

СОДЕРЖАНИЕ

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ
НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА**

Юрков Н. К. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОНАДЕЖНОЙ БОРТОВОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ.....	5
Ильин А. С., Карчев И. А., Большакова А. А., Перевертов В. П. МАСШТАБНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ.....	13
Тудегулов А. Д., Ергалиев Д. С., Кенбеилова С. Ж., Исмаилов А., Акишев К. М. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ DATA MINING	20
Иванов А. И., Иванов А. П., Куприянов Е. Н. МУЛЬТИПЛИКАТИВНО-НЕЙРОСЕТЕВОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ ХЕРСТА И МУРОТА – ТАКЕУЧИ ПРИ ПРОВЕРКЕ ГИПОТЕЗЫ НОРМАЛЬНОСТИ МАЛЫХ ВЫБОРОК.....	27
Панкин А. М., Калюттик А. А., Лялюев Д. В. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ЦЕЛЯХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ	34
Полтавский А. В., Тюгашев А. А., Юрков Н. К. ОПТИМИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ БЕСПИЛОТОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА	44

**ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ**

Кубасов И. А., Иванов А. И. ЭНТРОПИЙНО-НЕЙРОСЕТЕВОЙ МЕТОД УСТРАНЕНИЯ ПРОТИВОРЕЧИВОСТИ ОЦЕНОК ЭКСПЕРТОВ	56
Иванов С. В., Петрова О. В., Запорожченко М. Р., Карипов Д. Р., Ковешников М. А. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОПЕРАТИВНОСТИ ПРОЦЕССА СБОРА И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В ХОДЕ ВЫПОЛНЕНИЯ ПОЛЕТНОГО ЗАДАНИЯ ГРУППОЙ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ.....	64
Коршунов Г. И., Поляков С. А., Романец В. И. ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ПРОДУКЦИИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СТРУКТУР	74

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

Комлев В. Н.

К ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОМУ ОБОСНОВАНИЮ ПОДЗЕМНОГО ОБЪЕКТА
ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНОЙ СТАДИИ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА 81

Доросинский А. Ю., Прокофьев О. В., Семочкина И. Ю.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ РЕЗИСТОРОВ В АППАРАТНОМ
ОБЕСПЕЧЕНИИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ..... 98

Годунов А. И., Шишков С. В., Балабян С. Т., Аль Сафтли Ф. Х.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОННОЙ СЕТИ
ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ КОЛИЧЕСТВА НЕЙРОНОВ В СКРЫТОМ СЛОЕ В ЦЕЛЯХ
ПОВЫШЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ НАЗЕМНОЙ ЦЕЛИ..... 106

Тулегулов А. Д., Ергалиев Д. С., Зуев Д. В., Шабден Б. А., Абицаев Р.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ВИЗУАЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ..... 119

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Masloboev A.V.

REGIONAL MANAGEMENT CENTER FRAMEWORK
FOR G2C-FEEDBACK AND PUBLIC SAFETY SUPPORT 127

ПАМЯТИ ПРОФЕССОРА В. А. ПУТИЛОВА 139

CONTENT

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

Yurkov N.K.
THE CURRENT STATE OF RESEARCH IN THE FIELD OF CREATING
HIGHLY RELIABLE ON-BOARD ELECTRONIC EQUIPMENT 5

Il'in A.S., Karchev I.A., Bol'shakova A.A., Perevertov V.P.
SCALED HIGH VOLTAGE CONVERTERS FOR INFORMATION-MEASURING SYSTEMS.....13

Tulegulov A.D., Ergaliev D.S., Kenbeilova S.Zh., Ismailov A., Akishev K.M.
MATHEMATICAL MODEL OF AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK
FOR SOLVING DATA MINING PROBLEMS20

Ivanov A.I., Ivanov A.P., Kupriyanov E.N.
MULTIPLICATIVE NEURAL NETWORK COMBINATION OF HURST
AND MUROTA-TAKEUCHI STATISTICAL CRITERIA IN CHECKING
THE HYPOTHESIS OF NORMALITY OF SMALL SAMPLES27

Pankin A.M., Kalyutik A.A., Lyalyuev D.V.
MATHEMATICAL MODELING OF ENERGOMECHANICAL SYSTEMS
FOR THE PURPOSE OF DETERMINING THEIR TECHNICAL STATE.....34

Poltavskiy A.V., Tyugashev A.A., Yurkov N.K.
OPTIMIZATION OF THE INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM
OF AN UNMANNED AIRCRAFT44

**DIAGNOSTIC METHODS FOR ENSURING
RELIABILITY AND QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS**

Kubasov I.A., Ivanov A.I.
ENTROPY-NEURAL NETWORK METHOD FOR ELIMINATING
INCONSISTENCIES IN EXPERT ASSESSMENTS56

Ivanov S.V., Petrova O.V., Zaporozhchenko M.R., Karipov D.R., Koveshnikov M.A.
METHODOLOGY FOR ASSESSING THE EFFICIENCY OF THE PROCESS
OF COLLECTING AND PROCESSING INFORMATION DURING THE EXECUTION
OF A FLIGHT TASK BY A GROUP OF UNMANNED AERIAL VEHICLES64

Korshunov G.I., Polyakov S.L., Romanets V.I.
QUALITY ASSURANCE OF RADIO ELECTRONIC PRODUCTS IN ENTERPRISES
WITH DIFFERENT TYPES OF ORGANIZATIONAL STRUCTURES74

TECHNOLOGICAL BASIS FOR IMPROVING RELIABILITY AND PRODUCT QUALITY

Komlev V.N.

TO MINING AND GEOLOGICAL VALIDATION OF THE UNDERGROUND OBJECT
OF THE FINAL STAGE OF THE NUCLEAR FUEL CYCLE 81

Dorosinskiy A.Yu., Prokof'ev O.V., Semochkina I.Yu.

PROSPECTS FOR THE USE OF COMPOSITE RESISTORS IN THE HARDWARE
OF INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEMS..... 98

Godunov A.I., Shishkov S.V., Balanyan S.T., Al' Saftli F.Kh.

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR OPTIMIZING NEURAL NETWORK TRAINING
WHEN DETERMINING THE NUMBER OF NEURONS IN A HIDDEN LAYER IN ORDER
TO INCREASE THE PROBABILITY OF RECOGNIZING IMAGES OF A GROUND TARGET 106

Tulegulov A.D., Yergaliyev D.S., Zuev D.V., Shabden B.A., Abikaev R.

VISUAL MEASURING AUTOMATION CONTROL..... 119

SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS

Masloboev A.V.

REGIONAL MANAGEMENT CENTER FRAMEWORK
FOR G2C-FEEDBACK AND PUBLIC SAFETY SUPPORT 127

IN MEMORY OF PROFESSOR V.A. PUTILOV 139

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

УДК 519.873

doi:10.21685/2307-4205-2021-4-1

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОНАДЕЖНОЙ БОРТОВОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Н. К. Юрков

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

yurkov_NK@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Предлагается подход к развитию фундаментальных основ конструкторско-технологического проектирования радиоэлектронных средств, функционирующих в жестких условиях эксплуатации. Решение проблемы ведется с учетом многофакторности взаимного влияния внешних воздействующих факторов. Подчеркнута острая необходимость единой теоретической базы создания адаптивных самовосстанавливающихся реконфигурируемых структур радиоэлектронных систем (РЭС), что позволяет значительно снизить затраты на резервирование, повысить адаптивные способности аппаратуры, а также оптимизировать массо-габаритные характеристики систем. Автоматический выбор цели (это должна быть как локальная, так и частная цели) может быть реализован при условии оценки степени приближения системы к ее глобальной цели, которая должна быть представлена не декларативно, а как известная совокупность условий, т.е. глобальная цель должна быть декомпозирована на множество подцелей (локальных, частных, временных, переходных и т.д.), а это возможно только на основе искусственного интеллекта, способного находить обоснованные с точки зрения разума и интуиции человека решения. *Материалы и методы.* Формирование стратегий квазиоптимального управления интеллектуального резервирования радиоэлектронных систем проводится на основе методологии структурно-параметрической оптимизации РЭС. Математически это представляет собой решение обратной задачи теории надежности с последующим выявлением не критичных по внешним воздействующим факторам компонентов, на основе чего проводится структурно-параметрический синтез РЭС с учетом обобщения опыта эксплуатации, получаемого с помощью интеллектуальных компьютерных систем обучения. *Результаты и выводы.* Предлагаемый подход к синтезу системы управления строится на основе динамической экспертной системы, представляющей собой банк знаний, алгоритмов, сформированных на основе опроса экспертов, и обладающей высокоуровневым интерфейсом.

Ключевые слова: надежность, конструкторско-технологическое проектирование, радиоэлектронное средство, адаптация, квазиоптимальное управление

Для цитирования: Юрков Н. К. Современное состояние исследований в области создания высоконадежной бортовой радиоэлектронной аппаратуры // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 4. С. 5–12. doi:10.21685/2307-4205-2021-4-1

THE CURRENT STATE OF RESEARCH IN THE FIELD OF CREATING HIGHLY RELIABLE ON-BOARD ELECTRONIC EQUIPMENT

N.K. Yurkov

Penza State University, Penza, Russia
yurkov_NK@mail.ru

Abstract. *Background.* An approach to the development of the fundamental foundations of the design and technological design of radio-electronic devices operating in harsh operating conditions is proposed. The solution to the problem is carried out taking into account the multifactorial nature of the mutual influence of external influencing factors. The urgent need for a unified theoretical basis for creating adaptive self-healing reconfigurable structures of radio-electronic systems (RES) is emphasized, which can significantly reduce the cost of redundancy, increase the adaptive capabilities of equipment, and also optimize the mass-dimensional characteristics of systems. Automatic target selection (this should be both local and private goals) can be implemented provided that the degree of approximation of the system to its global goal is assessed, which should be presented not declaratively, but as a known set of conditions, i.e. a global goal should be decomposed into many subgoals (local, private, temporary, transitional, etc.), and this is possible only on the basis of artificial intelligence capable of finding solutions that are justified from the point of view of human reason and intuition. *Materials and methods.* The formation of strategies for quasi-optimal control of intelligent redundancy of radio-electronic systems is carried out on the basis of the methodology of structural-parametric optimization of radio electronic systems. Mathematically, this is a solution to the inverse problem of the theory of reliability with the subsequent identification of components that are not critical in terms of external influencing factors, on the basis of which a structural-parametric synthesis of RES is carried out, taking into account the generalization of the operating experience obtained with the help of intelligent computer training systems. *Results and conclusions.* The proposed approach to the synthesis of a control system is based on a dynamic expert system, which is a knowledge bank, algorithms formed on the basis of a survey of experts, and has a high-level interface.

Keywords: reliability, design and technological design, electronic means, adaptation, quasi-optimal control

For citation: Yurkov N.K. The current state of research in the field of creating highly reliable on-board electronic equipment. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;(4):5–12. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-4-1

Большинство современных работ посвящены решению классических задач конструкторско-технологического проектирования с целью создания конструкции с ограниченной эксплуатационной зоной, а также решению задач адаптации существующих конструкций к новым условиям эксплуатации. Проблема синтеза самоорганизующихся реконфигурируемых структур радиоэлектронных систем на основе интеллектуального резервирования не звучит в явной форме, хотя ее актуальность несомненна. Актуальность методологии синтеза супернадёжных систем длительного функционирования подтверждается все возрастающими требованиями к надёжности и качеству бортовой радиоэлектронной аппаратуры с высокими требованиями по массогабаритным ограничениям, работающей в жестких условиях эксплуатации [1, 2].

Сложная РЭС представляет собой мультиагентную структуру, для которой актуальна разработка и совершенствование методологии мультиагентного взаимодействия модулей, получаемых в результате разукрупнения системы РЭС, и объединенных по функциональному признаку. Функционирование РЭС опирается на общесистемную целевую функцию, которая постоянно «уточняется» в соответствии со своим текущим состоянием (локальными целевыми функциями) и динамикой воздействующих факторов внешней среды.

В условиях возрастающих требований к надёжности радиоэлектронных средств крайне остро ощущается необходимость в единой теоретической базе создания адаптивных самовосстанавливающихся реконфигурируемых структур радиоэлектронных систем. Важнейшее значение имеет совершенствование научно-методических основ повышения долговечности и безотказности деталей и узлов, что подразумевает обязательные мероприятия по многоэшелонному резервированию, что в свою очередь ведет к непроизводительным материальным затратам и значительному снижению массогабаритных показателей; обоснование межремонтных периодов, нормативов расхода сменно-запасных частей и объема ремонтов, актуальны научно обоснованные требования по надёжности применительно к заданным условиям эксплуатации и многие другие задачи. Хотя на этапе проектирования и закладываются основы надёжного функционирования изделия, нельзя исключать меро-

приятия по повышению надежности и долговечности также в ходе эксплуатации РЭС. Актуальной является проблема разработки и совершенствования методологии структурно-параметрической оптимизации проектных решений высоконадежных радиоэлектронных средств с учетом прогнозирования и управления показателями эффективности на этапе эксплуатации. И здесь не удается обойтись без резервирования элементов, блоков, подсистем. При этом необходимо именно интеллектуальное резервирование, основанное на накоплении и обработке знаний и позволяющее создавать конкретные резервные элементы по мере возникающей необходимости в ходе эксплуатации, а не складировать их заранее. Все это осуществляется на основе систем активной безопасности и локализации неисправностей, прогнозирования развития латентных дефектов, интеллектуальных компьютерных систем проектирования и теории распознавания образов. При этом появляется возможность использовать минимальные по массе и габаритам резервные блоки, которые по мере необходимости приобретают способность выполнять структурное и функциональное резервирование тех подсистем, которые имеют наибольшую (с точки зрения живучести системы) степень деградации [3, 4].

Научная значимость проблемы состоит в развитии фундаментальных основ конструкторско-технологического проектирования радиоэлектронных средств для жестких условий эксплуатации. Масштаб решаемой проблемы определяется многофакторностью взаимного влияния внешних воздействующих факторов, таких как температурные, механические и электромагнитные воздействия применительно к индивидуальной конструкции самовосстанавливающейся радиоэлектронной системы [5].

В процессе синтеза сложных, многопараметрических, высоконадежных РЭС ответственного применения требуется построение и управление областью работоспособности, а также необходимо выявить методологические аспекты синтеза критериев структурно-параметрической оптимизации. Решение оптимизационных задач для высоконадежных систем, в которых показатели надежности выступают в роли целевых функций, представляет собой сложную научно-техническую проблему, описываемую системой нелинейных дифференциальных уравнений большого порядка. Принимая некоторые допущения относительно ее области применения, удастся использовать упрощенный математический аппарат оценки надежности, что существенно снижает ранг решения проблемы.

При этом требуется разработка фундаментальных физико-математических основ синтеза структуры высоконадежных электронных средств на основе интеллектуального резервирования путем создания системы активной безопасности, включающей в себя подсистемы диагностики и внутренней реконфигурируемости для определения и управления областью работоспособности при учете внешних воздействующих факторов. Необходимо создание методологических основ комплексного учета факторов снижения ресурса электронных систем под действием внешних факторов [6].

Таким образом, актуальность синтеза адаптивных самовосстанавливающихся систем (Adaptive Self-Recovering System – ASRS), обеспечивающих бесперебойную работу систем ответственного назначения при длительной эксплуатации в жестких условиях, на основе интеллектуального резервирования не вызывает сомнения.

Таким образом, актуальна научная проблема формирования стратегий квазиоптимального управления интеллектуального резервирования радиоэлектронных систем на основе структурно-параметрической оптимизации бортовых РЭС ответственного назначения в зависимости от начальных, текущих и пролонгированных состояний системы. Создание алгоритмов структурно-параметрического синтеза резервирующих элементов, интеллектуального управления резервированием, созданием и восстановлением коммутирующих связей, обеспечивающих живучесть РЭС в реальных условиях эксплуатации осуществляется с учетом накопившейся усталости элементов и самой конструкции РЭС.

Необходима система активной безопасности, позволяющая обеспечить контроль за состоянием элементов и всей системы в целом, прогнозирование развития латентных дефектов на основе моделирования их развития с учетом влияния внешних воздействующих факторов (ВВФ) и воздействия старения, усталостной прочности материалов за счет интеллектуального резервирования, с последующим восстановлением нарушенных связей (элементов, компонент).

Математически это представляет собой решение обратной задачи теории надежности с последующим выявлением некритичных по внешним воздействующим факторам компонент, на основе чего проводится структурно-параметрический синтез РЭС с учетом обобщения опыта эксплуатации, получаемого с помощью интеллектуальных компьютерных систем обучения [7].

Актуальна разработка фундаментальных подходов, позволяющих синтезировать квазиоптимальную структуру высоконадежных электронных средств с возможностью последующей адаптации полученной структуры под выполнение поставленной задачи при выходе из строя части узлов и блоков разработанной системы, и тем самым создать методологию структурно-параметрического синтеза подсистем интеллектуального резервирования [8].

В ходе исследования предполагается решение следующих задач:

- применение системного учета комплексного влияния внешних воздействующих факторов на узлы электронной аппаратуры, отличающегося созданием мультиагентной цифровой модели, ориентированной на динамическую индивидуальную оценку показателей надежности;
- разработка методики комплексного учета в цифровой модели электронного блока как вибрационного воздействия, так и воздействий температуры, а также электромагнитного поля;
- разработка методов автоматизированного интеллектуального выбора минимально необходимого набора индикаторных показателей электронной аппаратуры, предназначенного для мониторинга и оценки показателей надежности с требуемым уровнем достоверности;
- разработка интеллектуальной компьютерной обучающей системы распознавания, оценки и прогнозирования степени влияния накопления усталостных явлений на развитие латентных дефектов;
- разработка методики, программной и аппаратной реализации для динамической оценки и прогнозирования работоспособности электронной аппаратуры на основе индикаторных показателей;
- разработка методики оценки показателей надежности проектируемых узлов, в том числе мелкосерийного и единичного исполнения, на основе выбранных индикаторных показателей, ориентированных на интеграцию в цифровые модели современной аппаратуры и отличающихся возможностью динамического контроля и прогнозирования предотказных состояний;
- разработка методов, моделей и алгоритмов прогнозирования остаточного ресурса узлов при динамическом контроле индикаторных показателей электронной аппаратуры в процессе эксплуатации;
- разработка методологических основ процесса реконфигурации сложных электронных систем за счет интеллектуального резервирования отдельных элементов и подсистем;
- разработка фундаментальных основ формирования резервных компонент по мере возникновения необходимости в их замене, а также восстановление нарушенных функциональных связей.

Системное представление указанного подхода графически дано на рис. 1 [9].



Рис. 1. Структура системы синтеза адаптивных самовосстанавливающихся РЭС на основе интеллектуального резервирования

Проблема заключается в определении алгоритмов структурно-параметрического синтеза системы управления интеллектуальным резервированием РЭС, находящейся под воздействием случайных факторов, когда на основе первичного определения положения динамической системы в фазовом пространстве и интеллектуальной оценки результатов прогнозирования состояния системы в реальном времени определяются алгоритмы формирования резервных элементов (подсистем) и алгоритмы их коммутации. Далее предстоит выявить конфликтные ситуации; определить параметры квазиоптимального управления в реальном пространстве и времени; распределить функции управления между человеком и техническими устройствами и осуществить синтезированное управление [10].

Это позволяет повысить эффективность принимаемых решений на основе обеспечения точности и устойчивости решения обратной задачи математической теории управления [11].

В связи с вышесказанным необходимо:

- 1) совершенствовать методологию структурно-параметрической оптимизации высоконадежных конструкций РЭС на начальных этапах жизненного цикла;
- 2) разработать методы проектирования резервирующих компонентов РЭС;
- 3) создать методики построения динамической системы с переменным числом параметров (адаптивная система), находящейся под воздействием деструктивных факторов;
- 4) разработать методику комплексного прогнозирования развития дефектов бортовой радиоэлектронной аппаратуры для интеллектуальной системы поддержки принятия решений;
- 5) разработать систему самодиагностики, ориентированной на применение как на верхнем системном уровне, так и на уровне электронных блоков;
- 6) осуществить выбор оптимальной совокупности контролируемых параметров изделий РЭС для оценки работоспособности узлов, их резерва и возможности дальнейшего выполнения оптимизационной задачи;
- 7) создать методику построения области работоспособности и управления ею, оценки запаса работоспособности для многопараметрических РЭС; разработать методологические аспекты синтеза критерия оптимальности на базе построения как глобальной, так и локальных целевых функций системы;
- 8) разработать методику оценки комплексного влияния температуры и механических и электромагнитных воздействий на работоспособность блока на этапе проектирования и эксплуатации, а также учет технологических особенностей производства;
- 9) провести исследование оптимизационных параметров конструкций РЭС с учетом многофакторной нелинейности гетероструктур, с учетом электромагнитных воздействий в процессе эксплуатации;
- 10) сформировать методологию оценки надежности электронной аппаратуры при комплексных воздействиях.

Таким образом, необходимо построить систему, которая могла бы скоординировать работу всех систем управления, задействованных в функциональной структуре РЭС, т.е. достичь такой эффективности с позиций аппаратуры длительного функционирования, в которой в ходе эксплуатации возможны изменения (деградация) штатного поведения подсистем и систем в целом, вызванные неисправностями или внешними возмущающими факторами, имеющими как объективный, так и субъективный характер. Эта система позволяет осуществлять оперативное формирование взаимосвязанных процедур мониторинга и управления состоянием РЭС, при котором обнаружение, локализация и ликвидация сбоев и отказов в них будет происходить раньше, чем станут проявляться возможные отрицательные последствия неисправностей [12].

Структура адаптивной самовосстанавливающейся системы представлена на рис. 2 [13].

Анализ рис. 2 показывает, что система функционирует на основе локальной цели (которая в свою очередь формируется из глобальной цели) с учетом внешних воздействующих факторов, которые в системе представлены своими моделями. Человек как лицо, принимающее решение (ЛПР), вырабатывает управляющее воздействие и представляет модели подсистем согласно локальным целям системы. Управляющие воздействия от ЛПР поступают в подсистему рассогласования между структурой и параметрами подсистем и соответствующих локальных целей. Получаемая информация о рассогласовании поступает в блок синтеза (материализации) структуры и параметров подсистемы, отвечающей за реализацию данной локальной цели. Также формируются частные цели, которые реализуются за счет управляющих воздействий в блоке достижения локальной цели.

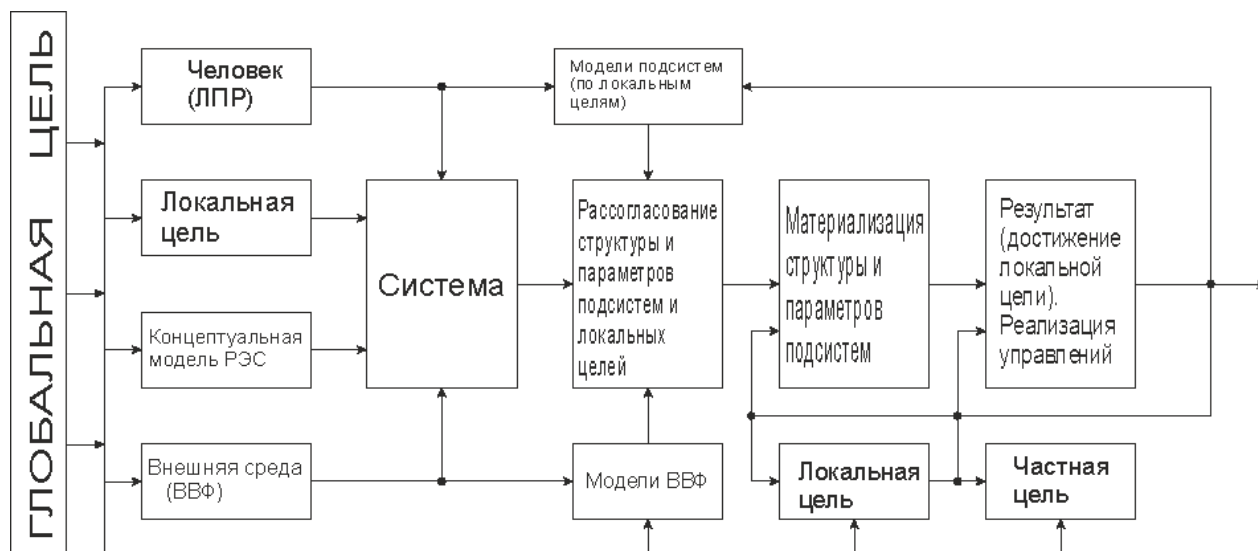


Рис. 2. Структура адаптивной самовосстанавливающейся системы

Таким образом, необходимо создать систему управления, которая не обрабатывает, а вырабатывает цель автоматически внутри себя. А поскольку система управления по определению предназначена для достижения уже выбранной цели, новая система, вырабатывая цель, превышает функции, возлагаемые на систему управления, являясь еще и системой автоматического целеуказания.

Автоматический выбор цели (это должна быть как локальная, так и частная цель) может быть реализован при условии оценки степени приближения системы к ее глобальной цели, которая должна быть представлена не декларативно, а как известная совокупность условий, т.е. глобальная цель должна быть декомпозирована на множество подцелей (локальных, частных, временных, переходных и т.д.), а это возможно только на основе искусственного интеллекта, способного находить обоснованные с точки зрения разума и интуиции человека решения. При этом система управления строится на основе динамической экспертной системы, представляющей собой банк знаний, алгоритмов, сформированных на основе опроса экспертов, и обладающей высокоуровневым интерфейсом.

Список литературы

1. Каштанов В. А., Медведев А. И. Теория надежности сложных систем. 2-е изд., перераб. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2010. 608 с.
2. Северцев Н. А. Теория надежности сложных систем в отработке и эксплуатации : учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Юрайт, 2019. 435 с.
3. Острейковский В. А. Теория надежности : учеб. для вузов. М. : Высш. шк., 2003. 463 с.
4. Абрамов О. В., Розенбаум А. Н. Управление эксплуатацией систем ответственного назначения. Владивосток : Дальнаука, 2000. 200 с.
5. Острейковский В. А., Лысенкова С. А., Недорезов В. Г., Юрков Н. К. Концептуальные основы обоснования применения операторов эволюции микроскопической энтропии, преобразования и внутреннего времени в теории долговечности структурно и функционально сложных систем // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 1. С. 17–30.
6. Михайлов В. С., Юрков Н. К. Интегральные оценки в теории надежности. Введение и основные результаты. М., 2020. 149 с.
7. Юрков Н. К. Интеллектуальные компьютерные обучающие системы : монография. Пенза : Изд-во ПГУ, 2010. 304 с.
8. Yurkov N. K., Mikhaylov V. S. Estimates of reliability indicators for failure-free tests conducted according to the binomial plan // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2020 : proceedings. 2020. С. 9067421.
9. Юрков Н. К., Кочегаров И. И., Трусов В. А. Разработка единой надежно-ориентированной модели радиоэлектронных средств // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2020. Т. 1. С. 19–21.
10. Северцев Н. А., Юрков Н. К., Гришко А. К. К проблеме глобальной оптимизации параметров надежности и безопасности сложных динамических систем инверсным методом // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 1. С. 13–23.

11. Кочегаров И. И., Юрков Н. К., Абдирашев О. К. [и др.]. Методика оценки остаточного ресурса электронного блока с использованием ускоряющих факторов // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 4. С. 58–72.
12. Grishko A., Lysenko A., Yurkov N. Stochastic model of parametric prediction of reliability of radio-electronic systems // Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, USBEREIT 2019 : proceedings. 2019. С. 432–435.
13. Юрков Н. К. Методология программно-целевого адаптивного управления интегрированными производственными комплексами в условиях неопределенности // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2019. Т. 1. С. 107–110.

References

1. Kashtanov V.A., Medvedev A.I. *Teoriya nadezhnosti slozhnykh system = Theory of reliability of complex systems*. 2nd ed., rev. Moscow: FIZMATLIT, 2010:608. (In Russ.)
2. Severtsev N.A. *Teoriya nadezhnosti slozhnykh sistem v otrabotke i ekspluatatsii: ucheb. posobie = Theory of reliability of complex systems in development and operation : textbook*. 2nd ed., rev. and suppl. Moscow: Yurayt, 2019:435. (In Russ.)
3. Ostreykovskiy V.A. *Teoriya nadezhnosti: ucheb. dlya vuzov = Reliability theory : textbook for universities*. Moscow: Vyssh. shk., 2003:463. (In Russ.)
4. Abramov O.V., Rozenbaum A.N. *Upravlenie ekspluatatsiyey sistem otvetstvennogo naznacheniya = Management of the operation of systems of responsible purpose*. Vladivostok: Dal'nauka, 2000:200. (In Russ.)
5. Ostreykovskiy V.A., Lysenkova S.A., Nedorezov V.G., Yurkov N.K. Conceptual bases of substantiation of application of operators of evolution of microscopic entropy, transformation and internal time in the theory of durability of structurally and functionally complex systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and Quality of Complex Systems*. 2021;(1):17–30. (In Russ.)
6. Mikhaylov V.S., Yurkov N.K. *Integral'nye otsenki v teorii nadezhnosti. Vvedenie i osnovnye rezul'taty = Integral estimates in reliability theory. Introduction and main results*. Moscow, 2020:149. (In Russ.)
7. Yurkov N.K. *Intellektual'nye komp'yuternye obuchayushchie sistemy: monografiya = Intelligent computer learning systems : monograph*. Penza: IZD-VO PGU, 2010:304. (In Russ.)
8. Yurkov N.K., Mikhaylov V.S. Estimates of reliability indicators for failure-free tests conducted according to the binomial plan. *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2020: proceedings*. 2020:9067421.
9. Yurkov N.K., Kochegarov I.I., Trusov V.A. Development of a unified reliability-oriented model of electronic means. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2020;1:19–21. (In Russ.)
10. Severtsev N.A., Yurkov N.K., Grishko A.K. On the problem of global optimization of reliability and safety parameters of complex dynamic systems by the inverse method. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and Quality of Complex Systems*. 2020;(1):13–23. (In Russ.)
11. Kochegarov I.I., Yurkov N.K., Abdirashev O.K. [et al.]. Methodology for estimating the residual life of an electronic unit using accelerating factors. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and Quality of Complex Systems*. 2020;(4):58–72. (In Russ.)
12. Grishko A., Lysenko A., Yurkov N. Stochastic model of parametric prediction of reliability of radio-electronic systems. *Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, USBEREIT 2019: proceedings*. 2019:432–435.
13. Yurkov N.K. Methodology of program-targeted adaptive management of integrated production complexes in conditions of uncertainty. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2019;1:107–110. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Николай Кондратьевич Юрков

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

Nikolay K. Yurkov

Doctor of technical sciences, professor,
the honoured worker of science
of the Russian Federation,
head of the sub-department
of radio equipment design and production,
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 27.09. 2021

Поступила после рецензирования/Revised 10.10.2021

Принята к публикации/Accepted 10.11.2021

МАСШТАБНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

А. С. Ильин¹, И. А. Карчев², А. А. Большакова³, В. П. Перевертов⁴

¹ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
^{1,2,3} Научно-исследовательский институт электронно-механических приборов, Пенза, Россия
⁴ Самарский государственный университет путей сообщения, Самара, Россия
¹ aalexii@mail.ru, ^{2,3} npk4p@niiemp.ru, ⁴ vperevertov@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность применения информационно-измерительных систем измерений высоких напряжений определяется постоянной модернизацией и совершенствованием как энергетического оборудования, так и различных областей науки и техники. Повсеместное применение высоковольтных информационно-измерительных систем вызывает необходимость уделить особое внимание масштабным преобразователям высокого напряжения в их составе. Целью работы является ознакомление с современными отечественными делителями напряжений высоковольтными фирмы АО «НИИЭМП», а также описание областей их применения. *Материалы и методы.* Метод масштабного преобразования. Измерение напряжения делителем напряжения. *Результаты.* Приведен обзор делителей напряжения высоковольтных, представлены результаты их работы и сферы применения. *Выводы.* Применение отечественных делителей напряжений в информационно-измерительных системах с рабочими напряжениями до 100 кВ и более позволит увеличить в современное время темпы развития энергетики, науки и техники.

Ключевые слова: информационно-измерительная система, модернизация, масштабные преобразователи, высокое напряжение, делитель напряжения, импульсный сигнал, измерение

Для цитирования: Ильин А. С., Карчев И. А., Большакова А. А., Перевертов В. П. Масштабные преобразователи высокого напряжения для информационно-измерительных систем // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 4. С. 13–19. doi:10.21685/2307-4205-2021-4-2

SCALED HIGH VOLTAGE CONVERTERS FOR INFORMATION-MEASURING SYSTEMS

A.S. Il'in¹, I.A. Karchev², A.A. Bol'shakova³, V.P. Perevertov⁴

¹ Penza State University, Penza, Russia
^{1,2,3} Research Institute of Electronic and Mechanical Devices, Penza, Russia
⁴ Samara State University of Railway Transport, Samara, Russia
¹ aalexii@mail.ru, ^{2,3} npk4p@niiemp.ru, ⁴ vperevertov@yandex.ru

Abstract. *Background.* The relevance of the use of information-measuring systems for measuring high voltages is determined by the constant modernization and improvement of both power equipment and various fields of science and technology. The widespread use of high-voltage information-measuring systems makes it necessary to pay special attention to scaled high-voltage converters in their composition. The purpose of the work is to familiarize with modern domestic high-voltage voltage dividers of the company JSC "NIIEMP", as well as a description of the scope of their application. *Materials and methods.* Scaled transformation method. Voltage measurement with a voltage divider. *Results.* An overview of voltage dividers of high-voltage is given, the results of their operation and scope of application are presented. *Conclusions.* The use of domestic voltage dividers in information-measuring systems with operating voltages up to 100 kV and more will increase the pace of development of science and technology in modern times.

