С. 27–33. doi:10.21685/2307-4205-2021-4-4
7. Волчихин В. И., Иванов А. И., Иванов А. П., Лукин В. С. Расширение номенклатуры семейства критериев среднего гармонического полиномами Эрмита при проверке гипотезы нормального распределения малых выборок биометрических данных // Динамика систем, механизмов и машин. 2021. Т. 9, № 4. С. 3–11. doi:10.25206/2310-9793-9-4-3-11
8. Шалыгин А. С., Палагин Ю. И. Прикладные методы статистического моделирования. Л. : Машиностроение, 1986. 320 с.
9. Иванов А. И., Захаров О. С. Среда моделирования «БиоНейроАвтограф» [Программный продукт создан лабораторией биометрических и нейросетевых технологий, размещен с 2009 г. на сайте АО «ПНИЭИ»]. URL: <http://пниэи.рф/activity/science/noc/bioneuroautograph.zip>
10. Иванов А. И. Автоматическое обучение больших искусственных нейронных сетей в биометрических приложениях : учеб. пособие. Пенза, 2013. 30 с. URL: http://пниэи.рф/activity/science/noc/tm_IvanovAI.pdf
11. Иванов А. И., Банных А. Г., Серикова Ю. И. Учет влияния корреляционных связей через их усреднение по модулю при нейросетевом обобщении статистических критериев для малых выборок // Надежность. 2020. Т. 20, № 2. С. 28–34. URL: <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-2-28-34>
12. Иванов А. И., Полковникова С. А. Хи-квадрат симметризация корреляционных связей, ориентированная на одиночные нейроны и их обучение на малые выборках // Информационно-управляющие, телекоммуникационные системы, средства поражения и их техническое обеспечение : сб. науч. ст. по материалам IV Всерос. межведомственной науч.-техн. конф. Пенза, 2022. С. 123–127.
13. Волчихин В. И., Иванов А. И., Фунтиков В. А., Малыгина Е. А. Перспективы использования искусственных нейронных сетей с многоуровневыми квантователями в технологии биометрико-нейросетевой аутентификации // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2013. № 4. С. 88–99.
14. Курников Д. С., Петров С. А. Использование нейронных сетей в экономике // Juvenis Scientia. 2017. № 6. С. 10–12.

References

1. Kobzar' A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov = Applied mathematical statistics. For engineers and researchers*. Moscow: Fizmatlit, 2006:816. (In Russ.)
2. Ivanov A.P., Ivanov A.I., Malygin A.Yu. et al. An album of nine classical statistical criteria for testing the hypothesis of normal or uniform distribution of small sample data. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(1):20–29. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-1-3
3. Ivanov A.P., Ivanov A.I., Bezyaev A.V. et al. Review of new statistical criteria for testing the hypothesis of normality and uniformity of distribution of small sample data. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(20):33–44. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-2-4
4. Ivanov A.I., Ivanov A.P., Kupriyanov E.N. Integral-differential extended nomenclature of statistical criteria of the Kolmogorov- Smirnov family for testing the hypothesis of normal distribution of small sample data. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2022;1:10–13. (In Russ.)
5. Ivanov A.I., Kupriyanov E.N. Synthesis of new more powerful statistical criteria through a multiplicative combination of the classical Frocini and Murota-Takeuchi criteria with the Hurst criterion for testing the hypothesis of normality of small samples. *Nadezhnost' = Reliability*. 2022;22(1):52–55. (In Russ.). doi:10.21683/1729-2646-2022-22-1-52-55
6. Ivanov A.I., Ivanov A.P., Kupriyanov E.N. Multiplicative neural network integration of Hearst and Murot-Takeuchi statistical criteria when testing the hypothesis of normality of small samples. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(4):27–33. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-4-4
7. Volchikhin V.I., Ivanov A.I., Ivanov A.P., Lukin V.S. Extension of the nomenclature of the family of criteria for the average harmonic Hermite polynomials when testing the hypothesis of the normal distribution of small samples of biometric data. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin = Dynamics of systems, mechanisms and machines*. 2021;9(4):3–11. (In Russ.). doi:10.25206/2310-9793-9-4-3-11
8. Shalygin A.S., Palagin Yu.I. *Prikladnye metody statisticheskogo modelirovaniya = Applied methods of statistical modeling*. Leningrad: Mashinostroenie, 1986:320. (In Russ.)
9. Ivanov A.I., Zakharov O.S. *Sreda modelirovaniya «BioNeyroAvtograf» [Programmnyy produkt sozdan laboratoriy biometricheskikh i neyrosetevykh tekhnologiy, razmeshchen s 2009 g. na sayte AO «PNIEI»] = Modeling environment "Bioneiroautograph" [The software product was created by the laboratory of biometric and neural network technologies, posted since 2009 on the website of JSC PNIEI]*. (In Russ.). Available at: <http://pniei.rf/activity/science/noc/bioneuroautograph.zip>
10. Ivanov A.I. *Avtomaticheskoe obuchenie bol'shikh iskusstvennykh neyronnykh setey v biometricheskikh prilozheniyakh: ucheb. posobie = Automatic training of large artificial neural networks in biometric applications : textbook*. Penza, 2013:30. (In Russ.). Available at: http://pniei.rf/activity/science/noc/tm_IvanovAI.pdf
11. Ivanov A.I., Bannykh A.G., Serikova Yu.I. Accounting for the influence of correlations through their modulus averaging in neural network generalization of statistical criteria for small samples. *Nadezhnost' = Reliability*. 2020;20(2):28–34. (In Russ.). Available at: <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-2-28-34>
12. Ivanov A.I., Polkovnikova S.A. Chi-square symmetrization of correlation connections, focused on single neurons and their training on small samples. *Informatsionno-upravlyayushchie, telekommunikatsionnye sistemy, sredstva porazheniya i ikh tekhnicheskoe obespechenie: sb. nauch. st. po materialam IV Vseros. mezhvedomstvennoy nauch.-tekhn. konf. = Information-control, telecommunication systems, means of destruction and their technical support : collection of scientific articles based on the materials of the IV All-Russian interdepartmental scientific-technical. conf.* Penza, 2022:123–127. (In Russ.)
13. Volchikhin V.I., Ivanov A.I., Funtikov V.A., Malygina E.A. Prospects for the use of artificial neural networks with multilevel quantizers in biometric-neural network authentication technology. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of higher educational institutions. Volga region. Technical sciences*. 2013;(4):88–99. (In Russ.)
14. Kurnikov D.S., Petrov S.A. The use of neural networks in economics. *Juvenis Scientia*. 2017;(6):10–12. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Иванович Иванов

доктор технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник,
Пензенский научно-исследовательский
электротехнический институт
(Россия, г. Пенза, ул. Советская, 9)
E-mail: ivan@pniei.penza.ru

Aleksandr I. Ivanov

Doctor of technical sciences, associate professor,
senior researcher,
Penza Research Electrotechnical Institute
(9 Sovetskaya street, Penza, Russia)

Алексей Петрович Иванов

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой технических средств
информационной безопасности,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ap_ivanov@pnzgu.ru

Константин Николаевич Савинов

старший преподаватель кафедры проводной
электросвязи и автоматизированных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: tsib@pnzgu.ru

Роман Викторович Еременко

старший преподаватель
кафедры радио и спутниковой связи,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: tsib@pnzgu.ru

Aleksey P. Ivanov

Candidate of technical sciences, associate professor,
head of the sub-department of technical means
of information security,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Konstantin N. Savinov

Senior lecturer of the sub-department of wired
telecommunications and automated systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Roman V. Eremenko

Senior lecturer of the sub-department of radio
and satellite communications,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 21.02.2022

Поступила после рецензирования/Revised 22.03.2022

Принята к публикации/Accepted 25.04.2022

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВЫСОКОПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ФАКТОРОВ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Н. О. Борщев

Астрокосмический центр Учреждения Российской академии наук
Физического института имени П. Н. Лебедева, Москва, Россия
moriarty93@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассмотрен метод определения теплопроводности высокопористого материала для условий функционирования при орбитальном полете. Данный метод основан на классическом подходе минимизации среднеквадратичного отклонения между теоретическим и экспериментальным температурным полем в зонах установки датчиков температур. *Материалы и методы.* Для этого сперва решается «прямая» задача теплообмена для пористого образца при орбитальных начально-граничных условиях при предварительном задании сплайнов, учитывающим зависимость теплопроводности от температуры. Процесс теплообмена внутри пор будет сопровождаться лучисто-кондуктивным теплопереносом. Далее решается задача минимизации целевой среднеквадратичной ошибки. Для этого сначала необходимо найти компоненты градиента целевого функционала шага спуска, так как данная задача оптимизации решается методом сопряженных направлений, позволяющим достигнуть требуемой сходимости за минимальное число итерационных приближений. *Результаты и выводы.* Результаты показали, что при данном уровне температур коэффициент теплопроводности будет варьироваться в пределах $0,26\text{--}0,28 \frac{\text{Вт}}{\text{мК}}$. Разработанный метод и результаты расчета могут быть использованы в вопросах проектирования теплозащитных покрытий.

Ключевые слова: высокопористая изоляция, обратная задача теплопроводности, метод сопряженных направлений, система обеспечения теплового режима, радиационно-кондуктивный теплообмен

Для цитирования: Борщев Н. О. Параметрическая идентификация теплопроводности высокопористых материалов в условиях воздействия факторов космического пространства // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 4. С. 98–109. doi:10.21685/2307-4205-2022-4-11

PARAMETRIC IDENTIFICATION OF THERMAL CONDUCTIVITY OF HIGHLY POROUS MATERIALS UNDER THE INFLUENCE OF SPACE FACTORS

N.O. Borshchev

Astro Space Center Institutions of the Russian Academy
of Sciences P.N. Lebedev Institute of Physics, Moscow, Russia
moriarty93@mail.ru

Abstract. *Background.* In this paper, a method for determining the thermal conductivity of a highly porous material for operating conditions during orbital flight is considered. This method is based on the classical approach of minimizing the standard deviation between the theoretical and experimental temperature field in the zones of installation of temperature sensors. *Materials and methods.* To do this, the "direct" heat transfer problem for a porous sample is first solved under orbital initial boundary conditions with preliminary spline construction taking into account the dependence of thermal conductivity on temperature. The heat exchange process inside the pores will be accompanied by radiant-conductive heat transfer. Next, the problem of minimizing the target root-mean-square error is solved. To do this, it is first necessary to find the components of the gradient of the target functional of the descent step, since this optimization problem is solved by the conjugate directions method, which allows achieving the required convergence in the minimum number of iterative approximations. *Results and conclusions.* The results showed that at this temperature level, the thermal conductivity coefficient will vary between $0,26\text{--}0,28 \text{ W/mK}$. The developed method and calculation results can be used in the design of heat-protective coatings.

Keywords: highly porous insulation, inverse thermal conductivity problem, conjugate directions method, thermal regime assurance system, radiation-conductive heat exchange

For citation: Borshchev N.O. Parametric identification of thermal conductivity of highly porous materials under the influence of space factors. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(4):98–109. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-4-11

Введение

При проектировании теплового режима космических аппаратов зачастую встает вопрос выбора теплоизоляционных материалов, удовлетворяющих заданному температурному режиму, как правило они должны быть низкотеплопроводными. Известно, что наилучшими теплоизоляционными свойствами обладают пористые материалы. Однако необходим адекватный метод определения его теплофизических свойств, поскольку внутри материала присутствуют все виды теплообмена и речь идет об эффективных характеристиках. Таким образом, определение теплопроводности теплоизоляционных высокопористых материалов является актуальной задачей на сегодняшний день.

Постановка задачи теплообмена

Первым шагом в восстановлении коэффициента теплопроводности является составление постановки «прямой» задачи теплообмена конструкции, моделирующей условия эксперимента.

Применительно к данной постановке задачи можно применить упрощенную одномерную постановку задачи теплопроводности при допущении о малом перераспределении теплового потока по поверхности прибора при его одномерном нагреве [1]:

$$(1 - \Pi) C_{\text{эф}}(T) \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_{\text{эф}}(T) \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right].$$

В работе [2] получена формула для расчета эффективной теплопроводности пористой системы методом обобщенной проводимости:

$$\lambda_{\text{эф}}(T) = \lambda_{\text{ск}}(T) \left(\frac{1}{\left(\frac{l_x}{h} \right)^2 + A} + V_2 \left(1 - \frac{h}{l_x} \right)^2 + \frac{2}{1 + \frac{h}{l_x} + \frac{l_x}{V_2 h}} \right),$$

здесь

$$A = \frac{1}{\frac{\lambda_{\text{к}}(T)}{\lambda_{\text{ск}}(T)} + \frac{\lambda_{\text{г.з.}}(T)}{4k_{\text{к}}k_{\text{м}}} \left(\frac{h}{L} \right)^2 10^3}.$$

Величина A отражает передачу тепла на стыке двух частиц через контакт между ними и газовый микрозазор. Таким образом, тепло от одной соприкасающейся поверхности к другой может передаваться самостоятельными четырьмя процессами:

- 1) теплопроводностью через контакт;
- 2) теплопроводностью через среду, заполняющую поры и пространство выступающими шероховатостями контактирующих поверхностей;
- 3) лучистым теплообменом между поверхностями;
- 4) конвекцией газа в порах.

При выводе данной формулы были сделаны следующие допущения:

- 1) линии теплового тока параллельны вертикальным образующим элементарной ячейки;
- 2) структура пористой системы монодисперсная (средний размер частиц одинаков);
- 3) форма зерен шарообразная.

Выражение для контактной теплопроводности можно представить в виде

$$\lambda_{\text{к}}(T) = \int_0^{l_x} \left(\frac{x dx}{\lambda_{\text{г.з.}}(T) + \lambda_{\text{ск}}(T)} \right)^{-1}.$$

Влияние излучения в порах может быть оценено из выражения [2]

$$\lambda_r(T) = 2\varepsilon(T)^2 \sigma T(x, \tau)^3 l_n.$$

Таким образом, выражение для коэффициента теплопроводности через среду, заполняющую поры и пространство выступающими шероховатостями контактирующих поверхностей [2]:

$$\lambda_{г.з.}(T) = 4n(x)\varepsilon(T)\sigma T(x, \tau)^3 l_n.$$

Граничные условия для проведения тепловакуумных испытаний, моделирующих орбитальный участок полета, выглядят следующим образом:

$$T(0) = T_0; \lambda_{эф}(T) \frac{\partial T(l_x, \tau)}{\partial x} = A_s(T) q_s + \varepsilon(T) q_i + q_{атм}(\tau) - \varepsilon(T) \sigma T(l_x, \tau)^4.$$

Представим коэффициент теплопроводности исследуемого образца в параметризованном виде, помноженным на соответствующие базисные функции, учитывающие их зависимость от температуры:

$$\lambda_{эф}(T) \approx \sum_{m=1}^M \lambda_p N_m(T),$$

где $N_m(T)$ – базисные функции, описывающие зависимость искомых теплофизических характеристик от температуры. В данной работе используются линейно-непрерывные базисные функции, имеющие следующий вид [3–8]:

$$N_m(T) = \begin{cases} 0, & T < T_{m-1}, \\ \frac{T - T_{m-1}}{T_m - T_{m-1}}, & T_{m-1} \leq T \leq T_m, \\ \frac{T_{m+1} - T}{T_{m+1} - T_m}, & T_{m-1} \leq T \leq T_m, \\ 0, & T > T_m, \quad m = \overline{1, M}. \end{cases}$$

Рассмотрим восстановление исследуемой характеристики на основе среднеквадратичного функционала невязки между теоретическим и экспериментальным полем температур [7, 8]:

$$S(\lambda_p) = \frac{1}{2} \int_0^{\tau_{\max}} \sum_{i=1}^M [T(\lambda_p) - \tilde{T}(\bar{x}, \bar{\tau})]^2 d\tau.$$

В работе используется метод безусловной минимизации функционала $S(\lambda_p)$ с помощью метода сопряженных градиентов как наиболее точного метода первого порядка точности, позволяющего достичь требуемой сходимости за минимальное число итераций.

Последовательный алгоритм метода сопряженных градиентов можно представить в следующем виде на примере параметризованного коэффициента теплопроводности [9–13]:

$$\lambda^{n+1} = \lambda^n + \Delta \lambda^{n+1},$$

где

$$\Delta \lambda^{n+1} = -\beta_k p^{(n)}.$$

Направление спуска определяется из

$$\vec{p}^n = \text{grad} S(\lambda^n) + \beta_n \vec{p}^{n-1}; \quad \beta_0 = 0, \quad p^{(0)} = \text{grad} S(\lambda^{(0)}); \quad \beta_n = \frac{|\text{grad} S(\lambda^{(n)})|^2}{|\text{grad} S(\lambda^{(n-1)})|^2}.$$

Критерием останова итерационного процесса является выражение

$$\left| \text{grad} S(\lambda^{(0)}) \right| = \sqrt{\left\{ \sum_{p=1}^3 \left[\frac{\partial S(\lambda^{(n)})}{\partial \lambda_p} \right]^2 \right\}} \leq \delta_{\text{sum}},$$

где δ_{sum} – погрешность входных данных, вычисленная в той же метрике, что и целевой функционал:

$$\delta_{\text{sum}} = \delta_a + \delta_f + \delta_{\text{окр}},$$

где δ_f – погрешность входных температур, определяемая следующим выражением:

$$\delta_f = \int_0^{\tau_{\max}} \sum_{i=1}^M \delta_L(\tau) d\tau.$$

Для определения компоненты градиента целевого функционала воспользуемся методом неопределенных множителей Лагранжа. Для этого запишем обобщенный функционал Лагранжа с ограничениями в виде зашумленного уравнения теплопроводности и его граничных условий

$$\begin{aligned} S\left(\lambda_p, C_p, \frac{\varepsilon}{A_s p}\right) = & \frac{1}{2} \int_0^{\tau_{\max}} \sum_{i=1}^M \left[T(\lambda_p) - \tilde{T}(\bar{x}, \tau) \right]^2 d\tau + \int_0^{\tau_{\max}} \int_0^{l_x} \psi(x, \tau) [C_{\text{эф}}(T) \rho \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} - \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_{\text{эф}}(T) \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right]] dx d\tau + \\ & + \int_0^{\tau_{\max}} \xi(l_x, \tau) \left[\lambda_{\text{эф}}(T) \frac{\partial T(l_x, \tau)}{\partial x} - A_s q_s + \varepsilon(T) q_i + q_{\text{атм}} + \varepsilon(T) \sigma T(l_x, \tau)^4 \right] d\tau + \int_0^{\tau_{\max}} \xi(0, \tau) [T(0, \tau) - T_0] d\tau. \end{aligned}$$

Для нахождения компонент сообщим элементарные приращения искомым рассматриваемым теплофизическим характеристикам. Получим следующие зависимости:

$$\lambda_{\text{ск}}(T + \Delta T) \approx (1 + \Delta) \sum_{m=1}^M \lambda_p N_m(T + \Delta T) = (1 + \Delta) \sum_{m=1}^M \lambda_p \left[N_m(T) + \frac{\partial N_m(T)}{\partial T} \Delta T \right].$$

Таким образом, при подстановке данных компонент получим возмущенное уравнение теплопроводности:

$$\begin{aligned} \left[C_{\text{эф}}(T) + \frac{\partial C_{\text{эф}}(T)}{\partial T} \Delta T \right] \frac{\partial T(x, \tau) + \Delta T(x, \tau)}{\partial \tau} &= T(0, \tau) = T_0(0, \tau) + \Delta T(0, \tau); \\ \left[\lambda_{\text{эф}}(T) + \frac{\partial \lambda_{\text{эф}}(T)}{\partial T} \Delta T \right] \frac{\partial T(l_x, \tau) + \Delta T(l_x, \tau)}{\partial x} &= \\ = \sum_{m=1}^M \frac{A_s}{\varepsilon} + \frac{\partial \frac{A_s}{\varepsilon}}{\partial T} \Delta T q_s + \frac{q_i - \left(\sigma T(l_x, \tau)^4 + 4\sigma T(l_x, \tau)^3 \Delta T(l_x, \tau) \right)}{(1 + \Delta)}. \end{aligned}$$

Выражение для производной эффективной теплопроводности от температуры примет следующий вид:

$$\frac{\partial \lambda_{\text{эф}}(T)}{\partial T} = \frac{\partial \lambda_{\text{ск}}(T)}{\partial T} \left(\frac{1}{\left(\frac{l_x}{h} \right)^2 + A} + V_2 \left(1 - \frac{h}{l_x} \right)^2 + \frac{2}{1 + \frac{h}{l_x} + \frac{l_x}{V_2 h}} \right) - \frac{\lambda_{\text{ск}}(T) \frac{\partial A}{\partial T}}{\left(\left(\frac{l_x}{h} \right)^2 + A \right)^2},$$

здесь

$$\frac{\partial A}{\partial T} = \frac{-\lambda_{\text{ск}}(T) \frac{\partial \lambda_{\text{к}}(T)}{\partial T} + \lambda_{\text{к}}(T) \frac{\partial \lambda_{\text{ск}}(T)}{\partial T} - \frac{\partial \lambda_{\text{г.з.}}(T)}{\partial T} \left(\frac{h}{L} \right)^2 10^3}{\left(\frac{\lambda_{\text{к}}(T)}{\lambda_{\text{ск}}(T)} + \frac{\lambda_{\text{г.з.}}(T)}{4k_{\text{к}}k_{\text{м}}} \left(\frac{h}{L} \right)^2 10^3 \right)^2}.$$

Выражение для производной по контактной теплопроводности имеет вид

$$\frac{\partial \lambda_{\text{к}}(T)}{\partial T} = - \int_0^{l_x} \left(\frac{\frac{\partial \lambda_{\text{г.з.}}(T)}{\partial T} + \frac{\partial \lambda_{\text{ск}}(T)}{\partial T}}{(\lambda_{\text{г.з.}}(T) + \lambda_{\text{ск}}(T))^2} x dx \right)^{-1}.$$

Выражение для производной коэффициента теплопроводности через среду, заполняющую поры и пространство выступающими шероховатостями контактирующих поверхностей от температуры, примет вид

$$\lambda_{\text{г.з.}}(T) = n(x) \sigma l_n \left(12n(x) \varepsilon(T) T(x, \tau)^2 + 3 \frac{\partial \varepsilon(T)}{\partial T} T(x, \tau)^3 \right).$$

Для получения выражения относительно вариации температуры вычтем из возмущенного уравнения теплопроводности невозмущенное [14–17]. Получим

$$\left[C_{\text{эф}}(T) \frac{\Delta T(x, \tau)}{\partial \tau} + \frac{\partial C_{\text{эф}}(T)}{\partial T} \frac{T(x, \tau)}{\partial \tau} dT \right] = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left[\lambda_{\text{эф}}(T) \frac{\partial \Delta T(x, \tau)}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_{\text{эф}}(T)}{\partial T} \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} dT \right] \frac{\partial T(x, \tau) + \Delta T(x, \tau)}{\partial x} \right];$$

$$T(0) = \Delta T; \lambda_{\text{эф}}(T) \frac{\partial \Delta T(l_x, \tau)}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_{\text{эф}}(T)}{\partial T} \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} dT = \sum_{m=1}^M q_s \frac{\partial \frac{A_s}{\varepsilon}(T)}{\partial T} dT + \frac{q_i - 4\sigma T^3 \Delta T(l_x, \tau)}{(1 + \Delta)}.$$

Теперь можно записать вариацию обобщенного функционала Лагранжа:

$$\begin{aligned} \delta S \left(\lambda_p, C_p, \frac{\varepsilon}{A_{\text{ср}}} \right) &= \int_0^{\tau_{\text{max}}} \int_0^{l_x} \left[T(\lambda_p) - \tilde{T}(\bar{x}, \bar{\tau}) \right] \Delta T + \int_0^{\tau_{\text{max}}} \psi(x, \tau) \left[C_{\text{эф}}(T) \frac{\partial \Delta T(x, \tau)}{\partial \tau} + \right. \\ &+ \left. \frac{\partial C_{\text{эф}}(T)}{\partial T} \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} dT \right] - \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_{\text{эф}}(T) \frac{\partial \Delta T(x, \tau)}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_{\text{эф}}(T)}{\partial T} \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} dT \right] dx d\tau + \\ &+ \int_0^{\tau_{\text{max}}} \xi(l_x, \tau) \left[q_s \frac{\partial \frac{A_s}{\varepsilon}(T)}{\partial T} dT - \frac{\Delta q_i}{(1 + \Delta)} d\tau + \xi(0, \tau) \int_0^{\tau_{\text{max}}} \Delta T(0, \tau) d\tau \right]. \end{aligned}$$

Избавимся от знака повторного дифференцирования для выражения

$$\begin{aligned} \int_0^{l_x} \psi(x, \tau) \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_{\text{эф}}(T) \frac{\partial \Delta T(x, \tau)}{\partial x} \right] dx &= \psi(x, \tau) \lambda_{\text{эф}}(T) \frac{\partial \Delta T(x, \tau)}{\partial x} \Big|_0^{l_x} - \int_0^{l_x} \frac{\partial \psi(x, \tau)}{\partial x} \times \\ &\times \lambda_{\text{эф}}(T) \frac{\partial \Delta T(x, \tau)}{\partial x} dx = \psi(x, \tau) \lambda_{\text{эф}}(T) \frac{\partial \Delta T(x, \tau)}{\partial x} \Big|_0^{l_x} - \frac{\partial \psi(x, \tau)}{\partial x} \lambda_{\text{эф}}(T) \Delta T(x, \tau) \Big|_0^{l_x} + \\ &+ \int_0^{l_x} \left[\frac{\partial^2 \psi(x, \tau)}{\partial x^2} \lambda_{\text{эф}}(T) \Delta T(x, \tau) + \frac{\partial \psi(x, \tau)}{\partial x} \frac{\partial \lambda_{\text{эф}}(T)}{\partial T} \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \Delta T(x, \tau) \right] dx. \end{aligned}$$

Запишем теперь новый вид функционала с учетом сделанного преобразования:

$$\begin{aligned} \delta S(\lambda_p) = & \int_0^{\tau_{\max}} \sum_{i=1}^M T(\lambda_p) - \tilde{T}(\bar{x}, \bar{\tau})] \Delta T + \int_0^{l_x} \int_0^{\tau_{\max}} \psi(x, \tau) \rho [C_{\text{эф}}(T) \frac{\partial \Delta T(x, \tau)}{\partial \tau} + \\ & + \frac{\partial C_{\text{эф}}(T)}{\partial T} \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} \Delta T] - \left[\frac{\partial^2 \psi(x, \tau)}{\partial x^2} \lambda_{\text{эф}}(T) \Delta T(x, \tau) + \frac{\partial \psi(x, \tau)}{\partial x} \frac{\partial \lambda_{\text{эф}}(T)}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x} \Delta T(x, \tau) \right] dx d\tau - \\ & - \int_0^{\tau_{\max}} \left[\psi(x, \tau) \lambda_{\text{эф}}(T) \frac{\partial \Delta T(x, \tau)}{\partial x} \Big|_0^{l_x} - \frac{\partial \psi(x, \tau)}{\partial x} \lambda_{\text{эф}}(T) \Delta T(x, \tau) \Big|_0^{l_x} \right] d\tau + \\ & + \sum_{m=1}^M \lambda_p \left[N_m(T) \frac{\Delta T(l_x, \tau)}{\partial x} + \frac{\partial N_m(T)}{\partial T} \frac{T(l_x, \tau)}{\partial x} \Delta T(l_x, \tau) \right] + \\ & + \int_0^{\tau_{\max}} \xi(l_x, \tau) \left[\sum_{m=1}^M \lambda_p \left[N_m(T) \frac{\Delta T(l_x, \tau)}{\partial x} + \frac{\partial N_m(T)}{\partial T} \frac{T(l_x, \tau)}{\partial x} \Delta T(l_x, \tau) \right] + \sum_{m=1}^M \Delta \lambda_p N_m(T) \frac{T(l_x, \tau)}{\partial x} + \right. \\ & \left. + q_s \frac{\partial \frac{A_s}{\varepsilon}(T)}{\partial T} dT - \frac{\Delta q_i}{(1+\Delta)} \right] d\tau + \xi(0, \tau) \int_0^{\tau_{\max}} \Delta T(0, \tau) d\tau. \end{aligned}$$

Для нахождения трех неопределенных множителей Лагранжа перегруппируем члены, стоящие перед вариацией температуры и производной от вариации по температуре, и приравняем их к нулю. Получим

$$\begin{aligned} \Delta T(x, \tau) : & \psi(x, \tau) \rho \frac{\partial C_{\text{эф}}(T)}{\partial T} \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} + \frac{\partial^2 \psi(x, \tau)}{\partial x^2} \lambda_{\text{эф}}(T) + \frac{\partial \psi(x, \tau)}{\partial x} \frac{\partial \lambda_{\text{эф}}(T)}{\partial T} \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} = 0; \\ \Delta T(l_x, \tau) : & - \frac{\partial \psi(l_x, \tau)}{\partial x} \lambda_{\text{эф}}(T) + \xi(l_x, \tau) q_s \frac{\partial \frac{A_s}{\varepsilon}(T)}{\partial T} = 0; \\ \Delta T(0, \tau) : & \xi(0, \tau) + \frac{\partial \psi(0, \tau)}{\partial x} \lambda_{\text{эф}}(T) = 0; \\ \frac{\partial \Delta T(l_x, \tau)}{\partial x} : & \psi(l_x, \tau) \lambda_{\text{эф}}(T) = 0; \\ \frac{\partial \Delta T(0, \tau)}{\partial x} : & \psi(x, \tau) \lambda_{\text{эф}}(T) = 0. \end{aligned}$$

Решая эту систему, находим неопределенные множители Лагранжа.