Keywords: information-measuring system, modernization, large-scale converters, high voltage, voltage divider, pulse signal, measurement

For citation: Ilin A.S., Karchev I.A., Bolshakova A.A., Perevertov V.P. Scaled high voltage converters for information-measuring systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(4):13–19. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-4-2

В соответствии с программой о развитии электроэнергетики до 2035 г., предусматривающей модернизацию действующих и ввод в эксплуатацию новых объектов электроэнергетики, оснащенных информационно-измерительными системами (ИИС) измерений высоких напряжений, возникает необходимость в усовершенствовании и обновлении масштабных преобразователей высоких напряжений для контроля, обслуживания и наладки энергетического оборудования. Создание и широкое применение в последние годы новых высоковольтных ИИС, в том числе ИИС проверки киловольтметров, вызвало настоятельную необходимость в совершенствовании и обновлении их высоковольтной части, в большинстве случаев, представляющих собой делитель напряжения.

АО «НИИЭМП» разрабатывает и производит делители напряжений высоковольтные (ДНВ), предназначенные для преобразования высоких напряжений до уровня, безопасного для последующей передачи, обработки и хранения измерительного сигнала. ДНВ могут использоваться для контроля режимов работы цепей постоянного (до 140 кВ), переменного (до 140 кВ) и импульсного (до 200 кВ) токов электротехнических и радиотехнических ИИС [1].

Принцип работы делителя основан на свойствах пассивных линейных электрических цепей, изменяя амплитуду напряжения в любой точке электрической цепи пропорционально амплитуде входного сигнала.

Согласно теории делителей напряжения, в омических делителях вследствие малых зарядных токов, протекающих по частичным емкостям по отношению к земле в нижней части делителя, распределение напряжения получается нелинейным и частотно-зависимым. Неравномерность распределения напряжения устраняется увеличением параллельных емкостей. Это осуществляется подключением конденсаторов параллельно омическим элементам делителя [2].

ДНВ имеет возможность масштабировать напряжения в широкой полосе частот. Это достигается одновременным подключением демпферных резисторов параллельно и последовательно с конденсаторами. Вместе с резисторами R_1 и R_2 конденсаторы C_1 и C_2 образуют последовательный емкостно-омический делитель (рис. 1). Параллельно этому делителю включены резисторы R_3 и R_4 , обеспечивающие компенсацию стекающего заряда с емкости C_2 через входное сопротивление осциллографа при регистрации длительных или постоянных напряжений [2].

Схема замещения емкостно-омического делителя напряжения представлена на рис. 1.

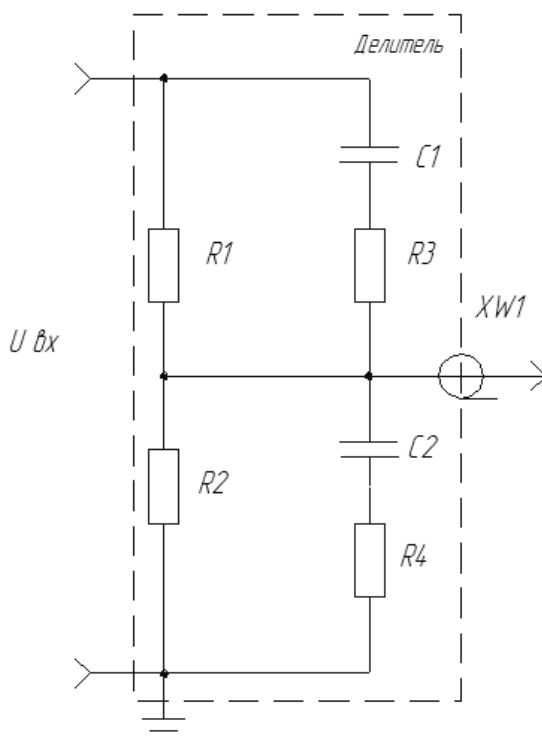


Рис. 1. Схема замещения емкостно-омического делителя напряжения типа ДНВ:

$U_{вх}$ – входное напряжение ДНВ; $U_{вых}$ – выходное напряжение ДНВ; R_1 – сопротивление верхнего плеча; C_1 – емкость верхнего плеча; R_2 – сопротивление нижнего плеча; C_2 – емкость нижнего плеча; R_3 – демпферное сопротивление верхнего плеча; R_4 – демпферное сопротивление нижнего плеча

Делитель дает возможность учитывать паразитные сопротивления и емкости утечки в широком диапазоне частот. Условие частотной компенсации по КД содержит формула

$$C_1 R_1 = C_2 R_2, \quad (1)$$

где R_1 – сопротивление верхнего плеча; C_1 – емкость верхнего плеча; R_2 – сопротивление нижнего плеча; C_2 – емкость нижнего плеча.

Такой делитель при подборе определенных параметров передает с малой погрешностью переменное, постоянное и импульсное напряжения.

Значение входного напряжения ДНВ определяется по формуле

$$U_{\text{вх}} = K_{\text{д}} \cdot U_{\text{вых}}, \quad (2)$$

где $K_{\text{д}}$ – коэффициент деления ДНВ вместе с кабелем; $U_{\text{вых}}$ – напряжение, измеренное на выходе соединительного кабеля.

Конструктивно ДНВ выполнен из высоковольтного электрода, основания и тонкостенного диэлектрического цилиндра.

Верхнее плечо, к которому прикладывается высокое напряжение, расположено внутри диэлектрического цилиндра. Нижнее плечо, на котором напряжение уменьшено по отношению к входному, расположено внутри основания.

На внешней поверхности основания делителя установлено приборное гнездо для подключения соединительного кабеля. Также на основании имеется зажим защитного заземления [3].

На рис. 2 представлен внешний вид делителей типа ДНВ производства АО «НИИЭМП».



Рис. 2. Внешний вид делителей напряжения типа ДНВ производства АО «НИИЭМП»

Делители обеспечивают защиту от поражения электрическим током по классу I по ГОСТ 12.2.007.0-75¹. Степень защиты оболочки делителя по ГОСТ 14254-96 IP40DH. Категория монтажа I, степень загрязнения 1².

¹ ГОСТ 12.2.007.0-75. Система стандартов безопасности труда. Изделия электротехнические. Общие требования безопасности.

² ГОСТ 14254-96. IP40DH Степени защиты, обеспечиваемые оболочками.

Делители ДНВ имеют два варианта исполнения: ДНВ А – диапазон рабочих частот (0 – 1000 Гц) и ДНВ И – диапазон (50 до $20 \cdot 10^6$ Гц).

Для работы ДНВ А используется кабель соединительный, который состоит из высокочастотного кабеля типа RG-58, на концах которого установлены штекеры для подключения к ДНВ и СИ (рис. 3,а). Для работы с ДНВ И применяется кабель соединительный, состоящий из высокочастотного кабеля типа RG-214/U и фильтра низких частот (рис. 3,б). Для соединения с делителем на одном из концов высокочастотного кабеля расположен штекер. Фильтр, содержащий R, L, C компоненты, размещен в металлическом корпусе, на одной из сторон которого расположен приборный штекер для подключения к СИ или осциллографу [3].

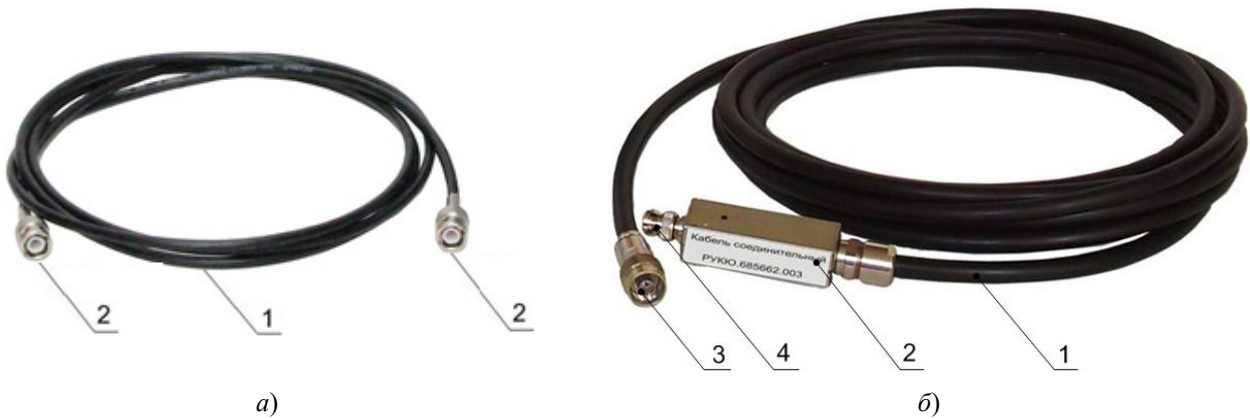


Рис. 3. Внешний вид соединительного кабеля:

- а – кабель соединительный для ДНВ А: 1 – кабель коаксиальный; 2 – штекер для подключения к ДНВ и СИ;
- б – кабель соединительный для ДНВ И: 1 – кабель коаксиальный; 2 – фильтр низких частот;
- 3 – штекер для подключения к ДНВ; 4 – приборный штекер для подключения к СИ

Зависимость нормированного входного напряжения делителей от частоты приведена на рис. 4.

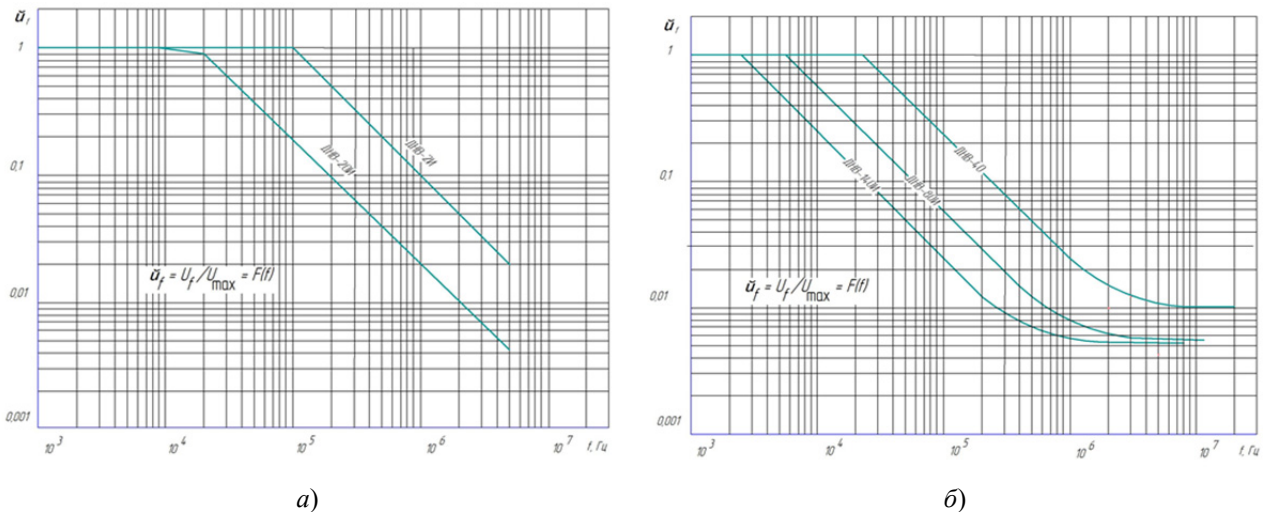


Рис. 4. Зависимость нормированного входного напряжения \bar{u}_f от частоты f :

- а – делителей типа ДНВ-2И и ДНВ-20И;
- б – делителей типа ДНВИ-40, ДНВ-80И и ДНВ-140И

Сравнение форм осциллограмм импульсных сигналов на выходе ДНВ и зарубежных аналогов подробно представлено в статье «Высоковольтные широкополосные делители напряжений», опубликованной в материалах IV общероссийской научно-технической конференции «Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем (СВЧ 2012)» [4].

В табл. 1 приведены основные метрологические характеристики делителей напряжений типа ДНВ.

Метрологические характеристики

Метрологические характеристики	Тип делителя					
	ДНВ-2И	ДНВ-20И	ДНВИ-40	ДНВ-80А	ДНВ-80И	ДНВ-140И
Диапазон входных напряжений постоянного тока, кВ	0,002–2,4	1–18	1–40	1–80	1–80	14–140
Диапазон входных напряжений переменного тока частотой 50 Гц, кВ	0,014–1,7	1–12	1–30	1–60	1–60	10–100
Основная относительная погрешность преобразования U DC, %	±0,1	±0,1	±0,5	±0,5	±0,5	±1
Основная относительная погрешность преобразования U AC частотой 50 Гц, %	±0,5	±0,5	±1	±1	±1	±1
Коэффициент деления	200	1500	2500	5000	5000	5000
Диапазон рабочих частот, Гц	0–5·10 ⁶	0–5·10 ⁶	0–20·10 ⁶	0–10 ³	0–12·10 ⁶	50–8·10 ⁶
Время нарастания переходной характеристики, нс, не более	70	70	17	–	30	50
Амплитуда импульса, кВ, не более	14	60	100	–	160	230

Делители напряжения типа ДНВ находят применение в ИИС измерений высоких напряжений объектов электроэнергетики, а также в различных областях науки и техники. Потребность оснащения ИИС данными масштабными преобразователями высоких напряжений показывает разнообразие областей применения ДНВ производства АО «НИИЭМП» (рис. 5).



Рис. 5. Применение делителей напряжений типа ДНВ производства АО «НИИЭМП»: а – цифровые киловольтметры; б – ИИС поверки киловольтметров; в – высоковольтный широкополосный комплект КМБТ; г – СТАТКОМ-1 подстанции 220 кВ «Могоча» ПАО «ФСК ЕЭС»

Так, делители напряжений типа ДНВ нашли применение в цифровых киловольтметрах СКВ, предназначенных для измерений напряжений постоянного тока, действующих и амплитудных значений напряжений переменного тока. Киловольтметры применяются для поверки измерительных трансформаторов напряжения, контроля и измерения сигналов при производстве и учете электроэнергии [5]. Кроме того, цифровые киловольтметры используются в передвижных электролабораториях [6].

ДНВ является образцовым масштабным преобразователем высокого напряжения постоянного тока в образцовом измерительном канале ИИС поверки киловольтметров УПК-30ПТ. Она предназначена для воспроизведений и измерений напряжений постоянного тока. Используется при проведении испытаний и исследований, при проведении поверки киловольтметров в лабораторных условиях в организациях государственных и ведомственных метрологических служб [7].

ЗАО «ИТЦ Континуум» предлагает высоковольтный широкополосный комплекс КМБТ, низковольтный блок которого сопряжен с делителями напряжения типа ДНВ. Комплекс предназначен для измерения постоянного/переменного/ импульсного напряжения до 100 кВ для лабораторных или промышленных применений. Применим для электроэнергетики, прикладной физики, при тестировании электромедицинского (рентгеновского) и коммуникационного оборудования [8].

В ходе проведения модернизации подстанции 220 кВ «Могоча» ПАО «ФСК ЕЭС» – магистральные электрические сети (МЭС) Сибири, делители напряжений типа ДНВ вошли в состав оборудования СТАТКОМ-1 [9].

Заключение

Делители ДНВ можно рекомендовать для измерения напряжений постоянного (до 140 кВ), переменного (до 100 кВ) и импульсного (до 200 кВ) токов.

Применение данных делителей в информационно-измерительных системах с рабочими напряжениями до 100 кВ и более в широком спектре научно-технических областей позволит увеличить в современное время темпы модернизации и развития энергетики, науки и техники.

Список литературы

1. АО «НИИЭМП». URL: <https://niiemp.ru>
2. Шваб А. Измерения на высоком напряжении. М. : Энергоатомиздат, 1983.
3. Делители напряжения высоковольтные. Технические условия. РУКЮ.411522.020 ТУ. URL: <https://propribory.ru>
4. Воронов А. П., Большакова А. А., Карчев И. А. Высоковольтные широкополосные делители напряжений // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем (СВЧ 2012) : материалы IV Общерос. науч.-техн. конф. (г. Омск, 10–13 октября 2012 г.). Омск : Полиграфический центр КАН, 2012. С. 228–232.
5. Киловольтметры цифровые СКВ. Руководство по эксплуатации. РУКЮ 411116.001 РЭ. URL: <https://www.terra-kip.ru>
6. ПО ЭНЕРГОСПЕЦТЕХНИКА. Передвижные электролаборатории. URL: <https://esteh.nt-rt.ru>
7. Ильин А. С., Кострикина И. А., Воронов А. П., Плаксунов Р. Ф. Установка для поверки киловольтметров УПК-30ПТ // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2020. № 4 (34). С. 44–50. doi: 10.21685/2307-5538-2020-4-5
8. ЗАО «ИТЦ Континуум». URL: <http://www.ec-continuum.ru>
9. В Забайкалье начались испытания рабочим напряжением оборудования СТАТКОМ // Новости – отрасли ТЭК. URL: <http://www.energyland.info/analytic-show-119895>

References

1. AO «NIIEMP». Available at: <https://niiemp.ru>
2. Shvab A. *Izmereniya na vysokom napryazhenii = Measurements at high voltage*. Moscow: Energoatomizdat, 1983. (In Russ.)
3. *Deliteli napryazheniya vysokovol'tnye. Tekhnicheskie usloviya. RUKYu.411522.020 TU = Voltage dividers are high-voltage. Technical conditions. ARM.411522.020 TU*. (In Russ.). Available at: <https://propribory.ru>
4. Voronov A.P., Bol'shakova A.A., Karchev I.A. High-voltage broadband voltage dividers. *Obmen opytom v oblasti sozdaniya sverkhshirokopolosnykh radioelektronnykh sistem (SVCh 2012): materialy IV Obscheros. nauch.-tekhn. konf. (g. Omsk, 10–13 oktyabrya 2012 g.) = Exchange of experience in the field of creation of ul-*

tra-wideband radioelectronic systems (microwave 2012) : materials of the IV All-Russian Scientific and Technical conf. (Omsk, October 10-13, 2012). Omsk: Poligraficheskiy tsentr KAN, 2012:228–232. (In Russ.)

5. *Kilovol'tmetry tsifrovyye SKV. Rukovodstvo po ekspluatatsii. RUKYu 411116.001 RE = Kilovoltmeters digital SLE. Operation manual. ARM 411116.001 RE. (In Russ.). Available at: <https://www.terra-kip.ru>*
6. *PO ENERGO SPETSTEKHNIKA. Peredvizhnye elektrolaboratorii = PA ENERGO SPECTEKHNIKA. Mobile electrical laboratories. (In Russ.). Available at: <https://esteh.nt-rt.ru>*
7. *Pl'in A.S., Kostrikina I.A., Voronov A.P., Plaksunov R.F. Installation for verification of kilovoltmeters UPK-30PT. Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control. 2020;(4):44–50. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2020-4-5*
8. *ZAO «ITTs Kontinuum». Available at: <http://www.ec-continuum.ru>*
9. *In Transbaikalia, tests of the operating voltage of the STATCOM equipment began. Novosti – otrasli TEK = News – fuel and energy industries. (In Russ.). Available at: <http://www.energyland.info/analitic-show-119895>*

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Сергеевич Ильин

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40);
инженер-электроник,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: aalexeeil@mail.ru

Иван Анатольевич Карчев

начальник отдела измерительных приборов,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: npk4p@niiemp.ru

Альбина Александровна Большакова

руководитель группы электрических измерений,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: npk4p@niiemp.ru

Валерий Петрович Перевертов

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

Aleksey S. Plin

Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia);
electronics engineer,
Scientific and Research Institute
of Electronic Mechanic Instruments
(44 Karakozova street, Penza, Russia)

Ivan A. Karchev

Head of the measuring instruments department,
Scientific Research Institute
of Electro-Mechanical Devices
(44 Karakozova street, Penza, Russia)

Albina A. Bolshakova

Electrical measurement team leader,
Scientific Research Institute
of Electro-Mechanical Devices
(44 Karakozova street, Penza, Russia)

Valeriy P. Perevertov

Candidate of technical sciences, associate professor,
professor of the sub-department of ground
transportation and technology tools,
Samara State University of Communications
(2 V Svobody street, Samara, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 02.09.2021

Поступила после рецензирования/Revised 15.10.2021

Принята к публикации/Accepted 09.11.2021

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ DATA MINING

А. Д. Тулегулов¹, Д. С. Ергалиев², С. Ж. Кенбеилова³, А. Исмаилов⁴, К. М. Акишев⁵

^{1,2,3} Академия гражданской авиации, Алматы, Казахстан

^{4,5} Казахский университет технологии и бизнеса, Нур-Султан, Казахстан

¹ tad62@yandex.kz, ² DES-67@yandex.kz, ³ sal-japaspai@mail.ru, ⁴ Asyl@mail.ru, ⁵ tad62@ya.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматривается нейронная сеть (искусственная нейронная сеть) как некая математическая модель. Также в работе анализируется ее программное и аппаратное воплощение. *Материалы и методы.* Метод нейронных сетей ассоциируется с глубоким обучением (deep learning). Предлагаемая модель построена по принципу организации и функционирования биологических нейронных сетей – сетей нервных клеток живого организма. Она представляет собой систему соединенных и взаимодействующих между собой простых процессоров в виде искусственных нейронов. Будучи соединенными в большую сеть с управляемым взаимодействием, такие по отдельности взятые простые процессоры вместе способны выполнять довольно сложные задачи. *Результаты.* Как результат проведенных исследований можно отметить ансамблевые методы, которые являются методом интеллектуального обучения, где несколько моделей обучаются для решения поставленного единого вопроса и объединяются для получения лучших результатов. Основное предположение применения метода: при верном сочетании слабых моделей можно достигнуть более надежных и точных результатов. *Выводы.* Описываемые ансамблевые методы машинного обучения являются так называемыми мета-алгоритмами, позволяющими объединить несколько методов машинного обучения в одну прогностическую модель. Указанные алгоритмы состоят из двух шагов: создание распределения простых моделей ML по подмножествам исходных данных и объединение распределения в одну «агрегированную» модель.

Ключевые слова: нейронная сеть, математическая модель, аппаратное воплощение, процессор, задачи

Для цитирования: Тулегулов А. Д., Ергалиев Д. С., Кенбеилова С. Ж., Исмаилов А., Акишев К. М. Математическая модель искусственной нейронной сети для решения задач data mining // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 4. С. 20–26. doi:10.21685/2307-4205-2021-4-3

MATHEMATICAL MODEL OF AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK FOR SOLVING DATA MINING PROBLEMS

A.D. Tulegulov¹, D.S. Ergaliev², S.Zh. Kenbeilova³, A. Ismailov⁴, K.M. Akishev⁵

^{1,2,3} Academy of Civil Aviation, Almaty, Kazakhstan

^{4,5} Kazakh University of Technology and Business, Nur-Sultan, Kazakhstan

¹ tad62@yandex.kz, ² DES-67@yandex.kz, ³ sal-japaspai@mail.ru, ⁴ Asyl@mail.ru, ⁵ tad62@ya.ru

Abstract. Background. The article discusses a neural network (artificial neural network) as a kind of mathematical model. Also, the work analyzes its software and hardware implementation. Materials and methods. The neural network method is associated with deep learning. The proposed model is built on the principle of organization and functioning of biological neural networks – networks of nerve cells of a living organism. It is a system of interconnected and interacting simple processors in the form of artificial neurons. When connected in a large network with controlled interactions, these simple processors taken separately are capable of performing quite complex tasks together. Results. As a result of the research carried out, ensemble methods can be noted, which are a method of intellectual learning, where several models are trained to solve a single question posed and are combined to obtain the best results. The main assumption of the application of the method: with the right combination of weak models, more reliable and accurate results can be achieved. Conclusions. The described ensemble machine learning methods are so-called meta-algorithms that combine several machine learning methods into one predictive model. These algorithms consist of two

steps: creating a distribution of simple ML models over subsets of the original data and combining the distribution into one "aggregated" model.

Keywords: neural network, mathematical model, hardware implementation, processor, tasks

For citation: Tulegulov A.D., Ergaliev D.S., Kenbeilova S.Zh., Ismailov A., Akishev K.M. Mathematical model of an artificial neural network for solving data mining problems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(4):20–26. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-4-3

Введение

Методы интеллектуального обучения предполагают более гибкий подход к процессу обучения. Особое место в этом вопросе уделяется нейронным сетям. В настоящее время с помощью метода нейронных сетей успешно решаются задачи Data Mining, такие как классификация, прогнозирование и кластеризация.

Учитывая тот факт, что в современном мире активно развиваются цифровые образовательные технологии, было бы как минимум неправильно не использовать нейронные сети как эффективный инструмент. Уже существуют разные методы применения нейронных сетей.

Условия применения метода нейронных сетей:

- 1) необходимо выбирать переменные, которые скорее всего влияют на требуемый результат;
- 2) работать с числовыми и номинальными переменными, переменные других типов требуется преобразовать в указанные типы;
- 3) требуется иметь порядка сотен или тысяч наблюдений; чем больше в задаче переменных, тем больше нужно иметь наблюдений;
- 4) при необходимости можно работать с наблюдениями, содержащими пропущенные значения, если данных достаточно, исключить подобные наблюдения;
- 5) наличие выбросов в данных может создать трудности, при возможности требуется их удалить [1].

Методы исследования

Метод нейронных сетей ассоциируется с глубоким обучением (deep learning). Пример производительности методов нейронных сетей и глубокого обучения показан на рис. 1.



Рис. 1. Пример производительности методов нейронных сетей и глубокого обучения

Понятие глубокого обучения относится к другой классификации и обозначает подход к обучению так называемых глубоких структур, к которым можно отнести многоуровневые нейронные сети.

Глубокое обучение – совокупность методов машинного обучения (с учителем, с частичным привлечением учителя, без учителя, с подкреплением), основанных на обучении представлениям, а не специализированным алгоритмам под конкретные задачи [1].

В качестве преимуществ метода глубокого обучения можно отметить:

- 1) лучшее соотношение время-производительность – точность метода глубоких сетей превосходит иные методы машинного обучения в различных областях деятельности человека, как понимание устной речи, обработка естественного языка, компьютерное зрение и игровая индустрия;
- 2) масштабируемость – метод глубокого обучения не зависит от количества и прироста данных;
- 3) для метода не требуется разработка функций, так как данные передаются непосредственно в обучаемую сеть, т.е. полностью исключаются сложные этапы разработки функций по сравнению с классическими методами;
- 4) легкая адаптация методов глубокого обучения для использования в соседних областях, т.е. имеется возможность использования заранее подготовленных глубоких сетей для разных задач. Это позволяет достичь высокой производительности в кратчайшие сроки и облегчения обучения всей модели;
- 5) возможность переноса созданных методов глубокого обучения в другие области, это связано с похожестью базовых знаний рассматриваемых областей.

На рис. 2 методы глубокого обучения классифицированы по способу обучения.

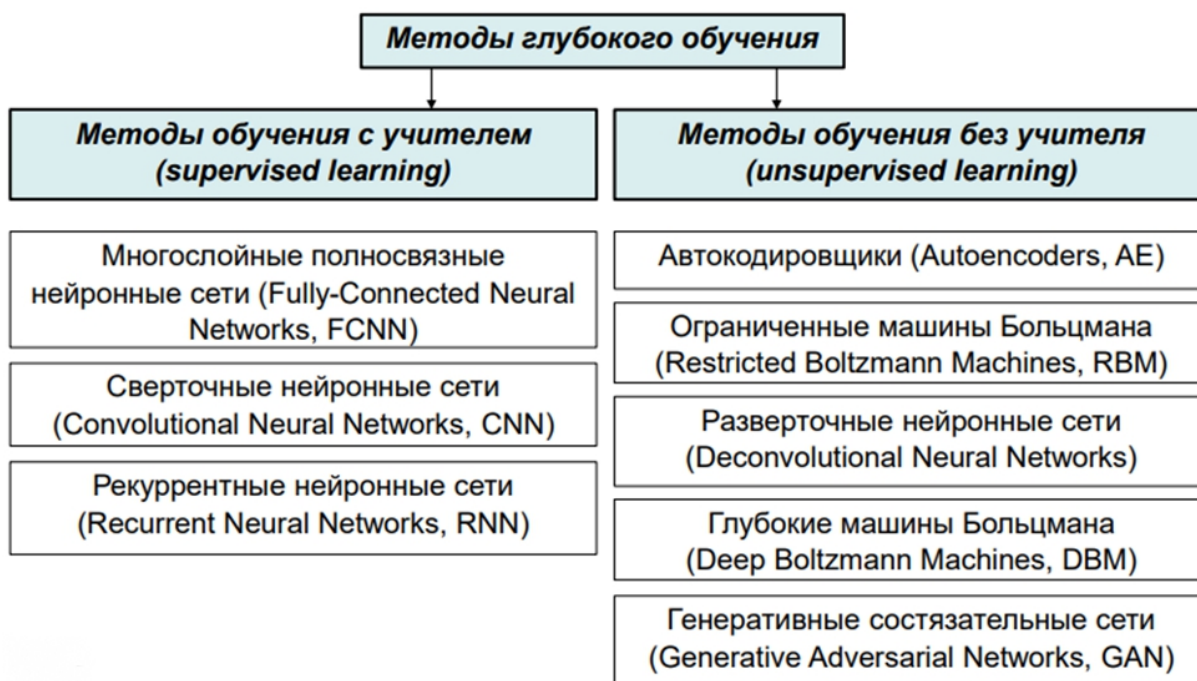


Рис. 2. Методы глубокого обучения по способу обучения

Существуют и другие формы классификации.

Результаты

Как результат проведенных исследований можно отметить ансамблевые методы, которые являются методом интеллектуального обучения, где несколько моделей обучаются для решения поставленного единого вопроса и объединяются для получения лучших результатов. Основное предположение применения метода: при верном сочетании слабых моделей можно достигнуть более надежных и точных результатов [2].

Ансамбль методов в обучении машин использует несколько обучающих алгоритмов с целью получения лучшей эффективности прогнозирования, чем могли бы получить от каждого обучающего алгоритма по отдельности.

В отличие от статистического ансамбля в статистической механике, который обычно бесконечен, ансамбль методов в обучении машин состоит из конкретного конечного множества альтернативных моделей, но обычно позволяет существовать более гибким структурам.

Рисунок 3 показывает пример ансамблевого метода с последовательным использованием методов.

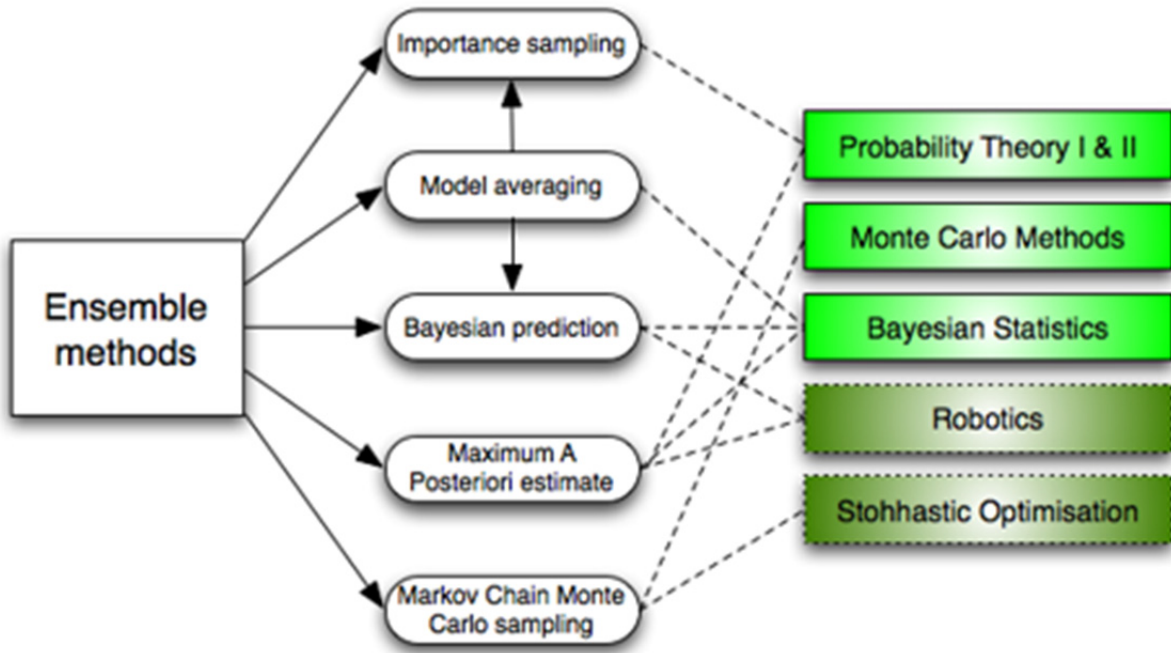


Рис. 3. Пример ансамблевого метода

На рис. 4 приведен график взаимосвязи между смещением и разбросом.

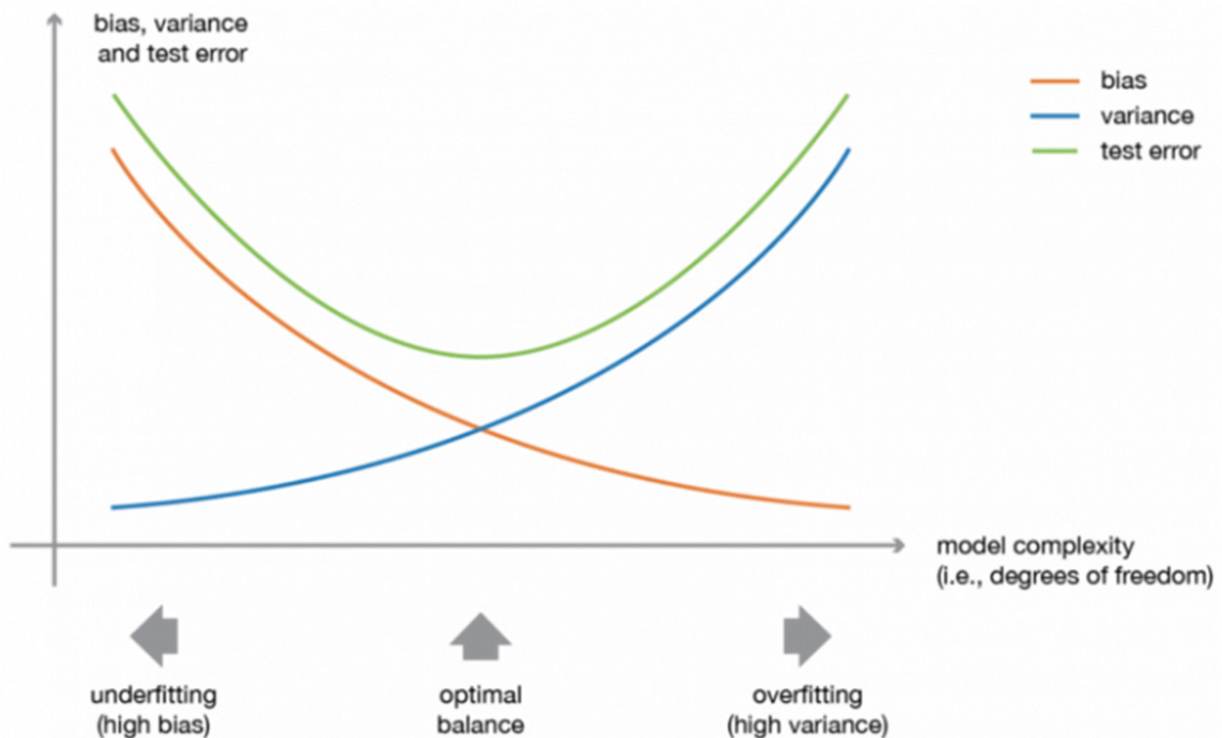


Рис. 4. Выбор между смещением и разбросом

В ансамблевой теории обучения вводятся понятия слабых учеников (или базовых моделей), которые используются в качестве базовых блоков для проектирования более сложных моделей путем объединения нескольких из них. В большинстве случаев эти базовые модели работают сами по себе не так хорошо в связи с тем, что они имеют высокое смещение или большой разброс.

Тогда идея ансамблевых методов состоит в том, чтобы попытаться уменьшить смещение и/или разброс таких слабых учеников, объединяя несколько из них вместе, чтобы создать сильного ученика (или модель ансамбля), который достигает лучших результатов [3].

Описание трех методов ансамблевого обучения:

1. Бэггинг (англ. *Bootstrap Aggregating*) является способом уменьшения дисперсии прогноза путем генерирования дополнительных данных для обучения из исходного набора данных с помощью комбинации с повторениями для получения мультинаборов той же мощности / размера как исходные данные.

Увеличивая размер тренировочного набора, вы не сможете улучшить прогнозирующую силу модели, а просто уменьшите дисперсию, узко настраивая прогноз на ожидаемый результат.

2. Бустинг представляет собой двухэтапный подход, при котором сначала используются подмножества исходных данных для создания ряда моделей со средней эффективностью, а затем повышается их производительность путем их объединения вместе с использованием определенной функции стоимости (= большинство голосов).

В отличие от пакетного применения, при классическом повышении создание подмножества не является случайным и зависит от производительности предыдущих моделей. При этом каждое новое подмножество содержит элементы, которые, вероятно, неправильно классифицированы предыдущими моделями.

Благодаря таким свойствам, как простота, универсальность, гибкость и высокая обобщающая способность, бустинг остается одним из наиболее популярных методов машинного обучения, наряду с нейронными сетями и методом опорных векторов.

3. Стекинг похож на бустинг: также применяется несколько моделей к исходным данным.

Обсуждения

Разница в том, что у это не просто эмпирическая формула для весовой функции, а ввод метауровня и использования другой модели. Подход оценивает входные данные вместе с выходными данными каждой модели для оценки весов. Иными словами, метод определяет, какие модели работают хорошо, а какие плохо, результаты определения учитывают входные данные [4–6].

Таблица 1

Сравнение возможностей методов ансамблей

Метод	<i>Bagging</i>	<i>Boosting</i>	<i>Stacking</i>
Разбиение данных на подмножества	Случайные	Предоставление неправильно классифицированных выборок	Разные
Цель	Свести распределение к минимуму	Увеличение прогноза	Оба
Методы, в которых используются	Случайный лес	Градиентный спуск	Смешивание
Функция для объединения отдельных моделей	(Взвешенное) среднее	Взвешенное, большинством голосов	Логистическая регрессия

Как видно в табл. 1, все три метода ансамблевого машинного обучения являются различными подходами к объединению нескольких моделей в лучшую. У каждой есть как преимущества, так и недостатки.

Заключение

Таким образом, можно отметить, что описываемые ансамблевые методы машинного обучения являются так называемыми метаалгоритмами, позволяющими объединить несколько методов машинного обучения в одну прогностическую модель.

Указанные алгоритмы состоят из двух шагов: создание распределения простых моделей ML по подмножествам исходных данных и объединение распределения в одну «агрегированную» модель.

Список литературы

1. Силен Д., Мейсман А., Али М. Основы Data Science и Big Data. Python и наука о данных. СПб. : Питер, 2017. 336 с.
2. Ансамблевые методы: бэггинг, бустинг и стекинг. URL: <https://neurohive.io/ru/osnovy-data-science/ansamblevye-metody-begging-busting-i-stekin>

3. Witten I. H., Eibe F. *Data Mining: practical machine learning tools and techniques*. 2nd ed. (Morgan Kaufmann series in data management systems). URL: <http://www.academia.dk>
4. Ясницкий Л. Н. Искусственный интеллект. Элективный курс : учеб. пособие. М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. 197 с.
5. Кочегаров И. И., Юрков Н. К., Ергалиев Д. С. [и др.]. Методика оценки остаточного ресурса электронного блока с использованием ускоряющих факторов // *Надежность и качество сложных систем*. 2020. № 4. С. 58–72. doi: 10.21685/2307-4205-2020-4-7.
6. Тулегулов А. Д., Ергалиев Д. С., Бейсембиева Б. С., Акишев К. М. Методы нейронных сетей и глубокого обучения на основе интеллектуального агента // *Надежность и качество сложных систем*. 2021. № 3. С. 25–32. doi: 10.21685/2307-4205-2021-3-3.

Reference

1. Silen D., Meysman A., Ali M. *Osnovy Data Science i Big Data. Python i nauka o dannykh*. Saint Petersburg: Piter, 2017:336.
2. *Ansamblevye metody: begging, busting i steking = Ensemble methods: bagging, boosting and stacking*. Available at: <https://neurohive.io/ru/osnovy-data-science/ansamblevye-metody-begging-busting-i-stekin>
3. Witten I.H., Eibe F. *Data Mining: practical machine learning tools and techniques*. 2nd ed. (Morgan Kaufmann series in data management systems). Available at: <http://www.academia.dk>
4. Yasnitskiy L.N. *Iskusstvennyy intellekt. Elektivnyy kurs: ucheb. posobie = Artificial intelligence. Elective course : study guide*. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2012:197. (In Russ.)
5. Kochegarov I.I., Yurkov N.K., Ergaliev D.S. [et al.]. Methodology for estimating the residual life of an electronic unit using accelerating factors. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and Quality of Complex Systems*. 2020;(4):58–72. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2020-4-7
6. Tulegulov A.D., Ergaliev D.S., Beysembieva B.S., Akishev K.M. Methods of neural networks and deep learning based on an intelligent agent. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and Quality of Complex Systems*. 2021;(3):25–32. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2021-3-3

Информация об авторах / Information about the authors

Амандос Дабысович Тулегулов

кандидат физико-математических наук, доцент,
заведующий кафедрой
авиационной техники и технологий,
Академия гражданской авиации
(Казахстан, г. Алматы, ул. Ахметова, 44)
E-mail: tad62@yandex.kz

Дастан Сырымович Ергалиев

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

Салтанат Жапаспаевна Кенбеилова

PhD, ученый секретарь,
Академия гражданской авиации
(Казахстан, г. Алматы, ул. Ахметова, 44)
E-mail: sal-japaspai@mail.ru

Асылхан Исмаилов

магистрант,
Казахский университет технологии и бизнеса
(Казахстан, г. Нур-Султан,
ул. Кайым Мухамедханова, 37А)
E-mail: Asyl@mail.ru

Amandos D. Tulegulov

Candidate of physical and mathematical sciences,
associate professor,
head of the sub-department
of aviation engineering and technology,
Academy of Civil Aviation
(44 Akhmetova street, Almaty, Kazakhstan)

Dastan S. Ergaliev

Ph.D., associate professor,
professor of the sub-department
of aviation engineering and technology,
Academy of Civil Aviation
(44 Akhmetova street, Almaty, Kazakhstan)

Saltanat Zh. Kenbeilova

PhD, scientific secretary,
Academy of Civil Aviation
(44 Akhmetova street, Almaty, Kazakhstan)

Asylkhan Ismailov

Master degree student,
Kazakh University of Technology and Business
(37A Kayim Mukhamedkhanova street,
Nur-Sultan, Kazakhstan)

Каршыга Максutowич Акишев

старший преподаватель
кафедры информационных технологий,
Казахский университет технологии и бизнеса
(Казахстан, г. Нур-Султан,
ул. Кайым Мухамедханова, 37А)
E-mail: tad62@ya.ru

Karshyga M. Akishev

Senior lecturer of the sub-department
of information technologies,
Kazakh University of Technology and Business
(37A Kayim Mukhamedkhanova street,
Nur-Sultan, Kazakhstan)

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

Поступила в редакцию/Received 02.09.2021

Поступила после рецензирования/Revised 20.10.2021

Принята к публикации/Accepted 10.11.2021

МУЛЬТИПЛИКАТИВНО-НЕЙРОСЕТЕВОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ ХЕРСТА И МУРОТА – ТАКЕУЧИ ПРИ ПРОВЕРКЕ ГИПОТЕЗЫ НОРМАЛЬНОСТИ МАЛЫХ ВЫБОРОК

А. И. Иванов¹, А. П. Иванов², Е. Н. Куприянов³

¹ Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт, Пенза, Россия

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

¹ivan@pniei.penza.ru, ²ap_ivanov@pnzgu.ru, ³evgnkupr@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматривается проблема анализа малых выборок путем объединения нескольких, созданных в прошлом веке статистических критериев. Объединяются критерий Херста, критерий Андерсона – Дарлинга, критерий Мурота – Такеучи. *Материалы и методы.* Предложено осуществлять объединение, рассматриваемых статистических критериев через умножение их выходных состояний. Уже после мультипликативного объединения статистических критериев предложено выполнять квантование их непрерывных данных в дискретные состояния «0» и «1». *Результаты.* При низкой коррелированности объединяемых статистических критериев мультипликативно-нейросетевое обобщение дает существенное снижение их итоговой вероятности ошибок первого и второго рода в сравнении с использовавшимся ранее конкатенационно-нейросетевым обобщением. В этом отношении более простое конкатенационно-нейросетевое обобщение является менее информативным. *Выводы.* Конкатенационно-нейросетевое объединение статистических критериев плохо работает для разнородных по качеству критериев, что показано на примере обобщения трех рассмотренных статистических критериев. В этом отношении мультипликативно-нейросетевое обобщение статистических критериев является более выгодным, так как позволяет повысить достоверность принимаемых решений уже для двух, рассматриваемых критериев.

Ключевые слова: статистический анализ малых выборок, проверка гипотезы нормальности, критерий Херста, критерий Андерсона – Дарлинга, критерий Мурота – Такеучи

Для цитирования: 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

MULTIPLICATIVE NEURAL NETWORK COMBINATION OF HURST AND MUROTA-TAKEUCHI STATISTICAL CRITERIA IN CHECKING THE HYPOTHESIS OF NORMALITY OF SMALL SAMPLES

A.I. Ivanov¹, A.P. Ivanov², E.N. Kupriyanov³

¹ Penza Research Institute of Electrical Engineering, Penza, Russia

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

¹ivan@pniei.penza.ru, ²ap_ivanov@pnzgu.ru, ³evgnkupr@gmail.com

Abstract. *Background.* The problem of analyzing small samples by combining several statistical criteria created in the last century is considered. The Hirst test, the Anderson-Darling test, and the Murota-Takeuchi test are combined. *Materials and methods.* It is proposed to combine the considered statistical criteria by multiplying their output states. Already after the multiplicative combination of statistical criteria, it is proposed to quantize their continuous data into discrete states "0" and "1". *Results.* With a low correlation of the combined statistical criteria, multiplicative neural network generalization gives a significant decrease in their final probability of errors of the first and second kind, in comparison with the previously used concatenation-neural network generalization. In this respect, a simpler concatenation-neural network generalization is less informative. *Conclusions.* The concatenation-neural network combining of statistical criteria does not work well for criteria of different quality, which is shown by the example of generalization of the three considered statistical criteria. In this respect, multiplicative-neural network generalization of

statistical criteria is more advantageous, since it allows increasing the reliability of decisions made for two considered criteria.

Keywords: statistical analysis of small samples, testing the hypothesis of normality, Hurst tests, Anderson-Darling test, Murota-Takeuchi test

For citation: Ivanov A.I., Ivanov A.P., Kupriyanov E.N. Multiplicative neural network combination of Hurst and Murota-Takeuchi statistical criteria in checking the hypothesis of normality of small samples. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(4):27–33. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-4-4

Введение

В двадцатом веке активно создавались статистические критерии для проверки гипотезы нормального распределения данных. Наиболее часто применяемым является хи-квадрат критерий Пирсона, созданный в 1900 г.¹ Позднее был создан ряд более мощных статистических критериев, однако все они ориентированы на обработку больших выборок в 100 и более опытов². К сожалению, в ряде практически важных приложений столь большие объемы выборок получить не удастся. В частности, такая ситуация возникает в медицине, биологии, биометрии, экономике. При наличии малых выборок от 16 до 20 опытов обычные статистические критерии дают крайне низкую достоверность принимаемых решений. Однако в двадцатом веке было создано порядка 21 работоспособных статистических критериев [1]. Если каждому из известных статистических критериев построить эквивалентный искусственный нейрон [2–4], то мы получим нейросеть, выходом которой является код с высокой 21-кратной избыточностью. При таком подходе к решению задачи анализа малых выборок каждый из 21 искусственных нейронов работают самостоятельно, а их выходные кодовые состояния объединяются конкатенацией в длинный код. В связи с этим такой способ объединения множества статистических критериев следует рассматривать как конкатенационный.

Пример конкатенационного объединения трех классических статистических критериев: Андерсона – Дарлинга, Херста, Мурота – Такеучи

Традиционное аналитическое исследование статистических критериев начала двадцатого века требует очень высокой математической подготовки исследователя. Гораздо меньший уровень квалификации исследователя требует прямой численный эксперимент. На рис. 1 приведены коды программной реализации моделирования на языке MathCAD откликов трех классических статистических критериев при воздействии на них малыми выборками в 16 опытов с нормальным и равномерным распределением.

$ \begin{aligned} sx(r) := & \left\{ \begin{array}{l} x \leftarrow \text{sort}(\text{norm}(16, 0, 1 + r)) \\ m \leftarrow \text{mean}(x) \\ \sigma \leftarrow \text{stdev}(x) \\ AD \leftarrow \sum_{i=0}^{15} \frac{\left(\text{pnorm}(x_i, m, \sigma) - \frac{i - 0.5}{16} \right)^2 \cdot \text{dnorm}(x_i, m, \sigma)}{\text{pnorm}(x_i, m, \sigma) \cdot (1 - \text{pnorm}(x_i, m, \sigma))} \\ Hr \leftarrow \frac{x_{15} - x_0}{\sigma} \\ MT \leftarrow \sum_{i=0}^{15} \cos\left(\frac{x_i - x_{15}}{3.14}\right) \\ (AD \ Hr \ MT)^T \end{array} \right. \end{aligned} $	$ \begin{aligned} sx(r) := & \left\{ \begin{array}{l} x \leftarrow \text{sort}(\text{runif}(16, -3 - r, 3 + r)) \\ m \leftarrow \text{mean}(x) \\ \sigma \leftarrow \text{stdev}(x) \\ AD \leftarrow \sum_{i=0}^{15} \frac{\left(\text{pnorm}(x_i, m, \sigma) - \frac{i - 0.5}{16} \right)^2 \cdot \text{dnorm}(x_i, m, \sigma)}{\text{pnorm}(x_i, m, \sigma) \cdot (1 - \text{pnorm}(x_i, m, \sigma))} \\ Hr \leftarrow \frac{x_{15} - x_0}{\sigma} \\ MT \leftarrow \sum_{i=0}^{15} \cos\left(\frac{x_i - x_{15}}{3.14}\right) \\ (AD \ Hr \ MT)^T \end{array} \right. \end{aligned} $
---	---

Рис. 1. Программная реализация статистического критерия Андерсона – Дарлинга (1952), критерия Херста (1907) и критерия Муроты – Такеучи (1981) для малых выборок в 16 опытов с нормальным распределением и равномерным распределением данных

¹ Р 50.1.033-2001. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Часть I. Критерии типа χ^2 .

² Р 50.1.037-2002. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Часть II. Непараметрические критерии.

На рис. 2 представлены выходные состояния классического критерия Андерсона – Дарлинга. Следует подчеркнуть, что обычно классические статистические критерии принято описывать таблицами квантилей доверительной вероятности. Для нас более удобным является замена статистического критерия эквивалентным ему искусственным нейроном. В свою очередь множество выходных состояний искусственных нейронов зависит от порога его выходного квантователя. В нашей ситуации выгодно снизить размерность решаемой задачи через выбор порога квантования, обеспечивающего одинаковые значения ошибок первого и второго рода. Порог квантователя $k = 0,165$ обеспечивает вероятности ошибок $P_1 = P_2 \approx 0,272$. При выборе выходных состояний квантователя зададим состояние «0» для малых выборок с нормальным распределением и состояние «1» для данных с равномерным распределением.

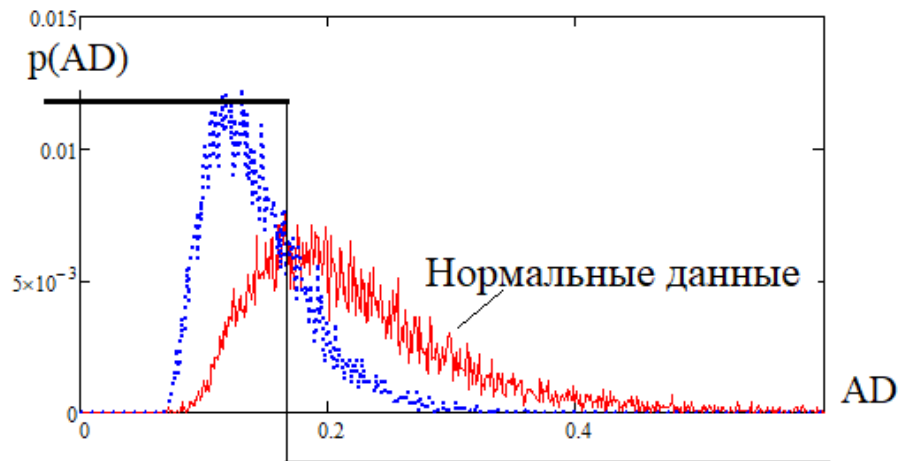


Рис. 2. Распределения вероятностей выходных состояний критерия Андерсона – Дарлинга и эквивалентного ему искусственного нейрона

Можно показать, что мощность критерия Андерсона – Дарлинга на малых выборках существенно выше мощности хи-квадрат критерия Пирсона. Более мощным критерием, чем критерий Андерсона – Дарлинга является критерий Херста, возраст которого сопоставим с возрастом хи-квадрат критерия [5, 6]. Англичанин Херст был гидрологом и работал с 1907 г. в Египте над проектом плотины на реке Нил. В какой момент гидролог Херст создал свой критерий, неизвестно. Округляя в пользу пионера, можно считать 1907 г. годом создания критерия Херста. На рис. 3 даны плотности вероятности выходных состояний критерия Херста и эквивалентного им искусственного нейрона. Для этого критерия при пороге квантования $k = 3,4$ обеспечивается вероятность ошибок $P_1 = P_2 \approx 0,225$. Это примерно на 21 % меньше, чем для критерия Андерсона – Дарлинга.

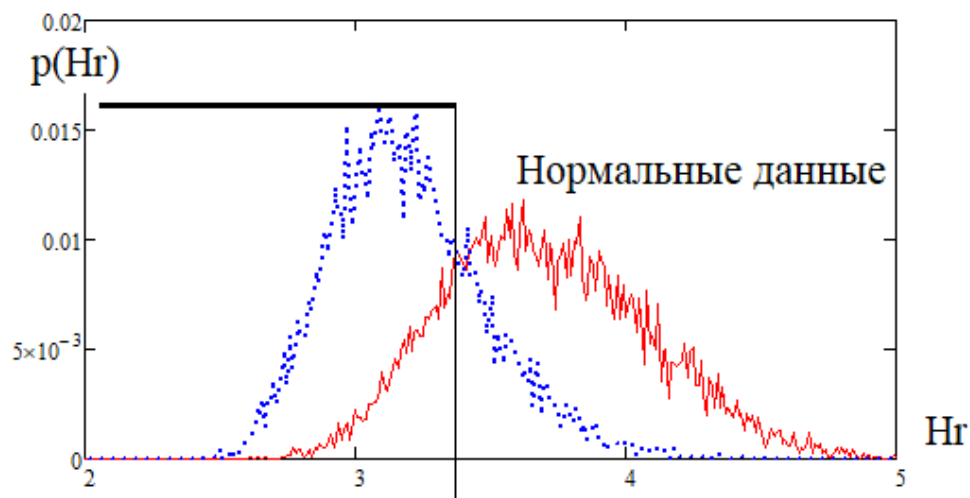


Рис. 3. Распределения вероятностей выходных состояний критерия Херста и эквивалентного ему искусственного нейрона

Самым мощным из рассматриваемых является критерий Муроты – Такеучи. Данные о выходных состояниях этого критерия приведены на рис. 4. При выборе порога $k = 10,9$ обеспечивается вероятность ошибок $P_1 = P_2 \approx 0,119$, т.е. мощность критерия Муроты – Такеучи примерно в 2 раза выше критерия Херста.

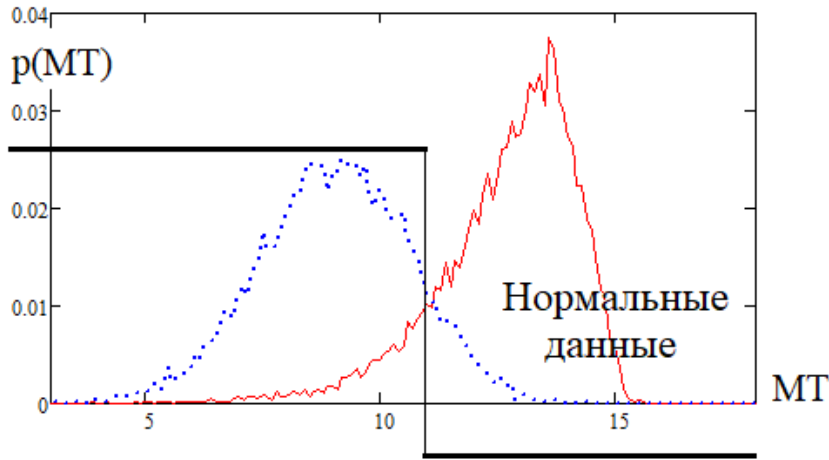


Рис. 4. Распределения вероятностей выходных состояний критерия Мурота – Такеучи и эквивалентного ему искусственного нейрона

Если мы выходные дискретные состояния трех рассмотренных искусственных нейронов объединим конкатенацией, то получим код из трех бит. Когда все три критерия обнаруживают нормальные данные, то мы получим выходной код «000». Если бы мы использовали большее число статистических критериев, то выходной код был бы длиннее. По мере роста числа известных статистических критериев может расти длина выходного кода, соответственно, должна расти их корректирующая способность. Структура конкатенационно-нейросетевых обобщений статистических критериев проверки гипотезы нормальности приведена на рис. 5.

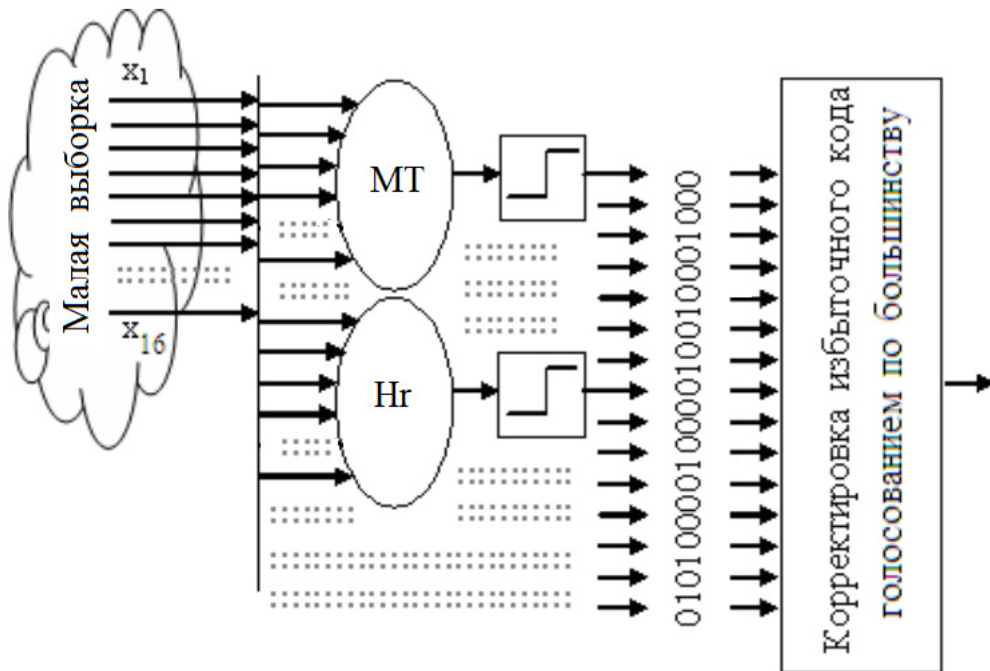


Рис. 5. Конкатенационное обобщение искусственных нейронов

Избыточность выходных кодов в простейшем случае может быть устранена подсчетом числа состояний «0» и «1». Если число состояний «0» больше, чем «1», то принимается итоговое решение «0» (обнаружены нормальные данные). Основной проблемой таких технических решений является

низкая корректирующая способность. Чем сильнее корреляционная связь между разрядами избыточного кода, тем хуже корректирующая способность подобных кодов. В рассматриваемом нами случае: $\text{corr}(MT, Hr) \approx -0,347$, $\text{corr}(MT, AD) \approx 0,603$, $\text{corr}(Hr, AD) \approx -0,117$. В связи со столь значительной корреляцией разрядов трехкратной избыточности кода недостаточно. Простейшее техническое решение конкатенационно-нейросетевых обобщений не работает. Проще отбросить слабые критерии (Херста и Андерсона – Дарлинга), оставив только наиболее сильный критерий Мурота – Такеучи. Тогда мы получаем вероятности ошибок на уровне $P_1 = P_2 \approx 0,119$.

Перспектива мультипликативного объединения статистических критериев

Рассмотрим ситуацию перемножения результатов двух наиболее мощных критериев Мурота – Такеучи и Херста и последующего квантования данных. При этом умножение выполним нормированным так, чтобы наиболее вероятные значения этих критериев для равномерных данных были менее единицы:

$$\begin{cases} MT \cdot Hr \leftarrow \frac{MT \cdot Hr \cdot 3,4}{10,09}; \\ z(MT \cdot Hr) \leftarrow "0" \text{ if } MT \cdot Hr > 1,04; \\ z(MT \cdot Hr) \leftarrow "1" \text{ if } MT \cdot Hr \leq 1,04. \end{cases} \quad (1)$$

Результаты численного моделирования искусственного нейрона Мурота – Такеучи – Херста (1) приведены на рис. 6.

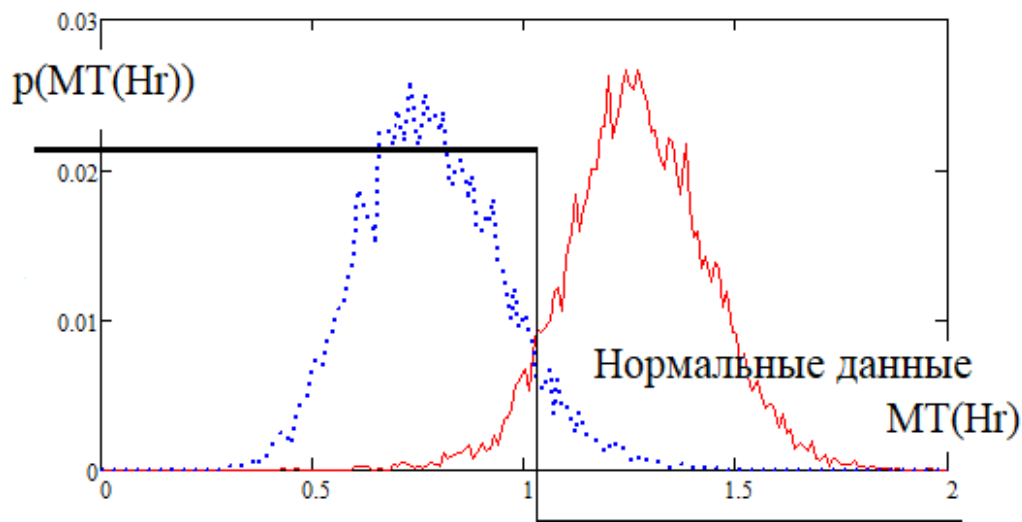


Рис. 6. Распределения вероятностей выходных состояний мультипликативного объединения критерия Мурота – Такеучи и критерия Херста, а также эквивалентного им искусственного нейрона

Сравнивая данные рис. 4 и 6, мы видим существенный рост качества принимаемых нейронами решений. Нейрон, полученный мультипликативным объединением критерия Херста и критерия Мурота – Такеучи, дает снижение вероятности ошибок до величины $P_1 = P_2 \approx 0,078$. Принципиально важным является то, что мультипликативное объединение только двух рассматриваемых критериев дает вероятности ошибок первого и второго рода примерно в 2 раза лучше, чем конкатенационное объединение трех рассматриваемых критериев. Это свидетельствует о высоком потенциале мультипликативного обобщения двух и более известных статистических критериев проверки гипотезы нормального распределения малых выборок.

Появляется формальная возможность перехода от использовавшейся ранее конкатенационной схемы нейросетевого обобщения множества статистических критериев к гибридной конкатенационно-мультипликативной схеме объединения известных статистических критериев. Эта схема отображена на рис. 7.