Теперь перепишем наш функционал в другом виде:

$$\begin{aligned} \delta S \left(\lambda_p, C_p, \frac{\varepsilon}{A_{s_p}} \right) = & \int_0^{\tau_{\max}} \int_0^{l_x} \frac{\partial S}{\partial \lambda_p} \Delta \lambda_p + \int_0^{l_x} \int_0^{\tau_{\max}} \psi(x, \tau) \left\{ \sum_{m=1}^M N_m(T) \Delta C_p \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} + \right. \\ & + \sum_{m=1}^M \frac{\partial N_m(T)}{\partial T} \lambda_p \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \Delta T(x, \tau) + \sum_{m=1}^M N_m(T) \lambda_p \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} + \sum_{m=1}^M N_m(T) \Delta \lambda_p \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} \left. \right\} dx d\tau + \\ & + \int_0^{\tau_{\max}} \left[\psi(x, \tau) \lambda_{\text{эф}}(T) \frac{\partial \Delta T(x, \tau)}{\partial x} \Big|_0^{l_x} - \frac{\partial \psi(x, \tau)}{\partial x} \lambda_{\text{эф}}(T) \Delta T(x, \tau) \Big|_0^{l_x} \right] d\tau + \sum_{m=1}^M \Delta \lambda_p N_m(T) \frac{T(l_x, \tau)}{\partial x} + \\ & + \int_0^{\tau_{\max}} \xi(l_x, \tau) \left[q_s \left[\Delta \frac{A_s}{\varepsilon} \sum_{m=1}^M N_m(T) + \frac{A_s}{\varepsilon} \frac{\partial N_m(T)}{\partial T} \Delta T(x, \tau) \right] - \Delta q_i \right] d\tau + \xi(0, \tau) \int_0^{\tau_{\max}} \Delta T(0, \tau) d\tau. \end{aligned}$$

Группируя члены относительно вариаций параметризованного коэффициента теплопроводности материала, получим аналитическое выражение компоненты градиента целевого функционала:

$$\frac{\partial S}{\partial \lambda_p} = \int_0^{\tau_{\max}} \int_0^{l_x} \sum_{m=1}^M \psi(x, \tau) N_m(T) \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} dx d\tau + \int_0^{\tau_{\max}} \sum_{m=1}^M \Delta \lambda_p N_m(T) \frac{T(l_x, \tau)}{\partial x} d\tau.$$

В качестве регуляризующего параметра выбирается номер итерации, т.е. на $n + 1$ итерации целевой функционал должен быть минимален:

$$S(\lambda_p + \Delta\lambda_p) = S(\lambda_p) - \alpha_{\text{сп}} \left[\frac{\partial S(\lambda_p)}{\partial \lambda_p} \right]^2; \quad S(\lambda_p + \Delta\lambda_p) = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \int_0^{\tau_{\text{max}}} \left[T(\lambda_p) - \alpha_{\text{сп}} \frac{\partial T(\lambda_p)}{\partial \lambda_p} \text{grad} S \right]^2 - \tilde{T}(\bar{x}, \bar{\tau})^2 d\tau,$$

куда согласно принципу глобального минимума необходимо и достаточно приравнять полученное выражение к нулю и выразить шаг спуска. Получим

$$\alpha_{\text{сп}} = \sum_{m=1}^M \int_0^{\tau_{\text{max}}} \frac{1}{\frac{\partial T(\lambda_p)}{\partial \lambda_p}} d\tau.$$

Таким образом, можно сформулировать принцип работы данного алгоритма идентификации теплофизических параметров. Суть его заключается в следующем:

1. Решается «прямая» задача прогрева конструкции при реализации граничных условий, характерных для условий тепловакуумных испытаний изделия.
2. Далее после результатов тепловакуумных испытаний составляется среднерегуляризуемая интегральная ошибка между теоретическим и экспериментальным полем температур в зонах установки датчиков температур.
3. Решается задача оптимизации данного функционала при предварительном вычислении компоненты градиента целевого среднеквадратичного функционала невязки.
4. Ищется шаг спуска в методе «сопряженных» направлений, обеспечивающий минимум целевого функционала на следующей итерации.
5. Получаем значения целевых функций на следующей итерации. При выполнении условия останова полученные значения каждого из блоков домножаются на свои характерные базисные функции, считается, что зависимости получены, иначе процесс 1–5 выполняется повторно.

Реализация решения данного алгоритма проиллюстрирована на блок-схеме на рис. 1.

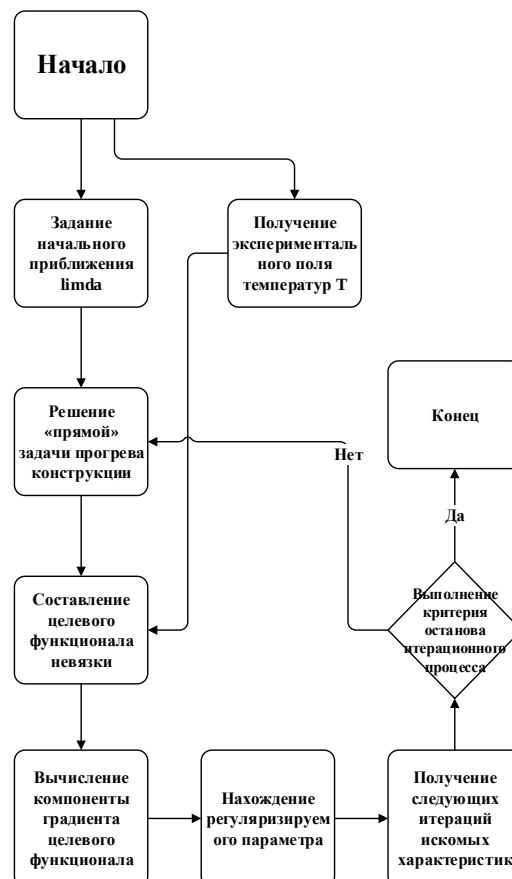


Рис. 1. Блок-схема алгоритма идентификации искомых теплофизических параметров

В численном эксперименте рассматривается образец в виде параллелепипеда, по толщине которого установлено шесть термодатчиков. Все его поверхности теплоизолированы, кроме верхнего основания, на которое падает лучистый интегральный тепловой поток. Таким образом, реализуется одномерный прогрев по толщине материала, моделирующий заданную постановку задачи. В качестве источника теплового потока используется медный линейчатый нагреватель. Результаты определения падающего теплового потока и экспериментального температурного поля представлены на рис. 2, 3.

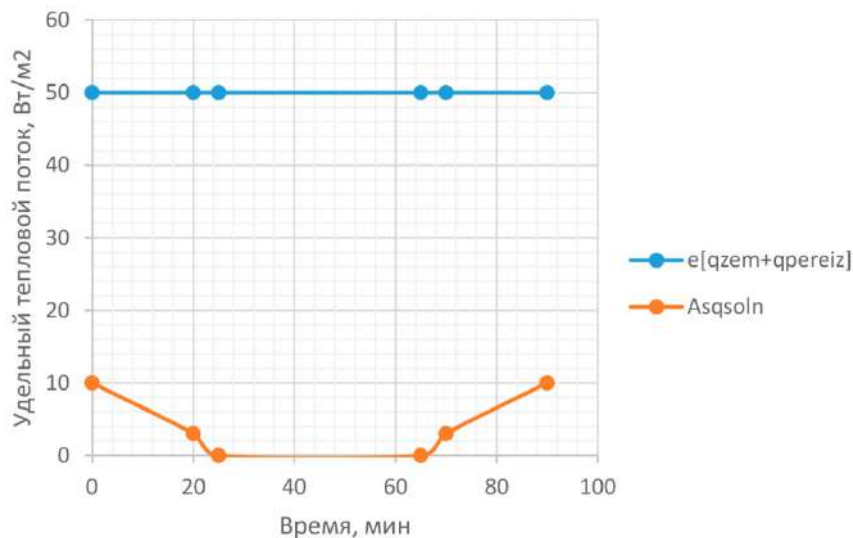


Рис. 2. Удельные падающие тепловые потоки на нагреваемую поверхность образца

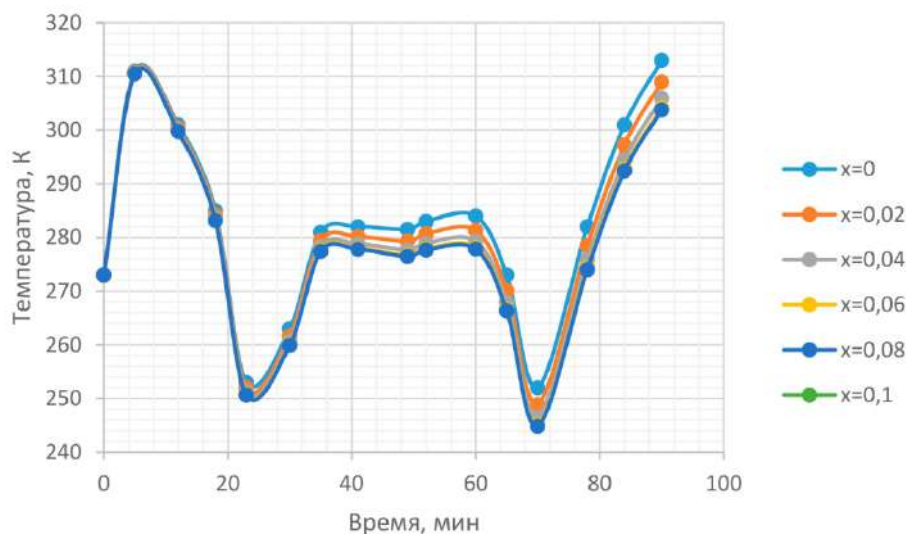


Рис. 3. Температурное поле в местах установки датчиков температур

При итерационном уточнении параметризированной величины коэффициента теплопроводности материала будет также по итерациям восстанавливаться температурное поле, стремясь к своему экспериментальному аналогу. На рис. 4 приведена зависимость температур в точке замера температур для двух крайних моментов времени в зависимости от номера итерации.

Как видно из рисунка, для итерационной сходимости к своему итерационному постоянному значению необходимы четыре итерации, что говорит об эффективности предложенного метода.

Нагляднее всего процесс сходимости показан по минимизации среднеквадратичного отклонения теоретического температурного поля от экспериментального в местах замера температур. Данный процесс показан на рис. 5. При решении данной обратной задачи теплопроводности в силу симметрии теплового нагружения от времени было решено выбрать три временных блока, причем третий дублирует первый.

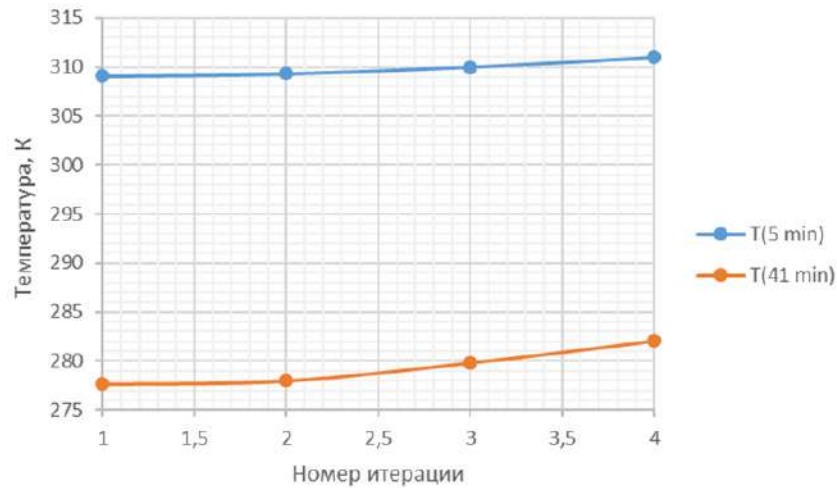


Рис. 4. Итерационное изменение температурного поля для двух моментов времени

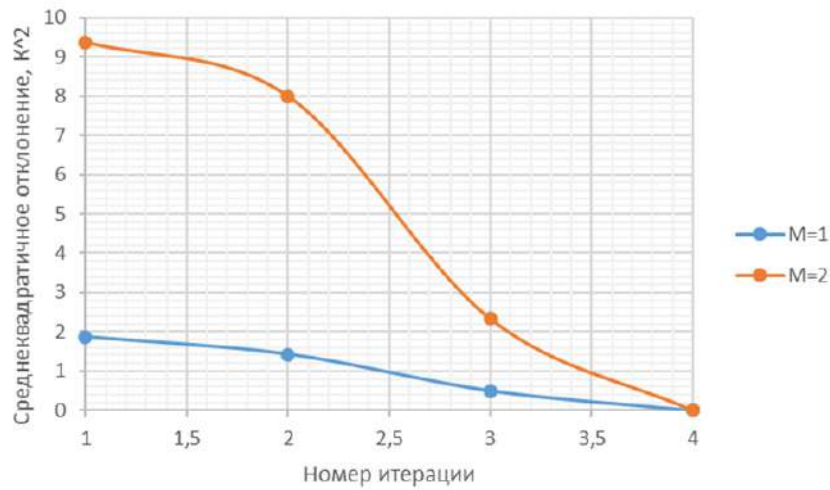


Рис. 5. Итерационное изменение среднеквадратичной ошибки между теоретическим и экспериментальным температурным полем в местах установки датчиков температур

Итерационные изменения коэффициента теплопроводности материала представлены для каждого из двух временных блоков на рис. 6, а изменение коэффициента теплопроводности от температуры – на рис. 7.

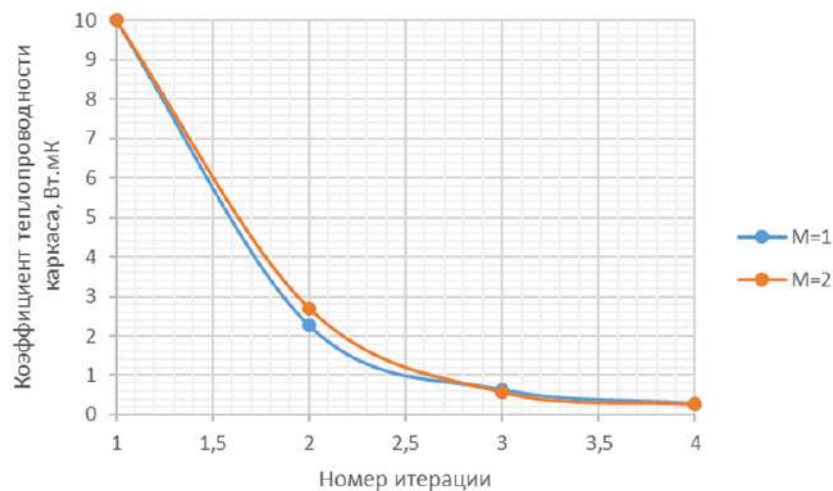


Рис. 6. Итерационное изменение коэффициента теплопроводности высокопористого материала от температуры

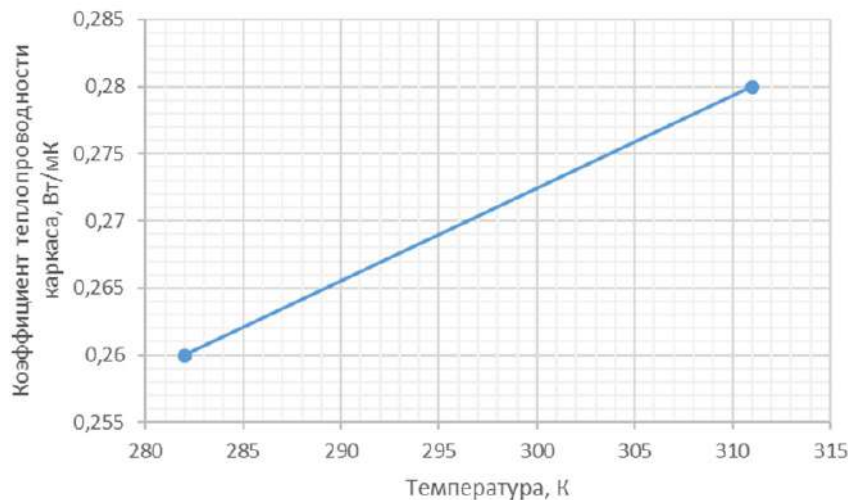


Рис. 7. Изменение коэффициента теплопроводности высокопористого материала от температуры

Заключение

1. Разработан метод параметрической идентификации коэффициента теплопроводности высокопористых материалов как функций от температуры методом итерационной регуляризации в приближении однонаправленного прогрева для орбитального участка полета.

2. Продемонстрированы результаты данного алгоритма на примере определения коэффициента теплопроводности образца высокопористого теплозащитного покрытия.

3. Результаты показали, что при данном уровне температур коэффициент теплопроводности будет варьироваться в пределах $0,26\text{--}0,28 \frac{\text{Вт}}{\text{мК}}$.

4. Данный алгоритм может быть использован и для более широкого температурного диапазона для определения коэффициента теплопроводности высокопористых материалов в изотропном приближении.

Список литературы

1. Залетаев В. М., Капинос Ю. В., Сургучев О. В. Расчет теплообмена космического аппарата. М. : Машиностроение, 1979.
2. Васильев Л. Л., Танаева С. А. Теплофизические свойства пористых материалов. Минск, 1971. С. 17–20.
3. Басистов Ю. А., Яновский Ю. Г. Некорректные задачи в механике (реологии) вязкоупругих сред и их регуляризация // Механика композиционных материалов и конструкций. 2010. Т. 16, № 1. С. 117–143.
4. Бакушинский А. Б., Кокурин М. Ю., Кокурин М. М. Прямые и обратные теоремы для итерационных методов решения нерегулярных операторных уравнений и разностных методов решения некорректных задач Коши // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2020. Т. 60, № 6. С. 939–962.
5. Фанов В. В., Мартынов М. Б., Карчаев Х. Ж. Летательные аппараты НПО им. С. А. Лавочкина (к 80-летию предприятия) // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. 2017. № 2/36. С. 5–16.
6. Блох А. Г., Журавлев Ю. А., Рыжков Л. Н. Теплообмен излучением. М. : Энергоатомиздат, 1991.
7. Тулин Д. В., Финченко В. С. Теоретико-экспериментальные методы проектирования систем обеспечения теплового режима космических аппаратов. М. : МАИ-ПРИНТ, 2014. Т. 3. С. 1320–1437.
8. Цаплин С. В., Болычев С. А., Романов А. Е. Теплообмен в космосе. Самара : Самарский университет, 2013. 53 с.
9. Алифанов О. М., Артюхин Е. А., Румянцев С. В. Экстремальные методы решения некорректных задач. М. : Наука, 1988. 288 с.
10. Алифанов О. М. Обратные задачи теплообмена. М. : Машиностроение, 1988. 280 с.
11. Формалев В. Ф. Теплоперенос в анизотропных твердых телах. М. : Физматлит, 2015. 238 с.
12. Васин В. В. Модифицированный метод наискорейшего спуска для нелинейных регулярных операторных уравнений // Доклады Академии наук. 2015. Т. 462, № 3. С. 264.
13. Голичев И. И. Модифицированный градиентный метод наискорейшего спуска решения нелинейной задачи для нестационарных уравнений Навье-Стокса // Уфимский математический журнал. 2013. Т. 5, № 4. С. 60–76.
14. Формалев В. Ф., Ревизников Д. Л. Численные методы. М. : Физматлит, 2004. 400 с.

15. Формалев В. Ф. Анализ двумерных температурных полей в анизотропных телах с учетом подвижных границ и большой степени анизотропии // Теплофизика высоких температур. 1990. Т. 28, № 4. С. 715–721.
16. Формалев В. Ф. Идентификация двумерных тепловых потоков в анизотропных телах сложной формы // Инженерно-физический журнал. 1989. Т. 56, № 3. С. 382–386.
17. Формалев В. Ф., Колесник С. А. Аналитическое решение второй начально-краевой задачи анизотропной теплопроводности // Математическое моделирование. 2003. Т. 15, № 6. С. 107–110.

References

1. Zaletaev V.M., Kapinos Yu.V., Surguchev O.V. *Raschet teploobmena kosmicheskogo apparata = Calculation of the heat exchange of the spacecraft*. Moscow: Mashinostroenie, 1979. (In Russ.)
2. Vasil'ev L.L., Tanaeva S.A. *Teplofizicheskie svoystva poristyykh materialov = Thermophysical properties of porous materials*. Minsk, 1971:17–20. (In Russ.)
3. Basistov Yu.A., Yanovskiy Yu.G. Incorrect problems in mechanics (rheology) of viscoelastic media and their regularization. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksiy = Mechanics of composite materials and structures*. 2010;16(1):117–143. (In Russ.)
4. Bakushinskiy A.B., Kokurin M.Yu., Kokurin M.M. Direct and inverse theorems for iterative methods of solving irregular operator equations and difference methods for solving ill-posed Cauchy problems. *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki = Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2020;60(6):939–962. (In Russ.)
5. Fanov V.V., Martynov M.B., Karchaev Kh.Zh. Aircraft of S.A. Lavochkin NGO (to the 80th anniversary of the enterprise. *Vestnik NPO im. S. A. Lavochkina = Bulletin of S.A. Lavochkin NGO*. 2017;(2/36):5–16. (In Russ.)
6. Blokh A.G., Zhuravlev Yu.A., Ryzhkov L.N. *Teploobmen izlucheniem = Heat exchange by radiation*. Moscow: Energoatomizdat, 1991. (In Russ.)
7. Tulin D.V., Finchenko V.S. *Teoretiko-eksperimental'nye metody proektirovaniya sistem obespecheniya teplovogo rezhima kosmicheskikh apparatov = Theoretical and experimental methods of designing systems for ensuring the thermal regime of spacecraft*. Moscow: MAI-PRINT, 2014;3:1320–1437. (In Russ.)
8. Tsaplin S.V., Bolychev S.A., Romanov A.E. *Teploobmen v kosmose = Heat transfer in space*. Samara: SamarSKIY universitet, 2013:53. (In Russ.)
9. Alifanov O.M., Artyukhin E.A., Rumyantsev S.V. *Ekstremal'nye metody resheniya nekorrektnykh zadach = Extreme methods for solving ill-posed problems*. Moscow: Nauka, 1988:288. (In Russ.)
10. Alifanov O.M. *Obratnye zadachi teploobmena = Inverse problems of heat transfer*. Moscow: Mashinostroenie, 1988:280. (In Russ.)
11. Formalev V.F. *Teploperenos v anizotropnykh tverdykh telakh = Heat transfer in anisotropic solids*. Moscow: Fizmatlit, 2015:238. (In Russ.)
12. Vasin V.V. Modified steepest descent method for nonlinear regular operator equations. *Doklady Akademii nauk = Reports of the Academy of Sciences*. 2015; 462(3):264. (In Russ.)
13. Golichev I.I. Modified gradient method of the steepest descent of the solution of the non-linearized problem for unsteady Navier-Stokes equations. *Ufimskiy matematicheskiy zhurnal = Ufa Mathematical Journal*. 2013;5(4):60–76. (In Russ.)
14. Formalev V.F., Reviznikov D.L. *Chislennyye metody = Numerical methods*. Moscow: Fizmatlit, 2004:400. (In Russ.)
15. Formalev V.F. Analysis of two-dimensional temperature fields in anisotropic bodies taking into account mobile boundaries and a large degree of anisotropy. *Teplofizika vysokikh temperature = Thermophysics of high temperatures*. 1990;28(4):715–721. (In Russ.)
16. Formalev V.F. Identification of two-dimensional heat flows in anisotropic bodies of complex shape. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal = Engineering and Physics journal*. 1989;56(3):382–386. (In Russ.)
17. Formalev V.F., Kolesnik S.A. Analytical solution of the second initial boundary value problem of anisotropic thermal conductivity. *Matematicheskoe modelirovaniye = Mathematical modeling*. 2003;15(6):107–110. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Никита Олегович Борщев

кандидат технических наук, ведущий инженер,
Астрокосмический центр
Учреждения Российской академии наук
Физического института имени П. Н. Лебедева
(Россия, г. Москва, Ленинский пр-т, 53)
E-mail: moriarty93@mail.ru

Nikita O. Borshchev

Candidate of technical sciences, leading engineer,
Astro Space Center Institutions of the Russian Academy
of Sciences P.N. Lebedev Institute of Physics
(53 Leninsky avenue, Moscow, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 15.03.2022

Поступила после рецензирования/Revised 18.04.2022

Принята к публикации/Accepted 16.05.2022

РОЛЬ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ЦЕН В ВЛИЯНИИ НА НАУЧНУЮ И НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКУЮ ПРОДУКЦИЮ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ В ОБЕСПЕЧЕНИИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ГОСУДАРСТВА

А. В. Бабкин¹, А. Г. Подольский², О. В. Прокофьев³, А. Е. Савочкин⁴

¹ Управление военных представительств Министерства обороны Российской Федерации, Москва, Россия,

² 46 Центральный научно-исследовательский институт

Министерства обороны Российской Федерации, Москва, Россия,

^{3,4} Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия

¹ babkin.3@mail.ru, ² podolskijag@mail.ru, ³ prokof_ow@mail.ru, ⁴ aebrat@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В настоящее время эффективное расходование средств на разработку оборонной продукции и выполнение государственного оборонного заказа приобретает особую актуальность. Целью работы является обоснование способа совершенствования системы ценообразования на продукцию оборонно-промышленного комплекса за счет разработки и применения информационно-аналитической системы мониторинга цен в сфере государственного оборонного заказа. *Материалы и методы.* Проведен анализ методологии формирования цены и исследованы данные о причинах несовершенства системы ценообразования. Предложены основы системного подхода к решению задачи автоматизации аналитики ценообразования. *Результаты.* Сформулированы требования к информационно-аналитической системе для мониторинга цен на продукцию военного назначения, изложены основные концептуальные положения ее создания. Требования могут быть положены в основу технического задания на разработку системы. Приведен перечень подсистем, которые должны входить в информационно-аналитическую систему мониторинга цен и дана их характеристика. *Выводы.* Дана предварительная качественная оценка экономического эффекта от применения информационно-аналитической системы мониторинга цен вооружений, военной и специальной техники. Выявлены направления совершенствования методологического подхода к определению прогнозной цены на продукцию.