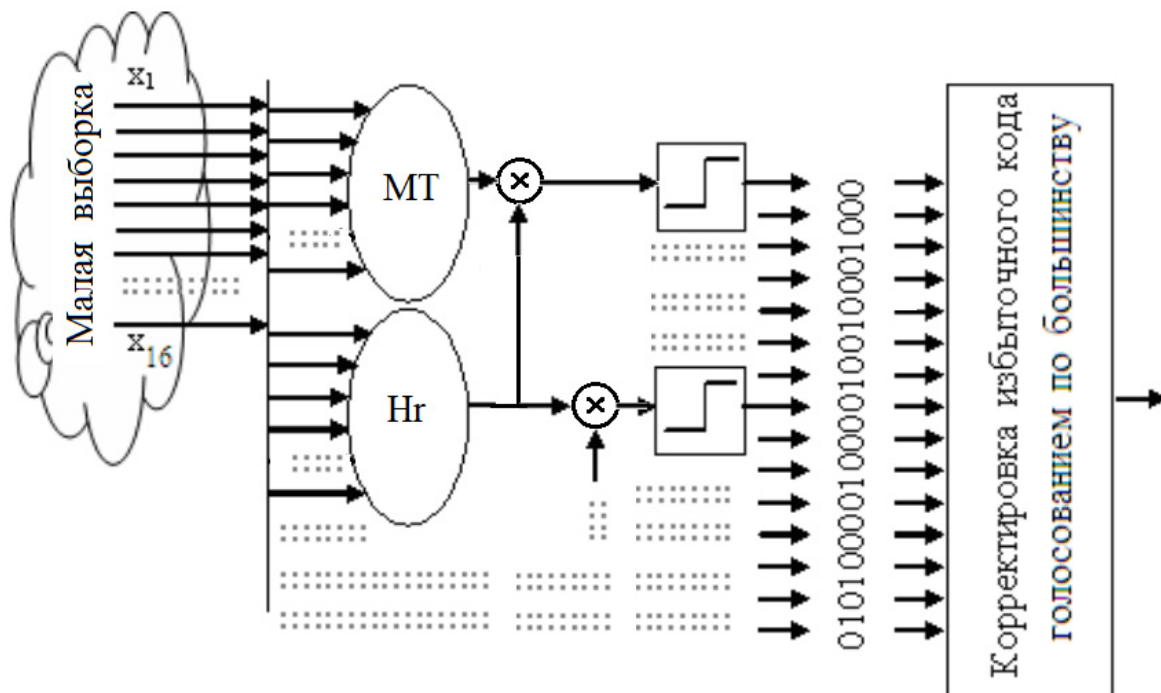


Рис. 7. Конкатенационно-мультипликативное объединение искусственных нейронов статистической проверки гипотезы нормальности малых выборок

Заключение

Переход от использования множества известных одиночных статистических критериев к их совместному применению критериев легко выполним, если каждый критерий заменить эквивалентным искусственным нейроном. При этом простейшие алгоритмы корректировки ошибок избыточного выходного кода нейросети по большинству состояний имеют низкую эффективность. Очевидно, что применение более сложных алгоритмов обнаружения и корректировки ошибок в избыточном коде должно приводить к улучшению результатов [7].

Еще одним путем улучшения итоговых результатов является увеличение числа учитываемых статистических критериев (увеличение избыточности нейросетевых кодов). Как показано в данной статье, число статистических критериев легко увеличивается путем умножения их выходных состояний. Предположительно потенциал конкатенационно-мультипликативных нейросетевых обобщений статистических критериев много выше, чем исследованных ранее конкатенационно-нейросетевых обобщений.

Список литературы

1. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М. : Физматлит, 2006. 816 с.
2. Иванов А. И., Банных А. Г., Безяев А. В. Искусственные молекулы, собранные из искусственных нейронов, воспроизводящих работу классических статистических критериев // Вестник Пермского университета. Сер.: Математика. Механика. Информатика. 2020. № 1. С. 26–32. doi: 10.17072/1993-0550-2020-1-26-32.
3. Иванов А. И. Искусственные математические молекулы: повышение точности статистических оценок на малых выборках (программы на языке MathCAD) : препринт. Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. 36 с.
4. Иванов А. И., Банных А. Г., Куприянов Е. Н. [и др.]. Коллекция искусственных нейронов, эквивалентных статистическим критериям, для их совместного применения при проверке гипотезы нормальности малых выборок биометрических данных // Безопасность информационных технологий : тр. I Всерос. науч.-техн. конф. Пенза : Изд-во ПГУ, 2019. С. 163–172.
5. Мандельброт Б., Хадсон Р. (Не) послушные рынки: фрактальная революция в финансах. М. : Вильямс, 2006. 400 с.
6. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М. : Институт компьютерных исследований, 2002. 656 с.
7. Морелос-Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение. М. : Технофера, 2005. 320 с.

References

1. Kobzar' A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov = Applied mathematical statistics. For engineers and scientists*. Moscow: Fizmatlit, 2006:816. (In Russ.)
2. Ivanov A.I., Bannykh A.G., Bezyaev A.V. Artificial molecules assembled from artificial neurons reproducing the work of classical statistical criteria. *Vestnik Permskogo universiteta. Ser.: Matematika. Mekhanika. Informatika = Bulletin of Perm University. Ser.: Mathematics. Mechanics. Computer science*. 2020;(1):26–32. (In Russ.). doi: 10.17072/1993-0550-2020-1-26-32
3. Ivanov A.I. *Iskusstvennye matematicheskie molekuly: povyshenie tochnosti statisticheskikh otsenok na malykh vyborkakh (programmy na yazyke MathCAD): preprint = Artificial mathematical molecules: improving the accuracy of statistical estimates on small samples (programs in MathCAD) : preprint*. Penza: Izd-vo PGU, 2020:36. (In Russ.)
4. Ivanov A.I., Bannykh A.G., Kupriyanov E.N. [et al.]. A collection of artificial neurons equivalent to statistical criteria for their joint application in testing the hypothesis of the normality of small samples of biometric data. *Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologiy: tr. I Vseros. nauch.-tekhn. konf. = Information Technology Security : Proceedings of the I All-Russian Scientific and Technical conf.*. Penza: Izd-vo PGU, 2019:163–172. (In Russ.)
5. Mandel'brot B., Khadson R. *(Ne) poslushnye rynki: fraktal'naya revolyutsiya v finansakh = .* Moscow: Vil'yams, 2006:400. (In Russ.)
6. Mandel'brot B. *Fraktal'naya geometriya prirody = Fractal geometry of nature*. Moscow: Institut komp'yuternykh issledovaniy, 2002:656. (In Russ.)
7. Morelos-Saragosa R. *Iskusstvo pomexoustoychivogo kodirovaniya. Metody, algoritmy, primenenie = The art of noise-resistant coding. Methods, algorithms, application*. Moscow: Tekhnosfera, 2005:320. (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

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

Евгений Николаевич Куприянов

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

Aleksandr I. Ivanov

Doctor of technical sciences, associate professor,
senior researcher,
Penza Research Electrotechnical Institute
(9 Sovetskaya street, Penza, Russia)

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)

Evgeniy N. Kupriyanov

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 15.11.2021

Поступила после рецензирования/Revised 20.11.2021

Принята к публикации/Accepted 25.11.2021

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ЦЕЛЯХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

А. М. Панкин¹, А. А. Калютик², Д. В. Лялюев³

^{1,2} Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия
³ Научно-исследовательский технологический институт имени А. П. Александрова,
Сосновый Бор, Ленинградская область, Россия
¹ alpank@niti.ru, ² Kalyutik@yandex.ru, ³ ldv@niti.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассмотрено построение математических моделей контролируемых объектов на основе фундаментальных законов классической механики для решения основной задачи технической диагностики – определения технического состояния. *Материалы и методы.* На основе математической модели строится диагностическая модель. Такой подход выводит на определение рабочих функций объекта и получение критериев оценки работоспособности, необходимых для определения остаточного ресурса. Уточняется понятие диагностического признака объекта, подлежащего идентификации в процессе диагностирования. *Результаты и выводы.* В данной статье рассмотрены вопросы технической диагностики ограничено объектами механической природы.

Ключевые слова: математическая модель, диагностическая модель, технический объект, техническое состояние, физические законы, движение, скорость, сила, импульс силы, работа, энергия, диагностирование, рабочая функция, диагностический признак

Для цитирования: Панкин А. М., Калютик А. А., Лялюев Д. В. Математическое моделирование энергомеханических систем в целях определения их технического состояния // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 4. С. 34–43. doi:10.21685/2307-4205-2021-4-5

MATHEMATICAL MODELING OF ENERGOMECHANICAL SYSTEMS FOR THE PURPOSE OF DETERMINING THEIR TECHNICAL STATE

A.M. Pankin¹, A.A. Kalyutik², D.V. Lyalyuev³

^{1,2} Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia
³ A. P. Alexandrov Research Institute of Technology, Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia
¹ alpank@niti.ru, ² Kalyutik@yandex.ru, ³ ldv@niti.ru

Abstract. *Background.* The article discusses the construction of mathematical models of controlled objects based on the fundamental laws of classical mechanics for solving the main problem of technical diagnostics – determining the technical condition. *Materials and methods.* A diagnostic model is built on the basis of a mathematical model. This approach leads to the definition of the working functions of the object and the receipt of criteria for assessing the performance required determining the residual resource. The concept of a diagnostic feature of an object to be identified in the process of diagnostics is clarified. *Results and conclusions.* In this article, consideration of the issues of technical diagnostics is limited to objects of a mechanical nature.

Keywords: mathematical model, diagnostic model, technical object, technical condition, physical laws, motion, speed, force, impulse of force, work, energy, diagnostics, working function, diagnostic feature

For citation: Pankin A.M., Kalyutik A.A., Lyalyuev D.V. Mathematical modeling of energomechanical systems for the purpose of determining their technical state. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;(4):34–43. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-4-5

При создании технических объектов на этапе проектирования должна быть предусмотрена их надежность в процессе эксплуатации. Выбираются такие конструкторские решения, при которых изменения конструктивных параметров объекта, к которым относятся размеры и свойства отдель-

ных частей и элементов объекта, в процессе заданного срока эксплуатации могут быть в допустимых пределах. При таком изменении параметров структуры конструктор рассчитывает на выполнение объектом предназначенных ему рабочих функций. Для того чтобы подойти к пониманию, что это такое, необходимо однозначное определение и толкование основных понятий теории надежности и технической диагностики [1]. На основе таких определений строятся алгоритмы диагностирования, реализуемые в программном обеспечении новых систем технического диагностирования [2].

Основные понятия и определения, используемые при определении технического состояния

Надежность – свойство объекта выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения его эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям применения объекта, его технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортирования.

При этом объект должен быть **работоспособным**.

Основные факторы, влияющие на надежность изделий.

К основным факторам, влияющим на надежность технических объектов, относятся: старение, тепловые поля, влажность окружающей среды, солнечная и иная радиация, механические воздействия и режимы работы.

Основные факторы можно разделить на две группы: **субъективные и объективные**.

К субъективным факторам относятся ошибки персонала вследствие нарушения инструкций по эксплуатации и другой эксплуатационной документации.

Объективные факторы разделяются на **внутренние** факторы, возникающие вследствие старения и износа, и **внешние** факторы [1].

Причиной старения являются физико-механические процессы, происходящие в элементах изделий и оборудования, в силу которых эти изделия и системы начинают чаще отказывать. Износ возникает в машинах и механизмах, в которых имеются трущиеся детали.

Тепловые поля могут быть созданы как воздействием внешней среды (солнечная энергия и ближайшие объекты, излучающие тепло), так и отдельными элементами самого объекта, излучающими теплоту в процессе работы.

Влажность является одним из наиболее сильно воздействующих на технические объекты факторов. При повышенной влажности происходит ускоренное разрушение лакокрасочных покрытий, нарушение герметизации и заливок, электрической прочности радиоэлементов, окисление контактов.

Солнечная радиация приводит к тепловому воздействию и воздействию ультрафиолетовых лучей. Тепловые излучения ухудшают условия охлаждения аппаратуры и способствуют ее местному и общему перегреву. Воздействие ультрафиолетовых лучей приводит к активизации процессов старения.

Такие же факторы проявляются при воздействии на изделия и блоки систем **ядерного излучения**: нагрев и изменение физико-механических свойств материалов.

Механическое воздействие – удары и вибрации в процессе эксплуатации могут привести к нарушению целостности паек, контактов, разрушению, крепежных деталей.

Режим работы оказывает существенное влияние на надежность элементов, узлов и всего оборудования в целом. Уменьшение фактических нагрузок способствует увеличению надежности.

Перечисленные факторы, как и ряд других [3–4], приводят к уменьшению ресурса изделий и должны учитываться при его проектировании.

Техническое состояние – состояние, которое характеризуется в определенный момент времени при определенных условиях внешней среды значениями параметров, установленных технической документацией на объект.

Диагностическим признаком (ДП) называется параметр или характеристика, используемые при диагностировании объекта, по которым оценивается техническое состояние объекта диагностирования (ОД). В качестве **параметров** могут использоваться определяемые при диагностировании такие физические величины, как параметры элементов электрической цепи (сопротивления, индуктивности, емкости), время переходного процесса и др. Под **характеристикой** понимается зависимость одной физической величины от другой. При этом характеристики могут быть **статическими**, если величина не зависит от времени, и **динамическими**, если такая зависимость присутствует.

Общим понятием теории надежности и технической диагностики является **работоспособность** контролируемого объекта. Это понятие используется для обозначения класса состояний ОД,

находясь в котором он выполняет свойственную ему *работу*. Однако есть и некоторое отличие в формулировке понятия работоспособного состояния в технической диагностике и теории надежности.

Работоспособным называется состояние, при котором значения всех диагностических признаков, характеризующих способность ОД *выполнять заданные функции*, соответствуют установленным требованиям (приведенным в технической документации на объект).

Другие основные понятия технической диагностики, необходимые для разработки алгоритмов определения технического состояния, были ранее представлены в работе [5].

В следующем разделе понятие диагностического признака объекта расширяется при рассмотрении механических объектов на основе известных законов физики и использовании ряда определенных физических величин.

Анализ законов механики, используемых при построении функций работоспособности технических объектов

Второй закон Ньютона запишем в виде: *ускорение всякого тела прямо пропорционально действующей на него силе и обратно пропорционально массе тела*.

Вспомним понятия некоторых физических величин, используемых в данном законе [6].

В первую очередь это касается понятия *силы*. Ньютонская механика, в рамках которой проводится данное рассмотрение, предлагает понимать под силой \vec{F} физическую величину, дающую количественную характеристику и *направление воздействия*, оказываемое на данное тело со стороны других тел. При этом тела не обязательно должны находиться в состоянии непосредственного соприкосновения друг с другом. Воздействие, оказываемое на тело со стороны других тел и характеризуемое величиной силы и направлением ее воздействия, может изменить *скорость движения* тела (в том числе и направление первоначального движения) или вызвать его *деформацию*, т.е. изменение размеров.

С учетом приведенной формулировки и введенных обозначений второй закон Ньютона принято записывать в виде

$$\vec{\omega} = d\vec{v}/dt = k\vec{F}/m, \quad (1)$$

где k – некоторый коэффициент пропорциональности.

Что дает запись закона Ньютона в виде (1)?

Представленное рассмотрение выводит на следующие моменты:

– *состояние тела* можно связать с двумя характеристиками: *местоположением* тела в момент рассмотрения его состояния и *скоростью* его перемещения (величина, направление) в этот же момент времени;

– *воздействующая на тело сила* может не изменить скорость перемещения тела, т.е. придать ему ускорение, но может вызвать его *деформацию*, т.е. изменение его размеров или, иначе говоря, структуры.

Таким образом, к двум введенным характеристикам тела (местоположение, скорость) добавим еще одну – характеристику формы или структуры тела. Важно отметить, что эта последняя характеристика также может измениться под воздействием силы, приложенной к телу.

Изменение второй характеристики состояния тела, а именно его скорости (величины направления), будет происходить до тех пор, пока имеет место ускорение $\vec{\omega}$, определяемое в соответствии с формулой (1) действием на тело силы \vec{F} . Отсюда следует, что после прекращения действия силы тело будет продолжать движение с постоянной по величине и направлению скоростью. Следовательно, при этом вторая и третья характеристики не меняются.

Изменение величины и направления скорости \vec{V} зависит не только от ускорения тела $\vec{\omega}$, определяемого в соответствии со вторым законом Ньютона действующей на тело силой \vec{F} , но и временем Δt этого действия. Как известно, величина произведения $\vec{F}\Delta t$ в механике получила название *импульса силы*. В случае, если сила \vec{F} в течение времени ее действия в интервале (t_1, t_2) не остается постоянной, ее импульс равен

$$\int_{t_1}^{t_2} \vec{F}(t)dt. \quad (2)$$

Подынтегральное выражение можно представить в следующем виде:

$$\vec{F}dt = m d\vec{v} = d(m\vec{v}), \quad (3)$$

что имеет место в случае постоянства массы m в механике Ньютона.

Известно, что величина $m\vec{v}$ называется *количеством движения* \vec{K} , хотя в ряде случаев эта величина под обозначением \vec{p} фигурирует как импульс [4]. Мы будем ее рассматривать как количество движения \vec{K} , а величину $\vec{F}dt$ как *импульс силы* \vec{F} .

Единство и определенность терминов в *технической диагностике* являются основой успешного создания *алгоритмов диагностирования*.

После этого выражение 2-го закона Ньютона представляется в виде

$$\vec{F}(t) = d\vec{K}/dt. \quad (4)$$

Это дает возможность, определив временную функцию количества движения, определять временную функцию воздействия на тело силы $\vec{F}(t)$.

В первую очередь нужно определиться с тем, что понимать под телом как объектом диагностирования, на который может действовать сила \vec{F} , представляющая входное воздействие на объект для выполнения им рабочих функций, определенных конструктором.

Ранее уже была рассмотрена физическая величина, называемая *массой тела*, которая вводилась как количественная характеристика инертности тела.

Естественно понимать, что масса тела формируется каким-то количеством микрочастиц вещества (атомов, молекул), находящихся в некоторой связи друг с другом.

Эти микрочастицы формируют также *отдельные части* тела, которые могут отличаться между собой некоторыми свойствами (теплопроводность, электропроводность и т.д.).

Степень связи микрочастиц (отдельных частей) может иметь большую или меньшую величину.

При максимальной величине связи воздействие внешней по отношению к телу силы \vec{F} в *одинаковой степени* проявляется ко всем без исключения микрочастицам (частям) тела. В этом случае поведение тела и, соответственно, его состояние (координаты, скорость) могут описываться на основе введенного в механике понятия *материальная точка*.

О каком физическом объекте может идти речь при таком рассмотрении? По-видимому, наличие более жесткой связи между отдельными частями приводит к относительно небольшому изменению размеров самого тела, его частей при изменении факторов внешней среды (температуры, влажности, давления, радиации, вибраций, внешних сил и т.д.) до определенной величины.

Следствием этого, можно полагать, будет и относительно небольшое изменение формы тела.

Все вышеприведенное подводит нас к такому общеизвестному понятию физического объекта, как *твердого тела*.

Для такой категории физических объектов можно ставить вопрос о какой-то степени сохранения объема тела или его отдельных частей при влиянии на тело вышеуказанных факторов.

В свою очередь это отразится на некотором изменении плотности вещества отдельных частей тела и, как следствие, изменении свойств этих частей.

В итоге мы подходим к возможному изменению *технического состояния* тела за счет изменения его структурных параметров под влиянием внешних и внутренних факторов, указанных выше.

Рассматривая законы механики, будем в первую очередь оценивать влияние на параметры состояния тела приложенной к нему внешней силы \vec{F} .

При уменьшении имеющейся величины связи между отдельными микрочастицами тела (жидкость, газ) воздействие внешней силы может по-разному проявиться по отношению к отдельным частям этого физического объекта.

Величина связи может быть уменьшена, в том числе и в процессе воздействия приложенной к объекту силы \vec{F} (например, в случае некоторых деформаций).

Таким образом, снова подходим к такому изменению состояния тела, как технического объекта, когда к параметрам состояния, характеризующим тело как нечто целое в виде материальной точки, добавляются параметры, определяющие его внутреннее состояние (внутренние размеры, свойства отдельных частей).

Вернемся ко второму закону Ньютона, который в формулировке (1) представляет случай, когда единственная сила \vec{F} действует на тело, рассматриваемое в виде материальной точки.

В реальной ситуации, как уже было отмечено, физический объект имеет реальные размеры, может состоять из нескольких частей с разными свойствами, и на него может оказывать воздействие одновременно несколько внешних сил разной природы.

Что касается последнего, то в качестве силы \vec{F} следует рассматривать равнодействующую силу с определением точки ее приложения.

Для анализа ситуации со сложным объектом (состоящим из двух и более конструктивно оформленных частей [1]) рассмотрим систему, состоящую из N материальных точек [4], которые будем называть объектами.

В этой системе входящие в нее тела (или части одного тела), представленные материальными точками, могут взаимодействовать как с объектами внутри системы, так и с теми, которые к этой системе не относятся.

С учетом этого силы, действующие на объекты системы, делятся на внутренние силы, возникающие от объектов системы, и внешние силы, действующие на тот же объект системы от объектов за ее пределами.

В случае, если воздействие внешних сил на объекты системы отсутствует, то данная система считается *замкнутой* [4], и для нее имеет место выполнение *закона сохранения* количества движения, представленного в виде: *количество движения для замкнутой системы не изменяется*, т.е. $d\vec{K}/dt = 0$. Использование этого закона позволяет при разработке алгоритмов диагностирования получить дополнительные соотношения для идентификации *диагностических признаков* контролируемого механического объекта.

Рассмотрим перемещение некоторого тела под действием силы \vec{F} , которая сообщает телу ускорение \vec{w} . При этом нужно исходить из того, что сила \vec{F} может частично или полностью компенсировать действие на тело другой внешней силы. В итоге на тело будет действовать некоторая результирующая внешняя сила, что скажется на величине сообщаемому ему ускорения. Будем исходить из того, что в любом случае имеет место перемещение тела, даже когда $\vec{w} = 0$, т.е. тело движется с постоянной скоростью.

Как известно, *действие силы \vec{F} на пути s в направлении перемещения тела* связывают с понятием *работы, выполненной данной силой*.

При этом работой является величина, определяемая по формуле

$$A = F_s s = \vec{F} \vec{s}, \quad (5)$$

где s – величина перемещения; F_s – проекция силы \vec{F} на направление перемещения.

В формуле (5) предполагается, что во время всего перемещения s сила \vec{F} остается постоянной. В случае, если это условие не выполняется, величина работы будет равна

$$A = \int_s F_s(s) ds. \quad (6)$$

Работа не может быть физически выполнена за время $\Delta t = 0$. Следовательно, и величина dt , вводимая в разделе математики «дифференциальное исчисление», может быть сколь угодно малой, но $dt \neq 0$. Поэтому при использовании теории пределов для описания физических процессов нужно использовать иные обозначения при стремлении ряда физических величин к каким-то малым значениям. Это позволит правильно понимать физический смысл определяемых на практике мгновенных значений для многих физических величин.

Иногда говорят, что одни тела могут совершать работу над другими телами. При такой трактовке из рассмотрения физических процессов исчезает такая величина, как *сила*. Поэтому правильнее считать, что сила, генерируемая одними телами, приводит к совершению *работы над другим телом* (в единственном числе). Поскольку вместе с понятием работы вводится и понятие энергии, то, используя введенные выше *параметры технического состояния* тела, можно под энергией тела понимать следующее: *мера такого изменения состояния тела, при котором оно способно при определенных условиях внешней среды создавать импульс силы для возможного совершения работы над другим телом или для его деформации*.

Возможны и другие формулировки. Главной особенностью приведенной формулировки является фиксация состояния объекта (тела), которое должно определяться набором *установленных параметров* объекта при конкретных условиях внешней среды, как это было определено в ГОСТах по технической диагностике.

Если в качестве параметра состояния рассматривать *величину скорости* тела, то при построении алгоритмов диагностирования используется понятие *кинетической энергии*, а в случае рассмотрения *координаты местоположения* тела в потенциальном поле сил – понятие его *потенциальной энергии*. В случае использования обоих параметров состояния объекта рассматривается сохранение *полной механической энергии* или в общем случае его *полной энергии*.

Взаимосвязь законов физики и задач технической диагностики в жизненном цикле технического объекта

Предлагается следующая последовательность событий, связанных с возможным изменением состояния (технического состояния) тела (технического объекта) в процессе его жизненного цикла, происходящего в пространстве и во времени. Основная задача технической диагностики представляется в установлении рабочей функции объекта и диагностических признаков (параметров и характеристик), которые должны определяться при проведении диагностических измерений.

В качестве объекта на данном этапе исследований рассматриваются механические объекты или системы, действие которых определяется законами классической механики.

1. Объект перемещается в пространстве с какой-то постоянной скоростью \vec{v} (в частности $\vec{v} = 0$) в выбранной системе координат.

2. На объект могут действовать силы:

- поле сил какой-то природы, действие которых не ограничено во времени (например, гравитационное поле);
- силы, возникающие только в процессе изменения состояния тела (например, силы трения);
- импульс силы $\vec{F}(t)$ от другого тела ограниченной длительности.

3. В случае силы $\vec{F}(t)$, действие которой происходит в течение времени $\Delta t = t_1 - t_2$, изменение первоначального состояния объекта можно связать:

- с изменением параметров его движения (местоположение, скорость), которые можно охарактеризовать как *внешние* параметры состояния;
- с изменением параметров структуры объекта, которые назовем *внутренними* параметрами состояния.

4. При *перемещении* тела, вызванного действием силы $\vec{F}(t)$, возможны следующие ситуации:

- перемещение происходит с постоянной скоростью, т.е. $\vec{v} = \text{const}$, если сила $\vec{F}(t)$, вызвав начало движения тела (первоначально неподвижного) со скоростью $\vec{v} > 0$, в процессе дальнейшего движения была уравновешена другими силами и в итоге результирующая сила $\vec{F}_1(t) = 0$;

– перемещение происходит с некоторым ускорением, под действием результирующей силы $\vec{F}_1(t) = \vec{F}(t) - \vec{F}_0(t)$, где $\vec{F}_0(t)$ – сумма возникших новых сил, противодействующих движению, таких что $|\vec{F}_1(t)| > 0$.

Возникает законный вопрос: как оценивать работу, выполненную силой $\vec{F}(t)$, по перемещению тела массой m на расстояние s ? Что касается механической работы, то в соответствии с формулой (8), ее величина должна быть равна

$$A = \vec{F} \vec{s}.$$

Однако на процесс перемещения тела массой m на расстояние s уходит только часть этой работы $A_0 = \vec{F}_0 \vec{s}$. В результате этого перемещения изменилось значение координаты местоположения тела.

Другая часть работы $A_1 = \vec{F}_1 \vec{s}$ может изменить кинетическую энергию тела при условии $|\vec{F}_1(t)| > 0$ и, соответственно, другой параметр состояния – скорость тела.

Приведем два примера, связанные с решением задач технической диагностики:

1. Под действием силы \vec{F} тело массой m должно быть поднято на высоту h за фиксированное время Δt и после прекращения действия силы должно иметь некоторую скорость \vec{v} . Рабочей функцией будет набор указанной высоты за фиксированное время и получение на этой высоте требуемой скорости, определяемой из величины $A_1 > 0$.

2. Под действием силы \vec{F} должна быть перемещена заслонка трубопровода на расстояние \vec{s} . Рабочей функцией является выполнение A_0 за фиксированное время Δt . Штатный режим перемещения будет в случае, если при этом $A_1 = 0$. Иначе заслонка совершит удар по части трубопровода.

В обоих примерах на параметры состояния (координата, скорость тела) возможны некоторые допуски, определяемые в том числе условиями безопасного функционирования объекта.

Рассмотрим более подробно решение задачи перемещения заслонки трубопровода системы топливно-энергетического комплекса при его закрытии и причины возможной неработоспособности этого технического объекта.

Алгоритм перемещения заслонки трубопровода при его закрытии

В этом разделе представлен один из возможных алгоритмов движения заслонки трубопровода, который предлагается для рассмотрения основной задачи технической диагностики – контроль технического состояния этой части трубопровода.

Для решения этой задачи необходимо определить рабочую функцию объекта и те параметры технического состояния объекта, которые в наибольшей степени оказывают влияние на выполнение (или невыполнение) этой рабочей функции.

Рабочую функцию, выполняемую приводом заслонки трубопровода, представим в следующем виде: необходимо переместить тело массой m на расстояние s за время t_s в предположении, что в начальный и конечный моменты времени это тело является неподвижным. Перемещение происходит под действием внешней силы F , приложенной к этому телу. При движении тела на него действует сила торможения F_t , препятствующая его перемещению. Будем полагать, что эта сила является переменной и в общем случае зависит от скорости перемещения тела v , т.е. $F_t = F_t(v)$.

Необходимо задать вид функции внешнего воздействия $F = F(t)$ как функции от времени перемещения заслонки. Для этого весь временной интервал на пути s разобьем на три участка: s_1, s_2, s_3 , в соответствии с чем данную функцию представим в виде

$$\begin{aligned} F(t) &> F_t(t), \text{ если } 0 \leq t \leq t_1; \\ F(t) &= F_t(t), \text{ если } t_1 < t < (t_1 + t_2); \\ F(t) &= 0, \text{ если } (t_1 + t_2) \leq t \leq (t_1 + t_2 + t_3), \end{aligned}$$

где t_1, t_2, t_3 – время, затрачиваемое на прохождение расстояний s_1, s_2, s_3 соответственно.

С учетом введенных обозначений

$$s = s_1 + s_2 + s_3; t_s = t_1 + t_2 + t_3.$$

Пусть максимальная скорость перемещения заслонки равна v_m . Такую скорость тело будет иметь в самом конце 1-го участка, на 2-м участке, в самом начале 3-го участка, поскольку

$$\text{на участке } s_1 \text{ ускорение равно } a_1 = \frac{F(t) - F_t(t)}{m}; s_2 \rightarrow a_2 = 0; s_3 \rightarrow a_3 = \frac{-F_t(t)}{m}.$$

Вначале рассмотрим случай, когда действующие на тело силы являются *постоянными по величине*.

Тогда $a_1 = \text{const}; a_3 = \text{const};$

$$v_m = a_1 t_1; v_m = a_3 t_3; s_1 = \frac{a_1 t_1^2}{2}; s_2 = v_m t_2; s_3 = \frac{a_3 t_3^2}{2}. \quad (7)$$

К записанным соотношениям, полученным на основе вышеприведенных законов классической механики, добавим еще два соотношения, выражающих основные условия для выполнения рабочей функции привода, обеспечивающего перемещение заслонки:

$$s_1 + s_2 + s_3 = s; \quad t_1 + t_2 + t_3 = t. \quad (8)$$

В итоге получится система из семи алгебраических уравнений с семью неизвестными величинами: $t_1, t_2, t_3, s_1, s_2, s_3, v_m$.

Для решения этой системы получим одно алгебраическое уравнение 2-го порядка относительно величины скорости v_m :

$$v_m^2 \left(\frac{1}{2a_1} + \frac{1}{2a_3} \right) - v_m t + s = 0. \quad (9)$$

После решения этого квадратного уравнения и получения двух действительных корней выбирается в качестве решения корень, в большей степени подходящий по условиям поставленной задачи.

После нахождения максимальной скорости перемещения заслонки трубопровода v_m остальные неизвестные находятся по формулам

$$t_1 = v_m / a_1; \quad t_3 = v_m / a_3; \quad t_2 = t - t_1 - t_3; \quad s_1 = v_m^2 / 2a_1; \quad s_2 = v_m t_2; \quad s_3 = v_m^2 / 2a_3. \quad (10)$$

На основе полученных формул можно проанализировать влияние на указанные величины значений приложенной к заслонке массой m внешней силы F и сил торможения F_t . Изменение этих величин в процессе перемещения с заданными параметрами управления t_1, t_2, t_3 может привести либо к неполному закрытию трубопровода, либо к удару заслонки по трубе со скоростью v_k , которую заслонка может иметь после перемещения на расстояние s .

В качестве еще одного результата проведенного анализа следует отметить, что величина внешней силы F на участке разгона s_1 должна быть не только больше силы торможения F_t , но и превышать некоторое значение F_{\min} , при котором длина участка $s_2 = 0$. Иначе не получается решения задачи при заданных значениях параметров s, t .

Следующий вариант алгоритма перемещения заслонки представляет случай, когда действующие на тело силы являются *переменными по величине*.

С такой ситуацией можно столкнуться, предполагая, что сила трения, препятствующая перемещению тела по поверхности, каким-то образом зависит от скорости его движения. В рассмотренном алгоритме этот случай моделировался представлением движения заслонки на участках s_1, s_3 с переменными по времени перемещения ускорениями a_1, a_3 .

Для такого случая изменится ряд формул (10) для величин t_1, t_3, s_1, s_3 , которые можно представить в виде

$$t_1 = A_{11} v_m; \quad t_3 = A_{31} v_m; \quad s_1 = A_{12} v_m^2; \quad s_3 = A_{32} v_m^2, \quad (11)$$

где

$$A_{11} = \frac{n_1}{\sum_{i=1}^{n_1} a_i^1}; \quad A_{12} = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} a_i^1 (2i-1)}{2(\sum_{i=1}^{n_1} a_i^1)^2}; \quad A_{31} = \frac{n_3}{\sum_{i=1}^{n_3} a_i^3}; \quad A_{32} = \frac{\sum_{i=1}^{n_3} a_i^3 (2i-1)}{2(\sum_{i=1}^{n_3} a_i^3)^2}, \quad (12)$$

a_i^1, a_i^3 – ускорения, определяемые переменными силами на 1-м и 3-м участках движения тела соответственно.

С учетом введенных обозначений уравнение (9) преобразуется к виду

$$v_m^2 (A_{11} + A_{31} - A_{12} - A_{32}) - v_m t + s = 0. \quad (13)$$

Дальнейшая процедура решения уравнения (14) и анализа полученных результатов аналогична той, которая показана выше.

С учетом введенных понятий технической диагностики в качестве диагностических признаков данного объекта можно считать его координату $s(t)$ и скорость $v(t)$ в фиксированный момент времени $t = t_1 + t_2 + t_3$. Объект можно считать работоспособным, если в этот момент времени координата

его нахождения будет равна заданному расстоянию s , а скорость будет равна 0. Однако на эти идеальные условия должны быть наложены некоторые допуски с принятием соответствующих мер для выполнения условий штатной работы объекта и обеспечения безопасности.

В качестве диагностических характеристик могут быть также рассмотрены зависимости скорости перемещения тела или проходимого им пути от времени. В этом случае рассматриваются динамические диагностические характеристики, которые по критериям работоспособности [1] должны сравниваться с реперными зависимостями. Необходимо также отметить, что при этом происходит совмещение диагностической характеристики объекта с его рабочей функцией. Этот частный случай обусловлен тем, что объект представлен по законам классической механики в виде материальной точки, для которой не рассматривается изменение свойств структуры под воздействием внешних факторов и режимов работы, указанных выше.

Представленный алгоритм был реализован в расчетной программе, созданной в программном пакете «Matlab». Проводимые по этой программе расчетные исследования для перемещаемого объекта с конкретными параметрами позволяют определить оптимальные режимы перемещения заслонки трубопровода за счет варьирования величины и временной зависимости приложенной к объекту внешней силы $F(t)$. При этом может быть определен режим с минимальным расходом энергии на перемещение тела и безопасным его приближением к конечной точке пути.

Заключение

В статье рассмотрены вопросы, которые возникают на этапе проектирования систем диагностирования новых технических объектов. К их числу, несомненно, относится и разработка алгоритмов диагностирования. Для решения задачи продления ресурса и обеспечения надежного функционирования в процессе эксплуатации в этих алгоритмах должна быть представлена связь между основными рабочими функциями объекта и теми структурными параметрами, которые в наибольшей степени влияют на выполнение этих функций. Иначе говоря, должен быть определен список диагностических признаков объекта, определяющих его техническое состояние и не зависящих от режима функционирования. В данной статье структура технического объекта не представлена, поскольку контролируемый объект сведен к принятому в механике понятию материальной точки. В то же время такое упрощение материального тела позволяет на основе известных законов механики расширить список параметров объекта, связанных с оценкой его технического состояния и выполнением функций работоспособности. Такой подход иллюстрируется представленным в работе алгоритмом перемещения заслонки трубопровода АЭС, который позволяет оптимизировать этот процесс и понять причины возможных дефектов. Ряд имеющихся на АЭС методик диагностирования электропривода ориентируется на оценку крутящего момента, создаваемого электродвигателем и параметрами его работы. Поэтому картина перемещения самой заслонки как механической части такой системы утрачивается, что не способствует пониманию причин возможных неисправностей при реализации основной рабочей функции: перекрыть движение теплоносителя за заданное время. При этом необходимо обеспечение работоспособности на заданное количество циклов. Для решения задачи технической диагностики указанного объекта была создана расчетная программа.

В то же время на основе материалов, изложенных в работе, может быть сделан ряд основополагающих выводов для технической диагностики как науки:

1. Корректировка и уточнение некоторых общеизвестных физических понятий (работа, энергия и т.д.) с привязкой их к понятию технического состояния позволят понять процесс возникновения неработоспособности и устранить некоторые причины ее возникновения при проведении диагностических измерений на этапе эксплуатации объекта.

2. Использование понятия *полной энергии объекта* или *системы тел* позволит расширить список и номенклатуру параметров и характеристик, определяющих техническое состояние, и расширить список диагностируемых объектов, *рабочие функции* которых реализуются на основе других физических законов.

Список литературы

1. Калявин В. П., Панкин А. М. Основы теории надежности и технической диагностики элементов и систем ЯЭУ : учеб. пособие. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 213 с.
2. Панкин А. М. Методология создания систем диагностирования в атомной энергетике // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2019. № 1. С. 133–138.

3. Kalyutik A., Kiselev V., Rouzich E. Impact of the Underground Metal Construction Cover Layer on the Cathode Protection Efficiency // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018.
4. Kiselev V., Kalyutik A., Rouzich E. Influence of the soil electrical conductivity in the area of the underground pipeline on energy efficiency of the cathodic protection // MATEC Web of Conferences. 2018.
5. Панкин А. М. Об основных понятиях технической диагностики // Контроль. Диагностика. 2010. № 10. С. 38–45.
6. Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 1. Механика, колебания и волны, молекулярная физика : учеб. пособие. М. : Наука, 1966. 404 с.

References

1. Kalyavin V.P., Pankin A.M. *Osnovy teorii nadezhnosti i tekhnicheskoy diagnostiki elementov i sistem YaEU: ucheb. posobie = Fundamentals of the theory of reliability and technical diagnostics of elements and systems of nuclear power plants : textbook.* Saint Petersburg: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2007:213. (In Russ.)
2. Pankin A.M. Methodology for creating diagnostic systems in the nuclear power industry. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii = Problems of mechanical engineering and automation.* 2019;(1):133–138. (In Russ.)
3. Kalyutik A., Kiselev V., Rouzich E. Impact of the Underground Metal Construction Cover Layer on the Cathode Protection Efficiency. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2018.
4. Kiselev V., Kalyutik A., Rouzich E. Influence of the soil electrical conductivity in the area of the underground pipeline on energy efficiency of the cathodic protection. *MATEC Web of Conferences.* 2018.
5. Pankin A.M. About the basic concepts of technical diagnostics. *Kontrol'. Diagnostika = Control. Diagnostics.* 2010;(10):38–45. (In Russ.)
6. Savel'ev I.V. *Kurs obshchey fiziki. T. 1. Mekhanika, kolebaniya i volny, molekulyarnaya fiziki: ucheb. posobie = General Physics course. Vol. 1. Mechanics, vibrations and waves, molecular physics : textbook.* Moscow: Nauka, 1966:404. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Михайлович Панкин

доктор технических наук, доцент,
профессор высшей школы атомной
и тепловой энергетики,
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29)
E-mail: alpank@niti.ru

Александр Антонович Калютик

кандидат технических наук,
директор Высшей школы атомной
и тепловой энергетики,
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29)
E-mail: Kalyutik@yandex.ru

Дмитрий Владимирович Лялюев

начальник отдела,
Научно-исследовательский технологический институт
имени А. П. Александрова,
(Россия, Ленинградская обл., г. Сосновый Бор,
Капорское шоссе, 72)
E-mail: ldv@niti.ru

Alexander M. Pankin

Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of Higher School of Nuclear
and Thermal Power Engineering,
Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University
(29 Polytechnicheskaya street, St. Petersburg, Russia)

Aleksandr A. Kalyutik

Candidate of technical sciences,
director of the Higher School of Nuclear
and Thermal Power Engineering,
Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University
(29 Polytechnicheskaya street, St. Petersburg, Russia)

Dmitriy V. Lyalyuev

Department head,
A. P. Alexandrov Research Institute of Technology
(72 Kaporskoe highway, Sosnovy Bor,
Leningrad region, Russia)

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

Поступила в редакцию / Received 15.11.2021

Поступила после рецензирования / Revised 20.11.2021

Принята к публикации / Accepted 25.11.2021

ОПТИМИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ БЕСПИЛОТОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА

А. В. Полтавский¹, А. А. Тюгашев², Н. К. Юрков³

¹ Институт проблем управления имени В. А. Трапезникова РАН, Москва, Россия

² Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

³ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ avp57avp@yandex.ru, ² tau797@mail.ru, ³ yurkov_NK@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Сегодня наблюдается очередной исторический всплеск для разработок беспилотных летательных аппаратов и моделей для объектов беспилотных авиационных систем. Данные передовые разработки являются инновационными в области беспилотной авиации, они интенсивно развиваются, достаточно стремительно меняют свою структуру и вид, а также совершенствуются блоки для различных систем управления и наведения с расширением функций аппаратно-программного обеспечения, которые связаны непосредственно с выполнением основной функциональной задачи. Как правило, в составе основных блоков для звеньев систем наведения находятся объекты информационно-измерительных и управляющих систем (ИИУС), которые также являются составной частью для системы автоматического управления в БЛА. *Материалы и методы.* Необходимость получения объективной оценки технического уровня для этих систем, именно на ранних этапах проектирования, решения ряда задач анализа по подготовке принятия управленческих решений ЛПП приводит разработчиков к более полному учету их оценок с характеристиками и параметрами. Следует отметить, что в печати, научных работах и др., также наблюдается всплеск интересов и всевозможных подходов к решению таких задач, в частности, по выбору структуры и параметров ИИУС. У каждого из этих подходов, методов и моделей к оценкам объектов для ИИУС свои преимущества и свои недостатки, в то же время любое подобное исследование должно подкрепляться экспериментом, как правило, вычислительным. Среди этих методов и множества разных подходов, особенно по структурно-параметрической оптимизации нелинейных, нестационарных и стохастических моделей объектов ИИУС, к сожалению, работ мало. *Результаты и выводы.* В данной статье рассматривается один из подходов к решению структурно-параметрической оптимизации моделей объектов для информационно-измерительной и управляющей системы ИИУС в составе блоков системы автоматического управления беспилотным летательным аппаратом. Подход основан на комплексном использовании алгоритмов имитационного (и компьютерного) моделирования с применением аппарата статистического синтеза и анализа стохастических систем переменной структуры.

Ключевые слова: информационная конструкция, моделирование, система, технический уровень, комплекс беспилотных летательных аппаратов, оптимизация, показатели качества, критерии

Для цитирования: 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. doi:10.21685/2307-4205-2021-4-6

OPTIMIZATION OF THE INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM OF AN UNMANNED AIRCRAFT

A.V. Poltavskiy¹, A.A. Tyugashev², N.K. Yurkov³

¹ V. A. Trapeznikov Institute of Management Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Samara State Technical University, Samara, Russia

³ Penza State University, Penza, Russia

¹ avp57avp@yandex.ru, ² tau797@mail.ru, ³ yurkov_NK@mail.ru

Abstract. *Background.* Today, there is another historical surge in the development of unmanned aerial vehicles and many models for unmanned aircraft systems. These developments are advanced in the field of unmanned aviation, they are rapidly changing their structure and appearance, as well as blocks for control and guidance systems with hardware and software for them, which are directly related to the performance of the main task. As a rule, the main

blocks for the guidance systems links contain objects of information-measuring and control systems (IIUS), which are also an integral part of the automatic control system in the UAV. *Materials and methods.* The need to obtain an objective assessment for these systems, namely at the early stages of design, the solution of a number of tasks for analysis for the preparation of management decisions of the LPR, leads developers to a more complete account of their assessments with characteristics and parameters. It should be noted that in the press, scientific papers, etc., there is also a surge of interests and various approaches to solving such problems, in particular, on the choice of the structure and parameters of the IIUS. Each of these approaches and methods for evaluating object models for IIUS has its own advantages and disadvantages, at the same time, any such research should be supported by an experiment, usually computational. Unfortunately, there are few works among these methods and approaches, especially on the structural-parametric optimization of nonlinear, non-stationary and stochastic models of IIUS objects. *Results and conclusions.* This article considers one of the approaches to the solutions of structural-parametric optimization of object models for the information-measuring and control system of the IIUS as part of the units of the automatic control system of an unmanned aerial vehicle. The approach is based on the complex use of simulation (and computer) modeling algorithms for statistical synthesis and analysis of stochastic systems of variable structure.

Keywords: information design, modeling, system, technical level, complex of unmanned aerial vehicles, optimization, quality indicators, criteria

For citation: Poltavskiy A.V., Tyugashev A.A., Yurkov N.K. Optimization of the information and measurement system of an unmanned aircraft. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;(4):44–55. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-4-6

Введение

В работе рассматривается подход к идентификации и оптимизации моделей для объектов ИИУС в составе блоков системы автоматического управления (САУ) беспилотного воздушного судна (БВС–БЛА) на основе сравнения (сличения) реального выходного сигнала Y с сигналом, который требуется Y_T . По существу, это означает то, что в основу исследований и оптимизации процессов положены признаки, связанные непосредственно с функционированием системы. Следовательно, за качество системы здесь принимается ее эффективность, точнее, условная эффективность. В состав блоков модели и принимаемых ограничений (условий) включаются требования к процессу формирования Y . Требуемый сигнал вида Y_T задается из объективных возможностей (и принимаемых ограничений) и целевого назначения для разрабатываемой системы, как желаемый сигнал Y_T может быть эталоном (т.е. базовым сигналом). Формально связь входного X и выходного Y сигналов производится с помощью некоторого оператора системы ИИУС, обозначим его $A(Y, X; t)$ [1, 2]:

$$Y = A(Y, X; t)X.$$

Информационная система из моделей объектов ИИУС в составе блоков САУ имеет многоуровневое и иерархическое управление (как подчиненность нижестоящих подсистем вышестоящим – характерная особенность иерархии), которое подчинено для достижения главной цели, поставленной перед всей системой. В заданных границах моделирования каждая подсистема и каждый элемент проявляют локальную независимость. Видно, что при заданных характеристиках входного сигнала X характеристики выходного сигнала Y полностью определяются оператором связи $A(Y, X; t)$. При заданных характеристиках Y_T показатель качества системы (как мера близости) будет изменяться при изменении оператора $A(Y, X; t)$, т.е. в заданных условиях работы и при выдвигении требований к системе управлять ее качеством можно осуществлять с помощью оператора $A(Y, X; t)$. Видоизменить информационную конструкцию $A(Y, X; t)$ можно путем замены некоторых управляющих звеньев в ИИУС, которые будем характеризовать управляющей матрицей S_c . Физически элементами матрицы S_c могут быть или численные значения некоторых параметров, или события. Подчеркивая зависимость выходного сигнала системы ИИУС от управляющей матрицы, запишем информационную конструкцию

$$Y(S_c) = A(Y, X, S_c; t)X.$$

Основная задача, стоящая перед объектами для модели ИИУС (и для САУ в БЛА), – управление качеством (сближение Y и Y_T). Чтобы придать отклонениям Y от Y_T свойство измеримости, будем пользоваться функцией потерь $\ell(Y, Y_T)$. Задавая назначение системы Y_T оптимизационным критерием

$$\min \rho = \min M[\ell(Y, Y_T)],$$

могут быть сформулированы ограничения (условия), которые обеспечивают физическую осуществимость оптимальной системы управления БЛА. Оптимизация системы связана с сравнительным анализом для ρ , что потребует проведения многократных опытов, если опытом в компьютерном моделировании назвать совокупность из действий, в результате которых для данной реализации входного сигнала $X(t)$ ставится в соответствие одна реализация выходного сигнала $Y(t)$. Как известно, для опыта нужна реальная система ИИУС и САУ БЛА или адекватная процессам ее модель. Опыт с реальной системой становится целесообразным тогда, когда принципиально необходимо учесть основные конструктивные, а также энергетические и некоторые эксплуатационные особенности системы. Как правило, целью таких подобных опытов является доводка уже готовой системы до состояния наилучшего в смысле принятого критерия качества. Опыты с моделями являются более доступными, более экономичными, а иногда и единственно возможными. К преимуществам моделирования относится также и то, что при этом создается возможность контроля непосредственно за каждым элементом процесса любой сложности. Процесс моделирования ИИУС состоит в создании целой цепочки: системы–аналога и среды–аналога. В основу построения моделей ИИУС и САУ для БЛА, а также описания возможных условий их работы положены «идентичность формы уравнений и однозначность соотношений между переменными в уравнениях для оригинала и самой модели» [3–5].

Постановка задачи

Описание подхода оптимизации моделей объектов ИИУС БЛА в следующем. Пусть задана динамическая система – ИИУС, на вход которой случайным образом действуют входные сигналы $X_1(U_1; t), X_2(U_2; t), \dots, X_r(U_r; t)$. Сами функции $X_\mu(U_\mu; t)$, ($\mu = \overline{1, r}$) являются случайными функциями времени, а векторные случайные величины U_r характеризуют возможную регулярность функций $X_r(U_r; t)$ (в частном случае функции $X_r(U_r)$ могут и не зависеть от времени). Свойства системы зависят от блочной управляющей матрицы S_c :

$$S_c = \begin{pmatrix} S_{c_1} \\ S_{c_2} \end{pmatrix},$$

где элементами $S_v^{(1)} (v = \overline{1, N_s})$ матрицы $S_{c1} = \begin{pmatrix} S_1^{(1)} \\ S_2^{(1)} \\ \vdots \\ S_{N_s}^{(1)} \end{pmatrix}$ являются параметры управляющих звеньев системы. Матрица

$$S_{c2} = \begin{pmatrix} C_1^{(2)} \\ C_2^{(2)} \\ \vdots \\ C_M^{(2)} \end{pmatrix}$$

с элементами $C_i^{(2)} (i = \overline{1, M})$ – сложные события, они отвечают следующим требованиям:

$$\prod_{i=1}^M C_i^{(2)} = C, P(C) = 1, \sum_{j_i=1}^{n_i} C_{ij_i}^{(2)} = C_i^{(2)}; \prod_{j_i=1}^{n_i} C_{ij_i}^{(2)} = \emptyset; P(\emptyset) = 0 \text{ и } \sum_{j_i=1}^{n_i} P(C_{ij_i}^{(2)}) = 1.$$

Первое требование свидетельствует о совместности событий $C_i^{(2)} (i = \overline{1, M})$, второе о том, что каждое из событий $C_i^{(2)} (i = \overline{1, M})$ является сложным, а третьему требованию соответствует несов-

местность событий $C_{ij}^{(2)}(j_i = \overline{1, n_i})$, четвертое говорит о полной группе событий $C_{ij}^{(2)}(j_i = \overline{1, n_i})$. Задача системы в том, чтобы обеспечить максимум события

$$\theta = \sum_{\mu=1}^r \theta_{\mu}, \quad (1)$$

в котором θ_{μ} – несовместные события, состоящие в выполнении всей совокупности требований, предъявляемых к системе при появлении входных сигналов $X_{\mu}(U_{\mu}; t)$. Учитывая несовместность событий θ_{μ} , получим формулу

$$P(\theta) = \sum_{\mu=1}^r P(\theta_{\mu}). \quad (2)$$

Данную задачу, связанную с оптимизацией системы, можно решить путем выбора из всех возможных элементов для матрицы S_c , т.е. тех элементов, при которых $S_c = S_o$ [6]:

$$P(\theta) = P(\theta/S_o) = \max. \quad (3)$$

Если зафиксировать таким образом матрицу $S_c = S_o$, то система в среднем по всем сигналам $X_{\mu}(U_{\mu}; t)$ будет обеспечивать максимум вероятности $P(\theta/S_c)$, а сама система при этом будет иметь постоянную структуру. Эффективность по критерию максимального значения вероятности и выполнения требований $P(\theta)$, связанную непосредственно с появлением входного сигнала $X_{\mu}(U_{\mu}; t)$ в ИИУС, можно повысить, если в состав ее блоков включить распознающее устройство (прежде всего, алгоритмы и программы), способное отличать входные сигналы $X_{\mu}(U_{\mu}; t)$ непосредственно друг от друга [6]. Покажем это.

При фиксированной матрице $S_c = S_o$ вероятность $P(\theta/S_o) = \sum_{\mu=1}^r P(\theta_r/S_o)$, при этом нет еще уверенности, что каждый член из суммы в выражении принимает максимально возможное значение. Само значение $P(\theta)$ может возрасти, если $P(\theta) = \sum_{\mu=1}^r P(\theta_r/S_{\mu_o})$, где $P(\theta_r/S_{\mu_o})$ – максимально возможная вероятность для события θ при появлении μ -го сигнала на входе системы и оптимальных для данного сигнала значений $S_c = S_{\mu_o}$. Сама же система будет иметь переменную структуру (рис. 1).

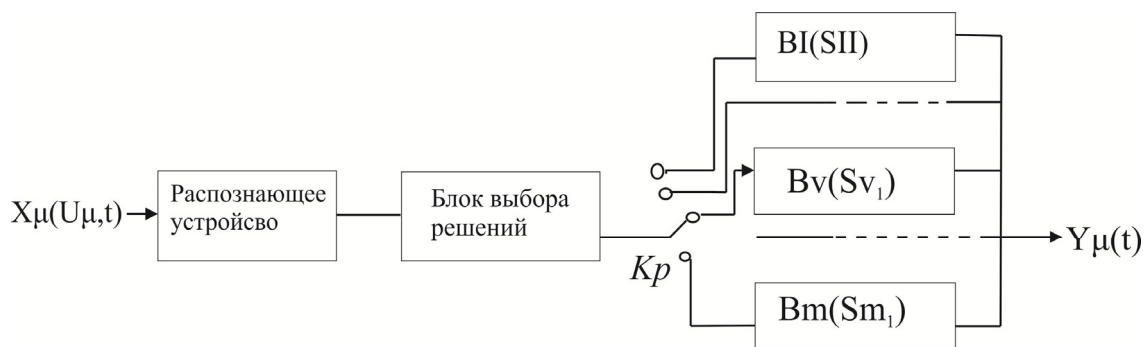


Рис. 1. Схематизация модели системы с переменной структурой

На вход распознающего устройства поступает сигнал $X_{\mu}(U_{\mu}; t)$. В соответствии с образом этого сигнала $X_{\mu}(U_{\mu}; t)$ и сигналом блока выбора решений «переключающий» ключ K_p осуществляет подключение непосредственно одного из моделируемых каналов системы. Свойства каналов для ИИУС определяются оператором $B_v(S_{v_1})$, $(v = \overline{1, m})$

$$Sv_1 = \begin{pmatrix} S_{v1}^{(1)} \\ S_{v2}^{(1)} \\ \vdots \\ S_{vN_{sv}}^{(1)} \end{pmatrix},$$

в котором v -е фиксированное значение матрицы S_{c_1} .

Далее рассматриваем идеальный случай, когда распознающее устройство и блок для выбора решений работают без ошибок (условно). Требуется определить $S_{\mu_0}(\mu = \overline{1, r})$, т.е. здесь требуется определить оптимальное решение (как оптимальную матрицу S_{c_2}) и оптимальные параметры подключенного в результате принятого решения канала ИИУС (оптимальную матрицу S_{c_1}) при условии, что на информационный вход действуют сигналы $X_{\mu}(U_{\mu}; t)$, $(\mu = \overline{1, r})$. Критерием качества в оптимизации будем считать максимум вероятности $P(\theta) = \max$ [7–9].

Решение задачи поиска сигнала в моделях блоков ИИУС

Для решения данной задачи в компьютеризированной среде воспользуемся методом неградиентного случайного поиска (НСП) Д. И. Гладкова. Рассмотрим систему (см. рис. 1). Здесь сама матрица S_{c_2} имеет в качестве своих составных элементов сложные события $C_1^{(2)}$ и $C_2^{(2)}$. На одном из уровней системы ИИУС (примем первый уровень) происходит распознавание сигналов $X_{\mu}(U_{\mu}; t)$. При этом фиксируются следующие события: $C_{11}^{(2)}$ – на вход действует сигнал $X_1(U_1, t)$; $C_{12}^{(2)}$ – на вход системы действует сигнал $X_2(U_2; t)$; ..., $C_{1r}^{(2)}$ – на вход системы действует сигнал $X_r(U_r; t)$. На втором уровне системы алгоритмом принимаются решения о подключении определенного канала. При этом здесь происходят следующие события, определяющие состояние системы:

$C_{21}^{(2)}$ – подключен первый канал $B_1(S_{11})$; $C_{22}^{(2)}$ – подключен второй канал $B_2(S_{21})$;

...

$C_{2v}^{(2)}$ – подключен v -й канал $B_v(S_{v_1})$; $C_{2m}^{(2)}$ – подключен m -й канал $B_m(S_{m_1})$.

Матрица S_{c_2} имеет вид

$$S_{c_2} = \begin{pmatrix} C_1^{(2)} \\ C_2^{(2)} \end{pmatrix}. \tag{4}$$

Свойства матрицы S_{c_2} будут характеризоваться с помощью формулы

$$A_{\mu v} = C_{1\mu}^{(2)} \cdot C_{2v}^{(2)}, \tag{5}$$

где $C_{1\mu}(\mu = \overline{1, r})$ – события, определяющие образ входного сигнала; C_{2v} – события, определяющие состояние системы ($v = \overline{1, m}$). Присутствие одного элемента от каждой строки матрицы (4) обязательно. Это обстоятельство вытекает из требования о совместимости событий $C_i^{(2)}(i = 1, 2)$. В свою очередь, каждое событие $A_{\mu v}$ определяет одно из возможных фиксированных состояний матрицы S_{c_2} . В процессе поиска все элементы для матрицы S_c будут случайными. При фиксированном состоянии матрицы $S_c \Rightarrow \Xi_c$ случайные элементы заменяются их реализациями. Случайность для элементов $C_{12}^{(2)}, \dots, C_{1r}^{(2)}$ определяется по соответствующим входным сигналам в ИИУС. Реализация для элементов $C_{11}^{(2)}, \dots, C_{1\mu}^{(2)}$ определяется алгоритмами поиска процедурами. Рассматривая управляющую матрицу S_c и событие θ_{μ} , напомним, что плотности будут

$$P(A_{\mu v})f_{c_1}(\Xi_{c_1} / A_{\mu v})P(\theta_{\mu} / A_{\mu v}; \Xi_{c_1}) = P(\theta_{\mu})P(A_{\mu v} / \theta_{\mu})f_{\theta}(\Xi_{c_1} / A_{\mu v}; \theta_{\mu}), \tag{6}$$

где $P(A_{\mu\nu})$ – вероятность события $A_{\mu\nu}$; $f_{c_1}(\Xi_{c_1}/A_{\mu\nu})$ – плотность вероятности матрицы Ξ_{c_1} при фиксированном состоянии матрицы Ξ_{c_2} ; $P(\theta_r/A_{\mu\nu};\Xi_{c_1})=P(\theta_\mu/\Xi_c)$ – вероятность события θ_μ , при фиксации матрицы Ξ_c ; $P(A_{\mu\nu}/\theta_\mu)$ – вероятность события $A_{\mu\nu}$, при условии, что имеет место событие θ_μ ; $f_\theta(\Xi_{c_1}/A_{\mu\nu};\theta_\mu)$ – плотность вероятности матрицы Ξ_{c_1} при фиксированном состоянии Ξ_{c_2} и при условии, что имеет место сложное событие θ_μ . Из вышеприведенного равенства находим такое выражение:

$$P(\theta_\mu/A_{\mu\nu};\Xi_{c_1})=P(\theta_\mu)\frac{P(A_{\mu\nu}/\theta_\mu)f_\theta(\Xi_{c_1}/A_{\mu\nu};\theta_\mu)}{P(A_{\mu\nu})f_{c_1}(\Xi_{c_1}/A_{\mu\nu})}.$$

Так как сама вероятность $P(\theta_\mu)$ не зависит от событий $A_{\mu\nu}$ и значений элементов матрицы Ξ_{c_1} , можно утверждать, что максимальному значению для вероятности

$$P(\theta_\mu/A_{\mu\nu};\Xi_{c_1})=P(\theta_\mu/S_{\mu_o})$$

соответствует наибольший из максимумов рассматриваемых функций, т.е.

$$F_{\mu\nu}(A_{\mu\nu};\Xi_{c_1})=\frac{P(A_{\mu\nu}/\theta_\mu)f_\theta(\Xi_{c_1}/A_{\mu\nu};\theta_\mu)}{P(A_{\mu\nu})f_{c_1}(\Xi_{c_1}/A_{\mu\nu})}.$$

Отсюда следует, что при организации случайного поиска без самообучения в блоке для апостериорной информации необходимо формировать функции $f_\theta(\Xi_{c_1}/A_{\mu\nu};\theta_\mu)$, $P(A_{\mu\nu}/\theta_\mu)$, а также находить $\mathop{Sup}_{A_{\mu\nu}} \mathop{extr}_{\Xi_{c_1}} F_{\mu\nu}(A_{\mu\nu};\Xi_{c_1})$, а поиск с самообучением следует организовать на основе

$$\begin{cases} P(A_{\mu\nu},n+1)=P(A_{\mu\nu}/\theta_\mu;n), \\ f_{c_1}(\Xi_{c_1}/A_{\mu\nu};n+1)=f_\theta(\Xi_{c_1}/A_{\mu\nu};\theta_\mu;n), \end{cases}$$

где $P(A_{\mu\nu}/\theta_\mu;n)$ – вероятность события $A_{\mu\nu}$ на n -м сеансе поиска, при условии, что имело место событие θ_μ ; $P(A_{\mu\nu};n+1)$ – вероятность события $A_{\mu\nu}$ на следующем $(n+1)$ -м сеансе поиска, $f_\theta(\Xi_{c_1}/A_{\mu\nu};\theta_\mu;n)$ – плотность вероятности матрицы Ξ_{c_1} на n -м сеансе случайного поиска, при условии, что уже произошли события θ_μ и $A_{\mu\nu}$; $f_{c_1}(\Xi_{c_1}/A_{\mu\nu};n+1)$ – плотность вероятности матрицы Ξ_{c_1} на $(n+1)$ -м сеансе поиска при фиксированном событии $A_{\mu\nu}$. Далее вероятностные характеристики, относящиеся к n -му сеансу поиска, называются апостериорными, а к $(n+1)$ -му сеансу поиска – априорными. Практически имеем выражения к построению алгоритма в информационной конструкции:

$$\begin{cases} M_{c_1}(A_{\mu\nu};n+1)=M_{\theta_\mu}(A_{\mu\nu};n), \\ K_{c_1}(A_{\mu\nu};n+1)=K_{\theta_\mu}(A_{\mu\nu};n), \end{cases}$$

где $M_{\theta_\mu}(A_{\mu\nu};n)$ – апостериорная матрица математических ожиданий, $K_{\theta_\mu}(A_{\mu\nu};n)$ – апостериорная матрица корреляционных моментов связи для параметров управляющих звеньев объектов ИИУС, при которых имело место событие θ_μ ; $M_{c_1}(A_{\mu\nu};n+1)$, $K_{c_1}(A_{\mu\nu};n+1)$ – априорные матрицы математических ожиданий и корреляционных моментов связи параметров управляющих звеньев системы. Матрица параметров в программном средстве формируется по следующим правилам:

$$\Xi_{c_1}(A_{\mu\nu};n+1)=M_{c_1}(A_{\mu\nu};n+1)+\Gamma_{\mu\nu}(A_{\mu\nu};n+1)\overline{\Xi_{r_2}}, (\mu=\overline{1,r};\nu=\overline{1,m}),$$

где $\Gamma_{\mu\nu}(A_{\mu\nu}; n+1)$ – треугольная матрица с элементами, функционально связанными с элементами матрицы $K_{c_1}(A_{\mu\nu}; n+1)$.

$$\text{Матрица } \Xi_{\Gamma_2} : M[\Xi_{\Gamma_2}] = 0; K_{\Gamma_2} = M[\Xi_{\Gamma_2} \Xi_{\Gamma_2}'] = E; E \in R(0;1).$$

Теперь покажем схему (рис. 2) для организации поиска процедурами НСП с самообучением. В блоки (Γ и M_{c_1}) информационной конструкции непосредственно поступает вся апостериорная информация. На их выходы пропускаются (в зависимости от события $A_{\mu\nu}$) только значения для элементов матриц $\Gamma_{\mu\nu}(A_{\mu\nu}; n+1)$ и $M_{c_1}(A_{\mu\nu}; n+1)$, в информационный блок для $L_{\mu\nu}$ поступает значение для вероятности $P(A_{\mu\nu} / \theta_{\mu})$. При этом корректируется длина из каждой части для μ -го единичного отрезка (условно принятого в модели отрезка, длина которого равна единице) в соответствии с условием

$$L_{\mu\nu}(n+1) = P(A_{\mu\nu} / \theta_{\mu}; n), \tag{7}$$

где $P(A_{\mu\nu} / \theta_{\mu}; n)$ – вероятность события $A_{\mu\nu}$, при условии, что имело место событие θ_{μ} , определяемое в процессе информационного поиска.