Ключевые слова: оборонно-промышленный комплекс, государственный оборонный заказ, продукция военного назначения, затраты, мониторинг цен, информационно-аналитическая система, эффективность

Финансирование: статья подготовлена в рамках проекта РФФИ № 19-010-00027.

Для цитирования: Бабкин А. В., Подольский А. Г., Прокофьев О. В., Савочкин А. Е. Роль информационно-аналитической системы мониторинга цен в влиянии на научную и научно-техническую продукцию военного назначения в обеспечении экономической безопасности государства // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 4. С. 110–119. doi:10.21685/2307-4205-2022-4-12

THE ROLE OF THE INFORMATION AND ANALYTICAL PRICE MONITORING SYSTEM IN INFLUENCING THE SCIENTIFIC AND SCIENTIFIC-TECHNICAL PRODUCTS FOR MILITARY PURPOSES TO ENSURE STATE ECONOMIC SECURITY

A.V. Babkin¹, A.G. Podolsky², O.V. Prokofiev³, A.E. Savochkin⁴

¹ Department of Military Representations of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow, Russia,

² 46 Central Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow, Russia,

^{3,4} Penza State Technological University, Penza, Russia

¹ babkin.3@mail.ru, ² podolskijag@mail.ru, ³ prokof_ow@mail.ru, ⁴ aebrat@mail.ru

Abstract. *Background.* At present, the effective spending of funds for the development of defense products and the implementation of the state defense order is of particular relevance. The purpose of the work is to substantiate the way to improve the pricing system for products of the military-industrial complex through the development and application of an information and analytical system for monitoring prices in the field of the state defense order. *Materials and methods.* An analysis of the pricing methodology was carried out and data on the reasons for the imperfection of the pricing system were investigated, and potentially possible reserves for price reduction were identified. *Results.* The requirements for an information-analytical system for monitoring prices for military products are formulated, and the main conceptual provisions for its creation are outlined. The requirements can be used as the basis for the terms of ref-

erence for the development of the system. A list of subsystems that should be included in the information-analytical price monitoring system is given and their characteristics are given. *Conclusions.* A preliminary qualitative assessment of the economic effect from the use of an information-analytical system for monitoring the prices of weapons, military and special equipment is given. Directions for improving the methodological approach to determining the forecast price for products are identified.

Keywords: military-industrial complex, state defense order, military products, costs, price monitoring, information and analytical system, efficiency

Acknowledgments: the article was prepared within the framework of the RFBR project No. 19-010-00027.

For citation: Babkin A.V., Podolsky A.G., Prokofiev O.V., Savochkin A.E. The role of the information and analytical price monitoring system in influencing the scientific and scientific-technical products for military purposes to ensure state economic security. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(4):110–119. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-4-12

Введение

По статистике Стокгольмского международного института исследований мира (*Stockholm international peace research institute, SIPRI*), в 2021 г. общие мировые военные расходы увеличились на 0,7 % в реальном выражении и достигли 2113 млрд долл. США [1]. В пятерку стран с крупнейшими тратами в 2021 г. вошли США, Китай, Индия, Великобритания и Россия, на долю которых вместе приходилось 62 % мировых расходов. Сравнение затрат в абсолютном выражении по состоянию на 2021 г. представлено в виде инфографики на рис. 1, а динамика расходования средств отражена на рис. 2. Увеличение американских расходов на НИОКР за десятилетие 2012–2021 гг. свидетельствует о том, что Соединенные Штаты больше внимания уделяют технологиям следующего поколения, и Правительство США выступает за поддержание технологического превосходства вооруженных сил над стратегическими конкурентами. Китай, занимающий второе место в мире по расходам, в 2021 г. выделил на свои вооруженные силы около 293 млрд долл., что на 4,7 % больше, чем в 2020 г. Военные расходы Китая растут 27 лет подряд. Значительный рост военных расходов демонстрируют Индия и ряд других стран мира. Международная геополитическая конкуренция, выраженная в размерах военных расходов стран мира, делает необходимым повышение качества формируемого оборонного бюджета РФ.

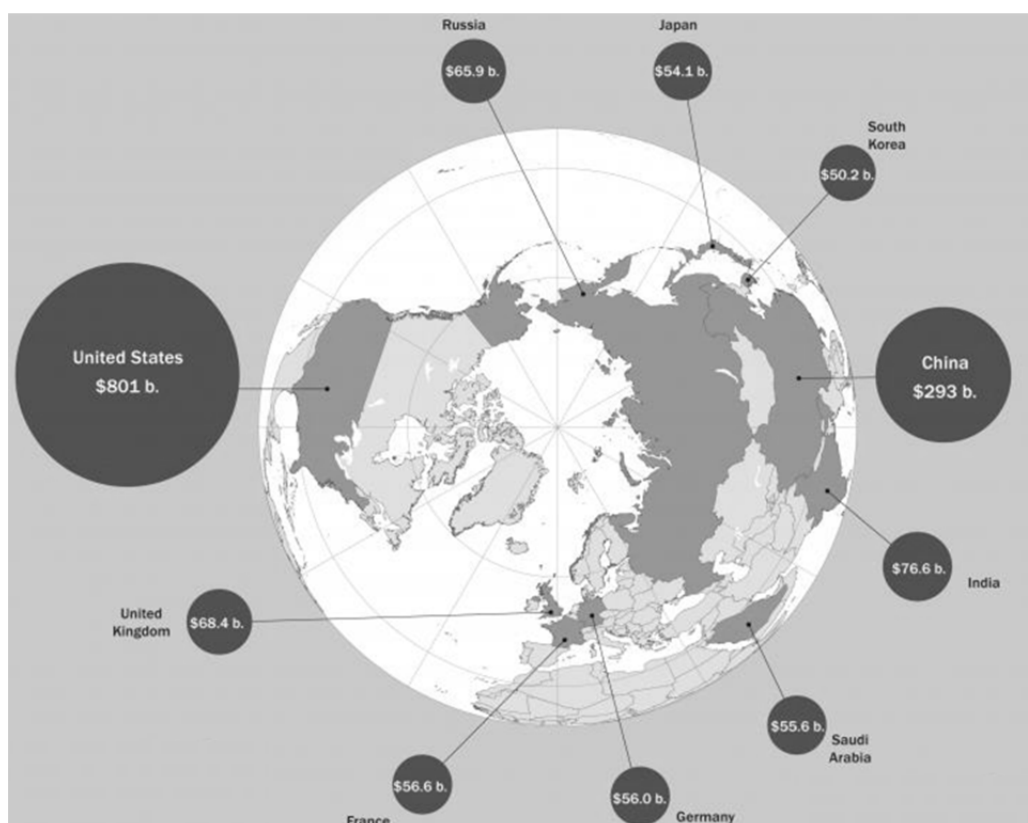


Рис. 1. Топ-10 стран мира по военным расходам [1]

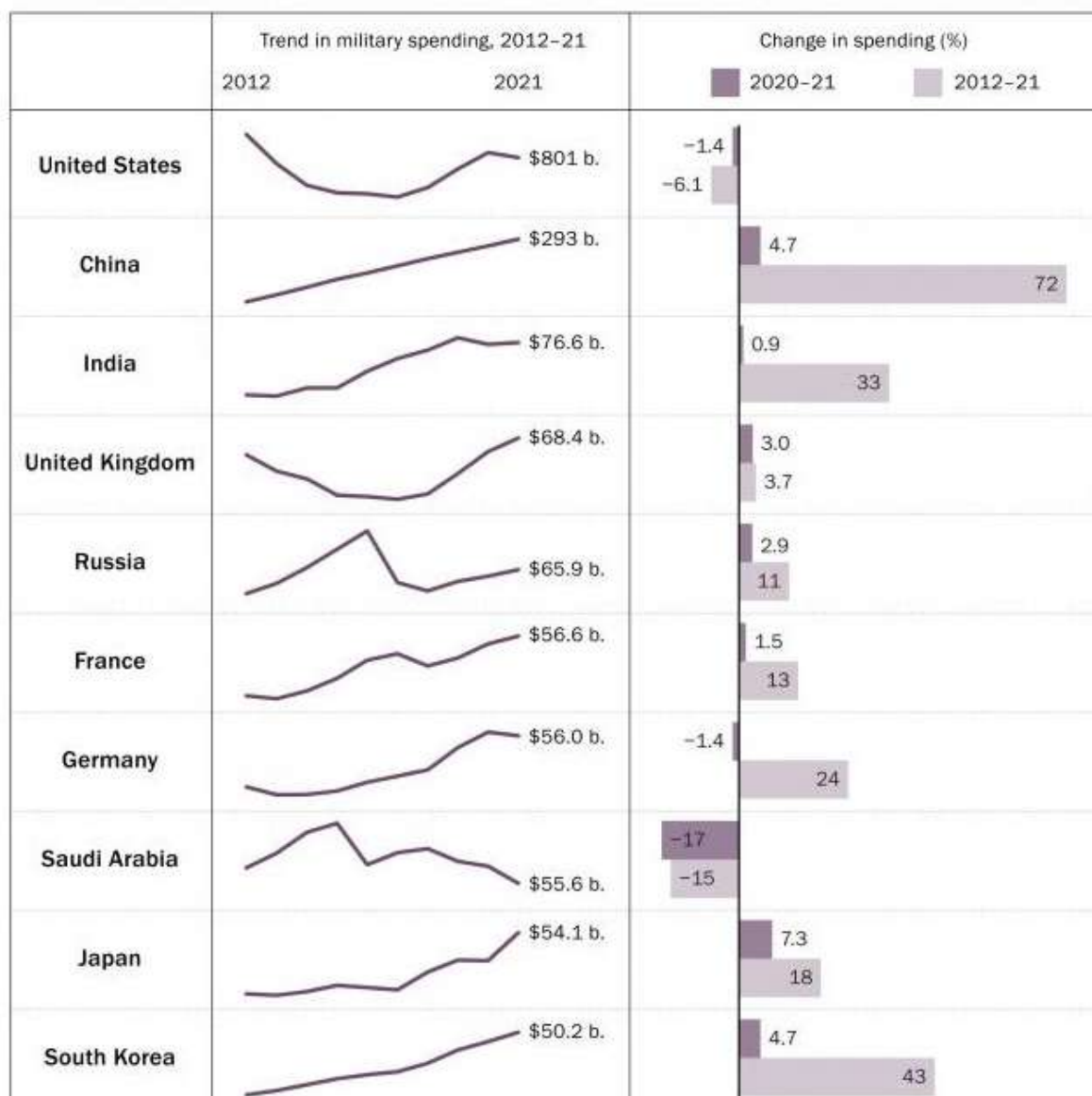


Рис. 2. Динамика военных расходов стран из списка Топ-10 [1]

В исследовании SIPRI отмечается [1], что одной из ключевых проблем стран, обладающих вооружениями, является прозрачность и подотчетность военного бюджета, расходов и закупок, так как недостаточность этих качеств может привести к расточительным и чрезмерным расходам, часто не связанным с реальными потребностями безопасности, к появлению коррупции. Мониторинг цен на военную продукцию РФ должен способствовать поддержанию достаточного уровня обороноспособности страны в рамках имеющегося финансирования и является актуальной задачей государственного масштаба. Вследствие этого авторы статьи поставили целью создание концепции и формулировку требований к информационно-аналитической системе мониторинга цен в сфере государственного оборонного заказа.

Материалы и методы

На реализацию государственного оборонного заказа (ГОЗ) затрачиваются значительные финансовые ресурсы, которые должны расходоваться эффективно. Для этого проводится постоянная работа по совершенствованию государственного регулирования цен, которая должна обеспечить эффективное расходование бюджетных средств при размещении и исполнении ГОЗ, возмещение (компенсацию) экономически обоснованных затрат головного исполнителя (исполнителей), необходимых для развития производственных мощностей и обслуживания привлеченного капитала. Кроме

того, осуществляется финансовая поддержка государством организаций оборонно-промышленного комплекса (ОПК) в целях выполнения ГОЗ.

Государственное регулирование цен как способ обеспечения экономической безопасности государства заключается в выполнении следующих шагов:

- 1) расчет прогнозируемой цены на поставляемую в текущем году и плановом периоде продукцию (прогнозной цены) согласно государственному оборонному заказу; разработка предложений по выбору вида цены на продукцию, если ее поставка будет осуществлена единственным поставщиком;
- 2) разработка заключений по прогнозной цене военными представительствами и оборонными научно-исследовательскими организациями;
- 3) расчет начальной (максимальной) цены государственного контракта; расчет цены на продукцию, получаемую на основе кооперации головного исполнителя государственного контракта по ГОЗ;
- 4) фиксирование вида цены на продукцию от единственного поставщика;
- 5) проведение государственной регистрации цены продукции, поставляемой от единственного поставщика;
- 6) реализация заказов и заключение государственных контрактов на создание продукции военного назначения (ПВН).

Государственное регулирование цен оказывает положительное влияние не только на экономию бюджетных средств, расходуемых на выполнение заданий ГОЗ с целью обеспечения военной безопасности, но и позитивно отражается на финансово-хозяйственной деятельности организации, способствуя экономической безопасности Российской Федерации. Это связано с тем, что военный сектор экономики является важным источником инноваций для гражданского сектора экономики. Президентом Российской Федерации Путиным В. В. поставлена задача в ближайшие годы существенно нарастить объем выпуска гражданской продукции в организациях ОПК.

Важное значение для достижения эффективного расходования бюджетных средств имеет обоснование начальной (максимальной) цены государственного контракта, в том числе цены на научную продукцию, создаваемую в ходе выполнения научно-исследовательской работы, и на научно-техническую продукцию, создаваемую в рамках выполнения опытно-конструкторской работы, поставляемую по ГОЗ, а также проведение результативного мониторинга расходов, осуществляемых организациями ОПК.

Терминологическая база и перечень методов, которые должны применяться для формирования прогнозной цены, изложены в Постановлении Правительства Российской Федерации от 02.12.2017 № 1465, устанавливающем порядок государственного регулирования цен на товары, работы, услуги, поставляемые в соответствии с государственными контрактами (контрактами) по ГОЗ¹.

Согласно Федеральному закону РФ «О государственном оборонном заказе», эффективное использование бюджетных средств является одной из главных задач, поставленных перед органами исполнительной власти, заказывающими органами и научно-исследовательскими организациями, участвующими в процессе формирования и выполнении планов разработки и производства высокотехнологичной продукции, а также занимающихся разработкой нормативного и методического обеспечения для этой области деятельности².

Изложению теоретических и практических аспектов ценообразования посвящено значительное количество публикаций [2–6], ряд из которых посвящен ценообразованию на ПВН [7–9] и государственному управлению ценообразованием на указанную продукцию [10]. В то же время, как показывает практика формирования прогнозных цен на ПВН и проведения их экспертизы, недостаточно развито методическое обеспечение определения прогнозной цены и оценки эффективности расходования бюджетных средств.

Его наличие важно не только для научно-исследовательских организаций, но и для военных представительств Минобороны России в организациях ОПК. Как показала практическая работа военных представительств Минобороны России, деятельность которых связана с разработкой плановых документов, формированием прогнозных и контрактных цен, а также с контролем за эффективным использованием финансовых ресурсов, в ряде случаев имеет место необоснованное завышение

¹ О государственном регулировании цен на продукцию, поставляемую по государственному оборонному заказу, а также о внесении изменений и признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации : постановление Правительства Российской Федерации № 1465 от 2 декабря 2017 г.

² О государственном оборонном заказе : федер. закон № 275-ФЗ от 29.12.2012 (редакция от 28.06.2022).

затрат на выполнение мероприятий, что приводит к снижению эффективности расходования бюджетных средств.

Для проведения качественной экспертизы прогнозных цен и подготовки обоснованных заключений на них необходимо обеспечить прозрачность формирования себестоимости продукции, в том числе отдельных элементов затрат. Для этого следует разработать соответствующие инструктивно-методические положения (рекомендации), которые должны содержать формы исходных данных, используемых для проведения расчетов, и аналитические зависимости, позволяющие проследить преобразование исходных данных в конечный результат, представляющий собой как отдельный элемент затрат, так и себестоимость и цену продукции, а также порядок оценки эффективности бюджетных расходов, суть и содержание используемых для этого показателей и критериев.

В условиях жестких временных сроков, предусмотренных нормативными документами для определения прогнозных цен и проведения их экспертизы (подготовки заключений), и значительной номенклатуры работ, а также необходимости оперативного анализа результатов формирования расходов в ходе реализации организациями планируемых заданий ГОЗ, и потребности в обработке большого объема технико-экономической информации, весьма актуальной является задача разработки информационно-аналитической системы (ИАС) мониторинга цен в сфере государственного оборонного заказа.

Важную роль в части совершенствования прогнозирования стоимостных характеристик продукции военного назначения играет, во-первых, военно-экономический анализ, результативность которого зависит от доступности, достоверности и актуальности используемых информационных массивов, отражающих не только экономический аспект, но и потребительские свойства продукции, во-вторых, качество лежащего в основе информационно-аналитической системы методического обеспечения, от которого в существенной степени зависит точность прогнозирования цен, а также обоснованность с военно-экономической точки зрения результатов их анализа и выводов о целесообразности прогнозируемых расходов.

Для эффективного мониторинга цен в сфере ГОЗ необходимо обеспечить выполнение системы требований, связанных с созданием и функционированием ИАС, первое из которых носит организационно-информационный характер, второе требование – методико-аналитический характер, а третье – программно-технический характер.

Первое требование формулируется в следующем виде: для результативного функционирования ИАС мониторинга цен в сфере ГОЗ необходимо организовать сбор и передачу достоверных и систематизированных данных, характеризующих структуру цены и отдельных статей расходов, а также трудоемкость работ, связанных с выполнением научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Наличие полной и достоверной информации о процессе формирования прогнозной (начальной) цены способствует выявлению причин необоснованного роста (занижения) затрат на выполнение задания ГОЗ, в том числе связанных с неэффективностью методов управления и организации производства опытных образцов, и необоснованным включением в себестоимость продукции видов затрат.

Выполнение указанного требования имеет важное значение, так как каким бы совершенным не было методическое обеспечение, с помощью которого обрабатывается исходная информация, на выходе ИАС мониторинга цен будут получены искаженные данные, на основе которых не могут быть сделаны корректные выводы. Это, в свою очередь, негативно отразится на эффективности расходования бюджетных средств и на реализуемости запланированных мероприятий.

Второе требование формулируется следующим образом: для обеспечения возможности получения обоснованных результатов функционирования ИАС мониторинга цен в сфере ГОЗ необходимо разработать методическое обеспечение, включающее в себя аналитические зависимости, позволяющие получать численные значения показателей (критериев), на основе анализа значений которых делаются объективные выводы, связанные с целевым расходованием бюджетных средств, обоснованностью прогнозных (начальных) цен, а также с целесообразностью (с военно-экономической точки зрения) затрат.

Выполнение указанного требования позволит проводить анализ обоснованности прогнозных оценок и оценивать их точность в условиях использования приближенных экономико-математических моделей, а также вырабатывать предложения по совершенствованию методического обеспечения (повышению точности прогноза) и оперативно реализовывать их путем внесения со-

ответствующих изменений в алгоритм расчетов и программное обеспечение ИАС мониторинга цен в сфере ГОЗ.

Третье требование формулируется так: для практического внедрения ИАС мониторинга цен в сфере ГОЗ в практику ценообразования необходимо разработать алгоритм систематизации и обработки исходной информации, поступающей в ИАС, с применением соответствующего методического обеспечения, а также программное обеспечение, реализованное на специальных технических средствах.

Выполнение указанного требования необходимо для практического использования разработанного методического обеспечения в заинтересованных органах военного управления, военных представительствах и научно-исследовательских организациях Минобороны России.

Кроме того, указанную ИАС целесообразно использовать в организациях ОПК, что позволит, во-первых, получать согласованные прогнозные оценки, во-вторых, совершенствовать методическое обеспечение, учитывая особенности создания ПВН в конкретных организациях ОПК, что, в свою очередь, будет способствовать повышению эффективности расходования бюджетных средств и обеспечению реализуемости заданий ГОЗ.

Приведенные требования необходимо рассматривать как единое целое, выполнение которых имеет важное практическое значение в рамках дальнейшего совершенствования системы ценообразования на ПВН и ее цифровизации с применением современных технологий.

Если указанные требования будут выполнены, то потребители результатов функционирования ИАС мониторинга цен в сфере ГОЗ получат объективную информацию о прогнозной цене и ее составных частях, на основе которой могут быть сделаны обоснованные выводы о ее адекватности потребительским свойствам продукции и целесообразности с военно-экономической точки зрения расходования бюджетных средств на ее создание в прогнозируемых объемах.

При создании ИАС мониторинга цен в сфере ГОЗ на ПВН необходимо реализовать принцип системного подхода, который заключается:

- в учете этапности создания научной и научно-технической продукции, которая обусловлена необходимостью решения комплекса сложных и взаимосвязанных научных, инженерных и экспериментальных задач в ходе выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ;
- в учете динамики затрат на плановом периоде времени в зависимости от серийности продукции и прогнозируемой инфляции;
- в выполнении единых требований (приведены выше), связанных с созданием и функционированием ИАС мониторинга цен в сфере ГОЗ всеми заинтересованными субъектами процесса ценообразования;
- в комплексном анализе с точки зрения экономических затрат на выполнение заданий ГОЗ и с точки зрения технических характеристик ПВН, учитывая эффективность применения продукции в военных действиях и в гражданских областях применения.

Реализация системного подхода связана с определением существенных факторов, влияющих на себестоимость ПВН, с анализом эффективности затрат и структуры цены продукции, с учетом потребительских свойств идентичной продукции или ее аналогов, закупленных ранее. В цене продукции должны быть учтены не только расходы на разработку и производство ПВН, содержащие экономически обоснованные затраты и величину прибыли, соответствующую работе исполнителя по выполнению ГОЗ и реальным результатам. Должен быть также учтен конечный результат применения ПВН и важнейшие для заказчика эксплуатационные и тактико-технические характеристики, состав обеспечивающих систем, средства противодействия предполагаемого противника.

Результаты

Таким образом, основными функциями ИАС мониторинга цен в сфере ГОЗ являются:

1. Систематизация технико-экономической информации, касающейся создания ПВН, с целью разработки системы каталогов, каждый из которых должен содержать в удобном для пользователя виде информацию о плановой (прогнозной) и фактической трудоемкости работ, плановых (прогнозных) и фактических затратах финансовых и других видов ресурсов.
2. Аналитическая обработка данных, направляемых организацией государственному заказчику в составе предложений о прогнозной цене и о цене продукции в целях обоснования начальной (максимальной) цены государственного контракта.

3. Анализ цен на ПВН, заключающийся в проверке ее адекватности потребительским свойствам и в оценке военно-экономической целесообразности расходования бюджетных средств в прогнозируемых объемах.

4. Автоматизация процесса взаимодействия с поставщиками (подрядчиками, исполнителями) ПВН в целях оперативного доведения до органов военного управления, военных представительств и научно-исследовательских организаций Минобороны России данных, характеризующих:

- затраты сырья, расходных материалов, топлива и прочих материальных ресурсов, нормы расхода и цены данных ресурсов;
- трудоемкость изготовления ПВН и ее составных частей, а также среднюю оплату труда работников различной квалификации;
- нормативы для отнесения отдельных затрат организации на себестоимость продукции головным исполнителем (исполнителем), характеризующих уровень общепроизводственных, общехозяйственных, транспортно-заготовительных расходов, а также специальных затрат и (или) затрат на подготовку производства опытных образцов.

Структурно ИАС мониторинга цен в сфере ГОЗ должна включать пять подсистем, показанных на рис. 3.



Рис. 3. Углубленная структура ИАС мониторинга цен в сфере ГОЗ

Подсистема «Оценка научно-технической и производственно-технологической базы организации» предназначена для проверки реализуемости выполнения заказа и результативности расходования бюджетных средств, направляемых на создание научной и научно-технической ПВН в запланированные сроки, на основе имеющейся (прогнозируемой) научно-технической и производственно-технологической базы организации.