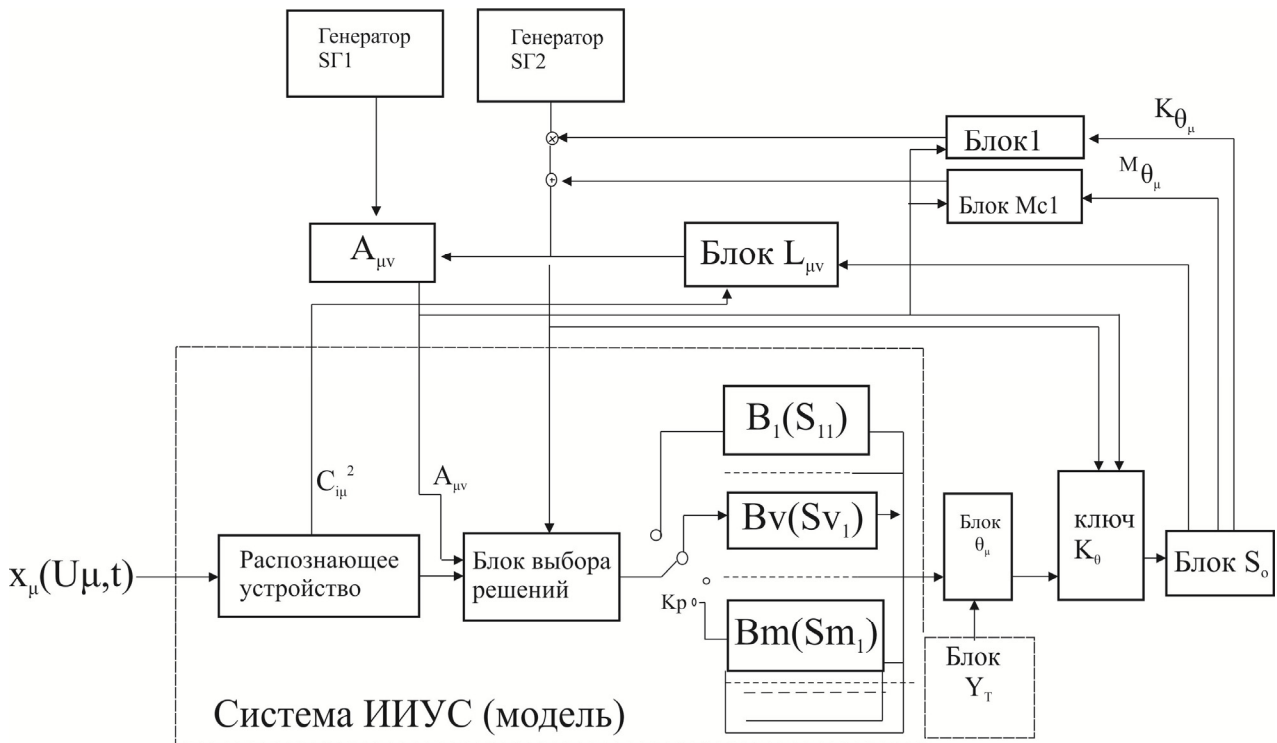


Рис. 2. Схематизация структуры для оптимизации системы с самообучением

Таким образом, сам процесс случайного поиска в модели ИИУС производится при следующей последовательности. В соответствии с сигналом $X_{\mu}(U\mu; t)$, поступающим на вход системы, распознающее устройство фиксирует событие $C_{\mu}^{(2)}$. Сам сигнал $C_{\mu}^{(2)}$ поступает в блок $L_{\mu\nu}$, где непосредственно находятся r единичных отрезков, каждый из которых «разбит» на t частей в соответствии с формулой (7). Моделируемый в блоке $L_{\mu\nu}$ μ -й отрезок далее поступает в блок $A_{\mu\nu}$. Генератор-датчик S_{Γ_1} , который представляет собой встроенный датчик для псевдослучайных чисел, воспроизводит случайную величину, распределенную по закону вида

$$f(\Xi_{\Gamma_1}) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 < \Xi_{\Gamma_1} < 1, \\ 0 & \text{при } \Xi_{\Gamma_1} < 0; \Xi_{\Gamma_1} > 1. \end{cases}$$

Далее в информационном блоке $A_{\mu\nu}$ происходит определение, на какую именно часть для μ -го отрезка непосредственно попала случайная величина Ξ_{Γ_1} . Попадание величины на ν -ю часть μ -го отрезка означает, что есть факт фиксации для события $A_{\mu\nu}$. В соответствии с этим событием блок выбора решений подключает ν -й канал. Генератор Ξ_{Γ_2} формирует реализацию из значений матрицы Ξ_{Γ_2} . На выходе из информационного блока наблюдается сигнал $Y_{\mu\nu}(t) = B_{\nu}[\Xi_{\nu 1}, X_{\mu}(U; t)]$. Далее в блоке сличения для θ_{μ} происходит его сравнение с сигналом, требуемым (или эталона) $Y_{T_{\mu}}(t)$. Если требования удовлетворены, срабатывает управляющий ключ K_{θ} и в блок для S_O поступают значения для элементов управляющей матрицы Ξ_c , соответствующие сеансу поиска. Если известна вероятность P_{μ} появления входных сигналов $X_{\mu}(U_{\mu}; t)$, то факт для события $A_{\mu\nu}$ можно установить с помощью одного единичного отрезка. Этот отрезок (рис. 3), как отмечено, разделен на r частей, а длина L_{μ} μ -й части от отрезка равна вероятности $P_{\mu}(\mu = \overline{1, r})$. Попадание случайной величины Ξ_{Γ_1} на виртуальный отрезок L_{μ} будет свидетельствовать о появлении на входе ИИУС входного сигнала $X_{\mu}(U_{\mu}; t)$. Сам же такой виртуальный отрезок $L_{\mu}(\mu = \overline{1, r})$ делится на m отрезков $L_{\mu\nu}(\nu = \overline{1, m})$ с целью удовлетворения формулы

$$\frac{L_{\mu\nu}}{L_{\mu}} = P(A_{\mu\nu} / \theta_{\mu}). \tag{8}$$

Величина $L_{\mu} = P_{\mu}$, а величину $L_{\mu\nu}$ можно определить следующим образом:

$$L_{\mu\nu}(n+1) = L_{\mu}P(A_{\mu\nu} / \theta_{\mu}; n) \tag{9}$$

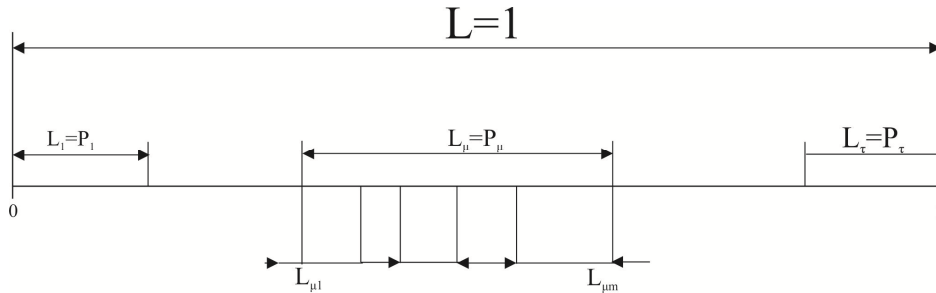


Рис. 3. Схематизация виртуального единичного отрезка в моделировании

Далее происходит следующее. В алгоритмах по идентификации ИИУС попадание случайной величины Ξ_{Γ_1} на виртуальный отрезок $L_{\mu\nu}$ свидетельствует о том, что имело место событие $A_{\mu\nu}$, а окончанием случайного поиска принята мера приращения матрицы математических ожиданий для параметров моделируемой системы [10, 11]:

$$\frac{1}{n_p} \sum_{i=0}^{n_p} \left| \frac{H_{n_{y-i}} - H_{n_{y-i-1}}}{H_{n_{y-i}}} \right| \leq \epsilon_p, \tag{10}$$

где $H_{n_{y-i}}$ – норма матрицы M_{θ} на n_{y-i} -м сеансе поиска; n_p – интервал усреднения; ϵ_p – заданное число, определяющее меру для приращения матрицы M_{θ} , характеризующее стационарность процесса поиска. При оптимизации решений стационарность процесса поиска также является сигналом к окончанию поиска. При неустановившемся режиме поиска оптимальные решения в компьютерной среде будут находиться по формуле

$$\frac{P(A_{\mu\nu} / \theta_{\mu})}{P(A_{\mu\nu})}. \tag{11}$$

Оценкой оптимальных значений параметров объектов ИИУС при симметричной апостериорной плотности вероятности $f_{\theta}(\Xi_{c1} / \theta_{\mu})$ является следующее выражение:

$$S_{\mu\nu_0} = M[\Xi_{c1} / A_{\mu\nu}; \theta_{\mu}]. \tag{12}$$

Результатом поиска лучшей модели в ИИУС являются оптимальные решения $a_{\mu\nu_0}$ для каждого вида из входных сигналов. Вместе с тем одновременно определяются оптимальные значения параметров управляющих звеньев ИИУС в составе блоков САУ $S_{\mu\nu_0}$, которые вводятся, а затем непосредственно фиксируются в программе (рис. 4).

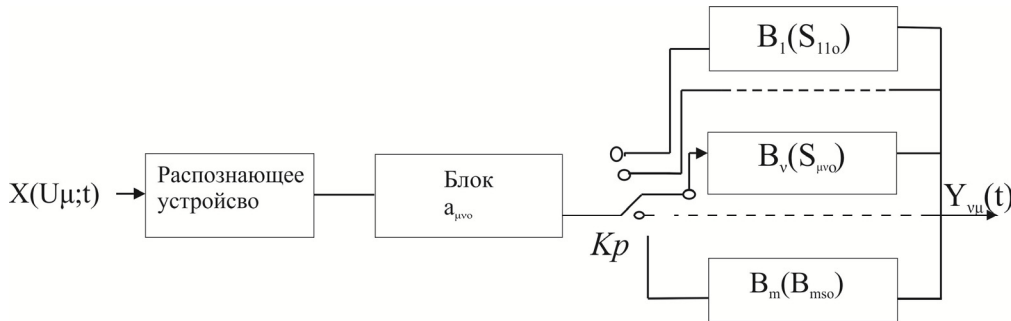


Рис. 4. Вид схемы после оптимизации модели ИИУС в составе блоков САУ информационной конструкции беспилотного воздушного судна

Схематично модель системы ИИУС представим в общем контуре системы наведения беспилотного воздушного судна (рис. 5), она построена на принципах открытости архитектуры с возможностями наращивания дополнительных блоков в имитационной (компьютерной) общей информационной модели [12, 13].

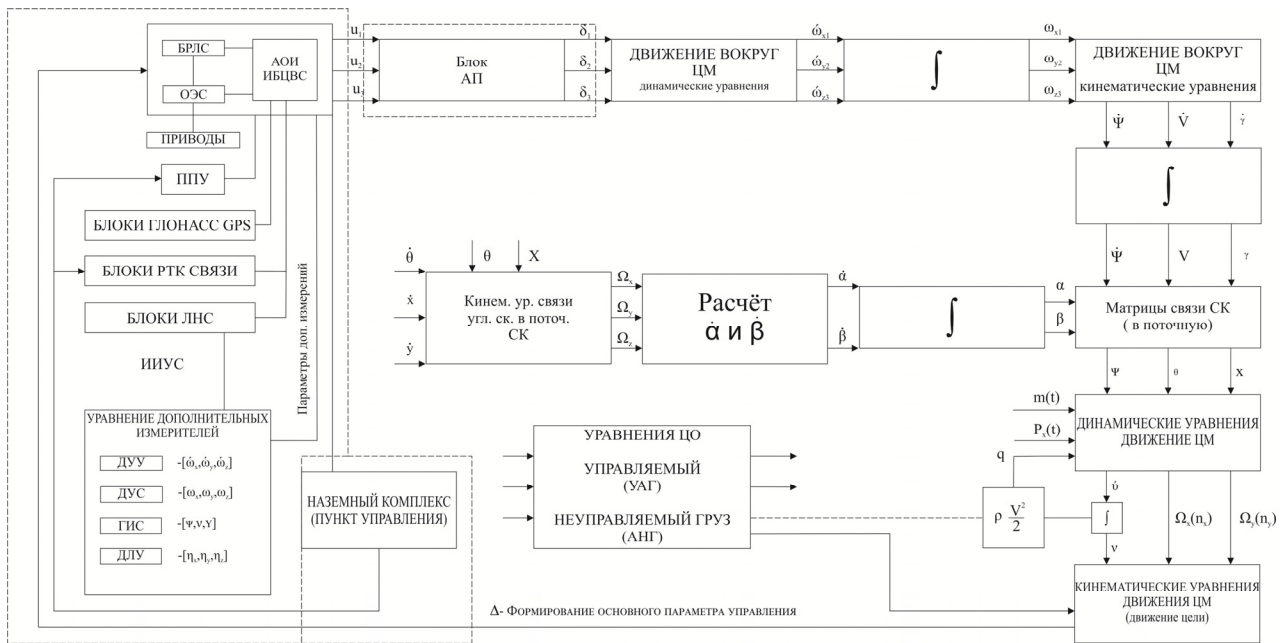


Рис. 5. Схематизация модели ИИУС в составе блоков информационной конструкции беспилотного воздушного судна

Заключение

Современные информационные технологии и разработки объектов информационных конструкций направлены, прежде всего, на комплексирование задач, методов, моделей и алгоритмов

к многокритериальному оцениванию показателей качества и технического уровня объектов ИИУС с целью выбора возможных альтернатив. Они также предлагают различные подходы к идентификации объектов в БАС. Известные положения из теории исследования операций [14] предполагают комплексный набор – ряд из методов и способов для формирования единого критерия $J(\cdot)$ ИИУС как набора частных критериев J_i . Метод введения ограничений в информационной конструкции на выходные параметры в форме их «свертки» позволяет решать многие задачи анализа и оптимизации. Преобразование задачи оптимизации с ограничениями в задачу оптимизации без ограничений путем изменения целевой функции является базисом и основой для целой группы методов, часто еще называемых методами штрафных функций. Алгоритмы поиска лучших параметров и решений (особенно на ранней стадии их предварительного анализа, проектирования и испытаний многофункциональных БЛА) объектов ИИУС в информационной конструкции методом НСП наряду с известными методами экспертных оценок могут дать не только оптимальные решения выбора для систем и объектов современным БЛА, а также указать на меру их конкурентоспособности в соответствии с принятым условием для критерия, формируемого из целого набора показателей качества и функциональной эффективности. Создание сложной информационной конструкции с основными блоками ИИУС для компьютеризированных информационно-аналитических систем, как правило, двойного назначения и двойных технологий позволяет выработать более объективные решения при построении современных систем наведения беспилотных воздушных судов. Особенно важно, что данный подход к оптимизации систем навигации может дополняться основными компонентами из технологий [9, 10] геоинформационных систем. В настоящее время различные ГИС-технологии также интенсивно развиваются, особенно это видно при построении современных информационных моделей и различных объектов беспилотных транспортных систем.

Список литературы

1. Казаков И. Е. Статистическая теория систем управления в пространстве состояний. М. : Наука, 1975. 354 с.
2. Казаков И. Е. Статистическая динамика систем с переменной структурой. М. : Наука, 1977. 416 с.
3. Казаков И. Е., Гладков Д. И. Методы оптимизации стохастических систем. М. : Наука, 1987.
4. Гладков Д. И. Оптимизация систем неградиентным случайным поиском. М. : Энергоатомиздат, 1984. 256 с.
5. Полтавский А. В., Бурба А. А., Макаров В. В., Маклаков В. В. Многофункциональные комплексы беспилотных летательных аппаратов / под ред. Е. Я. Рубиновича. М. : ИПУ РАН, 2015. 204 с.
6. Полтавский А. В., Семенов С. С., Бурба А. А., Нгуен Зуи Фьонг. Информационные процессы в технике: моделирование систем и объектов многофункциональных робототехнических комплексов беспилотной авиации / под ред. В. М. Вишневого. Королев : АО «ПСТМ», 2019. 404 с.
7. Полтавский А. В., Жумабаева А. С., Юрков Н. К. Алгоритм определения индикатрисы излучения подвижного объекта на примерах робототехнического комплекса беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 3. С. 23–30.
8. Полтавский А. В., Юрков Н. К. Отбор операторов автоматизированных рабочих мест многофункциональным комплексам беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 1. С. 70–76. doi: 10.21685/2307-4205-2019-1-8.
9. Полтавский А. В., Юрков Н. К., Семенов С. С. Информатизация образования: семантика термина «беспилотный летательный аппарат» // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2018. Т. 1. С. 301–302.
10. Саркисян С. А., Ахундов В. М., Минаев Э. С. Анализ и прогноз развития больших технических систем. М. : Наука, 1983. 280 с.
11. Полтавский А. В., Юрков Н. К. Модификация модели системы управления подвижным объектом // Надежность и качество сложных систем. 2014. № 1. С. 65–69.
12. Майоров А. А., Матерухин А. В. Геоинформационные аспекты разработки информационно-измерительных систем на базе распределенных сетей интеллектуальных сенсоров // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2017. № 6. С. 106–109.
13. Вилкас Э. Й., Майминас Е. З. Решения: теория, информация, моделирование. М. : Радио и связь, 1981. 68 с.
14. Юрков Н. К., Согомонян К. Э. Воздействие ультракоротких импульсов электромагнитного излучения на беспилотные летательные аппараты // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2019. Т. 2. С. 315–317.

References

1. Kazakov I.E. *Statisticheskaya teoriya sistem upravleniya v prostranstve sostoyaniy = Statistical theory of control systems in the state space*. Moscow: Nauka, 1975:354. (In Russ.)
2. Kazakov I.E. *Statisticheskaya dinamika sistem s peremennoy strukturoy = Statistical dynamics of systems with variable structure*. Moscow: Nauka, 1977:416. (In Russ.)

3. Kazakov I.E., Gladkov D.I. *Metody optimizatsii stokhasticheskikh system = Methods of optimization of stochastic systems*. Moscow: Nauka, 1987. (In Russ.)
4. Gladkov D.I. *Optimizatsiya sistem negradientnym sluchaynym poiskom = Optimization of systems by non-gradient random search*. Moscow: Energoatomizdat, 1984:256. (In Russ.)
5. Poltavskiy A.V., Burba A.A., Makarov V.V., Maklakov V.V. *Mnogofunktsional'nye komplekсы bespilotnykh letatel'nykh apparatov = Multifunctional complexes of unmanned aerial vehicles*. Moscow: IPU RAN, 2015:204. (In Russ.)
6. Poltavskiy A.V., Semenov S.S., Burba A.A., Nguen Zui Fyong. *Informatsionnye protsessy v tekhnike: modelirovanie sistem i ob'ektov mnogofunktsional'nykh robototekhnicheskikh kompleksov bespilotnoy aviatsii = Information processes in engineering: modeling of systems and objects of multifunctional robotic complexes of unmanned aircraft*. Korolev: AO «PSTM», 2019:404. (In Russ.)
7. Poltavskiy A.V., Zhumabaeva A.S., Yurkov N.K. Algorithm for determining the radiation indicatrix of a mobile object using examples of a robotic complex of unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and Quality of Complex Systems*. 2015;(3):23–30. (In Russ.)
8. Poltavskiy A.V., Yurkov N.K. Selection of automated workplace operators by a multifunctional complex of unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and Quality of Complex Systems*. 2019;(1):70–76. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2019-1-8
9. Poltavskiy A.V., Yurkov N.K., Semenov S.S. Informatization of education: semantics of the term "unmanned aerial vehicle". *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2018;1:301–302. (In Russ.)
10. Sarkisyan S.A., Akhundov V.M., Minaev E.S. *Analiz i prognoz razvitiya bol'shikh tekhnicheskikh system = Analysis and forecast of the development of large technical systems*. Moscow: Nauka, 1983:280. (In Russ.)
11. Poltavskiy A.V., Yurkov N.K. Modification of the mobile object control system model. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and Quality of Complex Systems*. 2014;(1):65–69. (In Russ.)
12. Mayorov A.A., Materukhin A.V. Geoinformation aspects of the development of information and measurement systems based on distributed networks of intelligent sensors. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotos'emka = News of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography*. 2017;(6):106–109. (In Russ.)
13. Vilkas E.Y., Mayminas E.Z. *Resheniya: teoriya, informatsiya, modelirovanie = Solutions: theory, information, modeling*. Moscow: Radio i svyaz', 1981:68. (In Russ.)
14. Yurkov N.K., Sogomonyan K.E. The effect of ultrashort pulses of electromagnetic radiation on unmanned aerial vehicles. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2019;2:315–317. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Васильевич Полтавский

доктор технических наук, ведущий научный сотрудник,
Институт проблем управления
имени В. А. Трапезникова РАН
(Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65)
E-mail: avp57avp@yandex.ru

Андрей Александрович Тюгашев

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры вычислительной техники,
Самарский государственный технический университет
(Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244)
E-mail: tau797@mail.ru

Николай Кондратьевич Юрков

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

Aleksandr V. Poltavskiy

Doctor of technical sciences, leading researcher,
V. A. Trapeznikov Institute of Management Problems
of the Russian Academy of Sciences
(65 Profsoyuznaya street, Moscow, Russia)

Andrey A. Tyugashev

Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the sub-department of computer technology,
Samara State Technical University
(244 Molodogvardeyskaya street, Samara, Russia)

Nikolay K. Yurkov

Doctor of technical sciences, professor,
the honoured worker of science
of the Russian Federation,
head of the sub-department
of radio equipment design and production,
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 08.09.2021

Поступила после рецензирования/Revised 10.10.2021

Принята к публикации/Accepted 11.11.2021

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

DIAGNOSTIC METHODS FOR ENSURING RELIABILITY AND QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

УДК 004.891.3

doi:10.21685/2307-4205-2021-4-7

ЭНТРОПИЙНО-НЕЙРОСЕТЕВОЙ МЕТОД УСТРАНЕНИЯ ПРОТИВОРЕЧИВОСТИ ОЦЕНОК ЭКСПЕРТОВ

И. А. Кубасов¹, А. И. Иванов²

¹ Академия управления МВД России, Москва, Россия

² Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт, Пенза, Россия

¹ igorak@list.ru, ² ivan@pnici.penza.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Исследованы пути решения проблемы устранения возможной противоречивости мнений разных экспертов при оценке рейтинга сравниваемых по параметрам надежности и качества сложных систем. Данная проблема возникает в силу того, что выбор интегрального показателя и установление интегрального критерия оценки сложных систем, учитывающих значения параметров надежности и качества, могут быть отличными у разных экспертов. При этом теоретически возможна ситуация, когда голоса экспертов «за» и «против» делятся ровно пополам и тогда принимаемое решение по формированию рейтинга сложных систем будет неустойчивым. *Материалы и методы.* Обоснована целесообразность сравнения нескольких лидеров рейтинга сравниваемых сложных систем не между собой, а со средне-статистической системой рассматриваемого множества сложных систем. При этом возникающий эффект смазывания различия между лидерами рейтинга устраняется методом обучения нейросети (с большим числом нейронов) разделению сравниваемых лидеров, а затем контроля расстояний Хэмминга и/или разности энтропии между лидерами по отношению к расстояниям до среднестатистической системы. *Результаты.* Применение предлагаемого энтропийно-нейросетевого метода позволяет объективно определить первого лидера рейтинга по максимальному скачку энтропии кодовых откликов до второго лидера по порядку. *Выводы.* Предлагается новый метод устранения возможной противоречивости мнений разных экспертов, позволяющий получить объективный результат по формированию рейтинга сложных систем, построенный на полностью автоматическом обучении нейросетей и автоматическом классифицировании нейросетями всех сравниваемых сложных систем.

Ключевые слова: сложные системы, оценка эксперта, искусственные нейроны, расстояние Хэмминга, энтропия кодовых откликов

Для цитирования: Кубасов И. А., Иванов А. И. Энтропийно-нейросетевой метод устранения противоречивости оценок экспертов // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 4. С. 56–63. doi:10.21685/2307-4205-2021-4-7

ENTROPY-NEURAL NETWORK METHOD FOR ELIMINATING INCONSISTENCIES IN EXPERT ASSESSMENTS

I.A. Kubasov¹, A.I. Ivanov²

¹ Academy of Management of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Moscow, Russia

² Penza Research Electrotechnical Institute, Penza, Russia

¹ igorak@list.ru, ² ivan@pnici.penza.ru

Abstract. *Background.* The paper investigates ways to solve the problem of eliminating the possible inconsistency of opinions of different experts when evaluating the rating of complex systems compared in terms of reliability and quality parameters. This problem arises due to the fact that the choice of an integral indicator and the establishment of an integral criterion for evaluating complex systems that take into account the values of reliability and quality parameters may be different for different experts. At the same time, a situation is theoretically possible when the votes of experts "for" and "against" are divided exactly in half and then the decision to form a rating of complex systems will be unstable. *Materials and methods.* The expediency of comparing several leaders of the rating of the compared complex systems is justified, not among themselves, but with the average system of the considered set of complex systems. At the same time, the resulting effect of blurring the difference between the leaders of the rating is eliminated by training a neural network (with a large number of neurons) to separate the compared leaders, and then controlling the Hamming distances and/or the entropy difference between the leaders in relation to the distances to the average system. *Results.* The application of the proposed entropy-neural network method allows us to objectively determine the first leader of the rating by the maximum jump in the entropy of code responses to the second leader in order. *Conclusions.* A new method is proposed to eliminate the possible inconsistency of opinions of different experts, which allows to obtain an objective result on the formation of a rating of complex systems, based on fully automatic training of neural networks and automatic classification by neural networks of all compared complex systems.

Keywords: complex systems, expert evaluation, artificial neurons, Hamming distance, entropy of code states

For citation: Kubasov I.A., Ivanov A.I. Entropy-neural network method for eliminating inconsistencies in expert assessments. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;(4):56–63. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-4-7

Введение

Экспертные оценки – это очень эффективный инструмент для предсказаний будущего и для принятия решений в настоящем. Люди-эксперты способны решать задачи огромной размерности. У современного человека обнаружены естественные нейроны с 10 000 входов [1]. Это означает, что теоретически эксперт-человек может решать 10 000-мерные задачи – $f(x_1, x_2, \dots, x_{10000})$ практически в реальном времени, при этом мозг человека потребляет от 30 до 50 Вт. Причем известно, что современные компьютеры легко решают одномерные задачи $f(x)$ в режиме микропотребления. Для двухмерных задач $f(x_1, x_2)$ нужен графический ускоритель, потребляющий как минимум несколько Ватт. Для решения трехмерных задач $f(x_1, x_2, x_3)$ нужна графическая станция, потребляющая сотни Ватт при решении задач в реальном времени. В этом аспекте ресурсы естественного интеллекта, в том числе в экспертной деятельности, огромны, но не полностью реализованы. Поэтому за помощью прибегают к искусственным нейронным сетям.

Следует отметить, что на практике иногда разные эксперты (полагаем, что это квалифицированные специалисты в определенной области) при оценке рейтинга сложных систем из некоторого рассматриваемого множества высказывают противоречивые мнения. При этом число учитываемых экспертами параметров сравниваемых систем может быть различным. Один эксперт учитывает десятки параметров надежности и качества, а другой эксперт, обладая большим опытом, учитывает сотни параметров. Кроме того, сами параметры могут не совпадать, даже если найти двух экспертов, учитывающих одинаковое число параметров. Для одного эксперта важным является одно, для другого – совсем иное. Поэтому выбор интегрального показателя и установление интегрального критерия оценки сложных систем, учитывающих значения параметров надежности и качества, могут быть отличными у разных экспертов.

Давно известен способ устранения противоречий экспертных оценок путем увеличения числа экспертов и принятия окончательного решения по большинству голосов. Этот способ доведен до технического предела, например, при выборе главы государства. Тогда каждый гражданин становится экспертом и отдает свой голос одному из претендентов или никому. При этом теоретически возможна ситуация, когда голоса «за» и «против» делятся ровно пополам, и в силу этого принимаемое решение будет неустойчивым.

Классическая математическая статистика легко справляется с задачей вычислений математических ожиданий, стандартных отклонений, коэффициентов корреляции на выборках, состоящих из 20 и более примеров реализации того или иного параметра оценки сложной системы. Однако, применяя классические методы многомерного статистического анализа [2], можно успешно решать достаточно широкий круг задач ограниченной размерности. Основной причиной, сдерживающей рост размерности решаемых задач, является низкая устойчивость вычислений линейной алгебры. При попытках использовать вычисления с обращением линейных матриц высокой размерности быстро накапливаются ошибки, возникает эффект так называемого «проклятия размерности».

Для исключения этого негативного эффекта в качестве гипотезы будем рассматривать нейронные сети как реализацию некоторых нелинейных алгебр нейросетевых функционалов, решения которых обладают более высокой устойчивостью по сравнению с классическими решениями линейной алгебры [2]. Сегодня активно используются глубокие (многослойные) сети искусственных нейронов [3, 4] для распознавания лиц и широкие (однослойные) сети нейронов с большим числом выходов¹.

Подтвердить гипотезу роста устойчивости нейросетевых вычислений удастся на примере решения обратной задачи нейросетевой биометрии, когда, используя базу из 10 000 образов «Чужой», удастся извлекать знания из таблиц весовых коэффициентов 256 нейронов, совместно обрабатывающих 416 биометрических параметров [5, 6]. Для примера можно отметить, что уже при обращении линейных матриц 16×16 , построенных на реальных биометрических данных, их число обусловленности уже становится неприемлемо большим. Получается, что вычисления с обращением огромных матриц нейросетевых функционалов 256×416 технически выполнимы, а вычисления с обращением относительно небольших линейных матриц 16×16 выполнить нельзя. Это связано с особенностью нелинейной деформации, выполняемой многомерными нейросетевыми функционалами при обработке «сырых» входных данных нейросети. То, что технически невозможно выполнять в линейных многомерных пространствах, вполне выполнимо в нелинейных многомерных пространствах нейросетевых функционалов. Преимуществом нейронных сетей является то, что они во время обучения нелинейно деформируют многомерные пространства входных «сырых» данных, многократно повышая устойчивость вычислений.

Следовательно, научный и практический интерес представляет применение положительного опыта отечественной нейросетевой биометрии [7, 8] для решения задачи устранения возможной противоречивости мнений разных экспертов при оценке рейтинга сложных систем из некоторого рассматриваемого экспертами множества по параметрам надежности и качества. Поэтому в данной статье предлагается метод повышения устойчивости вычислений и устранения возможной противоречивости оценок разных экспертов за счет привлечения стандартизованного алгоритма автоматического обучения больших сетей искусственных нейронов².

Устойчивая взаимная сортировка сетями искусственных нейронов многомерных образов

Быстрое обучение нейронных сетей алгоритмом ГОСТ Р 52633.5 на малых выборках в 20 примеров образа «Свой» выполняется в силу того, что полностью исключены итерации. Все весовые коэффициенты нейронов вычисляются, исходя из знания математического ожидания биометрических параметров и их стандартного отклонения. Как результат – время обучения нейросети на 20 примерах образа «Свой» составляет десятые доли секунды.

Тестирование качества работы сети из 256 искусственных нейронов также может быть выполнено быстро и на малых выборках из 20 примеров алгоритмом ГОСТ Р 52633.3³. Такая возможность появляется, если отказаться от статистического анализа большого числа в 2^{256} возможных кодовых состояний [9, 10]. Для этой цели предлагается вычислять расстояния Хэмминга между кодом-откликом нейросети образа «Чужой» и кодом-откликом нейросети образа «Свой»:

¹ ГОСТ Р 52633.0-2006. Защита информации. Техника защиты информации. Требования к средствам высоконадежной биометрической аутентификации ; ГОСТ Р 52633.5-2011. Защита информации. Техника защиты информации. Автоматическое обучение нейросетевых преобразователей биометрия-код доступа ; ГОСТ Р 52633.3-2011. Защита информации. Техника защиты информации. Тестирование стойкости средств высоконадежной биометрической защиты к атакам подбора.

² ГОСТ Р 52633.5-2011. Защита информации. Техника защиты информации. Автоматическое обучение нейросетевых преобразователей биометрия-код доступа.

³ ГОСТ Р 52633.3-2011. Защита информации. Техника защиты информации. Тестирование стойкости средств высоконадежной биометрической защиты к атакам подбора.

$$"h" = \sum_{i=1}^{256} ("c_i") \oplus ("x_i"), \quad (1)$$

где $"c_i"$ – состояние i -го разряда кода образа «Свой»; $"x_i"$ – состояние i -го разряда кода образа «Чужой»; \oplus – операция сложения по модулю два.

Результаты вычислений $p(h)$ – плотности распределения вероятности появления расстояний Хэмминга при воздействии на нейросеть разными образами отражены на рис. 1.

Из-за суммирования 256 случайных величин при вычислении расстояний Хэмминга по формуле (1) происходит нормализация их распределений. При этом чем ближе математическое ожидание расстояний Хэмминга к нулю $E(\langle h \rangle) \rightarrow 0$, тем ближе образ «Чужой» к образу «Свой». Еще одним интересным эффектом является уменьшение энтропии кодов-откликов на образ «Чужой». Без особых проблем удастся оценить энтропию каждого образа «Чужой» по отношению к нейросети, обученной ранее узнавать образ «Свой». Возникает эффект энтропийной самоклассификации образов «Чужой» относительно нейросети «Свой». На рис. 2 приведен пример распределения значений энтропий 10 000 образов «Чужой» при подаче их на нейросеть, обученную распознавать единственный образ «Свой» (на вертикальной оси отложены значения 256 энтропии кодовых откликов каждого из образов «Чужой», $H(\langle x_1, x_2, \dots, x_{256} \rangle)$).

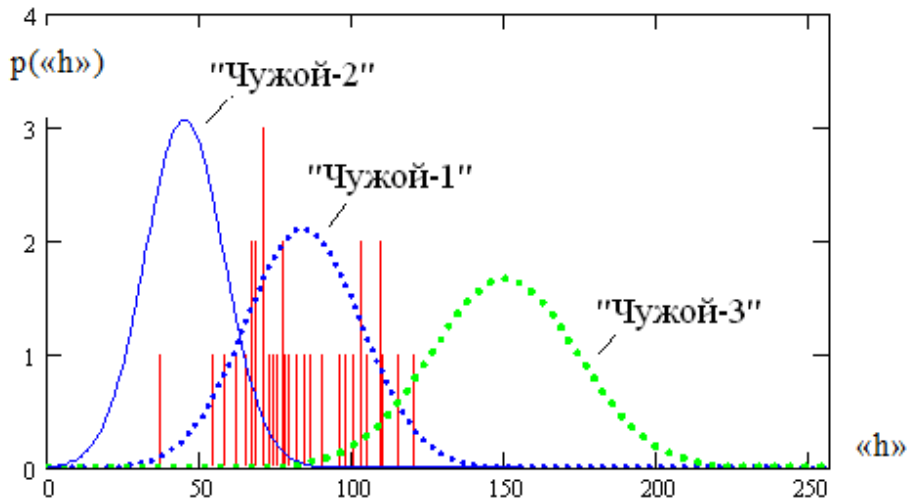


Рис. 1. Эффект взаимной сортировки образов в пространстве расстояний Хэмминга

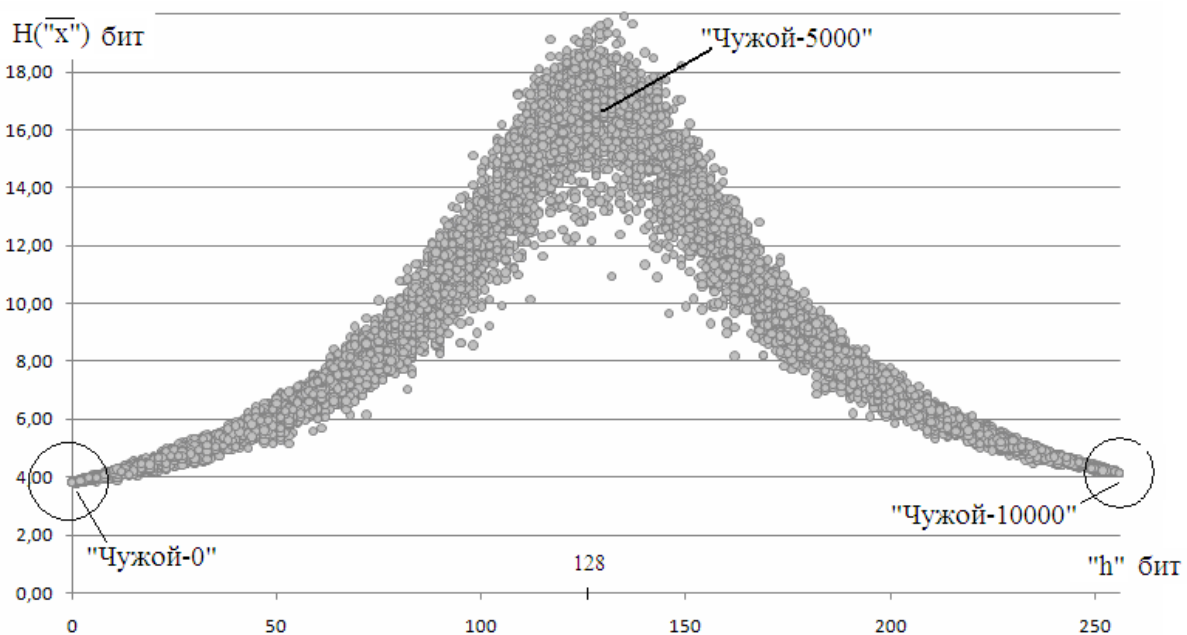


Рис. 2. Значение энтропий 10 000 образов «Чужой», упорядоченных по значению их энтропии и расстоянию Хэмминга между их центрами кодовых откликов

Наблюдается условная «палатка» распределения значений энтропий разных образов «Чужой». Неожиданным является то, что максимальной энтропией всегда обладают образы среднестатистических «Чужих». При этом минимальной энтропией в 4 бита будут обладать наиболее близкие образы «Чужой» к образу «Свой» (см. окружность в левой части рисунка) и очень далекие образы (см. окружность в правой части рисунка). Дело в том, что широкие нейросети, обученные по ГОСТ Р 52633.5¹, обладают симметрией. Минимальной, практически нулевой энтропией обладают не только примеры образа «Свой», но и примеры инверсного образа «Свой», с инверсными параметрами и инверсными кодовыми откликами.

Отметим, что классические эконометрические модели линейной алгебры [2] не могут корректно учитывать большое число параметров сравнения. Проблема состоит в том, что анализируемые переменные оказываются сильно зависимыми. Появление даже одной пары сильно коррелированных параметров во входных данных делает невозможным обращение матриц линейной алгебры (их определитель оказывается близок к нулю). В этом случае приходится понижать размерность задачи, выделяя наиболее информативные параметры. Фактически приходится жертвовать размерностью задачи ради повышения ее устойчивости.

Предположим, что эксперты провели оценку рейтинга сложных систем из некоторого множества, а также определили систему № 1 и систему № 2 как двух лидеров по наилучшим значениям параметров надежности и качества. Для проверки этой гипотезы (подтверждения того, что система № 1 возглавляет рейтинг, а следующим в рейтинге является система № 2) следует построить нейросетевой классификатор, отделяющий систему № 1 (образ «Свой») от других систем из рассматриваемого экспертами множества систем, в том числе с высокими значениями параметров надежности и качества. Из рис. 2 видно подтверждение гипотезы о том, что образ «Свой» (система № 1) отличается от ближайшего лидера рейтинга – образа «Чужой-0» (системы № 2) на 4 бита по шкале энтропии и от следующей системы в рейтинге – образа «Чужой-1000» (системы № 3) на 4,1 бита.

Преимущество приведенной на рис. 2 «палатки» энтропийно-нейросетевого представления данных состоит в том, что можно повторить вычисления, обучив нейросетевой классификатор на выделение образа следующей в рейтинге системы (например, системы № 2). Если какой-либо из этих образов обеспечит большой скачок энтропии, то гипотеза о лидерстве системы № 1 должна быть отклонена, так как сложная система с самыми высокими показателями надежности и качества должна давать максимальный скачок энтропии кодовых откликов до ближайшего лидера второго по порядку, т.е. рейтинг возглавляет система № 1, когда энтропия кодовых откликов образа системы № 2 является самой минимальной (в сравнении с образами других систем) по отношению к системе № 1.

При использовании сетей искусственных нейронов с большим числом выходов, обучаемых по ГОСТ Р 52633.5², проблема от использования сильно коррелированных данных не возникает. Более того, например, в Омском государственном техническом университете разрабатываются сети корреляционных нейронов Байеса [11, 12], разделительная способность которых увеличивается с ростом корреляционной связанности их входных данных. Получается, что сильная корреляция между входными данными уже не является причиной, по которой приходится отбрасывать реальные входные данные, т.е. появляется возможность увеличивать размерность эконометрических моделей.

Как результат можно увеличить входную размерность решаемой эконометрической задачи, расширяя список учитываемых параметров. При этом рост входной и выходной размерности широких нейронных сетей всегда приводит к росту их разделяющей способности. Исчезает «проклятие размерности» линейных эконометрических моделей. Становится выгодным применять разнотипные нелинейные пространства, в которых искусственные нейроны выполняют обогащение (суммирование) относительно «бедных» входных данных. Проведенные в этом направлении исследования показали, что каждому из примерно 200 известных критериев проверки статистических гипотез [13] может быть поставлен в соответствие эквивалентный искусственный нейрон [14–16].

Еще одним важным технологическим приемом повышения числа выходов у нейросети является переход от применения искусственных нейронов с выходным одноуровневым квантователем к использованию многоуровневых квантователей [17, 18]. Последнее приводит к увеличению длины выходного кода нейросети в несколько раз.

¹ ГОСТ Р 52633.5-2011. Защита информации. Техника защиты информации. Автоматическое обучение нейросетевых преобразователей биометрия-код доступа.

² ГОСТ Р 52633.5-2011. Защита информации. Техника защиты информации. Автоматическое обучение нейросетевых преобразователей биометрия-код доступа.

Все перечисленные выше технические приемы хорошо отработаны в нейросетевой биометрии и позволяют существенно увеличить разрешающую способность нейросетевого энтропийного классификатора [19, 20].

Заключение

Рост размерности задачи автоматического обучения нейронных сетей по ГОСТ 52633.5 всегда приводит к росту разрешающей способности нейросетевых наблюдателей. Высокая разрешающая способность нейросетей с большим числом искусственных нейронов позволяет легко разделять лидеров рейтинга сложных систем по показателям надежности и качества. Для этого достаточно контролировать расстояния Хэмминга и/или разность энтропии между системами-лидерами по отношению к расстояниям до среднестатистической системы рассматриваемого множества. Первого лидера будет выделять максимальный скачок энтропии кодовых откликов до лидера второго по порядку рейтинга.

Таким образом, если воспользоваться предлагаемым энтропийно-нейросетевым методом, то получим более объективный результат, построенный на полностью автоматическом обучении нейросетей и полностью автоматическом классифицировании нейросетями всех систем оценки. Естественно, что подобные вычисления целесообразно делать, когда голосование экспертов дает почти баланс голосов «за» и «против». Если подавляющее большинство экспертов дает одинаковые оценки, то скорее всего нейросетевая классификация подтвердит их результат.

Субъективная составляющая мнений отдельных экспертов полностью устраняется, если от них требуется выбирать не лидеров, а среднестатистическую систему среди множества сложных систем, оцениваемых экспертами по параметрам надежности и качества. Это еще одна важная особенность предлагаемого нового метода для обнаружения субъективных (ангажированных) экспертов. Если результаты применения предложенных в статье процедур противоречат результатам голосования экспертов, то можно с уверенностью констатировать, что некоторые эксперты не являются объективными. Их можно установить, меняя частично состав экспертов.

Список литературы

1. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. М. : Вильямс, 2006. С. 1104.
2. Тихомиров Н. Т., Тихомирова Т. М., Ушмаев О. С. Методы эконометрики и многомерного статистического анализа : учебник. М. : Экономика, 2011. 647 с.
3. Николенко С., Кудрин А., Архангельская Е. Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей. СПб. : Питер, 2018.
4. Чару А. Нейронные сети и глубокое обучение. СПб. : Диалектика, 2020. 756 с.
5. Волчихин В. И., Иванов А. И. Нейросетевая молекула: решение обратной задачи биометрии через программную поддержку квантовой суперпозиции на выходах сети искусственных нейронов // Вестник Мордовского университета. 2017. Т. 27, № 4. С. 518–523.
6. Иванов А. И. Искусственный интеллект высокого доверия. Ускорение вычислений и экономия памяти при тестировании больших сетей искусственных нейронов на малых выборках // Системы безопасности. 2020. № 5. С. 60–62.
7. Язов Ю. К., Волчихин В. И., Иванов А. И. [и др.]. Нейросетевая защита персональных биометрических данных / под ред. Ю. К. Язова. М. : Радиотехника, 2012. 157 с.
8. Ахметов Б. С., Иванов А. И., Фунтиков В. А. [и др.]. Технология использования больших нейронных сетей для преобразования нечетких биометрических данных в код ключа доступа : монография. Алматы : LEM, 2014. 144 с. URL: <http://portal.kazntu.kz/files/publicate/2014-06-27-11940.pdf>
9. Иванов А. И., Кубасов И. А. Сильный искусственный интеллект: повышение качества нейросетевых решений с переходом к обработке входных данных большого объема // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 1. С. 9–16.
10. Иванов А. И., Кубасов И. А., Самокутяев А. М. Тестирование больших нейронных сетей на малых выборках // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 3. С. 72–79.
11. Ложников П. С. Биометрическая защита гибридного документооборота. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2017. 130 с.
12. Иванов А. И., Сулавко А. Е. Использование сетей корреляционных нейронов с многоуровневым квантованием: защита от извлечения знаний из параметров решающего правила : препринт. Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. 48 с.
13. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М. : Физматлит, 2006. 816 с.

14. Иванов А. И., Банных А. Г., Безяев А. В. Искусственные молекулы, собранные из искусственных нейронов, воспроизводящих работу классических статистических критериев // Вестник Пермского университета. Сер.: Математика. Механика. Информатика. 2020. № 1. С. 26–32.
15. Иванов А. И. Искусственные математические молекулы: повышение точности статистических оценок на малых выборках (программы на языке MathCAD) : препринт. Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. 36 с.
16. Иванов А. И., Золотарева Т. А. Искусственный интеллект в защищенном исполнении: синтез статистико-нейросетевых автоматов многокритериальной проверки гипотезы независимости малых выборок биометрических данных : препринт. Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. 105 с.
17. 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.
18. Малыгина Е. А. Биометрико-нейросетевая аутентификация: перспективы применения сетей квадратичных нейронов с многоуровневым квантованием биометрических данных : препринт. Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. 114 с.
19. Кубасов И. А., Мельников А. В., Мальцев С. А., Нарушев И. Р. Кластеризация объектов со слабо формализуемыми признаками на основе нейронной сети в виде слоя Кохонена // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2018. Т. 80, № 3. С. 86–91.
20. Кубасов И. А., Нарушев И. Р., Черников Д. Н. Решение задачи классификации технических объектов с использованием персептрона в условиях их близости к границе линейной разделимости // Охрана, безопасность, связь. 2019. № 4-2. С. 132–138.

References

1. Khaykin S. *Neyronnye seti: polnyy kurs = Neural networks: a complete course*. Moscow: Vil'yams, 2006:1104. (In Russ.)
2. Tikhomirov N.T., Tikhomirova T.M., Ushmaev O.S. *Metody ekonometriki i mnogomernogo statisticheskogo analiza: uchebnik = Methods of econometrics and multidimensional statistical analysis : textbook*. Moscow: Ekonomika, 2011:647. (In Russ.)
3. Nikolenko S., Kudrin A., Arkhangel'skaya E. *Glubokoe obuchenie. Pogruzhenie v mir neyronnykh setey = Deep learning. Immersion in the world of neural networks*. Saint Petersburg: Piter, 2018. (In Russ.)
4. Charu A. *Neyronnye seti i glubokoe obuchenie = Neural networks and deep learning*. Saint Petersburg: Dialektika, 2020:756. (In Russ.)
5. Volchikhin V.I., Ivanov A.I. Neural network molecule: solving the inverse problem of biometrics through software support for quantum superposition at the outputs of a network of artificial neurons. *Vestnik Mordovskogo universiteta = Bulletin of the Mordovian University*. 2017;27(4):518–523. (In Russ.)
6. Ivanov A.I. Artificial intelligence of high trust. Acceleration of calculations and memory savings when testing large networks of artificial neurons on small samples. *Sistemy bezopasnosti = Security systems*. 2020;(5):60–62. (In Russ.)
7. Yazov Yu.K., Volchikhin V.I., Ivanov A.I. [et al.]. *Neyrosetevaya zashchita personal'nykh biometricheskikh dannykh = Neural network protection of personal biometric data*. Moscow: Radiotekhnika, 2012:157. (In Russ.)
8. Akhmetov B.S., Ivanov A.I., Funtikov V.A. [et al.]. *Tekhnologiya ispol'zovaniya bol'shikh neyronnykh setey dlya preobrazovaniya nechetkikh biometricheskikh dannykh v kod klyucha dostupa: monografiya = Technology of using large neural networks to convert fuzzy biometric data into an access key code : monograph*. Almaty: LEM, 2014:144. (In Russ.). Available at: <http://portal.kazntu.kz/files/publicate/2014-06-27-11940.pdf>
9. Ivanov A.I., Kubasov I.A. Strong artificial intelligence: improving the quality of neural network solutions with the transition to processing large-volume input data. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and Quality of Complex Systems*. 2021;(1):9–16. (In Russ.)
10. Ivanov A.I., Kubasov I.A., Samokutyaev A.M. Testing large neural networks on small samples. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and Quality of Complex Systems*. 2020;(3):72–79. (In Russ.)
11. Lozhnikov P.S. *Biometricheskaya zashchita gibridnogo dokumentooborota = Biometric protection of hybrid document flow*. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2017:130. (In Russ.)
12. Ivanov A.I., Sulavko A.E. *Ispol'zovanie setey korrelyatsionnykh neyronov s mnogourovnevym kvantovaniem: zashchita ot izvlecheniya znaniy iz parametrov reshayushchego pravila: preprint = Using networks of correlation neurons with multilevel quantization: protection against extracting knowledge from the parameters of the decisive rule : preprint*. Penza: Izd-vo PGU, 2020:48. (In Russ.)
13. Kobzar' A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov = Applied mathematical statistics. For engineers and scientists*. Moscow: Fizmatlit, 2006:816. (In Russ.)
14. Ivanov A.I., Bannykh A.G., Bezyaev A.V. Artificial molecules assembled from artificial neurons reproducing the work of classical statistical criteria. *Vestnik Permskogo universiteta. Ser.: Matematika. Mekhanika. Informatika = Bulletin of Perm University. Ser.: Mathematics. Mechanics. Computer science*. 2020;(1):26–32. (In Russ.)

15. Ivanov A.I. *Iskusstvennyye matematicheskie molekuly: povyshenie tochnosti statisticheskikh otsenok na malykh vyborkakh (programmy na yazyke MathCAD): preprint = Artificial mathematical molecules: improving the accuracy of statistical estimates on small samples (programs in MathCAD) : preprint*. Penza: Izd-vo PGU, 2020:36. (In Russ.)
16. Ivanov A.I., Zolotareva T.A. *Iskusstvennyy intellekt v zashchishchennom ispolnenii: sintez statistiko-neyrosetevykh avtomatov mnogokriterial'noy proverki gipotezy nezavisimosti malykh vyborok biometricheskikh dannykh: preprint = Artificial intelligence in protected execution: synthesis of statistical neural network automata for multi-criteria verification of the hypothesis of independence of small samples of biometric data : preprint*. Penza: Izd-vo PGU, 2020:105. (In Russ.)
17. 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 = University proceedings. Volga region. Technical sciences*. 2013;(4):88–99. (In Russ.)
18. Malygina E.A. *Biometriko-neyrosetevaya autentifikatsiya: perspektivy primeneniya setey kvadraticnykh neyronov s mnogourovnevnyum kvantovaniem biometricheskikh dannykh: preprint = Biometric-neural network authentication: prospects for the use of networks of quadratic neurons with multilevel quantization of biometric data : preprint*. Penza: Izd-vo PGU, 2020:114. (In Russ.)
19. Kubasov I.A., Mel'nikov A.V., Mal'tsev S.A., Narushev I.R. Clustering of objects with weakly formalized features based on a neural network in the form of a Kohonen layer. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy = Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2018;80(3):86–91. (In Russ.)
20. Kubasov I.A., Narushev I.R., Chernikov D.N. Solving the problem of classification of technical objects using a perceptron in conditions of their proximity to the boundary of linear separability. *Okhrana, bezopasnost', svyaz' = Security, security, communication*. 2019;(4-2):132–138. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Игорь Анатольевич Кубасов

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры информационных технологий,
Академия управления МВД России,
(Россия, г. Москва, ул. Зои и Александра
Космодемьянских, 8)
E-mail: igorak@list.ru

Igor A. Kubasov

Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the sub-department
of information technologies,
Academy of Management of the Ministry
of Internal Affairs of Russia,
(8 Zoya and Alexander Kosmodemyanskikh street,
Moscow, Russia)

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)

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

Поступила в редакцию/Received 10.09.2021

Поступила после рецензирования/Revised 12.10.2021

Принята к публикации/Accepted 10.11.2021

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОПЕРАТИВНОСТИ ПРОЦЕССА СБОРА И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В ХОДЕ ВЫПОЛНЕНИЯ ПОЛЕТНОГО ЗАДАНИЯ ГРУППОЙ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

С. В. Иванов¹, О. В. Петрова², М. Р. Запорожченко³, Д. Р. Карипов⁴, М. А. Ковешников⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Краснодарское высшее военное училище им. С. М. Штеменко, Краснодар, Россия
¹sta399@yandex.ru, ²Odi16.na@gmail.com, ³luigamarina@hotmail.com,
⁴karpovdaniel@yandex.ru, ⁵Koveshnikov.mihail@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Современные условия ведения боевых действий ужесточили требования к полноте информационного обеспечения процессов управления боевыми действиями и, как следствие, расширились временные требования к авиационным системам как поставщикам информации о противнике в информационные сети систем управления войсками. В целях минимизации потерь личного состава в боевых действиях, а также автоматизации процессов выполнения задач используются беспилотные летательные аппараты (БЛА), объединенные в группы БЛА для успешной реализации полетного задания в условиях дифференциации каждого летательного аппарата по его ведущей функции. Применение такой группы БЛА в ходе выполнения разнородных задач по предназначению требует оценки оперативности и качества в условиях информационно-технического воздействия, учета времени, затрачиваемого на прогнозирование исхода событий, сформированных в результате протекания всех этапов процесса функционирования группой БЛА, позволяющей получить статистические данные о времени его протекания. Такой процесс включает в себя: анализ, обобщение и принятие решения при требуемой точности измерений и минимально необходимом количестве опытов с сохранением статистической достоверности результатов эксперимента. Целью научной статьи является разработка методики оценки оперативности работы системы поддержки принятия решения (СППР), размещаемой одновременно на борту ведущего БЛА-лидера и на наземном пункте управления полетами с целью синхронизации действий оператора с автономным поведением группировки в воздухе. Введение в общий цикл управления такой системы обуславливает повышение эффективности работы системы «БЛА-лидер – оператор» и позволяет сократить время, затрачиваемое на выполнение задачи по предназначению за счет распараллеливания процессов сбора и обработки информации, протекающих в контуре системы. Использование высокоскоростного спецвычислителя в системе управления БЛА позволяет оптимизировать вычислительные затраты и реализовать высокоэффективные алгоритмы, заложенные на борт. *Материалы и методы.* Исходя из физической интерпретации рассматриваемой задачи сокращения временного показателя при учете различных факторов, влияющих на результат общего решения, используется метод долевого участия, устанавливающий долю влияния различных факторов на эффективность предлагаемой методики. Критерием оценки эффективности рассматриваемой методики является оперативность, а показателем – время, затрачиваемое на выполнение полетного задания. *Результаты.* В статье представлены результаты систематизации и анализа информации, обрабатываемой СППР на борту ведущего БЛА, а также проведены расчеты показателя эффективности предлагаемой методики и сравнение их с существующими. *Выводы.* Исходя из физической интерпретации рассматриваемой задачи сокращения временных показателей при учете различных факторов, влияющих на результат общего решения (на основе изучения метода долевого участия), установлена доля влияния каждого показателя на эффективность предлагаемой методики.

Ключевые слова: эксперимент, статистика, оценка оперативности, беспилотный летательный аппарат, система поддержки принятия решений

Для цитирования: Иванов С. В., Петрова О. В., Запорожченко М. Р., Карипов Д. Р., Ковешников М. А. Методика оценки оперативности процесса сбора и обработки информации в ходе выполнения полетного задания группой беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 4. С. 64–73. doi:10.21685/2307-4205-2021-4-8

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE EFFICIENCY OF THE PROCESS OF COLLECTING AND PROCESSING INFORMATION DURING THE EXECUTION OF A FLIGHT TASK BY A GROUP OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

S.V. Ivanov¹, O.V. Petrova², M.R. Zaporozhchenko³, D.R. Karipov⁴, M.A. Koveshnikov⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Krasnodar Higher Military School named after S. M. Shtemenko, Krasnodar, Russia
¹ sta399@yandex.ru, ² Odi16.na@gmail.com, ³ luigamarina@hotmail.com,
⁴ karipovdaniel@yandex.ru, ⁵ Koveshnikov.mihail@yandex.ru

Abstract. *Background.* Modern conditions of warfare have tightened the requirements for the completeness of information support for the management of combat operations and, as a result, the time requirements for aviation systems as suppliers of information about the enemy in the information networks of the command and control systems have expanded. In order to minimize the losses of personnel in combat operations, as well as to automate the processes of performing tasks, unmanned aerial vehicles (UAVs) are used, combined into groups of UAVs for the successful implementation of a flight task in conditions of differentiation of each aircraft according to its leading function. The use of such a group of UAVs in the course of performing heterogeneous tasks for their intended purpose requires an assessment of efficiency and quality in the conditions of information technology impact, taking into account the time spent on predicting the outcome of events formed as a result of the course of all stages of the process of functioning by a group of UAVs, which allows to obtain statistical data on the time of its course. Such a process includes: analysis, generalization and decision-making with the required measurement accuracy and the minimum required number of experiments while maintaining the statistical reliability of the experimental results. The purpose of the scientific article is to develop a methodology for assessing the efficiency of the decision support system (DSS), which is placed simultaneously on board the leading UAV leader and at the ground flight control station in order to synchronize the operator's actions with the autonomous behavior of the grouping in the air. The introduction of such a system into the general control cycle leads to an increase in the efficiency of the "UAV-leader – operator" system and reduces the time spent on completing the task for its intended purpose by parallelizing the processes of collecting and processing information flowing in the system circuit. The use of a high-speed special calculator in the UAV control system makes it possible to optimize computational costs and implement highly efficient algorithms embedded on board. *Materials and methods.* Based on the physical interpretation of the considered task of reducing the time indicator, taking into account various factors affecting the result of the overall solution, the equity method is used, which establishes the share of the influence of various factors on the effectiveness of the proposed methodology. The criterion for evaluating the effectiveness of the technique under consideration is efficiency, and the indicator is the time spent on completing the flight task. *Results.* The article presents the results of systematization and analysis of the information processed by the DSS on board the leading UAV, as well as calculations of the efficiency indicator of the proposed methodology and their comparison with existing ones. *Conclusions.* Based on the physical interpretation of the considered task of reducing time indicators, taking into account various factors affecting the result of the overall solution (based on the study of the equity method), the share of influence of each indicator on the effectiveness of the proposed methodology is established.

Keywords: experiment, statistics, efficiency assessment, unmanned aerial vehicle, decision support system

For citation: Ivanov S.V., Petrova O.V., Zaporozhchenko M.R., Karipov D.R., Koveshnikov M.A. Methodology for assessing the efficiency of the process of collecting and processing information during the execution of a flight task by a group of unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;(4):64–73. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-4-8

Введение

В качестве исследовательской авторами была поставлена задача по разработке методики оценки оперативности функционирования системы поддержки принятия решения (СППР) с целью сокращения времени, затрачиваемого на выполнение задач и оптимизации вычислительных возможностей на борту БЛА. Основным содержанием исследования явился анализ отдельно взятых временных промежутков процесса сбора и обработки информации в ходе решения задачи.

Для проведения оценки оперативности процесса сбора и обработки информации учитывается время с момента подготовки и развертывания до выполнения полетного задания.

Для проведения оценки оперативности процесса принятия решения учитывается время, затрачиваемое на прогнозирование исхода событий, сформированных в результате протекания всех этапов процесса функционирования группы БЛА.

В работе предложена количественная и качественная оценка оперативности процесса сбора и обработки информации за счет включения в контур управления системы поддержки принятия решения на борту БЛА. Такая система может быть размещена в бортовой системе управления БЛА в виде программно-алгоритмического комплекса.

1. Постановка задачи. По двум независимым малым выборкам, объемы которых соответственно равны n и m , извлеченным из нормальных генеральных совокупностей X и Y , найдены выборочные средние \bar{x} , \bar{y} и исправленные дисперсии S_x^2 и S_y^2 .

Требуется найти: при уровне значимости α проверить нулевую гипотезу $H_0 : T_{\Sigma_1}(X) = T_{\Sigma_2}(Y)$, при конкурирующей гипотезе $H_1 : T_{\Sigma_1}(X) \neq T_{\Sigma_2}(Y)$.

Ограничения и допущения:

– в процессе выполнения эксперимента используются легкие БЛА с малой и средней продолжительностью полета;

– для выполнения эксперимента привлекаются эксперты, имеющие опыт в области разработки и эксплуатации систем управления БЛА;

– при проведении моделирования принято, что направление ветра устойчивой направленности совпадает с направлением полета БЛА.

На основе проведенного анализа процесса функционирования БЛА, способных функционировать в составе группы, в ходе решения разведывательных задач определяются основные этапы процесса, состоящие из: анализа, обобщения информации и принятия решения. За принятие решения на борту БЛА отвечает система поддержки принятия решения (СППР), рассмотренная в работе [1].

Показатели и критерии. Показателем в данной методике будет являться время, затрачиваемое на обработку информации с применением системы поддержки принятия решения оператором, а критерием выступает оперативность процесса принятия решения, описываемая соответствующим уравнением:

$$T_{\text{СППР}} = T_{\text{ан2}} + T_{\text{пр.реш}} + T_{\text{обобщ}} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $T_{\text{СППР}}$ – время, затрачиваемое на обработку информации с применением системы поддержки принятия решения оператором.

Для определения оперативности обработки данных с использованием существующей методики [2] модель можно представить в следующем виде:

$$T_{\text{ВЗ}} = T_{\text{разв.}} + T_{\text{выдв.}} + T_{\text{впз}} + T_{\text{ан1}} + T_{\text{корр.ог.}} + T_{\text{возвр.}} + T_{\text{ан2}} + T_{\text{пр.реш.}} + T_{\text{обобщ.}}, \quad (2)$$

где $T_{\text{ВЗ}}$ – время, отведенное на выполнение задания в условиях реального времени; $T_{\text{разв.}}$ – время, затрачиваемое на развертывание БЛА; $T_{\text{выдв.}}$ – время, затрачиваемое на поднятие БЛА в воздух; $T_{\text{впз}}$ – время, отведенное на выполнение полетной задачи; $T_{\text{ан1}}$ – время, затрачиваемое на проведение дополнительных расчетов и подготовку решения по направлению дальнейших действий; $T_{\text{корр.ог.}}$ – время, затрачиваемое на пересчет координат точки прицеливания и наведение оружия на цель; $T_{\text{возвр.}}$ – время, затрачиваемое на возвращение группы БЛА после выполнения поставленной задачи; $T_{\text{ан2}}$ – время, затрачиваемое на проведение дополнительных расчетов после выполнения основной части поставленной задачи; $T_{\text{пр.реш.}}$ – время, затрачиваемое на принятие решения по дальнейшим действиям; $T_{\text{обобщ.}}$ – время, затрачиваемое на подведение итогов проведенной операции, составление необходимой документации и доклад командиру (начальнику).

Для определения времени, затрачиваемого на обработку данных с использованием разработанной методики модель можно представить в следующем виде:

$$T_{\text{ВЗ}} = T_{\text{разв.}} + T_{\text{выдв.}} + T_{\text{впз}} + T_{\text{корр.ог.}} + T_{\text{возвр.}} + T_{\text{СППР}}. \quad (3)$$

В такой модели исключаются три составляющие $T_{\text{ВЗ}}$ в соответствии с формулой (1).

2. Выдвижение гипотезы. В рамках проведенных исследований выдвигается следующая гипотеза: «Повышение оперативности управления смешанной группировкой БЛА возможно осуще-

ствить за счет распараллеливания процессов выполнения полетного задания, автоматизации процесса принятия решений и уменьшения количества опытов проведения эксперимента».

Выдвинутую гипотезу необходимо доказать, для этого перейдем к математической интерпретации сформулированной гипотезы и построим ее на основе теории математической статистики.

В работе рассматриваются две методики расчета времени, затрачиваемого на выполнение полетного задания группой БЛА. Первая методика предусматривает существующий подход, реализующий алгоритм работы расчета БЛА, в состав которого входит начальник расчета, оператор и командир подразделения, который реализует управляющую функцию.

Идея рассматриваемой работы заключается в исключении человеческого фактора из процесса сбора, обработки и обобщения информации и его автоматизация за счет распараллеливания процессов и построения автоматизированных алгоритмов, входящих в состав СППР.

Сформулируем гипотезу на языке математической статистики применительно к нашей задаче.

Гипотеза H_0 : среднее время $T_{\Sigma_1}(X)$, рассчитанное в соответствии с 1-й методикой, затрачиваемое на процесс выполнения полетного задания группировкой БЛА, значительно отличается от среднего времени $T_{\Sigma_2}(Y)$, рассчитанного по 2-й методике при использовании в расчете двух независимых выборок, сформированных в процессе реализации методики:

$$T_{\Sigma_1}(X) \neq T_{\Sigma_2}(Y). \tag{4}$$

3. Доказательство выдвинутой гипотезы. Проведем проверку выдвинутой статистической гипотезы на конкретном примере.

Иллюстрация процесса оптимизации временных ресурсов на основе предлагаемой методики представлена на рис. 1.