Подсистема «Оценка профессионального и количественного состава работников» предназначена для проверки количественной достаточности основного производственного персонала (непосредственных исполнителей), вспомогательного (обслуживающего) персонала и аппарата управления персоналом, а также соответствия профессионального состава работников и уровня их квалификации специфике и сложности выполнения заказа на создание ПВН.

Подсистема «Прогнозирование и анализ структуры цены» предназначена для определения экономически обоснованных затрат на создание ПВН, анализа состава затрат и факторов, на них влияющих.

Подсистема «Определение военно-экономической целесообразности расходования прогнозируемого объема бюджетных средств на создание ПВН» предназначена для выявления в процессе подготовки научно-исследовательскими организациями Минобороны России заключения на прогнозные цены заданий ГОЗ (программных мероприятий), затраты на реализацию которых не соответствуют (являются завышенными) потребительским свойствам ПВН, характеризующимся эффектом от их применения и основными характеристиками.

Подсистема «База данных о технико-экономических характеристиках ПВН» предназначена для накопления и хранения в систематизированном виде информации о стоимостных показателях выполненных, выполняемых и планируемых к выполнению заказов, показателей, отражающих потребительские свойства ПВН, а также показателей, характеризующих производственные, кадровые и материальные ресурсы, затрачиваемые на создание ПВН.

Одной из важнейших подсистем ИАС мониторинга цен на научную и научно-техническую ПВН является подсистема «Прогнозирование и анализ структуры цены», создание которой базируется на комплексе нормативно-методических документов:

- методических рекомендациях по определению трудоемкости выполнения научно-исследовательской работы [11];

- методических рекомендациях по определению трудоемкости выполнения опытно-конструкторской работы [12];

- методических рекомендациях по определению рационального соотношения численности основных работников (инженерно-технических работников, производственных работников) и вспомогательного персонала общехозяйственного и общепроизводственного назначения, управленческого персонала организации;

- методических рекомендациях по определению нормативов для отнесения отдельных затрат организации на себестоимость продукции, которые не имеют прямого отношения к созданию конкретной научной и научно-технической ПВН, но обеспечивают функционирование предприятия в целом;

- методических рекомендациях по определению прогнозной цены научно-исследовательской работы (опытно-конструкторской работы);

- методических рекомендациях по определению военно-экономической целесообразности расходования прогнозируемого объема финансовых ресурсов.

К разработке указанных методических рекомендаций необходимо привлечь научно-исследовательские организации Минобороны России и военные представительства Минобороны России, которые имеют достоверную и полную информацию о затратах всех видов ресурсов, затрачиваемых на создание ПВН, а также об имеющейся научно-технической и производственно-технологической базе организаций ОПК. Кроме того, целесообразно, чтобы перечисленные методические рекомендации носили межведомственный характер, что позволит лучше учесть особенности создания ПВН в организациях ОПК.

Заключение

Разработка ИАС мониторинга цен на научную и научно-техническую ПВН на основе изложенной концепции позволит повысить объективность и обоснованность формирования прогнозной цены и начальной (максимальной) цены, уменьшить риск необоснованных расходов бюджетных средств, предусмотренных для финансирования государственного оборонного заказа.

Список литературы

1. Stockholm international peace research institute. Armament and disarmament. Arms and military expenditure. Military expenditure. URL: <https://www.sipri.org/research/armament-and-disarmament/arms-and-military-expenditure/military-expenditure>
2. Алиев А. Т., Веснин В. Р., Слепов В. А. Теория, методология и практика ценообразования в промышленности : монография. 2-е изд. М. : Дашков и К, 2020. 125 с.
3. Слепов В. А., Николаева Т. Е., Глазова Е. С. Ценообразование : учебник / под ред. В. А. Слепова. 3-е изд. М. : ИНФРА-М, 2022. 304 с.
4. Липсиц И. В. Ценообразование. 4-е изд., испр. и доп. М. : Юрайт, 2022. 334 с.
5. Ямпольская Д. О. Ценообразование. 2-е изд., испр. и доп. М. : Юрайт, 2022. 193 с.

6. Егоров Ю. В. Многофакторная природа цены в теории ценообразования и формирования тарифов // Вестник Евразийской науки. 2020. № 5. URL: <https://esj.today/PDF/31ECVN520.pdf>
7. Лавринов Г. А., Подольский А. Г. Ценообразование на продукцию военного назначения: от затратной к ценностной концепции // Вооружение и экономика. 2012. № 1. С. 58–65.
8. Подольский А. Г. Верхняя лимитная цена: индикатор эффективного расходования бюджетных средств // Вооружение и экономика. 2017. № 1. С. 57–63.
9. Лавринов Г. А., Подольский А. Г. О методических подходах к определению цены научно-технической продукции военного назначения // Экономический потенциал промышленности на службе оборонно-промышленного комплекса : сб. докл. конф. М. : Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, 2016. С. 64–66.
10. Лавринов Г. А., Подольский А. Г. О государственном управлении ценообразованием на продукцию военного назначения // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2014. № 44. С. 2–12.
11. Подольский А. Г., Бабкин А. В. Методический подход к определению трудоемкости выполнения научно-исследовательских работ // Учет. Анализ. Аудит. 2017. № 4. С. 7–15.
12. Подольский А. Г., Бабкин А. В. Методический подход к формированию прогнозной трудоемкости разработки сложных технических систем // Учет. Анализ. Аудит. 2018. Т. 5, № 2. С. 52–59.

References

1. *Stockholm international peace research institute. Armament and disarmament. Arms and military expenditure. Military expenditure.* Available at: <https://www.sipri.org/research/armament-and-disarmament/arms-and-military-expenditure/military-expenditure>
2. Aliev A.T., Vesnin V.R., Slepov V.A. *Teoriya, metodologiya i praktika tsenoobrazovaniya v promyshlennosti: monografiya. 2-e izd. = Theory, methodology and practice of pricing in industry : monograph. 2nd ed.* Moscow: Dashkov i K, 2020:125. (In Russ.)
3. Slepov V.A., Nikolaeva T.E., Glazova E.S. *Tsenoobrazovanie: uchebник. 3-e izd. = Pricing : textbook. 3rd ed.* Moscow: INFRA-M, 2022:304. (In Russ.)
4. Lipsits I.V. *Tsenoobrazovanie. 4-e izd., ispr. i dop. = Pricing. 4th ed., corr. and suppl.* Moscow: Yurayt, 2022:334. (In Russ.)
5. Yampol'skaya D.O. *Tsenoobrazovanie. 2-e izd., ispr. i dop. = Pricing. 2nd ed., corr. and suppl.* Moscow: Yurayt, 2022:193. (In Russ.)
6. Egorov Yu.V. The multifactorial nature of price in the theory of pricing and tariff formation. *Vestnik Evraziyskoy nauki = Bulletin of Eurasian Science.* 2020;(5). (In Russ.). Available at: <https://esj.today/PDF/31ECVN520.pdf>
7. Lavrinov G.A., Podol'skiy A.G. Pricing for military products: from cost to value concept. *Vooruzhenie i ekonomika = Armament and economy.* 2012;(1):58–65. (In Russ.)
8. Podol'skiy A.G. Upper limit price: an indicator of effective spending of budgetary funds. *Vooruzhenie i ekonomika = Armament and economics.* 2017;(1):57–63. (In Russ.)
9. Lavrinov G.A., Podol'skiy A.G. On methodological approaches to determining the price of military scientific and technical products. *Ekonomicheskiy potentsial promyshlennosti na sluzhbe oboronno-promyshlennogo kompleksa : sb. dokl. konf. = The economic potential of industry in the service of the military-industrial complex : a collection of reports conf.* Moscow: Finansovyy universitet pri Pravitel'stve Rossiyskoy Federatsii, 2016:64–66. (In Russ.)
10. Lavrinov G.A., Podol'skiy A.G. On state management of pricing for military products. *Natsional'nye interesy: priority i bezopasnost' = National interests: priorities and security.* 2014;(44):2–12. (In Russ.)
11. Podol'skiy A.G., Babkin A.V. A methodical approach to determining the complexity of performing research work. *Uchet. Analiz. Audit = Accounting. Analysis. Audit.* 2017;(4):7–15. (In Russ.)
12. Podol'skiy A.G., Babkin A.V. Methodological approach to the formation of predictive labor intensity of the development of complex technical systems. *Uchet. Analiz. Audit = Accounting. Analysis. Audit.* 2018;5(2):52–59. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Викторович Бабкин

начальник группы отдела технологического аудита
производства оборонной продукции,
Управление военных представительств
Министерства обороны Российской Федерации
(Россия, г. Москва, Комсомольский пр-т, 18, стр. 3)
E-mail: babkin.3@mail.ru

Aleksey V. Babkin

Head of the group of the department of technological
audit of defense production,
Department of Military Representations
of the Ministry of Defense of the Russian Federation
(bld. 3, 18 Komsomolsky avenue, Moscow, Russia)

Александр Геннадьевич Подольский

доктор экономических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник,
46 Центральный научно-исследовательский институт
Министерства обороны Российской Федерации
(Россия, г. Москва, Чукотский проезд, 10)
E-mail: podolskijag@mail.ru

Олег Владимирович Прокофьев

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры информационных технологий и систем,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, пр. Байдукова / ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: prokof_ow@mail.ru

Александр Евгеньевич Савочкин

кандидат технических наук,
доцент кафедры прикладной информатики,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, пр. Байдукова / ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: aebrat@mail.ru

Aleksandr G. Podolsky

Doctor of economical sciences, professor,
leading researcher,
46 Central Research Institute of the Ministry
of Defense of the Russian Federation
(10 Chukotsky passage, Moscow, Russia)

Oleg V. Prokofiev

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of informational technologies and systems,
Penza State Technological University
(1a/11 Baidukov's passage /Gagarina street, Penza, Russia)

Aleksandr E. Savochkin

Candidate of technical sciences, associate professor
of the sub-department of applied informatics,
Penza State Technological University
(1a/11 Baidukov's passage /Gagarina street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 24.03.2022

Поступила после рецензирования/Revised 25.04.2022

Принята к публикации/Accepted 16.05.2022

СИТУАЦИОННАЯ ОСВЕДОМЛЕННОСТЬ О СОСТОЯНИИ ПОРТОВ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ТРАНСПОРТНОГО КОРИДОРА В УПРАВЛЕНИИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ АРКТИКИ

И. В. Гурлев¹, А. В. Маслобоев², И. Г. Малыгин³

^{1,3} Институт проблем транспорта имени Н. С. Соломенко Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

² Институт информатики и математического моделирования имени В. А. Путилова Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», Апатиты, Россия

¹ gurleff@mail.ru, ² masloboev@iimm.ru, ³ malygin_com@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Работа направлена на исследование и развитие методов и средств поддержки управления экологической безопасностью арктических портов для обеспечения жизнеспособности критических инфраструктур Северного морского транспортного коридора. *Материалы и методы.* Проведен системный анализ экологических проблем арктических портов и прибрежных территорий на трассе Северного морского транспортного коридора. Дана экспертная оценка влияния эксплуатации морских портов, используемых для хранения и перевалки грузов, на экологическую устойчивость, здоровье, безопасность и качество жизни населения Арктической зоны России. *Результаты и выводы.* На основе проведенного анализа и оценки предложена концептуальная схема оперативного формирования ситуационной осведомленности лиц, принимающих решения, об угрозах экологической безопасности и параметрах функционирования арктических портов для реализации модели сетецентрического управления критическими инфраструктурами Северного морского транспортного коридора. Схема базируется на адаптации метода ситуационного управления структурой и параметрами промышленно-природных сетецентрических систем, обеспечивающего повышение координируемости этих систем на различных уровнях организационного управления. Результаты работы могут найти применение для информационно-аналитической поддержки региональных ситуационных центров, ответственных за работу составных частей (портов и узлов) сетецентрической транспортной инфраструктуры Северного морского транспортного коридора в части решения задач обеспечения экологической и других видов безопасности в Арктике.

Ключевые слова: ситуационная осведомленность, системный анализ, управление, экологическая безопасность, Северный морской транспортный коридор, арктические порты

Финансирование: работа выполнена в рамках государственных заданий ИИММ КНЦ РАН (НИР № FMEZ-2022-0023), ИППЭС КНЦ РАН (НИР № FMEZ-2022-0010) и ИПТ РАН (НИР № FFSZ-2019-0004).

Для цитирования: Гурлев И. В., Маслобоев А. В., Малыгин И. Г. Ситуационная осведомленность о состоянии портов северного морского транспортного коридора в управлении экологической безопасностью Арктики // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 4. С. 120–134. doi:10.21685/2307-4205-2022-4-13

SITUATIONAL AWARENESS ON PORTS STATE OF THE NORTHERN SEA ROUTE IN ENVIRONMENTAL SAFETY MANAGEMENT OF ARCTIC REGION

I.V. Gurlev¹, A.V. Masloboev², I.G. Malygin³

^{1,3} Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

² Putilov Institute for Informatics and Mathematical Modeling of the Federal Research Centre
"Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences", Apatity, Russia

¹ gurleff@mail.ru, ² masloboev@iimm.ru, ³ malygin_com@mail.ru

Abstract. *Background.* The work is aimed at examination and development of methods and tools for management support of the environmental safety of Arctic ports to resilience ensuring of critical infrastructures of the Northern Sea Route. *Materials and methods.* A systems analysis of the ecological problems of Arctic ports and coastal areas along the Northern Sea Transport Corridor has been carried out. An expert judgement and review of the operation impact of seaports used for cargo storage and transshipment on environmental sustainability, health, safety and life quality of population of the Arctic region of Russia are given. *Results and conclusions.* Based on the analysis and evaluation carried out, a conceptual scheme is proposed for the operational synthesis of situational awareness of the decision makers on threats to environmental safety and parameters of the Arctic ports functioning to model implementation of

the critical infrastructures network-centric control of the Northern Sea Route. The generic scheme is based on the adaptation of the situational control method of the structure and parameters of industrial-natural network-centric systems. This method provides the coordinability enhancement of these systems at various levels of organizational management. The study efforts and contributions can be applicable to information and analytical support of regional situational centers responsible for the components (ports and hubs) operation of the network-centric transport infrastructure of the Northern Sea Route in terms of problem-solving of the ecological and other types of security ensuring and maintenance in the Arctic region.

Keywords: situational awareness, systems analysis, management, environmental safety, Northern Sea Route, Arctic ports

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of the State Research Programs of the Putilov Institute for Informatics and Mathematical Modeling KSC RAS (project No. FMEZ-2022-0023), Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS (project No. FMEZ-2022-0010) and Solomenko Institute of Transport Problems RAS (project No. FFSZ-2019-0004).

For citation: Gurlev I.V., Masloboev A.V., Malygin I.G. Situational awareness on ports state of the northern sea route in environmental safety management of Arctic Region. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(4):120–134. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-4-13

Введение

Транспортная система Северный морской транспортный коридор (СМТК) в пределах морских владений России включает в себя части Баренцево-Евроарктического, Азиатско-Тихоокеанского транспортных коридоров и весь транспортный коридор «Северный морской путь» (рис. 1).



Рис. 1. Общая схема и порты Северного морского транспортного коридора

В настоящее время СМТК фактически выполняет роль внутреннего транспортного коридора, что подтверждают данные по объемам ежегодных внутренних, импортно-экспортных и международных транзитных грузоперевозок, приведенные в табл. 1 [1, 2].

Таблица 1

Динамика грузоперевозок по СМТК

Годы	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Внутренний и импортно-экспортный грузопоток, млн т	4,0	6,0	7,0	10,0	20,0	31,0	32,0	34,9
Международный транзитный грузопоток, млн т	0,25	0,05	0,22	0,20	0,50	0,70	1,30	2,0
Всего, млн т	4,25	6,05	7,22	10,20	20,50	31,70	33,3	36,90

Согласно данным табл. 1 основную часть грузопотоков по СМТК в настоящее время составляют внутренние для обеспечения потребностей населенных пунктов и предприятий Крайнего Севера и импортно-экспортные грузоперевозки, которые в 2021 г. возросли в 8,7 раза по сравнению с 2014 г. За тот же период международный транзитный грузопоток вырос в 8 раз, однако он остается незначительным.

В связи с ростом грузоперевозок увеличивается и вред, наносимый природе Арктики не только со стороны судов, сжигающих сотни тысяч тонн топлива, но также и со стороны арктических портов, принимающих и отправляющих различные грузы [3, 4].

В работе проведен анализ экологического состояния территории портов и вокруг них, работы портов по хранению и перевалке грузов и негативного влияния эксплуатации портов СМТК на экологическую безопасность Арктической зоны России.

Анализ экологического состояния морских портов по маршруту СМТК

В Арктической зоне России по маршруту СМТК расположены 18 основных портов, 17 из которых нуждаются в технической реконструкции и проведении дноуглубительных работ с целью обеспечения приема крупнотоннажных судов и ритмичной работы по всему маршруту транспортной системы (см. рис. 1).

В табл. 2 приведены некоторые технические характеристики 18 указанных портов, расположенных в Арктической зоне России по маршруту СМТК [5].

Таблица 2

Технические характеристики морских портов по маршруту СМТК

Наименование порта	Период навигации	Площадь территории порта, га	Площадь акватории порта, км ²	Количество причалов	Максимально допустимые габариты судов в метрах у причалов		
					осадка	длина	ширина
Мурманск	Круглогодично	645,9	53,7	111+2 пирса	не ограничены		
Архангельск	Круглогодично	215,26	1120	75	9,2	190	30
Кандалакша	Круглогодично	25,44	5,09	5	9,8	200	33
Витино	Круглогодично	18,66	11,59	4	11,1	230	32,2
Онега	Круглогодично	2,68	845,59	7	13,6	242	32,4
Мезень	01.05–01.10	–	191	3	4,2	120	20
Варандей	01.06–30.12	1,47	24,98	2	3,5	120	15
Нарьян-Мар	01.06–30.11	22,57	5,63	6	3,6	114	16
Сабетта	Круглогодично	179,5	1177	11	12	315	50
Дудинка	01.01–20.05; 15.06–31.12	24,92	30,22	9	11,8	260,3	32,2
Диксон	01.06–31.10	4,77	0,182	2	8	100	20
Хатанга	01.06–31.10	10,62	3,70	5	4,17	136	16,5
Тикси	15.07–30.09	7,29	96,78	2	3,9	129,5	15,8
Певек	03.07–25.10	19	8,90	3	9	172,2	24,5
Анадырь	01.07–01.10	11,89	45,33	6	7	177	25
Провидения	01.06–01.12	12,70	13,02	4	10	200	24
Эгвекино	01.07–01.12	7,17	5,75	2	7,5	150	21
Беринговский	01.07–01.10	22,12	47,07	4	2,7	39,9	12

Порт Мурманск. Местонахождение морского порта: Мурманская область, Баренцево море, южное колено Кольского залива. Основными грузами Мурманского морского порта являются уголь, нефть и нефтепродукты, контейнеры, удобрения, лес. Ежегодный грузооборот порта составляет до 50 млн т. Основными загрязнителями территории и акватории порта являются угольная пыль, нефтяные углеводороды, тяжелые металлы (медь и железо), а также высокие концентрации никеля и марганца. В акватории порта наблюдается повышенное содержание фосфатов. По индексу загрязненности качество вод в торговом порту г. Мурманска оценивается как умеренно загрязненные. Основным загрязнителем атмосферного воздуха в районе порта и в городе является угольная пыль [6].

Порт Архангельск. Местонахождение морского порта: Архангельская область, Белое море, Двинский залив, устье реки Северная Двина. Архангельский морской торговый порт с круглогодичной навигацией – современное, мощное многопрофильное предприятие, которое предоставляет услуги по перегрузке генеральных грузов, контейнеров, леса, пиломатериалов, металлов, удобрений, каменного угля, целлюлозы, оборудования, промышленных, продовольственных товаров и других грузов, кроме наливных. Мощности порта позволяют перерабатывать до 4,5 млн т грузов в год. Порт обслуживается двумя железнодорожными станциями Северной железной дороги. В Архангельском

порту базируется основной состав экспедиционного арктического флота, Северного регионального управления гидрометеослужбы, полярной гидрографии Минтранса России. Развитие Архангельского морского порта, в первую очередь, связано с освоением месторождений углеводородов в Арктике и развитием потоков экспортных грузов.

Основными проблемами в Архангельском порту являются высокий и повышенный уровень загрязнения атмосферного воздуха, территории и акватории порта угольной пылью, а также содержащими различные загрязнения сточными водами [7].

Порт Кандалакша. Местонахождение морского порта: Мурманская область, Кольский полуостров, Белое море, Кандалакшский залив, губа Лупча. Железнодорожные и автомобильные подходы обеспечивают Кандалакшскому порту выход на крупные магистрали страны. Порт связан с железной дорогой «Санкт-Петербург – Мурманск», а также с федеральной автодорогой М18 «Санкт-Петербург – Мурманск».

Основной груз круглогодичного Кандалакшского морского торгового порта: каменный уголь энергетических марок, поступающий по железной дороге с шахт Кемеровской области и поставляемый в Западную Европу и Северную Африку. Действующие мощности порта позволяют перерабатывать до 3 млн т грузов сложившейся номенклатуры (апатитовый концентрат, уголь, глинозем, металллом и др.). Во время перевалки угля облако угольной пыли поднимается в атмосферу и покрывает город и порт плотным слоем. Экологическое состояние атмосферного воздуха неудовлетворительное.

Другим направлением деятельности порта является перевалка генеральных грузов Арктического направления для освоения нефте- и газоконденсатных месторождений, а также для обеспечения строительства и модернизации портов вдоль трасс СМТК. Средние значения концентрации растворенных форм тяжелых металлов (медь, никель, кадмий, марганец, железо, свинец) по данным наблюдений ниже нормы. Воды Кандалакшского морского порта характеризуются лабораторными данными как чистые [6].

Порт Витино. Местонахождение морского порта: Мурманская область, город Кандалакша, населенный пункт Белое море, губа Палкина, Кандалакшский залив, Белое море. Порт используется, главным образом, для экспорта нефти и нефтепродуктов, газового конденсата, поступающих по железной дороге. Экологическая обстановка в этом районе удовлетворительная [8].

Порт Онега. Местонахождение морского порта: Архангельская область, побережье Белого моря, Онежский залив, устье реки Онега. Пропускная способность порта составляет 262 тыс. т грузов в год, из них 3 тыс. т – по нефтеналивным грузам, 259 тыс. т – по сухим грузам. Площадь открытых складов – 73 тыс. м², крытых – 15 тыс. м². Пропускная способность пассажирских терминалов – 160 тыс. пассажиров в год. В акватории порта расположен рейдовый комплекс перегрузки нефти и нефтепродуктов «Осинки». Обеспечение экологической безопасности осуществляется не лабораторными измерениями, а путем регулярного патрулирования акватории на катере капитана порта в летнее время и визуальным осмотром причалов порта инспекторами ГПК в зимний период [9].

Порт Мезень. Местонахождение морского порта: Архангельская область, побережье Белого моря, Мезенский залив, устье реки. Суда обрабатываются в основном на рейде – порт рейдовый. Морское судно заходит в акваторию порта, встает на рейд, к нему подходят сухогрузные или нефтеналивные баржи, перегружают груз и уже баржа идет к причалу или к берегу, где разгружается на необорудованный берег или у одного из трех причалов порта.

Основу перевозок в порту составляет северный завоз – поставки для нужд Мезенского и Лешуконского районов Архангельской области угля, дизельного топлива и ГСМ для внутреннего потребления. Расчетная пропускная способность порта – 132 тыс. т в год, из них по сухим грузам – 116 тыс. т, по наливным грузам – 16 тыс. т. Емкость резервуаров для хранения нефтепродуктов 12 тыс. т. Крытых складов в порту нет. Основной экологической проблемой является наличие угольной пыли при перевалке угля [10].

Порт Варандей. Местонахождение морского порта: Ненецкий автономный округ, побережье Баренцева моря, район Варандейской губы. Морской порт Варандей не имеет связи с железнодорожной сетью России. Грузооборот составляют сырая нефть, ГСМ, генеральные и другие грузы. Порт предназначен для транспортировки морским путем сырой нефти, добываемой компанией «Лукойл» на севере Ненецкого автономного округа (НАО) в Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. Объем перевалки нефти за январь–апрель 2021 г. составил более 1,5 млн т. Экологическая ситуация в районе порта Варандей характеризуется как удовлетворительная [11, 12].

Порт Нарьян-Мар. Местонахождение морского порта: Ненецкий автономный округ, г. Нарьян-Мар, Баренцево море, река Печора. Основные грузы, проходящие через порт Нарьян-Мар – лес, уголь, минерально-строительные, продовольственные грузы, контейнеры и т.д. На данный момент потенциальная пропускная способность грузового морского терминала составляет 500 тыс. т в год. Порт находится в экологически неудовлетворительном состоянии. Происходит засорение территории и акватории порта древесиной, угольной пылью, цементом, строительными материалами [13].

Порт Сабетта. Местонахождение морского порта: Ямало-Ненецкий автономный округ, Ямальский район, на западном побережье Обской губы Карского моря. Это самый молодой арктический порт России, строительство которого началось в 2012 г. Порт в эксплуатации с 2013 г. Порт построен в рамках проекта «Ямал СПГ» для круглогодичной транспортировки сжиженного природного газа. Грузооборот порта в 2020 г. составил около 30 млн т. Структура грузооборота: сжиженный природный газ, газовый конденсат, сырая нефть, генеральные грузы. Экологическое состояние удовлетворительное [14].

Порт Дудинка. Местонахождение морского порта: Красноярский край, Карское море, река Енисей. Порт Дудинка – структурное подразделение ПАО «Норильский никель» и ключевой транспортный узел для вывоза продукции комбината и жизнеобеспечения Норильского промрайона. Порт Дудинка осуществляет завоз продукции и сырья для комбината ПАО «ГМК "Норильский никель"», а также «северный завоз», в который входят строительные материалы, продовольствие и уголь для населенных пунктов региона. С материком порт соединяет авиатранспорт и водный путь по Енисею. Железнодорожное и автомобильное сообщение отсутствует. В режиме круглогодичной навигации порт перерабатывает около 2 млн т грузов. Территория порта во время ежегодного паводка полностью затопливается. Проводятся регулярные работы по восстановлению инфраструктуры порта.

Основным источником загрязнения окружающей природной среды порта и города является ПАО «ГМК "Норильский никель"». Выбросы от его стационарных источников составляют 2/3 от выбросов по Красноярскому краю и 14 % от объема промышленных выбросов Российской Федерации. Выбросы вредных веществ комбината ежегодно составляют 2,3–2,5 млн т, из них 90 % диоксида серы, помимо диоксида серы, содержатся соединения никеля, меди, кобальта, свинца, фенола, оксиды азота и углерода, сероводород, диоксид селена и других веществ. Количество источников выбросов основную на подведомственной территории комбината более 2,3 тыс. единиц.

Объем отходов производства и потребления на территории муниципального образования составляет более 900 тыс. т, основную массу из которых составляет металлолом – более 600 тыс. т. Однако высокие транспортные затраты и удаленность объектов от г. Дудинка делают экономически невыгодным вывоз металлолома на пункты приема, что ведет к постоянному его накоплению и ухудшению экологической обстановки, отсутствует переработка приборов с ртутьсодержащими элементами и ртутьсодержащих ламп, которые в результате вывоза на полигоны твердых бытовых отходов и на несанкционированные свалки, являются наиболее опасными источниками загрязнения окружающей среды.

Не менее важной проблемой остается проблема утилизации и переработки отработанных масел и продуктов зачистки резервуаров на полевых объектах и в населенных пунктах. При сжигании данных видов отходов в атмосферу попадают опасные вещества, которые отрицательно влияют на окружающую среду и здоровье человека.

Нет объективных данных об общем количестве образующихся и накопившихся отходов производства и потребления, так как с 1998 г. не проводилась инвентаризация объектов размещения отходов. Кроме того, на берегах реки Енисей находится огромное количество древесины, которая до настоящего времени остается невостребованной. При этом большое количество леса ежегодно смывается в море при изменении уровня воды в реке Енисей. Продукты разложения древесины в воде в свою очередь приводят к уменьшению кормовой базы морских биоресурсов и снижению их численности.

Все населенные пункты муниципального образования расположены на берегах крупных и мелких рек, которые являются источниками снабжения населения питьевой водой. Суровые климатические условия, большая обводненность территории, недостаточность финансирования и проблемы с транспортом не позволяют строить полигоны в соответствии со всеми экологическими, санитарными и технологическими требованиями. С каждым годом увеличивается площадь земельных участков, занятых твердыми бытовыми отходами, идет процесс их разложения, а в период паводковых вод и снеготаяния идет загрязнение водных объектов, в том числе и питьевых.

Наиболее распространенными загрязняющими веществами в поверхностных водах являются нефтепродукты, аммонийный и нитратный азот, соединения металлов, соединения серы. В муниципальном образовании открытые водоемы, используемые для забора воды в питьевых целях, имеют повышенное содержание железа, низкое содержание фтора, а также, особенно в паводковый период, не соответствуют гигиеническим нормам по микробиологическим показателям (острые кишечные инфекции, дизентерия, гепатит А и др.). В водоемах периодически регистрируется превышение предельно допустимых концентраций цинка, кобальта, кадмия, все водозаборы, за исключением водозабора на озере Самсонкино (г. Дудинка), не имеют зон санитарной охраны, соответствующих санитарным нормам. Порт и близлежащая обширная территория находятся в экологически неудовлетворительном состоянии [15].

Порт Диксон. Местонахождение морского порта: Красноярский край, Таймырский Долгано-Ненецкий муниципальный район, поселок городского типа Диксон, юго-восточная часть Карского моря, Енисейский залив. Самый северный порт России. Основными грузами являются полезные ископаемые с ближайших месторождений, уголь и нефть. Негативное влияние Норильского промышленного узла распространяется далеко за пределы городского округа Норильска и оказывает влияние на атмосферу и территорию поселения и порта Диксон. Оценить это влияние количественно невозможно из-за отсутствия на территории поселения стационарных постов наблюдения за состоянием атмосферного воздуха. Основной вклад в общий объем загрязняющих выбросов в атмосферный воздух п.г.т. Диксон вносят объекты энергетики.

По природным условиям самоочищающаяся способность большинства рек рассматриваемой территории характеризуется как «низкая», а крупных рек – как «пониженная». Состояние водных объектов в западной части поселения неблагоприятное. По территории поселения основные крупные реки (Енисей и Пясины) протекают своей устьевой частью, их воды уже загрязнены в результате хозяйственной деятельности расположенных выше по течению объектов. ПАО «Норильский никель» сбрасывает сточные воды в реки Щучья и Наледная – притоки Пясины. Загрязнение реки Енисей и Енисейского залива формируется преимущественно промышленными объектами, расположенными в среднем течении – предприятиями электроэнергетики, цветной металлургии, топливной химической и целлюлозно-бумажной промышленности. Основные загрязняющие вещества: нефтепродукты, фенолы, медь, никель, кадмий и др. [15].

Порт Хатанга. Местонахождение морского порта: Красноярский край, море Лаптевых, река Хатанга, п. Хатанга. Основное назначение порта – снабжение грузами населенных пунктов, расположенных в бассейне реки Хатанги с притоками Котуй, Хета и Попигай. Порт играет ключевую роль при поставках каменного угля и нефтепродуктов в рамках северного завоза, а также продовольственных товаров и продукции производственно-технического назначения на территории Таймырского муниципального района.

В грузообороте порта на долю генеральных грузов приходится 20 %, лесных – 7 %, навалочных (уголь и песчано-гравийная смесь) – 70 %, нефтеналивных – 3 %. Перевалку грузов в порту осуществляет АО «Хатангский морской торговый порт (ХМТП)». Для хранения грузов в порту оборудованы открытые складские площадки общей площадью 25,3 тыс. м². Крытых складов нет. В состав территории морского транспорта входят производственные площадки ЗАО «ХМТП», склады и гаражи. Неиспользуемые территории превращены в стихийные свалки металлолома, строительного мусора и других отходов. Отсутствует переработка ртутьсодержащих ламп. С каждым годом увеличивается площадь земельных участков, занятых различными отходами, идет процесс их разложения, а в период паводковых вод и снеготаяния идет загрязнение приближенных водных объектов, в том числе и питьевых. Загрязненные сточные воды ухудшают качество воды и ведут к гибели ценных пород рыб, уменьшению рыбных запасов водных объектов, к заболеваниям людей. Экологическая ситуация в сфере загрязнений почвы, атмосферы и акватории в районе порта и поселка неблагоприятная [15–17].

Порт Тикси. Местонахождение морского порта: Республика Саха (Якутия), море Лаптевых, губа Буор-Хая, бухта Тикси. Грузооборот порта более 300 тыс. т. В основном это нефтепродукты, уголь, строительные материалы и продовольствие, предназначенные для населения северных поселков. При перевалке угля и сильном ветре происходит загрязнение атмосферы и территории порта и поселка угольной пылью. На территории и акватории порта много брошенных и полузаброшенных судов [18].

Порт Певек. Местонахождение морского порта: Чукотский автономный округ, г. Певек, Восточно-Сибирское море, Чаунская губа. Через Певек проходит более четверти объема всех поставок на Чукотку. Грузооборот порта составляет более 300 тыс. тонн в год. Основные виды грузов – уголь, песок, щебень, нефтепродукты легких сортов, контейнерные и генеральные грузы для компаний, работающих в Чаун-Билибинском промышленном узле. Экологической проблемой является загрязнение атмосферного воздуха и территории (акватории) порта угольной пылью [19].

Порт Анадырь. Местонахождение: Чукотский автономный округ, Берингово море, Анадырский залив, Анадырский лиман. Анадырь – единственный порт на Чукотке, который осуществляет речные перевозки навалочных, наливных и генеральных грузов в населенные пункты верховья рек Анадырского бассейна. Основные грузы – энергоносители, стройматериалы, продовольствие, генеральные грузы. В 2020 г. грузооборот порта составил 176,5 тыс. т. Большую часть объема переваливаемых грузов занимает уголь – 97 тыс. т; примерно треть, или 57 тыс. т – контейнерные и генеральные грузы; нефтепродукты – 21,9 тыс. т. Экологической проблемой является загрязнение атмосферного воздуха, территории и акватории порта угольной пылью [20].

Порт Провидения. Местонахождение: Чукотский автономный округ, Берингово море, бухта Провидения. Порт расположен у подножия горы. Самый восточный порт России. Основная специализация порта – завоз угля и нефтепродуктов для нужд Чукотки и генеральных грузов, поступающих из порта Владивосток. В 2020 г. в порту Провидения переработано – 26 тыс. т, из них почти половина – уголь, остальное – генеральные грузы и нефтепродукты. Экологической проблемой является загрязнение атмосферного воздуха, территории и акватории порта угольной пылью, а также загрязнение акватории порта нефтепродуктами и сточными водами [21].

Порт Эгвекино́т. Местонахождение: Чукотский автономный округ, п. Эгвекино́т, Берингово море, Залив Креста. Порт расположен у подножия горы. Средние показатели грузооборота порта Эгвекино́т сохраняются на уровне порядка 100 тыс. т в год. Основную долю грузов занимает ввозимый для нужд электростанции бурый уголь из Анадыря. Колебания грузооборота в основном связаны с потребностями Эгвекино́тской ГРЭС – единственным источником электроэнергии для ближайших населенных пунктов и приисков. Примерно четверть грузооборота занимают генеральные грузы и менее десятой части – наливные: дизельное топливо, авиационное топливо и бензин. Генеральные грузы в основном поступают из Владивостока, наливные – из Находки. Наблюдается повышенная зашелоченность территории поселка и порта из-за постоянного выброса в атмосферу продуктов сгорания котельных, работающих на угле. Выщелачивание почвы также происходит из-за окиси кальция, присутствующей в выбросах в атмосферу и из-за шлака на территории поселка и порта. Экологическое состояние атмосферы и акватории порта ухудшается из-за наличия угольной пыли при открытом хранении и перевалке угля [22].

Порт Беринговский. Местонахождение: Чукотский автономный округ, Берингово море, северо-западное побережье бухты Угольная. Порт расположен у подножия сопки. Порт Беринговский – морской порт федерального значения, расположенный в бухте Угольная в северной части Берингова моря на юго-западном берегу Анадырского залива вблизи поселка Беринговский. Беринговский является рейдовым портом. Рейд доступен для захода судов с любой осадкой. Погрузка–разгрузка морских судов происходит на внешнем рейде, имеющимися портовыми перегрузочными средствами. Основным грузом является уголь, отправляемый потребителям Чукотки, Камчатки, КНР и в другие страны АТР. Добыча угля на месторождении «Фандюшкинское поле» производится компанией «Берингпромуголь» – дочерним предприятием австралийской угольной компании Tigers Realm Coal. Также в порту осуществляется обработка в небольших объемах генеральных, лесных, продовольственных и других грузов, необходимых для близлежащих населенных пунктов. Экологическая обстановка в районе порта и поселка из-за наличия большого количества угольной пыли, протекания ливневых и талых вод через территории угольных складов в море, а также попадания угля в воду при его перевалке на рейде является неблагоприятной [23].

Интересно, что в навигацию 2020 г. в морских портах Восточной Арктики (Певек, Анадырь, Провидения, Эгвекино́т, Беринговский), находящихся в зоне ответственности администрации портов, случаев нарушения требований безопасности мореплавания и загрязнения акваторий официально не зафиксировано. Это говорит о том, что либо в этих портах не перегружали уголь и убрали весь мусор, либо лаборатории, проводившие замеры загрязнений атмосферы и акватории, находятся в подчинении администрации портов [24].

Оценка влияния работы портов СМТК на экологическую безопасность

Значительное увеличение спроса на энергоносители, в частности, на уголь в странах Азиатско-Тихоокеанского региона и традиционно в северных населенных пунктах Арктической зоны России привели к тому, что большинство арктических портов по трассе СМТК активно заняты перевалкой угля.

Перевалка угля приводит к ухудшению экологической обстановки как в портах, так и вокруг них, так как в результате открытого хранения, воздействия сильных ветров, открытой перегрузке угля происходит существенное загрязнение атмосферного воздуха угольной пылью, а при ее оседании – к загрязнению территории и акватории порта и близлежащих населенных пунктов.

Существующие угольные терминалы не способствуют созданию нормальных условий для проживания людей, даже на расстоянии до нескольких километров от порта. Однако большинство арктических портов практически расположено в черте населенных пунктов в непосредственной близости от жилых застроек.

Главной опасностью, которую представляет уголь для природы и людей, является угольная пыль, которая при длительном воздействии на организм человека приводит к различным легочным заболеваниям, к развитию бронхитов, пневмонии, бронхиальной астмы, эмфиземы, дерматитов, конъюнктивита и другим, оказывает угнетающее воздействие на нервную, сердечно-сосудистую, пищеварительную системы, приводит к нарушению обмена веществ и снижению защитных функций организма. В силу высокой адсорбционной способности пылевые частицы способны удерживать на своей поверхности молекулы газообразных токсичных веществ, например, оксида и диоксида углерода, которые при попадании в организм человека приводят к его химическому поражению [25].

Арктика является самой хрупкой экосистемой на нашей планете, природа которой восстанавливается чрезвычайно медленно. Например, растительный покров – через несколько десятков или даже сотен лет. Угольная пыль приводит к ускоренному таянию вечной мерзлоты, снежного и ледового покрова. Таким образом, необходим особый подход к решению проблемы сохранения экологической системы Арктики с учетом экстремальных природных условий и высокой уязвимости арктической природы.

В результате свертывания хозяйственной деятельности в 90-е гг. прошлого века в Арктике остались многочисленные объекты, на которых расположены свалки пустых бочек, склады горюче-смазочных материалов и свалки бытовых отходов. При этом происходит разлив нефтепродуктов в результате развивающейся коррозии металлических бочек с попаданием нефтепродуктов в грунт и открытое море. Уровень загрязнения почв территорий отдельных портов достигает до сотен ПДК, а среднее суммарное содержание полициклических ароматических углеводородов (масел, технических жидкостей и т.п.) в 2–8 раз превышает значение допустимых концентраций. При этом ущерб экологии увеличивается в связи с процессами глобального потепления и разрушением вечной мерзлоты, которая частично препятствовала дальнейшему распространению загрязняющих веществ в океан [26, 27].

Практически рядом со всеми действующими арктическими портами или на их территории и акватории находятся часто стихийные свалки бытового и строительного мусора, металлических бочек из-под топлива, автомобильных покрышек, брошенных судов, являющихся источником разнообразного экологического вреда, наносимого почве, воде, растительному и животному миру, в том числе и человеку [28].

Однако уборка территории, рекультивация почвы и вывоз металлического лома и другого мусора, наносящего ущерб флоре и фауне, являются в условиях Арктики экономически затратными мероприятиями, поэтому на местах реальное положение в этой сфере часто замалчивается.

Таким образом, проведенное исследование состояния атмосферы, почвы и акватории портов, наличие вредных веществ (не только угольной пыли), влияющих на экологию северной природы, показало необходимость создания системы постоянного мониторинга и сбора данных о состоянии атмосферы, почвы и воды с помощью различных датчиков и передачи данных в системы хранения и обработки для последующего централизованного управления экологическим состоянием объектов обеспечения экологической безопасности.

Сетецентрическое управления экологической безопасностью СМТК

Основными недостатками существующей системы обеспечения экологической безопасности СМТК являются:

- 1) отсутствие целостной информационной среды управления техносферной безопасностью территорий и акваторий портов СМТК;
- 2) несогласованность децентрализованного принятия решений на разных уровнях иерархии организационного управления экологической безопасностью объектов СМТК;
- 3) жесткое иерархическое управление техносферной безопасностью в условиях распределенности и организационной разнородности участников процессов обеспечения экологической безопасности СМТК.

Централизованное управление экологической безопасностью портов СМТК является малоэффективным в реальных условиях и не обеспечивает нужного эффекта. Аспектов экологической безопасности много и они очень разноплановые. Их необходимо системно рассматривать как единое целое. Проблематики добавляют и региональные особенности, специфичные для каждого отдельно-го арктического региона, в котором размещаются элементы критической инфраструктуры СМТК.

Для предупреждения и смягчения последствий критических ситуаций и угроз экологической безопасности на объектах СМТК необходимо принимать согласованные управленческие решения в очень ограниченное время. Это обстоятельство обуславливает необходимость перехода на модель сетецентрического управления экологической безопасностью объектов критической инфраструктуры СМТК. Для этого необходимо, с одной стороны, отказаться от закрытых иерархических структур управления техносферной безопасностью с жесткими организационными связями и централизованным управлением и осуществить переход к открытым сетевым виртуальным организационным структурам с гибкими связями и децентрализованным управлением, а, с другой стороны, сформировать единое информационное поле для принятия согласованных управленческих решений в условиях децентрализованного управления безопасностью. Сетецентрический подход адекватно отражает реальную природу управления сложными эколого-экономическими и транспортными системами и учитывает при этом децентрализованный характер процессов обеспечения экологической безопасности СМТК, как по функциональной структуре, так и по составу участников.

Транспортная инфраструктура СМТК представляет собой сетецентрическую систему взаимосвязанных арктических портов и логистических узлов для перевозки, временного хранения и перевалки грузов. Управление транспортной, экологической и связанными с ними видами безопасности критической инфраструктуры СМТК осуществляется с применением комплексных аварийно-спасательных центров МЧС России, центров мониторинга обстановки и региональных ситуационных центров, имеющих собственные зоны ответственности и сферы интересов.

Эффективным средством реализации сетецентрического управления экологической и другими видами безопасности СМТК в условиях возникновения разнотипных критических ситуаций социально-экономического, техногенного и природного характера является система распределенных ситуационных центров [29] – центров управления и поддержки принятия решений.

Таким образом, сетецентрическое управление экологической безопасностью СМТК заключается в реализации сетевой структуры организационного управления объектами критической инфраструктуры СМТК с выделенными управляющими ситуационными центрами, имеющими свои зоны ответственности и взаимодействующими между собой посредством их интеграции в единое региональное информационное пространство.

Для повышения экологической устойчивости объектов критической инфраструктуры СМТК к изменениям условий их функционирования в ходе исследований предложена адаптация метода ситуационного управления структурой и параметрами промышленно-природных сетецентрических систем [30], разработанного в Институте информатики и математического моделирования им. В. А. Путилова ФИЦ «Кольский научный центр РАН». Метод основан на получении и анализе числовых оценок ситуационной осведомленности лиц, принимающих решения, ответственных за работу критически важных объектов этих систем. Отличительной особенностью данного метода является автоматическое назначение координаторов и формирование их зон ответственности в виде областей локальных максимумов текущих значений оценок ситуационной осведомленности. Переформирование зон осуществляется при диагностировании быстрой деградации оценки осведомленности для какого-либо из координаторов. Концептуальная схема оперативного формирования зон ответственности (ЗО) лиц, принимающих решения (ЛПР), в модели сетецентрического управления экологической безопасностью объектов критической инфраструктуры СМТК представлена на рис. 2.

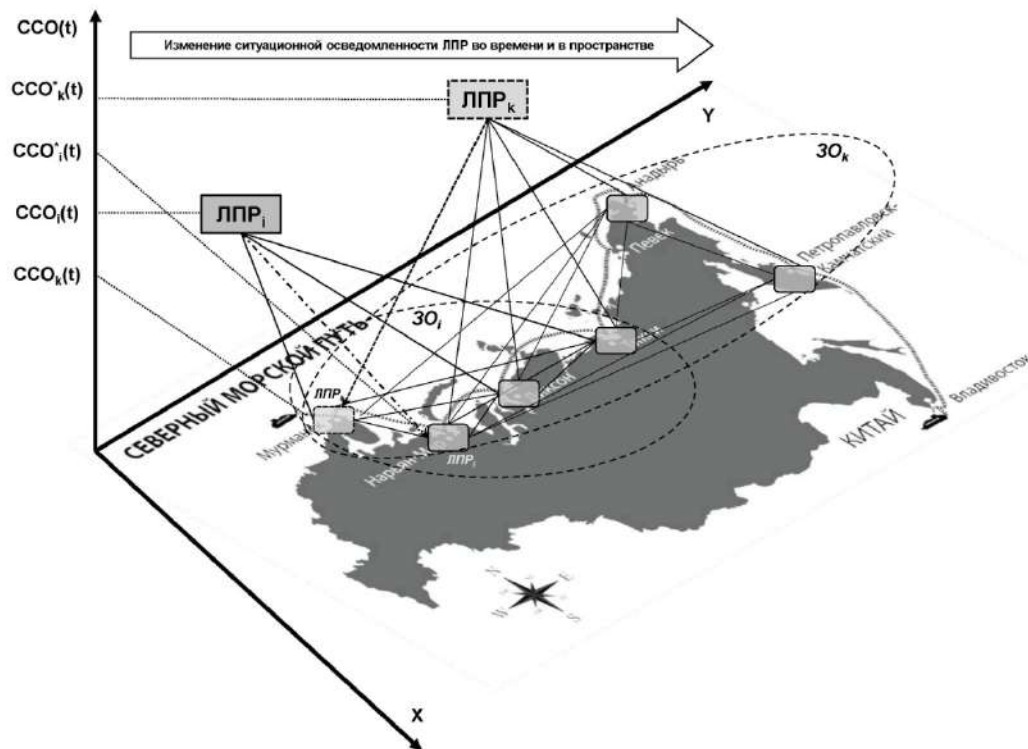


Рис. 2. Общая схема оперативного формирования зон ответственности лиц, принимающих решения, в сетевцентрической системе СМТК: ССО – степень ситуационной осведомленности

В общем случае степень ситуационной осведомленности определяется соотношением между мощностями множества входной информации (ресурсов) зоны ответственности лица, принимающего решения, изменяющейся без его участия; множества выходной информации и ресурсов, подконтрольных этому управляющему субъекту, и их долей в общем количестве информации и ресурсов, существенных для функционирования объекта управления или всей сетевцентрической системы в целом [31]. Эти соотношения позволяют объективно оценить важность решений данного субъекта управления и учитывать эту важность при поиске баланса интересов всех лиц, принимающих решения в сетевцентрической системе и влияющих на характеристики отдельного объекта управления или совокупности объектов (системы).

В рамках применения метода [30] для поддержки адаптивного управления структурой и параметрами взаимосвязанных объектов (арктических портов) критической инфраструктуры СМТК предлагается формализовать транспортную сетевцентрическую систему СМТК как функционально-территориальную сеть, каждый узел (вершина) в которой имеет свою цель, задаваемую некоторым критерием качества. Все иерархические связи «скрываются» во внутренней структуре узлов. В зависимости от сложившейся ситуации любой узел сети может стать центром некоторой связанной части или всей системы в целом, в таком случае он получает право и возможность координировать взаимодействия узлов, вошедших в его зону ответственности. При этом могут быть совместно использованы известные модели и методы координации [32], например, градиентные или игровые. Изначально сеть является пиринговой (одноранговой) не только и не столько в чисто сетевом смысле этого термина, сколько в равноправии узлов в плане принятия решений. В ходе работы такой сетевцентрической системы ранги узлов меняются в зависимости от количества подведомственных им узлов.

При реализации метода использованы следующие числовые оценки ситуационной осведомленности и трех ее основных уровней для каждого лица, принимающего решения, влияющего на работу сетевцентрической системы [31, 33]:

1) степень восприятия окружающей среды (I^{ER}) – отношение количества контролируемых i -м лицом, принимающим решения, ресурсов к количеству ресурсов, влияющих на его зону ответственности ($ЗО_i$);

2) степень понимания ситуации (I^{SU}) – мера близости состояния $ЗО$ к идеальному, зависит от вектора невязок собственных критериев качества работы $ЗО_i$ и вектора невязок входных ресурсов $ЗО_i$;

3) степень прогноза будущего (I^{FU}) – мера скорости изменения ситуации в $3O_i$.

Значения числовых оценок степени ситуационной осведомленности и каждой из ее компонент характеризуются неотрицательным числом с максимальным значением 1, т.е. все оценки меняются в диапазоне от 0 до 1.

Формальная модель степени ситуационной осведомленности лица, принимающего решения, в общем случае имеет вид [33]

$$I^{SA} = I^{ER} \times I^{SU} \times I^{FU},$$

$$I^{ER} = \frac{n}{n+m}, I^{SU} = \frac{2 - \delta a^{own} - \delta a^{in}}{2 - (\delta a^{own})^2 - (\delta a^{in})^2}, I^{FU} = 1 - e^{-\tilde{T}}, T = \frac{\alpha}{\Phi |\Lambda \Phi|},$$

где I^{ER} – степень восприятия окружающей среды, равная отношению количества контролируемых лицом, принимающим решение, ресурсов к общему количеству ресурсов, влияющих на его зону ответственности; I^{SU} – степень понимания ситуации или процесс синтеза элементов I^{ER} (мера близости текущего состояния управляемых объектов к идеальному); I^{FU} – степень прогноза будущего состояния объектов управления, которая определяется скоростью изменения ситуации в зоне ответственности субъекта управления; n – количество входных ресурсов в зоне ответственности лица, принимающего решения; m – количество вырабатываемых им ресурсов; $\delta a^{own} = \sqrt{\sum_{j=1}^n \delta a_j^2}$ – век-

тор невязок собственных критериев качества работы субъекта управления; $\delta a^{in} = \sqrt{\sum_{k=1}^m \delta a_k^2}$ – вектор невязок входных ресурсов субъекта управления; Φ – критерий качества работы субъекта управления; T – интервал достоверного прогноза; $\tilde{T}$ – сглаженное значение T ; α – параметр, задающий временную динамику функционирования субъекта управления, то есть изменение его зоны ответственности в процессе принятия решений, $\alpha > 0$.

Согласно работе [31] необходимо учитывать асимптотические свойства компонентов модели ситуационной осведомленности, а именно:

– для I^{SU} : при $\delta a^{own} \rightarrow 0$ и $\delta a^{in} \rightarrow 0$ $I^{SU} \rightarrow 1$; при $\delta a^{own} \gg 1$ $I^{SU} \rightarrow 0$; при $\delta a^{in} \gg 1$ $I^{SU} \rightarrow 0$;
 – для I^{FU} : при $\Phi \rightarrow 0$ и $\Lambda \Phi \rightarrow 0$ $I^{FU} \rightarrow 1$, $T \rightarrow \infty$; при $|\Lambda \Phi| \rightarrow \infty$ $I^{FU} \rightarrow 0$, $T \rightarrow 0$; при $\Phi \gg 1$ $I^{FU} \rightarrow 0$, $T \rightarrow 0$.

Совместно с приведенными числовыми метриками ситуационной осведомленности могут применяться и другие известные виды оценок и их комбинации.

Предложенная концептуальная схема проблемного мониторинга и оперативного формирования ситуационной осведомленности лиц, принимающих решения, об угрозах экологической безопасности и параметрах функционирования арктических портов для реализации модели сетецентрического управления критической инфраструктурой СМТК обеспечивает улучшение координируемости критически важных объектов СМТК на различных уровнях организационного управления.

Заключение

Все порты по маршруту СМТК, занимающиеся перевалкой экологически опасных грузов, небрежное обращение с которыми представляет опасность для флоры и фауны, являются источниками реальной экологической угрозы хрупкой северной природе Арктики.

Наиболее заметной и вызывающей наибольшие опасения и жалобы жителей населенных пунктов, расположенных вблизи морских портов, является перевалка угля и сопровождающая ее угольная пыль.

В целях уменьшения вредного воздействия угольной пыли на человека и экологию необходимо принятие следующих практических мер: обеспечение регулярного смачивания и поддержания необходимого уровня влажности в местах хранения запасов угля; строительство на территории портов крытых складов и закрытых погрузочных средств для подачи угля в трюмы сухогрузов; осуществление регулярных проверок лабораториями, независимыми от администраций портов, почвы, атмосферы и акватории на наличие угольной пыли и других вредных веществ.

Для контроля и управления экологической безопасностью на территории и акватории портов необходимо создание системы постоянного мониторинга и сбора данных о наличии вредных веществ в атмосфере, почве и воде с помощью различных датчиков и передачи экологических данных в системы хранения и обработки для последующего централизованного управления экологическим состоянием объектов обеспечения экологической безопасности.

Сетецентрический подход к организации обеспечения экологической безопасности и поддержания устойчивого функционирования объектов критической инфраструктуры СМТК в динамически меняющихся условиях обстановки позволяет повысить качество управления структурой и параметрами этих объектов на разных уровнях принятия решений, а также эффективность реализации государственной политики в сфере охраны окружающей среды на Арктическом региональном направлении. Для получения комплексного эффекта на практике необходимо обеспечить оперативное формирование ситуационной осведомленности лиц, принимающих решения, и координацию их деятельности согласно их зонам ответственности и сферам интересов. Такой эффект достигается за счет авторских теоретических разработок.

Результаты работы смогут найти применение для информационно-аналитической поддержки региональных ситуационных центров, ответственных за работу составных частей (портов и узлов) сетецентрической транспортной инфраструктуры Северного морского пути, в части решения задач обеспечения экологической и других видов безопасности в Арктике.

Список литературы

1. Северный морской путь. Итоги 2020 года. Макеты инфографики // РОСАТОМ. М., 2021. 24 с. URL: <https://arctic.gov.ru/wp-content/uploads/2021/02/2020.pdf> (дата обращения: 19.04.2021).
2. Грузооборот Севморпути в 2021 году: рост сверх ожиданий. URL: <https://arctic-russia.ru/article/gruzooborot-sevmorputi-v-2021-godu-rost-sverkh-ozhidaniy/> (дата обращения: 15.06.2022).
3. Гурлев И. В., Макоско А. А., Малыгин И. Г. Анализ состояния и развития транспортной системы Северного морского пути // Арктика: экология и экономика. 2022. № 2. С. 258–270.
4. Гурлев И. В., Малыгин И. Г., Маслобоев А. В. Северный морской транспортный коридор как угроза экологии Арктики // Труды Института системного анализа РАН. 2022. Т. 72, № 4. С. 82–95.
5. Знаете, сколько портов в Арктике у России? URL: <https://zen.yandex.ru/media/logistics/znaete-skolko-portov-v-arktike-u-rossii-5fa5af2bb1fbcf2e23f5099b> (дата обращения: 05.08.2021).
6. Интернет-бюллетень. Загрязнение акватории и районов морских портов Российской Федерации в 2020 г. URL: http://xn--c1akpc.xn--p1ai/lmz-docs/ports_20.pdf (дата обращения: 08.09.2022).
7. Архангельск – порт круглогодичной навигации // Морские порты. 2020. № 1. URL: <http://www.morvesti.ru/analitika/1688/84878/> (дата обращения: 28.08.2022).
8. Новая жизнь Белого моря. Порт Витино: открыть заново. URL: <https://arctic-russia.ru/project/novaya-zhizn-belogo-morya/> (дата обращения: 02.09.2022).
9. Служба капитана порта Онега на страже безопасности и порядка // Морские порты. 2020. № 10. URL: <http://www.morvesti.ru/analitika/1688/88222/> (дата обращения: 08.09.2022).
10. Порт Мезень: Северный завоз как жизненная необходимость // Морские порты. 2018. № 3. URL: <http://www.morvesti.ru/analitika/1692/72216/> (дата обращения: 05.09.2022).
11. Порт Варандей – уникальный центр перевалки нефти в Арктике // Морские порты. 2021. № 4. URL: <http://www.morvesti.ru/analitika/1688/90572/> (дата обращения: 06.09.2022).
12. Мискевич И. В., Деменков О. В. Оценка влияния хозяйственной деятельности в районе острова Варандей на геоэкологическую ситуацию в Печорском море // Успехи современного естествознания. 2021. № 5. С. 88–93.
13. Порт Нарьян-Мар с терминалом Амдерма нужен Севморпути // Морские порты. 2019. № 8. URL: <http://www.morvesti.ru/analitika/1688/82402/> (дата обращения: 30.08.2022).
14. Порт Сабетта растет вширь и вглубь // Морские порты. 2020. № 9. URL: <http://www.morvesti.ru/exclusive/88221/> (дата обращения: 02.09.2022).
15. Генеральная схема санитарной очистки муниципальных образований Красноярского края. Кн. 2. Раздел 2. СПб.: ООО «ИПЭиГ», 2015. 220 с.
16. Хатангский морской торговый порт. URL: <http://my.krskstate.ru/docs/infrasrtucture/khatangskiy-morskoy-torgovu-port/> (дата обращения: 07.09.2022).
17. Хатанга – река, арктический поселок и морской порт // Морские порты. 2016. № 6. URL: <http://www.morvesti.ru/analitika/1688/63207/> (дата обращения: 07.09.2022).
18. Порт Тикси – новый арктический рубеж // Морские порты. 2019. № 7. URL: <http://www.morvesti.ru/exclusive/81615/> (дата обращения: 05.09.2022).

19. Морской порт Певек – опорный пункт системы безопасности мореплавания в Арктике // Морские порты. 2017. № 9. URL: <http://www.morvesti.ru/exclusive/72276/> (дата обращения: 04.09.2022).
20. Порт Анадырь – в госпрограммах развития Чукотки // Морские порты. 2021. № 2. URL: <http://www.morvesti.ru/analitika/1688/89497/> (дата обращения: 06.09.2022).
21. Морской порт Провидения – нетронутая жемчужина Арктики // Морские порты. 2021. № 8. URL: <http://www.morvesti.ru/analitika/1688/93357/> (дата обращения: 02.09.2022).
22. Порт Эгвекинот намерен увеличить грузооборот по итогам года на треть // Морские порты. 2020. № 6. URL: <http://www.morvesti.ru/news/1679/86035/> (дата обращения: 31.08.2022).
23. Топ «Беринговский» даст Чукотке первый круглогодичный порт // Морские порты. 2018. № 2. URL: <http://www.morvesti.ru/analitika/1692/71616/> (дата обращения: 06.09.2022).
24. Навигация-2020 закрыта во всех портах Чукотки. URL: <https://lenoblast.bezformata.com/listnews/2020-zakrita-vo-vseh-portah/89531978/> (дата обращения: 10.09.2022).
25. Юркова А. А. Влияние угольной пыли на экологию // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2020. № 3-1. С. 11–13.
26. Паспорт Федеральной целевой программы «Ликвидация накопленного экологического ущерба» на 2014–2025 годы. М. : Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, 2013. 47 с.
27. Гребенец В. И., Толманов В. А., Хайрединова А. Г., Юров Ф. Д. Проблема размещения отходов в арктических регионах России // Проблемы региональной экологии. 2019. № 3. С. 63–67.
28. Васильков В. С., Яшалова Н. Н., Новиков А. В. Климатические и экологические риски развития прибрежных арктических территорий // Арктика: экология и экономика. 2021. № 3. С. 341–352.
29. Зацаринный А. А., Сучков А. П. Информационное взаимодействие в распределенных системах ситуационного управления. М. : ТОРУС ПРЕСС, 2021. 268 с.
30. Фридман А. Я., Кулик Б. А. Когнитивный подход к оценке ситуационной осведомленности в сетевых системах гражданского назначения // Гибридные и синергетические интеллектуальные системы: материалы V Всероссийской Поспеловской конференции с международным участием / под ред. А. В. Колесникова. Калининград : Издательство БФУ им. И. Канта, 2020. С. 489–497.
31. Кулик Б. А., Фридман А. Я. Количественная оценка ситуационной осведомленности в системе концептуального моделирования // Системный анализ в проектировании и управлении: тр. XXIII Междунар. науч. конф. СПб. : СПбПУ, 2019. С. 449–460.
32. Михайлов Р. Л. Анализ научно-методического аппарата теории координации и его использования в различных областях исследований // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 4. С. 1–30.
33. Маслобоев А. В., Цыгичко В. Н. Анализ информационной структуры и конфигурирование систем поддержки принятия решений региональных ситуационных центров // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 2. С. 68–84.

References

1. The Northern Sea Route. Results of 2020. Layouts of infographics. ROSATOM. Moscow, 2021:24. (In Russ.). Available at: <https://arctic.gov.ru/wp-content/uploads/2021/02/2020.pdf> (accessed 19.04.2021).
2. *Gruzooborot Sevmorputi v 2021 godu: rost sverkh ozhidaniy = Cargo turnover of the Northern Sea Route in 2021: growth beyond expectations.* (In Russ.). Available at: <https://arctic-russia.ru/article/gruzooborot-sevmorputi-v-2021-godu-rost-sverkh-ozhidaniy/> (accessed 15.06.2022).
3. Gurlev I.V., Makosko A.A., Malygin I.G. Analysis of the state and development of the transport system of the Northern Sea Route. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: ecology and economics*. 2022;(2):258–270. (In Russ.)
4. Gurlev I.V., Malygin I.G., Masloboev A.V. The Northern Sea transport corridor as a threat to the Arctic ecology. *Trudy Instituta sistemnogo analiza RAN = Proceedings of the Institute of System Analysis of the Russian Academy of Sciences*. 2022;72(4):82–95. (In Russ.)
5. *Znaete, skol'ko portov v Arktike u Rossii? = Do you know how many ports in the Arctic Russia has?* (In Russ.). Available at: <https://zen.yandex.ru/media/logistics/znaete-skolko-portov-v-arktike-u-rossii-5fa5af2bb1fbcf2e23f5099b> (accessed 05.08.2021).
6. *Internet-byulleten'. Zagryaznenie akvatorii i rayonov morskikh portov Rossiyskoy Federatsii v 2020 g. = Internet bulletin. Pollution of the water area and areas of seaports of the Russian Federation in 2020.* (In Russ.). Available at: http://xn--c1akpc.xn--p1ai/lmz-docs/ports_20.pdf (accessed 08.09.2022).
7. Arkhangelsk is a year-round navigation port. *Morskie porty = Seaports*. 2020;(1). (In Russ.). Available at: <http://www.morvesti.ru/analitika/1688/84878/> (accessed 28.08.2022).
8. *Novaya zhizn' Belogo Morya. Port Vitino: otkryt' zanovo = New Life of the White Sea. Vitino port: reopen.* (In Russ.). Available at: <https://arctic-russia.ru/project/novaya-zhizn-belogo-morya/> (accessed 02.09.2022).
9. The service of the captain of the port of Onega on the guard of security and order. *Morskie porty = Seaports*. 2020;(10). (In Russ.). Available at: <http://www.morvesti.ru/analitika/1688/88222/> (accessed 08.09.2022).

10. Port of Mezen: Northern delivery as a vital necessity. *Morskie porty = Seaports*. 2018;(3). (In Russ.). Available at: <http://www.morvesti.ru/analitika/1692/72216/> (accessed 05.09.2022).
11. The port of Varandey is a unique center of oil transshipment in the Arctic. *Morskie porty = Seaports*. 2021;(4). (In Russ.). Available at: <http://www.morvesti.ru/analitika/1688/90572/> (accessed 06.09.2022).
12. Miskevich I.V., Demenkov O.V. Assessment of the impact of economic activity in the area of Varandey Island on the geoecological situation in the Pechora Sea. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Successes of modern natural science*. 2021;(5):88–93. (In Russ.)
13. Naryan-Mar port with Amderma terminal on the Northern Sea Route. *Morskie porty = Seaports*. 2019;(8). (In Russ.). Available at: <http://www.morvesti.ru/analitika/1688/82402/> (accessed 30.08.2022).
14. The port of Sabetta is growing in breadth and depth. *Morskie porty = Seaports*. 2020;(9). (In Russ.). Available at: <http://www.morvesti.ru/exclusive/88221/> (accessed 02.09.2022).
15. *General'naya skhema sanitarnoy ochistki munitsipal'nykh obrazovaniy Krasnoyarskogo kraya. Kn. 2. Razdel 2 = General scheme of sanitary cleaning of municipalities of the Krasnoyarsk Territory. Book 2. Section 2*. Saint Petersburg: OOO «IPEiG», 2015:220. (In Russ.)
16. *Khatangskiy morskoy trgovyy port = Khatanga Commercial Sea Port*. (In Russ.). Available at: <http://my.krskstate.ru/docs/infrastructure/khatangskiy-morskoy-torgovyy-port/> (accessed 07.09.2022).
17. Khatanga – river, Arctic settlement and seaport. *Morskie porty = Seaports*. 2016;(6). (In Russ.). Available at: <http://www.morvesti.ru/analitika/1688/63207/> (accessed 07.09.2022).
18. Tiksi Port – new Arctic frontier. *Morskie porty = Seaports*. 2019;(7). (In Russ.). Available at: <http://www.morvesti.ru/exclusive/81615/> (accessed 05.09.2022).
19. The seaport of Pevek is a strong point of the navigation safety system in the Arctic. *Morskie porty = Seaports*. 2017;(9). (In Russ.). Available at: <http://www.morvesti.ru/exclusive/72276/> (accessed 04.09.2022).
20. The port of Anadyr – in the state programs of development of Chukotka. *Morskie porty = Seaports*. 2021;(2). (In Russ.). Available at: <http://www.morvesti.ru/analitika/1688/89497/> (accessed 06.09.2022).
21. Providence Seaport is an untouched pearl of the Arctic. *Morskie porty = Seaports*. 2021;(8). (In Russ.). Available at: <http://www.morvesti.ru/analitika/1688/93357/> (accessed 02.09.2022).
22. Egvekinot port intends to increase cargo turnover by a third by the end of the year. *Morskie porty = Seaports*. 2020;(6). (In Russ.). Available at: <http://www.morvesti.ru/news/1679/86035/> (accessed 31.08.2022).
23. The Beringovskiy TOR will give Chukotka the first year-round port. *Morskie porty = Seaports*. 2018;(2). (In Russ.). Available at: <http://www.morvesti.ru/analitika/1692/71616/> (accessed 06.09.2022).
24. *Navigatsiya-2020 zakryta vo vseh portakh Chukotki = Navigation 2020 is closed in all ports of Chukotka*. (In Russ.). Available at: <https://lenoblast.bezformata.com/listnews/2020-zakrita-vo-vseh-portah/89531978/> (accessed 10.09.2022).
25. Yurkova A.A. The influence of coal dust on ecology. *Mezhdunarodnyy zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk = International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2020;(3-1):11–13. (In Russ.)
26. *Pasport Federal'noy tselevoy programmy «Likvidatsiya nakoplennoy ekologicheskogo ushcherba» na 2014–2025 gody = Passport of the Federal Target program "Elimination of accumulated environmental damage" for 2014–2025*. Moscow: Ministerstvo prirodnnykh resursov i ekologii Rossiyskoy Federatsii, 2013:47. (In Russ.)
27. Grebenets V.I., Tolmanov V.A., Khayredinova A.G., Yurov F.D. The problem of waste disposal in the Arctic regions of Russia. *Problemy regional'noy ekologii = Problems of regional ecology*. 2019;(3):63–67. (In Russ.)
28. Vasil'kov V.S., Yashalova N.N., Novikov A.V. Climatic and environmental risks of the development of coastal Arctic territories. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: ecology and economics*. 2021;(3):341–352. (In Russ.)
29. Zatsarinnyy A.A., Suchkov A.P. *Informatsionnoe vzaimodeystvie v raspredelennykh sistemakh situatsionnogo upravleniya = Information interaction in distributed situational control systems*. Moscow: TORUS PRESS, 2021:268. (In Russ.)
30. Fridman A.Ya., Kulik B.A. Cognitive approach to assessing situational awareness in network-centric systems of civil purpose. *Gibridnye i sinergeticheskie intellektual'nye sistemy: materialy V Vserossiyskoy Pospelovskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem = Hybrid and synergetic intelligent systems: materials of the V All-Russian Pospelovskaya Conference with international participation*. Kaliningrad: Izdatel'stvo BFU im. I. Kanta, 2020:489–497. (In Russ.)
31. Kulik B.A., Fridman A.Ya. Quantitative assessment of situational awareness in the conceptual modeling system. *Sistemnyy analiz v proektirovanii i upravlenii: tr. XXIII Mezhdunar. nauch. konf. = System analysis in design and management: Proceedings of the XXIII International scientific conference*. Saint Petersburg: SPbPU, 2019:449–460. (In Russ.)
32. Mikhaylov R.L. Analysis of the scientific and methodological apparatus of the theory of coordination and its use in various fields of research. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti = Control systems, communications and security*. 2016;(4):1–30. (In Russ.)
33. Masloboev A.V., Tsygichko V.N. Analysis of the information structure and configuration of decision support systems of regional situational centers. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(2):68–84. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Игорь Валентинович Гурлев

доктор технических наук,
старший научный сотрудник,
ведущий научный сотрудник лаборатории
проблем организации транспортных систем,
Институт проблем транспорта имени Н. С. Соломенко
Российской академии наук
(Россия, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, 13)
E-mail: gurleff@mail.ru

Андрей Владимирович Маслобоев

доктор технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник,
заведующий лабораторией информационных
технологий управления региональным развитием,
Институт информатики и математического
моделирования имени В. А. Путилова
Федерального исследовательского центра
«Кольский научный центр Российской академии наук»
(Россия, г. Апатиты, ул. Ферсмана, 14)
E-mail: masloboev@iimm.ru

Игорь Геннадьевич Малыгин

доктор технических наук, профессор, директор,
Институт проблем транспорта имени Н. С. Соломенко
Российской академии наук
(Россия, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, 13)
E-mail: malygin_com@mail.ru

Igor V. Gurlev

Doctor of technical sciences, senior researcher,
leading researcher of laboratory
of the transport systems organization,
Solomenko Institute of Transport Problems
of the Russian Academy of Sciences
(13 12-th Line VO, St. Petersburg, Russia)

Andrey V. Masloboev

Doctor of technical sciences, associate professor,
leading researcher, head of the laboratory
of information technologies
for regional development management,
Putilov Institute for Informatics and Mathematical
Modeling of the Federal Research Centre
"Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences"
(14 Fersmana street, Apatity, Russia)

Igor G. Malygin

Doctor of technical sciences, professor, director,
Solomenko Institute of Transport Problems
of the Russian Academy of Sciences
(13 12-th Line VO, St. Petersburg, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 28.02.2022

Поступила после рецензирования/Revised 30.03.2022

Принята к публикации/Accepted 18.04.2022

ОЦЕНКА И ОПТИМИЗАЦИЯ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ РЕСУРСАМИ СТРАТЕГИЙ РАЗВИТИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА В РОССИИ В УСЛОВИЯХ РЫНОЧНОЙ ЭКОНОМИКИ

Е. А. Воронин

Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление»
Российской академии наук, Москва, Россия
e.voronin1@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Предложены и разработаны математические методы оценки и оптимизации обеспеченности ресурсами стратегий пространственного развития отдельных отраслей сельского хозяйства в России в условиях рыночной экономики. *Материалы и методы.* В их основу положен вероятностный подход к оценке обеспеченности ресурсами стратегий развития и методы теории оптимального управления распределением финансовых ресурсов и нагрузки на природные ресурсы с учетом их случайного характера. *Результаты и выводы.* Полученные результаты позволяют повысить надежность и качество принимаемых стратегий развития отраслей промышленности и сельского хозяйства в условиях рыночной экономики.

Ключевые слова: экономика, развитие, стратегии, управление, ресурсы, оптимизация, сельское хозяйство, финансы, оптимизация, вероятность, прибыль

Для цитирования: Воронин Е. А. Оценка и оптимизация обеспеченности ресурсами стратегий развития отдельных отраслей промышленности и сельского хозяйства в России в условиях рыночной экономики // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 4. С. 135–142. doi:10.21685/2307-4205-2022-4-14

EVALUATION AND OPTIMIZATION OF RESOURCE ENDOWMENT STRATEGIES FOR THE DEVELOPMENT OF INDIVIDUAL INDUSTRIES AND AGRICULTURE IN RUSSIA IN A MARKET ECONOMY

E.A. Voronin

Federal Research Centre "Computer Sciences and Control" of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
e.voronin1@gmail.com

Abstract. *Background.* The paper proposes and develops mathematical methods for assessing and optimizing the resource endowment of strategies for the spatial development of individual sectors of agriculture in Russia in a market economy. *Materials and methods.* They are based on a probabilistic approach to assessing the availability of resources for development strategies and methods of the theory of optimal management of the distribution of financial resources and the pressure on natural resources, taking into account their random nature. *Results and conclusions.* The results obtained will improve the reliability and quality of the adopted strategies for the development of industries and agriculture in a market economy.

Keywords: economics, development, strategies, management, resources, optimization, agriculture, finance, optimization, probability, profit

For citation: Voronin E.A. Evaluation and optimization of resource endowment strategies for the development of individual industries and agriculture in Russia in a market economy. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(4):135–142. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-4-14

Введение

Выбор стратегии развития – сложная многоэтапная задача. Она решается на всех уровнях экономики сельского хозяйства [1]: федеральном [1], региональном [1, 2], муниципальном [3] и отдельного предприятия [4].

Любая из этих стратегий выбирается, строится и реализуется по схеме (рис. 1) [3, 4].



Рис. 1. Этапы разработки и реализации стратегий развития

Известно, что большинство провалов стратегий развития было в основном из-за неправильно или недостаточного обеспечения ресурсами. Это – финансовые ресурсы, материальные ресурсы, людские ресурсы, социальные ресурсы, а для сельского хозяйства – природные ресурсы. Поэтому правильный подбор видов и структуры ресурсов на этапе планирования является главной проблемой и задачей [1].

В условиях рыночной экономики она стала актуальной и сложной из-за случайного характера их объемов и качества при наличии всякого рода санкций и ограничений в настоящее время. В сельском хозяйстве природные ресурсы имели и имеют случайный характер в пространстве и времени.

Необходимо это учитывать при выборе стратегий развития регионов АПК, технологий и видов хозяйственной деятельности, взяв за основу вероятностный подход и соответствующие методики математического моделирования и прогнозирования их результатов.

Исходя из этого была поставлена задача выбора объемов и структуры ресурсов для реализации стратегий пространственного развития отдельных отраслей промышленности и регионов сельского хозяйства России в условиях рыночной экономики при случайном характере доступных объемов финансовых, материальных и природных ресурсов.

Материалы и методы

В методических подходах и практике задача выбора оптимальной стратегии развития решалась и решается методами теории игр [5, 6].

До настоящего времени при недостаточном количестве необходимой статистической информации она решается табличным способом, при допущении полной неопределенности [5] по правилу Вальда

$$C = \min_j \max_i A_{ij}, \quad (1)$$

где A_{ij} – убытки при этой стратегии.

Или по правилу Сэвиджа

$$C = \min_j \max_i (A_{ij} - \min_j A_{ij}). \quad (2)$$

Однако в условиях широкой цифровизации сельского хозяйства и наличия достаточного объема статистических данных наиболее адекватным будет вероятностный подход [6]. Он позволяет получать более достоверные оценки принимаемых решений.

Если учесть, что выбор и комплектация ресурсов проводятся по данным случайного характера, то эту задачу можно свести к задаче оценки вероятности реализуемости стратегии.

Для этого достаточно ввести показатель вероятности комплектации стратегии необходимым набором ресурсов, обозначив его как $P_0 = P(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$, где x_i – объем необходимого ресурса.

Тогда критерием успешности реализации стратегии в ресурсном варианте будет иметь вид

$$P(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) \geq P_0, \quad (3)$$

т.е. вероятность успешной комплектации стратегии ресурсами должна быть больше или равной заданной, предварительно обоснованной по соответствующей методике.

Множество $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ характеризует основные свойства стратегии развития, а его элементы взаимосвязаны технологией реализации.

С некоторым допущением можно считать, что в условиях рыночной экономики доступность одного ресурса не зависит от доступности другого ресурса, т.е.

$$P(x_i \cap x_j) = P(x_i)P(x_j). \quad (4)$$

Доступность ресурса в вероятностном пространстве можно представить в виде соответствующей функции распределения $F(x_i) = P(x_i < X)$ или ее плотности распределения $f(x_i) = \frac{dF(x_i)}{dx_i}$.

При этом вероятность гарантированной доступности ресурса будет определяться как вероятность получения ресурса больше или равного требуемого объема x_{i0} , т.е.

$$P(x_i) = P(x_i \geq x_{i0}) = \int_{x_{i0}}^{\infty} f(x_i) dx_i = 1 - F(x_i). \quad (5)$$

Исходя из определений (4) и (5) вероятность реализации стратегии по выбранному набору необходимых ресурсов будет вычисляться по формуле

$$P(x_1, x_2 \dots x_i \dots x_n) = P(x_1)P(x_2) \dots P(x_n) = \prod_i P(x_i). \quad (6)$$

Особую роль при освоении и развитии аграрных территорий играет наличие и доступность природных и финансовых ресурсов.

Под доступностью природных ресурсов понимаются урожайность земельных угодий, лесов, лугов и водоемов, полезных ископаемых (газ, нефть, руда). Ее математически можно определить как вероятность получения заданного объема продукции с единицы площади или с единицы объекта животноводства, в виде функции распределения $F(x)$ или ее плотности распределения $f(x)$. Они находятся по результатам предварительных наблюдений или экспериментов известными методами математической статистики и теории вероятностей [7].

В рыночной экономике финансовым источником развития, по определению, может быть рынок капитала и частные инвесторы.

Наличие и величина финансовых ресурсов θ при этом определяется как вероятность привлечения частного капитала к проекту развития, представляемая в виде функции распределения. Многочисленными исследованиями установлено, что они имеют специфический характер степенного закона $f(\theta) = a\theta^{-k}$ или распределения Парето [8–10]. Для развивающихся экономических систем с синергетическими и фрактальными особенностями наблюдаются такие же закономерности (рис. 2) [11, 12].

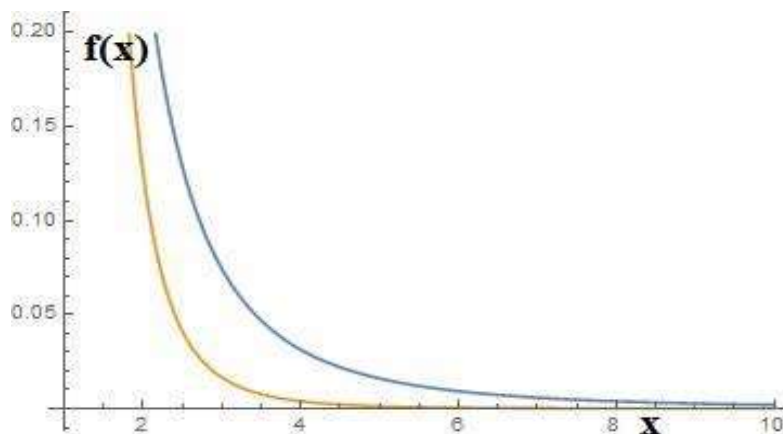


Рис. 2. Степенные функции плотности распределения вероятностей

Если известна или экспериментально установлена функция распределения доступных финансовых ресурсов, как $F(\theta) = P(\theta < \theta)$, то доступность необходимых финансовых ресурсов определяется из соотношения

$$P(\theta) = \int_{\theta}^{\infty} f(\theta) d\theta = 1 - F(\theta). \quad (7)$$

Часто возникает задача получения функции распределения капитала или природных ресурсов, когда имеются два источника одного и того же ресурса, но с разными распределениями вероятностей $F_1(x)$ и $F_2(x)$ необходимо найти функцию суммарного распределения ресурса, т.е. распределение суммы двух случайных величин.

Она находится из следующего выражения [7]:

$$f(y) = \int_0^{\infty} f_1(x) f_2(y-x) dx, \quad (8)$$

где $f_1(x)$ – функция плотности распределения для первого объекта; $f_2(y-x)$ – функция плотности распределения вероятностей для второго объекта; y – суммарный объем ресурсов для двух источников.

Не всегда удастся получить свертку некоторых распределений, т.е. получить интеграл (8) в аналитическом виде. Эта проблема решается методом Монте-Карло путем генерации двух выборок по сворачиваемым распределениям, парного суммирования их элементов и построения распределения плотности вероятностей по суммарной выборке.

При таком объединении источников ресурсов наблюдается интересная особенность.

Рассмотрим ее на примере 1-х объектов с экспоненциальными распределениями вероятностей:

$$f_1(x) = \lambda_1 \exp(-\lambda_1 x), \quad (9)$$

$$f_2(x) = \lambda_2 \exp(-\lambda_2 x). \quad (10)$$

Тогда после подстановки (9, 10) в (8) и интегрирования получим

$$f(y) = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (\exp(-\lambda_1 x) - \exp(-\lambda_2 x)). \quad (11)$$

Для $\lambda_1 = 2$ и $\lambda_2 = 4$ построены графики, представленные на рис. 3.

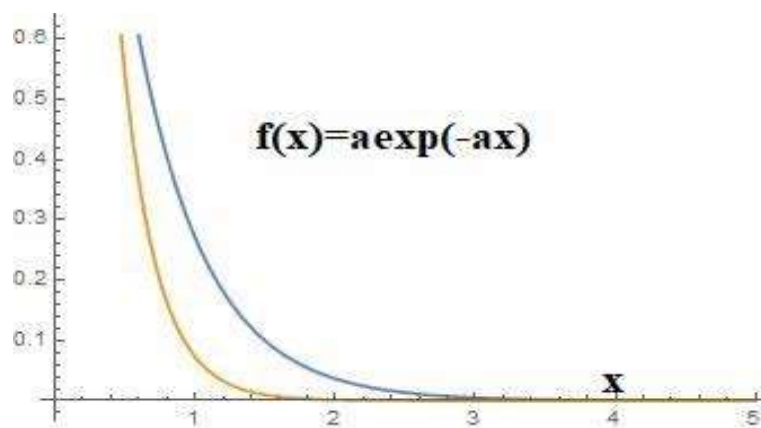


Рис. 3. Экспоненциальные законы распределения плотности вероятности

Вид $f(y)$ представлен на рис. 4.

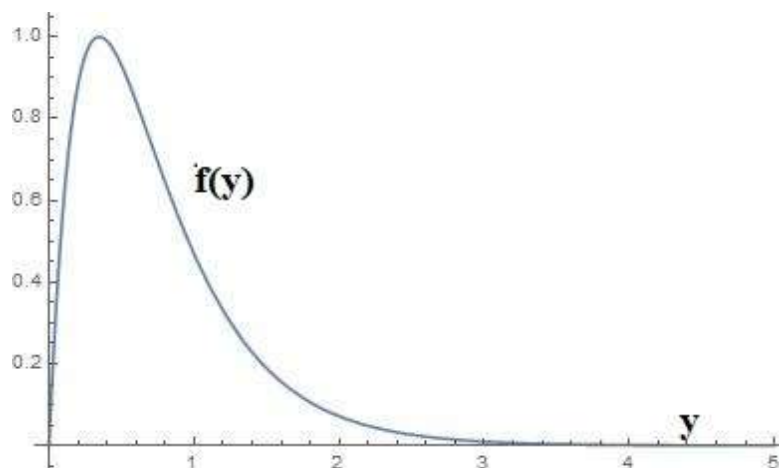


Рис. 4. Функция плотности вероятностей доступности суммы ресурсов

Из него видно, что на нем в отличие от экспоненциальных распределений явно выражено значение максимальной вероятности доступности ресурса. Это позволяет находить и выбирать гарантированные значения объема доступного ресурса из нескольких источников.

В случае наличия более двух источников ресурсов распределение вероятности по их суммарной доступности находится путем последовательной парной свертки их функций распределения по формуле (8).

Серьезной проблемой эксплуатации природных ресурсов является распределение нагрузки на них, т.е. выбор оптимального значения извлекаемого ресурса с учетом затрат на извлечение.

Предлагаемый математический формализм позволяет решить задачи оптимального управления природными ресурсами (нагрузки на них) и оптимального распределения финансовых средств на их поддержку.

Для этого предлагается ввести определение показателя оптимальности в виде

$$Z(x) = vxP(x) - cx, \quad (12)$$

где $Z(x)$ – прибыль от извлеченных ресурсов; $vxP(x)$ – ожидаемая выручка от реализации ресурса; cx – затраты на извлечение ресурса; v – цена единицы ресурса; c – удельные затраты на извлечение ресурса; x – объем извлеченного ресурса или нагрузки на него.

Вид зависимости этого показателя от объема нагрузки при различных себестоимостях извлечения $\{v = 4, c = 0,2; 0,5; 0,8\}$ и $P(x) = \exp(-x)$ представлен на графиках рис. 4.

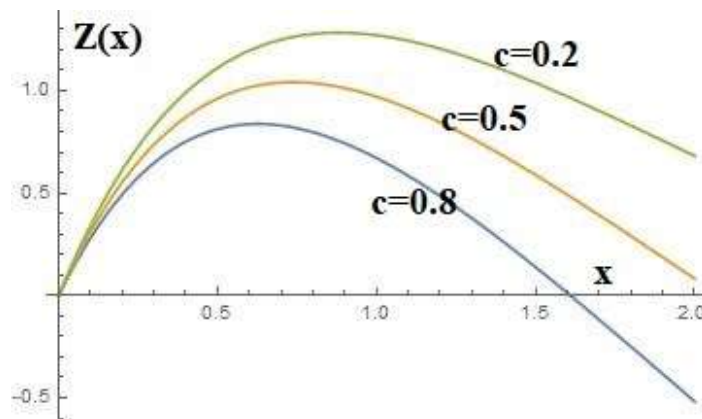


Рис. 4. Зависимость ожидаемой прибыли от себестоимости и нагрузки

Характер графиков показывает на явное наличие одного и единственного оптимального значения прибыли.

Следовательно, задача выбора оптимальной нагрузки на ресурс решается путем реализации соотношения

$$\text{opt}(x) = \arg \max_x Z(x) = \arg \max_x [vxP(x) - cx]. \quad (13)$$

Путем решения уравнения

$$\frac{d}{dx}(vxP(x) - cx) = 0. \quad (14)$$

Для решения задачи оптимального распределения финансирования и нагрузки на ресурсы при реализации стратегии использования нескольких природных ресурсов сформулируем ее:

- имеется n -объектов для получения на них аграрной продукции $\{x_i, i = 1, 2, 3, \dots, n\}$;
- для каждого объекта известны вероятности $\{P(x_i), i = 1, 2, 3, \dots, n\}$;
- имеются доступные финансовые ресурсы объемом R ;
- найти оптимальное распределение финансовых ресурсов и нагрузку на природные ресурсы, дающее максимальную прибыль от вложенных средств и природных ресурсов.

Используя введенный показатель эффективности (12), для объединенных ресурсов можно представить эту задачу в формализованном виде

$$\text{opt}\{x_i, i = 1, 2, \dots, n\} = \arg \max_{x_i, i = 1 \dots n} \sum_i Z(x_i), \quad (15)$$

при условии

$$\sum_i c_i x_i = R. \quad (16).$$

Это задача оптимизации с ограничениями на управляющие параметры и решается она методом Лагранжа с критерием оптимизации в виде

$$L(x_i, i = 1, 2, \dots, n) = \sum_i Z(x_i) + \lambda \left(\sum_i c_i x_i - R \right), \quad (17)$$

и системы уравнений

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i} L(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) &= 0, \quad i = 1 \dots n, \\ \sum_i c_i x_i - R &= 0. \end{aligned} \quad (18)$$

При этом объем финансовых ресурсов, выделяемый на каждый природный ресурс, находится из выражения

$$\theta_i = c_i x_i, \quad (19)$$

$$\sum_i \theta_i = R. \quad (20)$$

Решение системы уравнений существует и единственно, так как функция $\sum_i Z(x_i)$ строго вогнута по всем x_i , подтверждается на рис. 4.

Осуществить это можно известными численными методами [13], получив из выражения (18) множества $\{x_i, i = 1 \dots n\}$ и $\{\theta_i, i = 1 \dots n\}$ из выражения (19).

Заключение

1. Предложенный критерий обеспеченности стратегий развития финансовыми, трудовыми, технологическими и природными ресурсами позволяет получить достоверные оценки и принять адекватные управляющие решения исходя из реальной ситуации в экономике, промышленности и сельском хозяйстве.

2. Разработанный метод выбора оптимальной нагрузки на используемые ресурсы позволяет рационально их использовать без ущерба и необоснованных финансовых потерь.

3. Предлагаемые методы распределения нагрузки на природные ресурсы и финансов на их поддержание в состоянии высокой продуктивности позволит выбрать оптимальную стратегию пространственного и технологического развития региона и отрасли.

Список литературы

1. Алтухов А. И., Папцов А. Г., Силаева Л. П. [и др.]. Развитие сельского хозяйства геостратегических территорий России : монография / под науч. рук. акад. РАН А. И. Алтухова. М. : Научный консультант, 2022. 300 с.
2. Майданевич Ю. П., Анопоченко Т. Ю. Стратегия развития агропромышленного комплекса в контексте устойчивого развития региона // Наука и образование: хозяйство и экономика; предпринимательство; хозяйство и управление. 2017. № 6.
3. Садыкова Л. Н., Константинова Л. Ф. Факторы инновационной стратегии развития компании // Global & Regional Research. 2020. Т. 2, № 1.
4. Назаров А. Г. Классификация и систематизация стратегий развития промышленных предприятий // Вестник Российского государственного гуманитарного университета. Сер.: Экономика. Управление. Право. 2019. № 2. С. 102–116. doi:10.28995/2073-6304-2019-2-102-116
5. Конотопов М. Н. Выбор бизнес-стратегии фирмы в условиях полной неопределенности // Статистика и математические методы в экономике. 2013. № 6. С. 164–166.

6. Диксит А., Скит С., Рейли-мл. Д. Стратегические игры. Доступный учебник по теории игр : пер. с англ. Н. Яцюк / науч. ред. А. Минько. М. : Манн, Иванов и Фербер, 2017. 880 с.
7. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения : учеб. пособие для вузов. 2-е изд., стер. М. : Высш. шк., 2000. 480 с.
8. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Pareto_principle#cite_note-20
9. Laherrère J., Sornette D. Stretched exponential distributions in nature and economy: "fat tails" with characteristic scales // *The European Physical Journal B*. 1998. Vol. 2, № 4. P. 525–539. doi:10.1007/s100510050276
10. Newman M. E. J., Reggiani A., Nijkamp P. Power laws, Pareto distributions and Zipf's law // *Cities*. 2005. Vol. 30, № 2005. P. 323–351. doi:10.1016/j.cities.2012.03.001
11. Занг В.-Б. Синергетическая экономика: время и перемены в нелинейной экономической теории. М. : Мир, 1999. 400 с.
12. Кирдиной-Чэндлер С. Г., Дерябиной М. А. Очерки по экономической синергетике / под ред. В. И. Маевского. М. : ИЭ РАН, 2017. 182 с.
13. Кохендерфер М. Дж., Уиллер Т. А. Алгоритмы оптимизации : пер. с англ. СПб. : Диалектика, 2020. 528 с.
14. Северцев Н. А., Дарьина А. Н. Применение критериев подобия при ресурсной отработке сложных технических систем и изделий // *Надежность и качество сложных систем*. 2019. № 1. С. 5–14.
15. Быстров В. В., Маслобоев А. В. Технология информационной поддержки жизненного цикла управления мероприятиями по противодействию угрозам социально-экономической безопасности // *Надежность и качество сложных систем*. 2018. № 4. С. 150–164.

References

1. Altukhov A.I., Paptsov A.G., Silaeva L.P. et al. *Razvitie sel'skogo khozyaystva geostrategicheskikh territoriy Rossii: monografiya / pod nauch. ruk. akad. RAN A.I. Altukhova = Development of agriculture in geostrategic territories of Russia : monograph / under scientific hands. acad. RAS A.I. Altukhova*. Moscow: Nauchnyy konsultant, 2022:300. (In Russ.)
2. Maydanevich Yu.P., Anopchenko T.Yu. Strategy of development of the agro-industrial complex in the context of sustainable development of the region. *Nauka i obrazovanie: khozyaystvo i ekonomika; predprinimatel'stvo; khozyaystvo i upravlenie = Science and education: economy and economics; entrepreneurship; economy and management*. 2017;(6). (In Russ.)
3. Sadykova L.N., Konstantinova L.F. Factors of the company's innovative development strategy. *Global & Regional Research*. 2020;2(1).
4. Nazarov A.G. Classification and systematization of strategies for the development of industrial enterprises. *Vestnik Rossiyskogo gosudarstvennogo gumanitarnogo universiteta. Ser.: Ekonomika. Upravlenie. Pravo = Bulletin of the Russian State University for the Humanities. Ser.: Economics. Management. Right*. 2019;(2):102–116. (In Russ.). doi:10.28995/2073-6304-2019-2-102-116
5. Konotopov M.N. The choice of a firm's business strategy in conditions of complete uncertainty. *Statistika i matematicheskie metody v ekonomike = Statistics and mathematical methods in economics*. 2013;(6):164–166. (In Russ.)
6. Diksit A., Skit S., Reyli-ml. D. *Strategicheskie igry. Dostupnyy uchebnik po teorii igr: per. s angl. N. Yatsyuk = Strategic games. An accessible textbook on game theory : translated from English by N. Yatsyuk*. Moscow: Mann, Ivanov i Ferber, 2017:880. (In Russ.)
7. Venttsel' E.S., Ovcharov L.A. *Teoriya veroyatnostey i ee inzhenernye prilozheniya: ucheb. posobie dlya vtuzov. 2-e izd., ster. = Probability theory and its engineering applications : a textbook for higher education institutions. 2nd ed., ster.* Moscow: Vyssh. shk., 2000:480. (In Russ.)
8. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Pareto_principle#cite_note-20
9. Laherrère J., Sornette D. Stretched exponential distributions in nature and economy: "fat tails" with characteristic scales. *The European Physical Journal B*. 1998;2(4):525–539. doi:10.1007/s100510050276
10. Newman M.E.J., Reggiani A., Nijkamp P. Power laws, Pareto distributions and Zipf's law. *Cities*. 2005;30(2005):323–351. doi:10.1016/j.cities.2012.03.001
11. Zang V.-B. *Sinergeticheskaya ekonomika: vremya i peremeny v nelineynoy ekonomicheskoy teorii = Synergetic economics: time and changes in nonlinear economic theory*. Moscow: Mir, 1999:400. (In Russ.)
12. Kirdinoy-Chendler S.G., Deryabinoy M.A. *Ocherki po ekonomicheskoy sinergetike = Essays on economic synergetics*. Moscow: IE RAN, 2017:182. (In Russ.)
13. Kokhenderfer M.Dzh., Uiller T.A. *Algoritmy optimizatsii: per. s angl = Optimization algorithms : trans. from English*. Saint Petersburg: Dialektika, 2020:528. (In Russ.)
14. Severtsev N.A., Dar'ina A.N. Application of similarity criteria in resource testing of complex technical systems and products. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2019;(1):5–14. (In Russ.)
15. Bystrov V.V., Maslboev A.V. Technology of information support for the life cycle of management of measures to counter threats to socio-economic security. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2018;(4):150–164. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Евгений Алексеевич Воронин

доктор технических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник,
Федерального исследовательского центра
«Информатика и управление»
Российской академии наук
(Россия, г. Москва, пр-т 60-летия Октября, 9)
E-mail: e.voronin1@gmail.com

Evgeniy A. Voronin

Doctor of technical sciences, professor,
leading researcher,
Federal Research Center "Computer Science
and Control" of the Russian Academy of Sciences
(9 60-letiya Oktyabrya avenue, Moscow, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 27.04.2022

Поступила после рецензирования / Revised 30.05.2022

Принята к публикации / Accepted 24.06.2022

A MULTI-LEVEL ORGANIZATIONAL SYSTEM ENGINEERING FRAMEWORK FOR MANAGING REGIONAL SECURITY AND RESILIENCE

A.V. Masloboev¹, V.N. Tsygichko²

¹ Putilov Institute for Informatics and Mathematical Modeling of the Federal Research Centre
«Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences», Apatity, Russia

² Federal Research Centre "Computer Sciences and Control" of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
¹ masloboev@iimm.ru, ² vtsygichko@inbox.ru

Abstract. Background. The study is aimed at the development of general theory and methodology of synthesis and analysis of the multi-level organizational management structures for the efficiency enhancement of distributed control of the regional socio-economic system security and resilience. The final solution to this urgent problem in terms of application universality in relation to the subject field under study due to its dynamism and interdisciplinary nature has not yet been found. **Materials and methods.** The problem statement and the proposed formal approach to synthesis of organizational structures are based on the general system theory, control theory, theory of hierarchical multi-level systems, decision theory, methods of system analysis and multi-agent modeling of complex systems. **Results and conclusions.** The fundamentals of developed theory of organizational structure synthesis for managing socio-economic systems of various classes and scales are considered. Methodological and software tools for synthesis automation of the multi-level organizational structure models generated for management support of regional security under conditions of resilience loss of regional critical infrastructures have been developed. The target application of the developments is focused on functioning information and analytical maintenance of situational centers in the region and operation support of the regional security control systems.

Keywords: synthesis, organizational structure, situational control, modeling, multi-level system, regional security, resilience

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of the State Research Program of the Putilov Institute for Informatics and Mathematical Modeling (project No. FMEZ-2022-0023).

For citation: Masloboev A.V., Tsygichko V.N. A multi-level organizational system engineering framework for managing regional security and resilience. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(4):143–152. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-4-15

СРЕДСТВА СИНТЕЗА МНОГОУРОВНЕВЫХ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ И УСТОЙЧИВОСТЬЮ

А. В. Маслобоев¹, В. Н. Цыгичко²

¹ Институт информатики и математического моделирования имени В. А. Путилова Федерального
исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», Апатиты, Россия

² Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление»

Российской академии наук, Москва, Россия

¹ a.masloboev@ksc.ru, ² vtsygichko@inbox.ru

Аннотация. Актуальность и цели. Работа направлена на развитие общей теории и методологии синтеза и анализа многоуровневых организационных структур для повышения эффективности распределенного управления безопасностью и устойчивостью региональных социально-экономических систем. Окончательное решение этой актуальной задачи еще пока не найдено, что обусловлено ее динамичностью и междисциплинарным характером. **Материалы и методы.** Постановка задачи и предлагаемый формальный подход к синтезу организационных структур базируются на общей теории систем, теории управления, теории иерархических многоуровневых систем, теории принятия решений, методах системного анализа и мультиагентного моделирования сложных систем. **Результаты и выводы.** Рассмотрены основополагающие принципы развиваемой теории синтеза организационных структур управления социально-экономическими системами различного класса и мас-

штаба. Разработан методический и программный инструментарий автоматизации синтеза моделей многоуровневых организационных структур для управления региональной безопасностью в условиях потери устойчивости функционирования критических инфраструктур региона. Применение разработок ориентировано на информационно-аналитическое сопровождение работы ситуационных центров региона и систем обеспечения региональной безопасности.

Ключевые слова: синтез, организационная структура, ситуационное управление, моделирование, многоуровневая система, региональная безопасность, устойчивость

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания ИИММ КНЦ РАН (НИР № FMEZ-2022-0023).

Для цитирования: Маслобоев А. В., Цыгичко В. Н. Средства синтеза многоуровневых организационных систем для управления региональной безопасностью и устойчивостью // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 4. С. 143–152. doi:10.21685/2307-4205-2022-4-15

Introduction

Synthesis of multi-level organizational structures for managing socio-economic systems is and will be in the near-term outlook one of the most urgent fundamental interdisciplinary problems of the state-of-the-art control sciences. Chances for success in attaining organizational system goals significantly rely on the performance and capabilities of its management structure. Nowadays, when the geopolitical situation in the world is unpredictably changing with an increasing rate problems concerning formal synthesis, analysis and dynamic configuration of multi-level organizational management structures come to the foreground. Especially acute, these issues arise in matters of defense and national security ensuring agenda in accordance with systematics [1, 2]. Generation and implementation of reasonable organizational management structures relevant to the current situation predetermine the efficiency of decision-making under security and resilience control of socio-economic system critical infrastructures.

For the first time, the general ideas and original theoretical formulations of hierarchical organizational structure synthesis for security issues and applications were announced by Prof. Vitaly N. Tsygichko and Alexandra Yu. Popovich in Sofia, Bulgaria more than ten years ago. Their presentation on this challenging research topic at 7th International scientific and practical conference "The latest achievements of European science" gathered a great discussion, but, however, did not get further development in foreign safety scientific society. Thus, organizational and technological issues were passed off without due attention. Currently, there is a surge of interest to these studies both abroad, and in the domestic research.

The state-of-the-art foundations of the formal theory of organizational management structure synthesis are based on a wide range of various studies that reveal features of real control actors and multi-level entities (organizations). First of all, there are fundamental research works [3–6] which generalizing the synthesis principles into a unified conception and providing a rich empirical data to formal synthesis procedure implementation. However, so far there is no well-grounded and valid methodology for synthesis of organizational management structures applied to real security control applications, specifically, in socio-economic sphere. There is practically nothing that can provide us with comprehensive information and analytical decision-making support tools. Existing formal theories are for the most part focused on an analysis of hypothetical idealized management structures with formal inter-element relations given and are rather alienated from the studies of real organizational systems and applications [7, 8]. The main problem and the cause of most failures is the absence of formal procedures and basic parameters that determine organizational management structure generation. Without an explicit definition of these parameters and consistent model representation of management structures it is impossible to develop a reasonable methodology for multi-level organizational system engineering as to security control and other topical applications.

Then, in this study we are going to remind a formal approach to synthesis of organizational management structures and present its software implementation for regional security and resilience management support of socio-economic systems. We propose an advanced synthesis methodology which derives from fundamental axioms and principles of systems analysis, decision and control theory and is based on the feature examination of multi-level organizational systems, those genesis and operation.

Materials and methods

Regional security control process structuring consists in generation of hierarchical entity network with interlinked subsystems. A control subsystem can be defined as a multi-level structure consisting of in-

terlinked subsystems the elements of which are empowered to make decisions. The subsystems and elements form a hierarchy. Higher level element states a problem to a lower-level element and influences it by changing problems, introducing limitations or restrictions, or enumerating alternative actions. A low-level element is free in its actions in executing assigned tasks within the framework of specified restrictions or alternatives. A higher-level element organizes interaction of elements (subsystems) subordinated to it for the purpose of achieving goals (performing tasks) assigned to it by a higher-element. A lower-level element influences a decision by a higher-level element by informing it on its state and the consequences of the decision it makes. A higher-level element can correct or alter its decision in conformity with this information. Thus, there occurs coordination of lower-level decisions with the goals of the entire organizational system used for managing the regional security.

The informational structure of the hierarchical control subsystem in question reflects the hierarchic nature of the organizational system. In an actual control subsystem this is reflected in the fact that a specific level of description of system state corresponds to each control component. Higher-level control elements deal with larger subsystems and broader aspects of system activity. Description of system state at higher levels is less detailed than at lower ones, while the problems resolved at higher levels contain more uncertainty and are more difficult to solve.

Formally, control boils down to coordination of the activities of lower-level subsystems, which in practice is accomplished by setting and defining problems for subsystems of all levels. Defining problems to be solved by higher-level elements takes place in the language of the parameters of these elements, which essentially gives certain freedom in choosing of control parameters for lower-level elements. The temporal structure of control system functioning is also heterogeneous. The higher the level of control is, the greater the period of decision-making and the overall duration of execution of assigned tasks are. The enumerated properties of interlevel relations determine substantially the functioning nature of the control system as a hierarchical or network-centric organizational structure.

Incomplete information on the situation developing at any given moment in the activities of target systems is one of the principal features of processes in these systems. This means that decision-making in all control components takes place in conditions of a different degree of uncertainty, which substantially affects the quality of decisions and, consequently, the course of functioning processes.

Then, we are going to examine this aspect in a more detailed way. Decision-making is based on a goal-oriented process of uncertainty resolution. Precise values of decision-targeted parameters ($j = \overline{1, J}$) are rarely known, but decision maker can always operate ranges of possible values (l_j).

For each decision there exists an allowable accuracy of input information, i.e. minimal allowable ranges of decision-targeted parameters – δ_j . Specification of δ_j for all $j = \overline{1, J}$ defines allowable region of uncertainty $\Delta = \{ \delta_j \}$. Introduction of allowable range of accuracy makes it possible to convert a continuous set of numerical values of state description parameters to a bounded finite set and to perform practical calculations. Let the allowable ranges of accuracy δ_j be determined for all parameters $j \in J$ of description of a certain social entity, and let the ranges of determination of these parameters $l_j \in L$ be known (where L is the region of determination of the state of the target entity. We shall divide the ranges of possible values of components l_j of vector L into segments of length δ_j . There will be N_j segments in each interval:

$$N_j = \frac{l_j}{\delta_j}. \quad (1)$$

The probability that the numerical value of parameter j will fall within the k_j segment, $k_j = \overline{1, N_j}$, shall be designated P_{k_j} . Then, by virtue of the independence of components of vector L , full entropy of decision will be written as:

$$E_f = - \sum_{j=1}^J \sum_{k_j=1}^{N_j} P_{k_j} \log P_{k_j}. \quad (2)$$

Analytical process of uncertainty resolution that constitutes the core of decision-making is directed on reduction of initial region L to a certain final region, i.e. reduction of initial entropy E_{in} (full entropy at the begin-

ning of the decision-making process) to residual entropy E_r (full entropy at the end of the process). Entropy approach allows us to introduce quality of decision as a function of uncertainty resolution degree:

$$\chi(T) = 1 - \frac{\sup E_r(T)}{\sup E_{in}}, \quad (3)$$

where T is time given for the certain decision-making; $\sup E_r$ determines the degree of risks the decision-maker takes if he makes a decision at the moment T .

The most effective process of uncertainty resolution is based on the principle of sequential resolution of uncertainty. This principle states that the process of systems analysis should consist in movement from determination of the goals and conditions of organizational system development as an integral entity toward determination of objectives, mechanisms of functioning, conditions and criteria in detail and for each subsystem and element. In the process of this movement, at each level of system representation, beginning with the highest level, one selects for further examination from the many possible development alternatives only those which merit attention from the standpoint of system goals, while the remainder are discarded and no longer considered. Correctness of selection of alternatives at each level of synthesis is verified by means of analyzing them at a lower, more detailed level of representation. The initial alternatives are refined based on the results of this analysis, and their number is reduced. Such organization of analytic process makes it possible to isolate for analysis only a small portion of the infinite number of possible sets of parameters values and to determine the most rational ones from this limited number of alternatives.

Thus, the principle of uncertainty sequential resolution expects the implementation of an iterative analysis procedure, downward through the hierarchy of descriptions of the organizational system, whereby one can avoid consideration of the complete set of development alternatives. The mechanisms of synthesis and detailing serve as the implementation tool of this procedure. These mechanisms ensure description informational fullness and integrity of multi-level organizational systems. Introduction of measure, which reflects the requisite degree of description aggregation of the system and its elements at different levels of generalization, is one possible way of constructive continuation of the principle of uncertainty sequential resolution. A complexity threshold [9] can be adopted as such a measure.

The procedure of systems analysis, organized with observance of the principle of uncertainty sequential resolution, constitutes a certain invariant of the thought process. It is therefore natural that a constructive form of representation of this process is linked first and foremost with the properties of thinking. Such features of thought process as ability of purposeful multi-level abstract reflection of reality, ability to classify and other, involve one of its most important properties – limitedness of the number of factors and conditions with which decision-maker consciousness can operate simultaneously in solving any problem. These properties are being actively studied at the present time, and the indices of this limitation are extensively used in practice.

In decision-making theory complexity threshold is a measure of allowable dimensionality of problem which could be solved in a given period of time. Complexity threshold obeys to the following axioms:

- 1) a specific complexity threshold corresponds to every specific problem;
- 2) complexity threshold is a non-decreasing function of time given for the problem-solving.

The introduced above complexity threshold and decision quality concepts allow us to advance a mathematical formulation for synthesis of organizational management structures.

Let $\Gamma\{\gamma, i\}$ be a graph that represents the management structure of the given organizational system, and let the following function be given:

$$\tau = \tau(\Gamma\{\gamma, i\}, E_p, \{E_{p_{th}i}^\gamma\}, \chi). \quad (4)$$

The goal is to find a graph $\Gamma\{\gamma, i\}$ where function (4) finds its minimum on conditions that $\chi \geq \chi_\alpha$ (or $\sup E_r \leq E_{r_\alpha}$) and

$$\sum_i E_{p_{th}i}^\gamma \geq E_p^\gamma = \sum_i E_{p_i}^\gamma, \quad i = \overline{1, I}, \quad E_{p_{th}}^\gamma \geq E_{p_i}^\gamma, \quad (5)$$

$$E_p = \sum_\gamma E_p^\gamma \leq E_{p_{th}}, \quad (6)$$

where χ_α – admissible quality of control problem solution; E_{r_p} – admissible uncertainty resolution degree (for the control problem); i – the ordinal number of problem in the sequence of problems being solved at the γ stage of decision-making process; I – the number of such problems; E_p^γ – a priory entropy for the γ stage of decision-making process; $E_{p_i}^\gamma$ – a priory entropy for the γ stage of decision-making process; $E_{p_{th}}^\gamma$ – complexity threshold; τ – the management cycle of the organizational system.

If the management cycle of organizational system is given a priori or is determined by technological process, then the synthesis problem could be formulated in the following way: search a control structure that satisfies the conditions (5) and (6):

$$\Gamma\{\gamma, i\} = \Gamma\left(\tau, E_p, \{E_{p_{th}}^\gamma\}, \chi\right), \quad (7)$$

Synthesis of organizational management structures is one of the most complicated problems control theory and system theory have. Construction of functions (4) and (7) as well as calculation of complexity threshold for particular control problems arise the main difficulties.

The synthesis process cannot be determined by any general optimization scheme. This means that functions (4) and (7) are iterative procedures with human decisions involved at each step. These procedures could be described by algorithmic functions only. Our goal is in finding the algorithmic functions that approximate real processes in the most accurate manner. Principle of uncertainty sequential resolution will help us ones again, namely, from the start by modeling general features of the process until operation on determination of precise details.

Our study of real organizational system genesis analysis has resulted in extraction of two main parameters that determine organizational management structures. These parameters are conditionally defined as “complexity” (c) and “payload” (p). We must underline that each of these parameters has a complicated inner structure, and takes different forms in different organizational systems. Let us illustrate these parameters by a simple example. What kind of problems do we consider to be difficult? For example, typing. It seems to be a very easy problem. Every user of computer can do that. However, if we need to type several hundreds of pages in a couple of hours, we think it to be impossible. On the other hand, some mathematical problem. Let it be one of the problems that take about 5 minutes from a specialist to solve it, and let its solution fit in one page. However, a person who doesn’t have any qualification in mathematics would not be able to solve it, even if he has a lot of time in his hands. This example illustrates two sides of difficulty. We define these sides “complexity” (it causes the sort of difficulties illustrated by the second example) and “payload” (this is what we run across in the first example).

An employee i , who is assigned to a certain problem h , has to have enough time to be able to deal with the problem payload p_h and enough qualification to deal with its complexity c_h . It is convenient to handle sort of limit-parameters: complexity limit c_i^* as the maximum complexity of problem the employee i can deal with, and payload limit p^* as the maximum amount of time he can spare. Ability or inability to solve a problem is determined not by the problem’s c_h and p_h , but by the ratios $\frac{p_h}{p_i}, \frac{c_h}{c_i}$.

We must underline that the meaning and inner structure of the parameter complexity differs between problems of different types. For example, if we consider problems for security department, we bring to the fore requirements on tactical training and physical fitness. On the other hand, if we analyze work of sales department, we are much more interested in the abilities of employees to deal with customers. The more uncertainty of the problems solved is, the more significant analytical and creative abilities of the employee are.

For the general case we can consider a set of types of problems (or specializations) urgent for the certain organizational system. For each of the type we must construct an independent gradation of complexity. Each level at each specialty has its own meaning. In other words, $c = c(s)$, $s \in S$, where S – is a set of specializations urgent for the examined organizational system.

Let us introduce a function of expected effectiveness $Q_{h,i}$, which reflects the quality of problem solution a manager can expect, if he entrusts employee c with problem h .

At the current stage of approach, we propose the following approximation:

$$Q_{h,i} = Q_{h,i}^C \cdot Q_{h,i}^P \cdot Q_{h,i}^M, \quad (8)$$

where $Q_{h,i}^C = \prod_{\lambda=1}^{\zeta} f^c \left(\frac{c_h(s_{\lambda})}{c_i^*(s_{\lambda})} \right)$ is a term representing the contribution of “complexity”; ζ is a number of spe-

cialization urgent for the organizational management system; $Q_{h,i}^P = f^p \left(\frac{\sum_{j=1}^{b_i} p_{h_j}}{p_i^*} \right)$ is a term representing the

contribution of “payload”; b_i is a number of problems the employee i is entrusted with at the current cycle of the system functioning; $Q_{h,i}^M$ is a term that approximates manager contribution to the problem-solving, which reflects such manager functions as setting problems, consulting support, control, etc.

Results and Discussion

To mitigating the consequences of critical situations in the regional socio-economic systems, it is necessary to provide prompt and effective managerial decision-making in a extremely limited time. This fact stipulates a need for transition to the network-centric control model in managing the regional security and resilience. The network-centric approach most sufficiently reflects the real nature of regional socio-economic system management and takes into account the decentralized nature of regional security ensuring processes both in terms of its functional structure and the control actor membership. Regional security network-centric control implies a network structure of organizational management with dedicated control centers development. The interaction between these control centers should be carried out on the basis of it integration into a unified regional information space. For the implementation of regional security network-centric control model and efficiency enhancement of the decentralized decision-making the generation and synthesis of virtual problem-oriented organizational management structures in each domain of regional security should be provided within the distributed information environment covering all the critical infrastructures of regional socio-economic system. For these purposes, the fundamentals of organizational structure synthesis general theory [10] briefly presented above and applicable synthesis method [11] of multi-agent models of the virtual network-centric multi-level organizational structures for managing regional security and resilience have been developed. The synthesis methodology of hierarchical and network-centric organizational management structures is implemented within the framework of software tooling system "OS-Synthesizer" used for various practical applications in the field of modeling, analysis and engineering of complex organizational systems.

The software system corresponds an integrated multi-agent modeling environment of control problems and management processes for ensuring the regional security and critical infrastructure resilience. OS-Synthesizer is an application toolset providing the automated synthesis and analysis of organizational management structure models intended for information support and coordination of the decentralized managerial decision-making in the field of regional security. The system allows execution of the combined formal synthesis and efficiency analysis procedures under generating and configuring of the organizational management structure models subject to the specificity of control problem solving both in automatic and interactive mode. OS-Synthesizer provides dynamic pattern-driven formation of these models composition also, as well as the adaptive tuning of model characteristics under changing external environment. In turn, this contributes to the design process automation of the organizational management structures, well-posed sampling and composition of their elements under given conditions and restrictions on the set of problems to be solved. The multi-agent system technology [12] was used as a toolkit for the implementation of OS-Synthesizer system.

OS-Synthesizer has a modular architecture and includes the following main functional units discussed in detail in earlier study [13]:

- 1) organizational management structure (OS) model synthesis unit;
- 2) OS-model generation and configuration unit;
- 3) OS-model analysis and efficiency assessment unit;
- 4) OS-model tuning and reconfiguration unit;
- 5) OS-model optimization and development unit;
- 6) multi-agent simulation environment engine unit.

The generic enlarged structure of the OS-Synthesizer software system is shown in Figure 1.

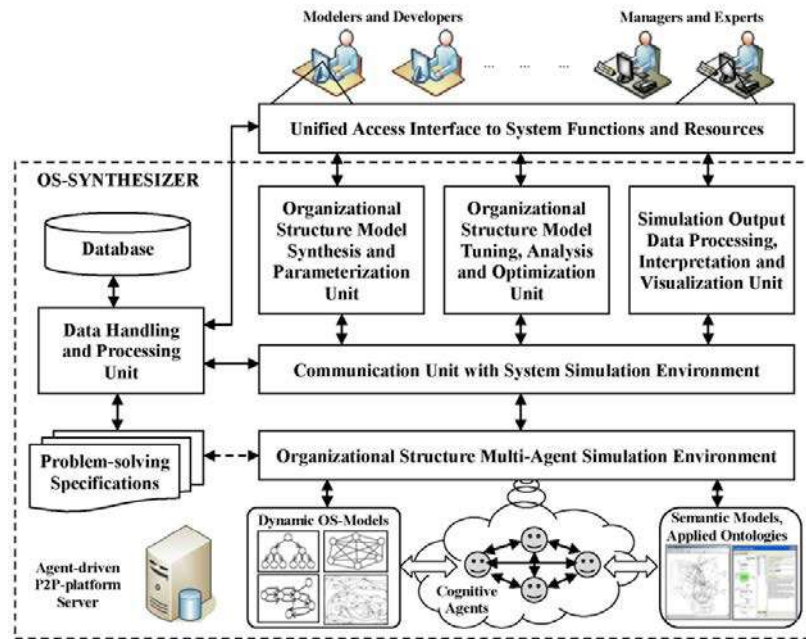


Fig. 1. The generic architecture of the OS-Synthesizer software tooling system

The OS-Synthesizer software system also includes some extra tools for designing conceptual (cognitive, semantic, ontological, etc.), dynamic and agent-based models intended for simulation of various scenarios of the regional security control and critical situations development. These models are as well used within the efficiency analysis of the alternative organizational management structures synthesized to preventing and counteracting critical situations accordingly to simulated scenarios. Such tools allow implementing the automated synthesis of organizational management structure models based on the use of a library of typical models and modeling patterns. In addition, OS-Synthesizer functionality provide correctness analysis of the synthesized models, aggregation of several models into a common polymodel complex, coordination of simulated time quantization for various submodels (normalization of models in time), interpretation of simulation data and results visualization in text, tabular or graphic form, export of generated analytical information and reports to monitoring information systems of regional situational centers.

The conceptual schemes of the OS-Synthesizer principal units are shown in Figure 2 and Figure 3.

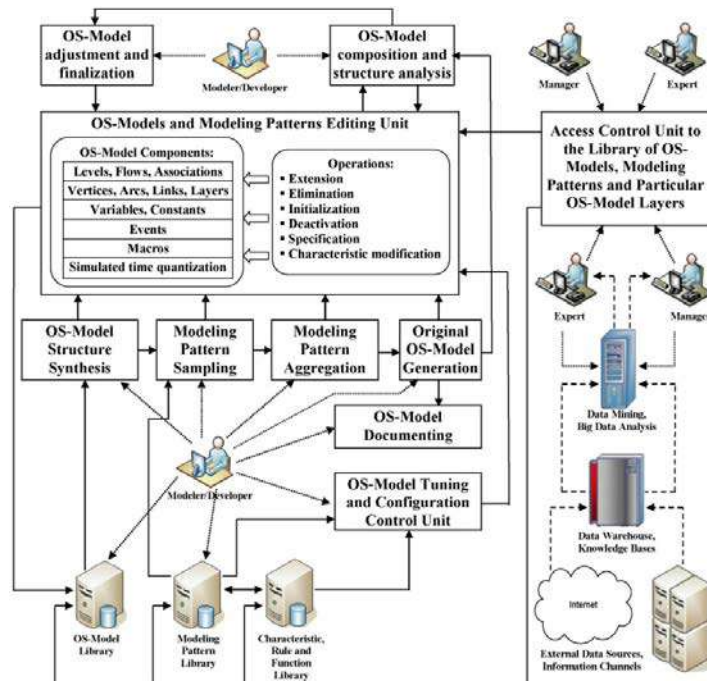


Fig. 2. The structure of the OS-model generation and editing unit (adopted from [14])

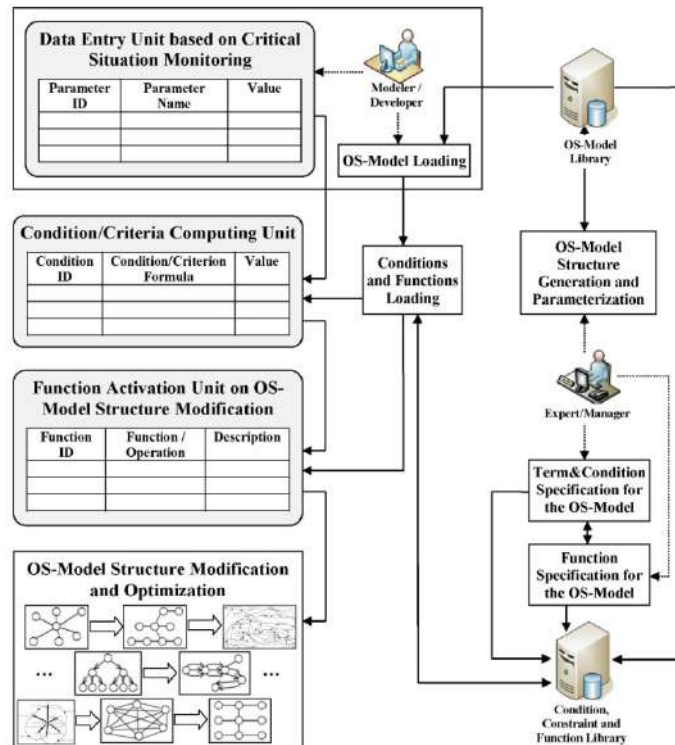


Fig. 3. The structure of the OS-model aggregation and tuning unit

OS-Synthesizer supports three modes for model generation of organizational management structures: direct, inverse and bidirectional synthesis, differing in the fixed goal, initial data and halt conditions of the iterative synthesis method. In general, the system maintains analysis and synthesis of various type organizational management structures both hierarchical [10, 15] and network-centric [16, 17]. OS-Synthesizer provides operation with all necessary information for multi-agent model generation, evaluation and reconfiguration of the organizational management structures to regional security control subject to the specification and operational (applied) context of critical situations.

The field of application of the OS-Synthesizer system as a tool for information support of regional security and resilience management is determined by providing the capability of synthesis and analysis of such classes of the organizational management structures as simple, adhocratic, bureaucratic, divisional and others oriented to operate both in stable and dynamic open environment characterized by a high level of uncertainty.

OS-Synthesizer software system was approved in real applications, particularly, for practical problem-solving in the field of situational control of economic security of the Murmansk region by integrating it as a part into information and analytical system "Prognosis" used by the Ministry of economic development and the Governor situational center of the Murmansk region.

Conclusion

The principal approach and formal basis proposed in this study has given an impulse to further development of the general theory of organizational system synthesis along the line of network-centric model generation of management structures to situational control the regional security and resilience. This theory is based on the entire methodology, which is applicable for synthesis of organizational management structures, and operates with a wide range of control methods and decision-making support tools for engineering, analysis and reconfiguration of various organizational management structures. Discussed theoretical fundamentals and methods resulted to development and application of the software tooling system OS-Synthesizer.

Technologically, the system has a multi-agent implementation and contributes the combined automated synthesis, dynamic reconfiguration and performance evaluation of the organizational management structure models for supporting the network-centric control of regional security under emergency situations in regional critical infrastructures of socio-economic systems. OS-Synthesizer features are provided at the expense of the interaction of autonomous software agents and the use of simulation toolset framework.

Our developments can be efficiently used for decision-making information and analytical support in the regional situational centers as well as for analyzing the behavior dynamics of the security actors in various critical situations and coordinating their joint activities within the bounds of operational management and strategic planning of anti-crisis measures in the regional security control systems. The innovation potential of the OS-Synthesizer is focused on solving new practical problems in such interdisciplinary security ensuring domains as critical infrastructure resilience of regional socio-economic systems, environmental safety and personnel sustainability of the region.

References

1. Tsygichko V.N., Chereshekin D.S., Smolyan G.L. *Bezopasnost' kriticheskikh infrastruktur = Safety of critical infrastructures*. Moscow: Krasand, 2018:200. (In Russ.)
2. 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. (In Russ.)
3. Mintsberg G. *Struktura v kulake. Sozdanie effektivnoy organizatsii = Structure in the fist. Creation of an effective organization*. Saint Petersburg: Piter, 2003:512. (In Russ.)
4. Mesarovich M., Mako D., Takakhara I. *Teoriya ierarhicheskikh mnogourovnevnykh system = Theory of hierarchical multilevel systems*. Moscow: Mir, 1973:343. (In Russ.)
5. Burkov V.N., Irikov V.A. *Modeli i metody upravleniya organizatsionnymi sistemami = Models and methods of management of organizational systems*. Moscow: Nauka, 1994:270. (In Russ.)
6. Pospelov D.A. *Situatsionnoe upravlenie. Teoriya i praktika. 2-e izd. = Situational management. Theory and practice. 2nd ed.* Moscow: URSS, 2021:288. (In Russ.)
7. Gubko M.V. *Matematicheskie modeli optimizatsii ierarhicheskikh struktur = Mathematical models of optimization of hierarchical structures*. Moscow: LENAND, 2006:264. (In Russ.)
8. Simon H.A. *The new science of management decision*. Prentice-Hall, 1977:175.
9. Tsygichko V.N. *Rukovoditel'nyy o priinyatii resheniy. Izd. 3-e, pererab. i dop. = To the head of decision-making. Ed. 3rd, reprint. and add.* Moscow: KRASAND, 2010:352. (In Russ.)
10. Tsygichko V.N., Popovich A.Yu. *Sintez ierarhicheskikh sistem upravleniya. Teoriya i praktika = Synthesis of hierarchical control systems. Theory and practice*. Moscow: Krasand, 2011:256. (In Russ.)
11. Masloboev A.V. Method of automated synthesis of virtual organizational structures for regional security management tasks. *Programmnye produkty i sistemy = Software products and systems*. 2013;(4):141–149. (In Russ.)
12. Wooldridge M. *An Introduction to MultiAgent Systems. 2nd ed.* John Wiley & Sons, 2009:484.
13. Masloboev A.V. Software package "Synthesizer of network-centric organizational management structures". *Informatsionno-tekhnologicheskiiy vestnik = Information Technology Bulletin*. 2017;(4):145–155. (In Russ.)
14. Chernov I. Improving the efficiency of management decisions based on the use of a software-analytical complex of scenario analysis and forecasting. *Vestnik Rossiyskogo gosudarstvennogo gumanitarnogo universiteta. Ser.: Ekonomika. Upravlenie. Pravo = Bulletin of the Russian State University for the Humanities. Ser.: Economics. Management. Right*. 2018;(1):40–57. (In Russ.)
15. Yurkov N.K. Methodology of synthesis of quasi-optimal structures of adaptive self-healing systems. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2021;(1):121–125. (In Russ.)
16. Makarenko S.I., Ivanov M.S. *Setetsentricheskaya voyna – printsipy, tekhnologii, primery i perspektivy = Network-centric warfare - principles, technologies, examples and perspectives*. Saint Petersburg: Naukoemkie tekhnologii, 2018:898. (In Russ.)
17. Zatsarinnyy A.A., Suchkov A.P. *Informatsionnoe vzaimodeystvie v raspredelennykh sistemakh situatsionnogo upravleniya = Information interaction in distributed situational management systems*. Moscow: TORUS PRESS, 2021:268. (In Russ.)

Список литературы

1. Цыгичко В. Н., Черешкин Д. С., Смолян Г. Л. Безопасность критических инфраструктур. М. : Красанд, 2018. 200 с.
2. Маслобоев А. В., Путилов В. А. Информационное измерение региональной безопасности в Арктике. Апатиты : КНЦ РАН, 2016. 222 с.
3. Минцберг Г. Структура в кулаке. Создание эффективной организации. СПб. : Питер, 2003. 512 с.
4. Месарович М., Мако Д., Такахаха И. Теория иерархических многоуровневых систем. М. : Мир, 1973. 343 с.
5. Бурков В. Н., Ириков В. А. Модели и методы управления организационными системами. М. : Наука, 1994. 270 с.
6. Пospelov Д. А. Ситуационное управление. Теория и практика. 2-е изд. М. : URSS, 2021. 288 с.
7. Губко М. В. Математические модели оптимизации иерархических структур. М. : ЛЕНАНД, 2006. 264 с.
8. Simon H. A. The new science of management decision. Prentice-Hall, 1977. 175 p.

9. Цыгичко В. Н. Руководителю о принятии решений / предисл. В.А. Лефевра. Изд. 3-е, перераб. и доп. М. : КРАСАНД, 2010. 352 с.
10. Цыгичко В. Н., Попович А. Ю. Синтез иерархических систем управления. Теория и практика. М. : Кранд, 2011. 256 с.
11. Маслובоев А. В. Метод автоматизированного синтеза виртуальных организационных структур для задач управления региональной безопасностью // Программные продукты и системы. 2013. № 4. С. 141–149.
12. Wooldridge M. An Introduction to MultiAgent Systems. 2nd ed. John Wiley & Sons, 2009. 484 p.
13. Маслובоев А. В. Программный комплекс «Синтезатор сетцентрических организационных структур управления» // Информационно-технологический вестник. 2017. № 4. С. 145–155.
14. Чернов И. Повышение эффективности управленческих решений на основе использования программно-аналитического комплекса сценарного анализа и прогнозирования // Вестник Российского государственного гуманитарного университета. Сер.: Экономика. Управление. Право. 2018. № 1. С. 40–57.
15. Юрков Н. К. Методология синтеза квазиоптимальных структур адаптивных самовосстанавливающихся систем // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2021. Т. 1. С. 121–125.
16. Макаренко С. И., Иванов М. С. Сетцентрическая война – принципы, технологии, примеры и перспективы. СПб. : Научные технологии, 2018. 898 с.
17. Зацаринный А. А., Сучков А. П. Информационное взаимодействие в распределенных системах ситуационного управления. М. : ТОРУС ПРЕСС, 2021. 268 с.

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Владимирович Маслובоев

доктор технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник,
заведующий лабораторией информационных
технологий управления региональным развитием,
Институт информатики и математического
моделирования имени В. А. Путилова
Федерального исследовательского центра
«Кольский научный центр Российской академии наук»
(Россия, г. Апатиты, ул. Ферсмана, 14)
E-mail: masloboev@iimm.ru

Andrey V. Masloboev

Doctor of technical sciences, associate professor,
leading researcher, head of the laboratory
of information technologies
for regional development management,
Putilov Institute for Informatics and Mathematical
Modeling of the Federal Research Centre
"Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences"
(14 Fersmana street, Apatity, Russia)

Виталий Николаевич Цыгичко

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
Институт системного анализа
Федерального исследовательского центра
«Информатика и управление»
Российской академии наук
(Россия, г. Москва, пр-т 60-летия Октября, 9)
E-mail: vtsygichko@inbox.ru

Vitaliy N. Tsygichko

Doctor of technical sciences, professor, chief researcher,
Institute for system analysis,
Federal Research Center "Computer Science
and Control" of the Russian Academy of Sciences
(9 60-letiya Oktyabrya avenue, Moscow, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 19.05.2022

Поступила после рецензирования / Revised 21.06.2022

Принята к публикации / Accepted 18.07.2022