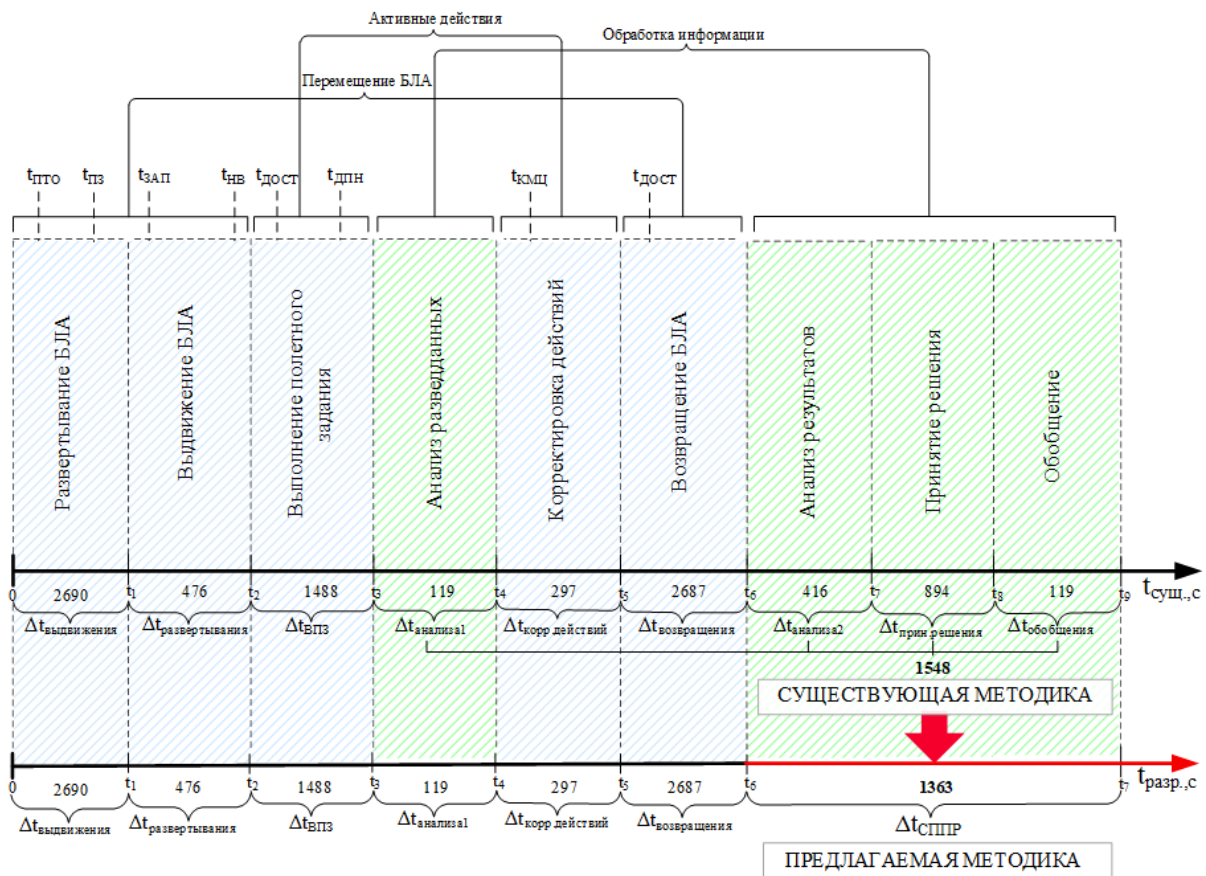


Рис. 1. Графическая иллюстрация процесса оптимизации временных ресурсов на выполнение полетного задания

Зададим точность, равную $\delta_1 = 14$, которая является абсолютной величиной отклонения выборочной средней от гипотетической генеральной средней совокупности, т.е. величину, в рамках ко-

второй среднее значение, рассчитанное с помощью методик, имеет право отклоняться от неизвестной средней генеральной совокупности, из которой была представлена выборочная совокупность для оценки методик. Считая, что выборочные совокупности можно аппроксимировать нормальным распределением, найдем число испытаний, необходимых для достижения заданной точности в условиях расчета выборочной совокупности по первой и второй методике.

Для расчета необходимого количества опытов (n, m) и точности (δ) воспользуемся формулой (1) и получим

$$n = t_{\text{двуст.кр.}}^2(a; k) S_{\text{тб31}}^2 / \delta_1^2 = 11;$$

$$m = t_{\text{двуст.кр.}}^2(a; k) S_{\text{тб32}}^2 / \delta_2^2 = 9.$$

Вычисления показали, что для достижения наперед заданной точности по первой методике требуется меньшее количество испытаний, чем по второй, следовательно, при одинаковом числе испытаний точность расчетов с помощью первой методики более высокая.

По уровню значимости $\alpha = 0,05$ определяется число степеней свободы $k = n + m - 2$ [2] (так как критическая область двусторонняя) следующим образом: $k = 11 + 9 = 18$.

Критическая область $t_{\text{двуст.кр.}}(\alpha; k)$ находится по таблице критических значений критерия: $t_{\text{двуст.кр.}}(0,05; 18) = 2,1$ [3].

Для нахождения исправленной дисперсии $S_{\text{тб31}}^2$ воспользуемся следующей формулой:

$$S_{\text{тб31}}^2 = \frac{D \cdot n}{n - 1}, \quad (5)$$

где $D = \overline{T_{\Sigma}^2} - (\overline{T_{\Sigma}})^2$.

Рассчитаем значение $S_{\text{тб31}}^2$ для каждой методики в отдельности:

$$S_{\text{тб31}} = \overline{X} = \left(\frac{D_1 n}{n - 1} \right) = 233,56 \text{ c}; \quad S_{\text{тб32}} = \overline{Y} = \left(\frac{D_2 m}{m - 1} \right) = 119,69 \text{ c}.$$

Вычислим значения D_1, D_2 и получим: $D_1 = 212,33$ и $D_2 = 106,40$.

Для нахождения наблюдаемого значения критерия Стьюдента $T_{\text{набл}}$ воспользуемся формулой

$$T_{\text{набл}} = \frac{\overline{x} - \overline{y}}{\sqrt{(ns_X^2 + ms_Y^2)}} \sqrt{\frac{nm(n+m-2)}{n+m}} = 2,1182; \quad (6)$$

$$2,1182 > 2,1;$$

$$T_{\text{набл}} > t_{\text{двуст.кр.}}$$

Так как $T_{\text{набл}} > t_{\text{двуст.кр.}}$, нулевую гипотезу о равенстве генеральных средних отвергаем. Другими словами, выборочные средние различаются значительно, это в свою очередь означает, что разработанная методика учитывает факторы, влияющие на среднее значение случайной величины, следовательно, не является аналогом предшествующей методики.

4. Сравнительная оценка результатов, полученных на основе известной и разработанной методики оценки оперативности процесса поддержки принятия решения. Так как было выяснено ранее, что методики в среднем различны, необходимо изучить факторы, заложенные в обе методики и их влияние на показатели исследуемого критерия [4].

В ряде случаев для определения величины влияния факторов на отклонение результирующего показателя может быть использован метод долевого участия.

Суть метода долевого участия заключается в определении доли каждого фактора в общей сумме их приростов, которая затем умножается на общий прирост совокупного показателя.

В случае одноуровневой модели типа ($Y = a + b + c$) расчет производится по следующим формулам:

$$\Delta y_i = \frac{\Delta x_i}{\Delta x_1 + \Delta x_2 + \dots + \Delta x_n} \Delta y_{\text{общ}}, \quad (7)$$

где Δy_i – доля влияния каждого фактора;

$$\Delta y_{\text{общ}} = \frac{y_1 - y_0}{y_0} \cdot 100\%, \quad (8)$$

где $\Delta y_{\text{общ}}$ – общий прирост совокупного показателя.

Выражения (7), (8) могут выполняться только при условии существования следующего соотношения:

$$\Delta y_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^n \Delta y_i, \quad (9)$$

где n – количество выбранных факторов.

Исходя из физической интерпретации рассматриваемой задачи сокращения временных показателей при учете различных факторов, влияющих на результат общего решения, проведем расчет доли влияния каждого показателя на эффективность предлагаемой методики [5].

Исходные данные для расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительная оценка влияния различных показателей на общий результат решения задачи

Показатель, фактор	Сущ. методика, с	Разработанная методика, с	Абсолютное отклонение, с	$\frac{\Delta x_i}{\Delta x_1 + \Delta x_2 + \dots + \Delta x_n}$	Доля влияния на результат предл. методики, %
$T_{\text{ан}_1}$	135	105	-30	-0,077	-0,163
$T_{\text{ан}_2}$	425	375	-50	-0,275	-0,582
$T_{\text{пр.реш}}$	905	820	-85	-0,601	-1,273
$T_{\text{обобщ}}$	120,5	64	-56,5	-0,047	-0,099

Среднее время всего процесса обработки информации, рассчитанное в соответствии с существующей методикой, составило 10685,5 с, а разработанной – 10464 с, на основе проведенных расчетов определяется общий прирост совокупного показателя:

$$\Delta y_{\text{общ}} = \frac{y_1 - y_0}{y_0} \cdot 100\% = -2,117,$$

где Δy_i – значение абсолютного отклонения одного из показателей (факторов).

Для проведения сравнительной оценки эффективности двух рассматриваемых методик расчета времени, затрачиваемого на выполнение полетного задания группой БЛА, необходимо провести анализ результатов, полученных при их тестировании. Наиболее часто используемым подходом при оценке двух методик является метод расчета коэффициентов, показывающих, на сколько одна методика является преимущественней другой по какому-либо критерию [6].

В качестве такого критерия, оценивающего эффективность рассматриваемого процесса, в работе используется оперативность процесса принятия решения на осуществление действий группой БЛА.

Рассмотрим частный показатель – коэффициент оперативности $K_{\text{опер.}}$ в виде

$$K_{\text{опер.}} = \frac{T_{\text{сущ.}} - T_{\text{предл.}}}{T_{\text{сущ.}}} \cdot 100\%, \quad (10)$$

где $T_{\text{предл.}}$ – время, затрачиваемое на частную обработку с применением разработанной методики; $T_{\text{сущ.}}$ – время, затрачиваемое на частную обработку при использовании существующих методик.

Имея исходные данные для условия процесса обработки информации о функционировании группы БЛА, производятся вычисления частных показателей коэффициентов оперативности процесса принятия решения по разработанной методике [7]:

$$K_{\text{опер. анализа}} = \frac{T_{\text{анализа сущ.}} - T_{\text{анализа предл.}}}{T_{\text{анализа сущ.}}} \cdot 100\% = 20\% ; \quad (11)$$

$$K_{\text{опер. обобщ.}} = \frac{T_{\text{обобщ. сущ.}} - T_{\text{обобщ. предл.}}}{T_{\text{обобщ. сущ.}}} \cdot 100\% = 9\% ; \quad (12)$$

$$K_{\text{опер. прин. реш.}} = \frac{T_{\text{прин. реш. сущ.}} - T_{\text{прин. реш. предл.}}}{T_{\text{прин. реш. сущ.}}} \cdot 100\% = 10\% . \quad (13)$$

Оценка оперативности полученных результатов характеризуется значением комплексного показателя оперативности процесса принятия решения, представляющего собой комбинацию частных показателей оперативности. Для вычисления значения комплексного показателя оперативности используется следующая формула [8]:

$$K_{\text{компл. обр. инф.}} = \frac{K_{\text{опер. анализа}} + K_{\text{опер. обобщ.}} + K_{\text{опер. прин. реш.}}}{N} = \frac{20\% + 9\% + 10\%}{3} = 13\% . \quad (14)$$

Следовательно, комплексный показатель оперативности процесса принятия решения о функционировании группы БЛА при использовании разработанной методике повышается на 13 % в отличие от существующих за счет распараллеливания процессов принятия решения и уменьшения объема выборки по сравнению с существующей методикой оценки оперативности процесса сбора и обработки информации группировкой БЛА.

Результатом расчета коэффициентов оперативности для двух сравниваемых методик с учетом информационно-технических воздействий (ИТВ) и без учета ИТВ является построение зависимостей коэффициентов оперативности от времени (рис. 2, 3).



Рис. 2. Зависимость между коэффициентом оперативности и временем выполнения полетного задания без влияния ИТВ

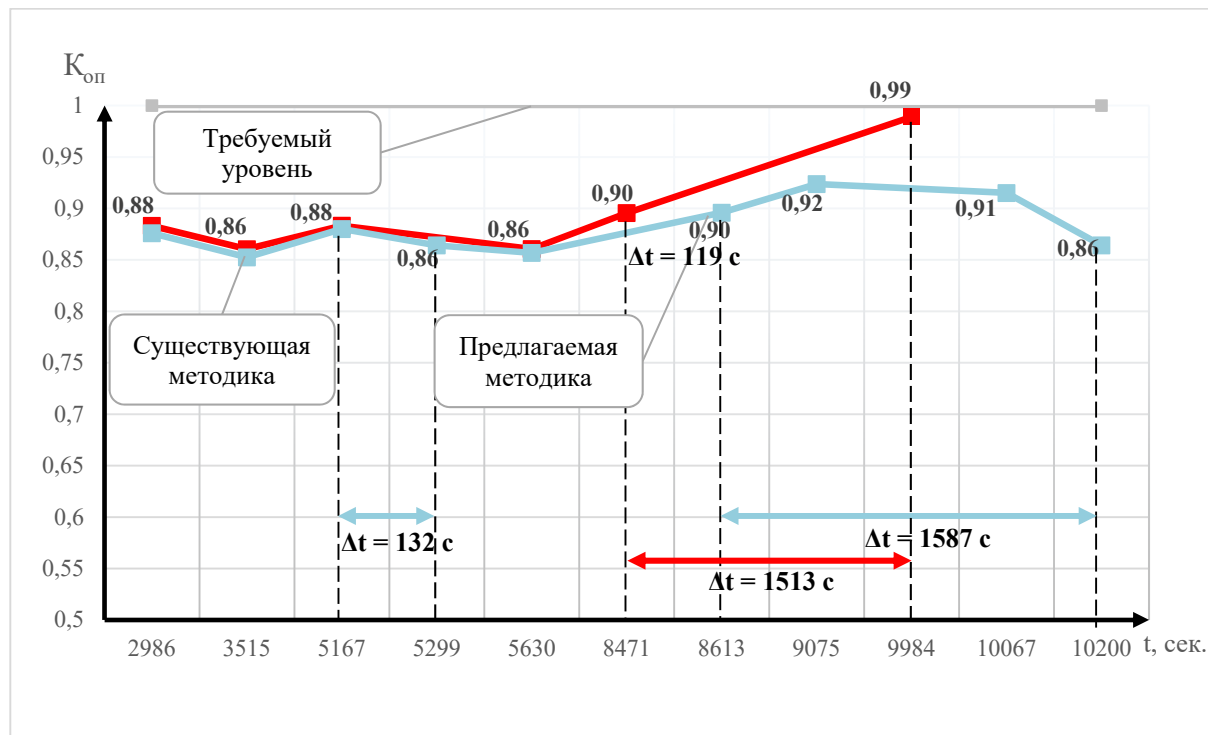


Рис. 3. Зависимость между коэффициентом оперативности и временем выполнения полетного задания с влиянием ИТВ

Заключение

Таким образом, время выполнения задачи в рамках предлагаемой методики по сравнению с существующей уменьшилось на 185 с, т.е. уменьшилось на 11,95 % относительно существующей, что даже при влиянии информационно-технических воздействий на процесс выполнения полетного задания (уменьшилось на 11,98 %) построенная система поддержки принятия решения оказалась устойчивой к этим воздействиям и предлагаемая методика привела к уменьшению времени на 206 с.

Сократилось время, затрачиваемое на проведение дополнительных расчетов и подготовку решения по направлению дальнейших действий, принятие решения и обобщение на 0,312 и 1,87 %; 3,335 и 0,369 % соответственно. В совокупности уменьшение времени отдельных этапов процесса выполнения полетного задания привело к общему сокращению времени выполнения задачи без влияния ИТВ – 11,95 %, а при воздействии РЭБ и ПВО – на 11,98 %.

Полученные результаты анализа эффективности предлагаемой методики позволяют утверждать, что разработанная система поддержки принятия решения (СППР) позволила сократить время выполнения полетного задания и исключить влияние человеческого фактора на достижение цели при решении задачи за счет автоматизации процесса принятия решения.

Список литературы

1. Иванов С. В., Белоножко Д. Г., Стадник А. П. [и др.]. Разработка автоматизированной информационной системы поддержки принятия решения группой БЛА на основе самообучающейся нейронной сети // Стратегическая стабильность. 2020. № 3. С. 53–60.
2. Тимочко А. И. Оценка оперативности принятия решений при назначении воздействий по объектам противника // Сборник научных трудов Харьковского университета Воздушных сил. 2013. Вып. 3. С. 126–129.
3. Халимов Н. Р., Мефедов А. В. Распределенная сетевая система управления группой ударных беспилотных летательных аппаратов // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 3. С. 1–13.
4. Резун А. А. Факторный анализ эффективности использования основных средств в сельскохозяйственных организациях // Научный журнал КубГАУ. 2012. № 75. С. 1–16.
5. Шкляр В. Н. Планирование эксперимента и обработка результатов. Томск : Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2010. С. 6–12.
6. Павлов А. Н., Соколов Б. В. Методы обработки экспертной информации. СПб. : Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2005. С. 5–15.

7. Математическая статистика / С. Е. Демин, Е. Л. Демина. Нижний Тагил : Нижнетагильский технологический институт, 2016. С. 7–18.
8. Гмурман В. Е. Теория вероятности и математическая статистика. М. : Высш. шк., 2019. С. 305–314.

References

1. Ivanov S.V., Belonozhko D.G., Stadnik A.P. [et al.]. Development of an automated information system for decision support by a group of UAVs based on a self-learning neural network. *Strategicheskaya stabil'nost' = Strategic stability*. 2020;(3):53–60. (In Russ.)
2. Timochko A.I. Assessment of the efficiency of decision-making when assigning impacts on enemy objects. *Sbornik nauchnykh trudov Khar'kovskogo universiteta Vozdushnykh sil = Collection of scientific papers of the Kharkiv Air Force University*. 2013;3:126–129. (In Russ.)
3. Khalimov N.R., Mefedov A.V. Distributed network-centric control system for a group of attack unmanned aerial vehicles. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti = Control, communication and security systems*. 2019;(3): 1–13. (In Russ.)
4. Rezun A.A. Factor analysis of the efficiency of the use of fixed assets in agricultural organizations. *Nauchnyy zhurnal KubGAU = KubGAU Scientific Journal*. 2012;(75):1–16. (In Russ.)
5. Shklyar V.N. *Planirovanie eksperimenta i obrabotka rezul'tatov = Experiment planning and results processing*. Tomsk: Natsional'nyy issledovatel'skiy Tomskiy politekhnicheskii universitet, 2010:6–12. (In Russ.)
6. Pavlov A.N., Sokolov B.V. *Metody obrabotki ekspertnoy informatsii = Methods of processing expert information*. Saint Petersburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet aerokosmicheskogo priborostroeniya, 2005: 5–15. (In Russ.)
7. Demin S.E., Demina E.L. *Matematicheskaya statistika = Mathematical statistics*. Nizhniy Tagil: Nizhnetagil'skiy tekhnologicheskii institut, 2016:7–18. (In Russ.)
8. Gmurman V.E. *Teoriya veroyatnosti i matematicheskaya statistika = Probability theory and mathematical statistics*. Moscow: Vyssh. shk., 2019:305–314. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Станислав Валерьевич Иванов

кандидат технических наук, доцент,
старший преподаватель,
Краснодарское высшее военное училище
имени генерала армии С. М. Штеменко
(Россия, г. Краснодар, ул. Красина, 4)
E-mail: sta399@yandex.ru

Ольга Владимировна Петрова

кандидат технических наук, доцент,
Краснодарское высшее военное училище
имени генерала армии С. М. Штеменко
(Россия, г. Краснодар, ул. Красина, 4)
E-mail: Odi16.na@gmail.com

Максим Русланович Запорожченко

курсант,
Краснодарское высшее военное училище
имени генерала армии С. М. Штеменко
(Россия, г. Краснодар, ул. Красина, 4)
E-mail: luigamarina@hotmail.com

Даниэль Расулович Карипов

курсант,
Краснодарское высшее военное училище
имени генерала армии С. М. Штеменко
(Россия, г. Краснодар, ул. Красина, 4)
E-mail: karipovdaniel@yandex.ru

Stanislav V. Ivanov

Candidate of technical sciences,
associate professor, senior lecturer,
Krasnodar Higher Military School
named after Army General S. M. Shtemenko
(4 Krasina street, Krasnodar, Russia)

Olga V. Petrova

Candidate of technical sciences, associate professor,
Krasnodar Higher Military School
named after Army General S. M. Shtemenko
(4 Krasina street, Krasnodar, Russia)

Maksim R. Zaporozhchenko

Cadet,
Krasnodar Higher Military School
named after Army General S. M. Shtemenko
(4 Krasina street, Krasnodar, Russia)

Daniel' R. Karipov

Cadet,
Krasnodar Higher Military School
named after Army General S. M. Shtemenko
(4 Krasina street, Krasnodar, Russia)

Михаил Андреевич Ковешников

курсант,

Краснодарское высшее военное училище

имени генерала армии С. М. Штеменко

(Россия, г. Краснодар, ул. Красина, 4)

E-mail: Koveshnikov.mihail@yandex.ru

Mikhail A. Koveshnikov

Cadet,

Krasnodar Higher Military School

named after Army General S. M. Shtemenko

(4 Krasina street, Krasnodar, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 09.09.2021

Поступила после рецензирования/Revised 15.10.2021

Принята к публикации/Accepted 16.11.2021

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ПРОДУКЦИИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СТРУКТУР

Г. И. Коршунов¹, С. А. Поляков², В. И. Романец³

¹ ООО «ПАНТЕСгрупп», Санкт-Петербург, Россия

^{1,2} Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Россия

^{1,3} Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург, Россия

¹kgi@pantes.ru, ²ssera83@mail.ru, ³romanec-2000@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Необходимость обеспечения высокой степени качества продукции выдвигает новые требования к моделям, методам и средствам управления производственными процессами и качеством выпускаемой продукции. Особенно это актуально для радиоэлектронной отрасли, где результативность технологических инноваций динамично подтверждается при серийном выпуске продукции. *Материалы и методы.* Интеллектуализация производства радиоэлектроники в полной мере соответствует концепции Индустрия 4.0 и стратегии цифровизации. Обеспечение качества при этом зависит от эффективного внедрения системы менеджмента качества на предприятии, что требует от высшего руководства не только следования установленным в стандарте ГОСТ Р ИСО 9001-2015 требованиям, но и учета внутренней специфики организации. Значительная часть особенностей хозяйственной деятельности предприятия определяется типом его организационной структуры. *Результаты и выводы.* Поэтому эффективность внедрения технологических инноваций зависит от пригодности применяемых методов менеджмента качества на предприятиях различных организационных форм управления.

Ключевые слова: качество, технологические инновации, организационные структуры, система менеджмента качества

Для цитирования: Коршунов Г. И., Поляков С. Л., Романец В. И. Обеспечение качества радиоэлектронной продукции на предприятиях с различными типами организационных структур // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 4. С. 74–80. doi:10.21685/2307-4205-2021-4-9

QUALITY ASSURANCE OF RADIO ELECTRONIC PRODUCTS IN ENTERPRISES WITH DIFFERENT TYPES OF ORGANIZATIONAL STRUCTURES

G.I. Korshunov¹, S.L. Polyakov², V.I. Romanets³

¹ PANTESgroup, Ltd, Saint Petersburg, Russia

^{1,2} Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia

^{1,3} Saint Petersburg State Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

¹kgi@pantes.ru, ²ssera83@mail.ru, ³romanec-2000@yandex.ru

Abstract. *Background.* The need to ensure a high degree of product quality puts forward new requirements for models, methods and tools for managing production processes and the quality of products. This is especially true for the radio-electronic industry, where the effectiveness of technological innovations is dynamically confirmed during the serial production of products. *Materials and methods.* The intellectualization of radio electronics production is fully consistent with the concept of Industry 4.0 and the digitalization strategy. At the same time, quality assurance depends on the effective implementation of a quality management system at the enterprise, which requires top management not only to follow the requirements established in the GOST R ISO 9001-2015 standard, but also to take into account the internal specifics of the organization. A significant part of the features of the economic activity of an enterprise is determined by the type of its organizational structure. *Results and conclusions.* Therefore, the effectiveness of the implementation of technological innovations depends on the suitability of the applied quality management methods at enterprises of various organizational forms of management.

Keywords: quality, technological innovations, organizational structures, quality management system

For citation: Korshunov G.I., Polyakov S.L., Romanets V.I. Quality assurance of radio electronic products in enterprises with different types of organizational structures. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(4):74–80. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-4-9

Введение

Необходимость постоянного обеспечения качества радиоэлектронной продукции не вызывает сомнений. В области производства электроники это связано с возрастающими требованиями по миниатюризации, качеству паек и т.д. В настоящее время наибольшее внимание вызывает поверхностный монтаж печатных плат наряду с другими видами технологических процессов. Основой современных автоматических линий в этой области является технология, выполненная в соответствии со стандартом IPC-SMEMA-9851, обычно называемого «стандартом SMEMA»¹. Стандартная конфигурация, допускающая расширение, обеспечивала электрическую и механическую совместимость. Создание новых возможностей предусмотрено стандартом Hermes, опубликованным так же, как IPC-HERMES-9852². Внедрение компонентов цифровизации в производственный процесс для обеспечения качества электронной продукции выполняется на предприятиях с различной организационной структурой. Цель работы – определить возможности различных организационных структур, представляющих малый, средний бизнес и крупные предприятия с «вертикальной структурой» для эффективного внедрения технологий поверхностного монтажа печатных плат и соответствующей структуры процессов СМК на основе формализованных базовых структур.

Материалы и методы

Интегральный критерий качества (ИКК) позволяет оценивать эффект целевого функционирования, а его показатели обладают свойствами измеримости, полноты и достоверности. Под целевым функционированием понимается такое целеустремленное поведение, когда система учитывает особенности окружения $\{X\}$, ориентируется и направляется целью T (рис. 1). Цель определена как подмножество конечных состояний системы $\{X_T\}$, в которых она вступает в определенную связь с окружением: $T: \{X_T\} \subset \{X\}$.

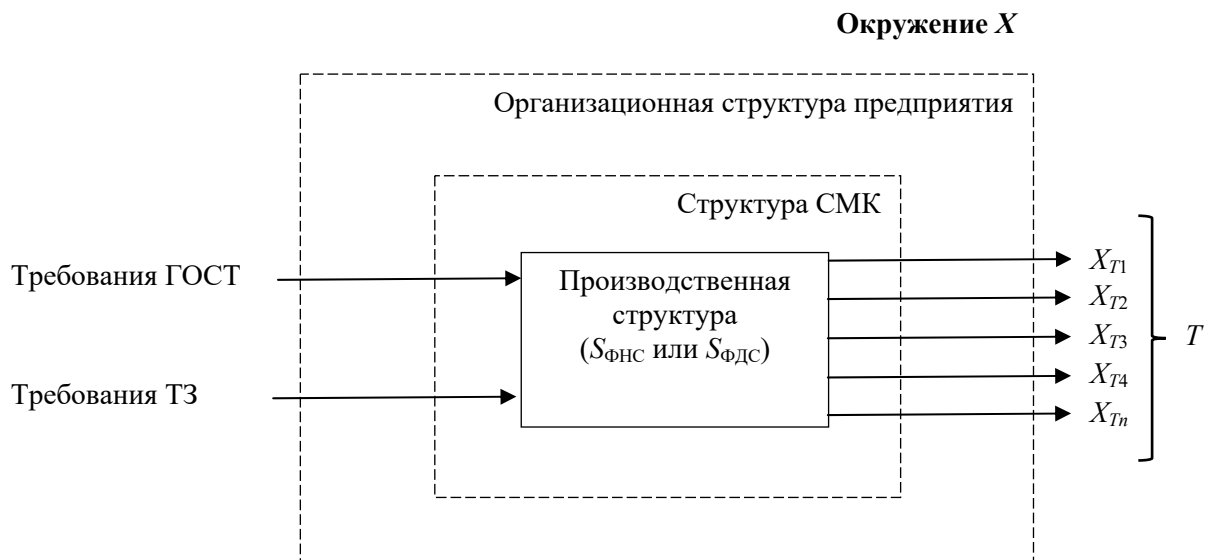


Рис. 1. Схема целевого функционирования

Базовыми структурами в работе [1] названы функционально необходимые (ФНС) и функционально достаточные структуры (ФДС).

¹ IPC-SMEMA-9851. URL: www.ipc.org

² IPC-Hermes-9852. The Hermes Standard for vendor independent machine-to-machine communication in SMT Assembly Version 1.1. 2018.

Функционально необходимой структурой названа структура $S_{\text{ФНС}}$, предназначенная для выполнения определенного класса однотипных целей, функций, задач, в которой отсутствует какого-либо вида избыточность и достигаются минимальные значения показателей качества из заданного набора, образующего ИКК: $\text{ИКК} = \{Q_i\}, S_{\text{ФНС}} \in \{S\}; \{Q_{i\text{ФНС}}\} = \{Q_{i\text{ФНС}}: \forall i, Q_{i\text{ФНС}} \leq Q_i\}$.

В этих терминах технологии поверхностного монтажа печатных плат конфигурация оборудования IPC-SMEMA-9851 представляет функционально необходимую структуру. Эта конфигурация и ее составляющие представлены на рис. 2.

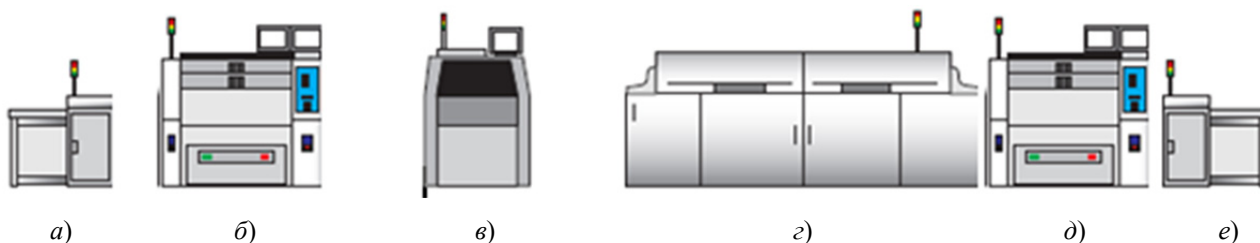


Рис. 2. Типовая конфигурация автоматического монтажа печатных плат:

a – загрузчик ПП; *б* – трафарет для нанесения паяльной пасты; *в* – установщик электронных чип-компонентов; *г* – конвекционная печь; *д* – станция автоматического контроля паяных соединений; *е* – приемник ПП

Дальнейшее развитие может быть представлено как созданием функционально достаточных систем [1], так и многошаговыми процессами постепенного совершенствования технологий [2].

Функционально-достаточные структуры характеризуются наличием некоторой избыточности, допустимой в рамках заданных ограничений, в связи с этим большое значение приобретает исследование структур на основе коэффициентов значимости составляющих ее элементов. Этому определению соответствует технология IPC-HERMES-9852. Этот стандарт является непатентованным открытым протоколом, основанным на TCP/IP – XML. Он выводит обмен данными, связанными с печатными платами между различными машинами на сборочных линиях электроники на новый уровень. Стандарт Hermes был инициирован, разработан и установлен и в дальнейшем поддерживается группой ведущих поставщиков оборудования, объединяющих свой опыт для достижения большого шага на пути к продвинутой интеграции процессов. В наиболее полном составе структура SMT производства (фирмы Saki America, Inc.) [5] представлена на рис. 3.

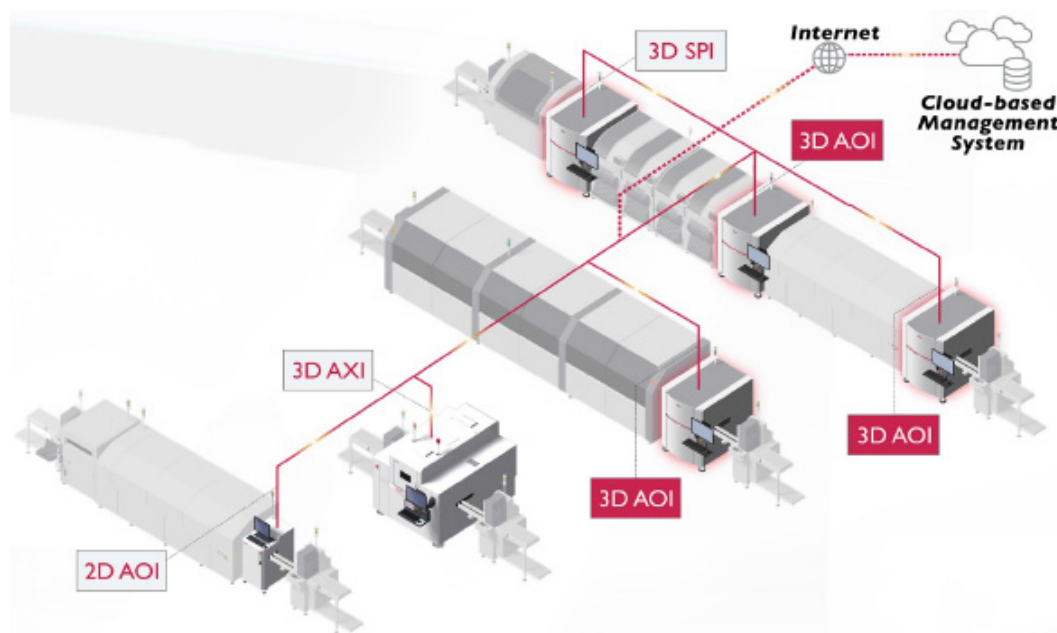


Рис. 3. Производственная линия фирмы Saki America, Inc.

Такая конфигурация включает несколько связанных линий, объединенных Интернетом и облачными технологиями.

Поэтапное внедрение элементов концепции Индустрия 4.0 обеспечивает повышение качества продукции [2], и при достижении всех необходимых факторов, влияющих на пригодность и воспроизводимость процессов, может быть реализована стратегия «Нулевой уровень дефектов». Индексы пригодности S_{pk} и воспроизводимости P_{pk} определяют возможности процесса. Значения этих индексов являются основой для статистической оценки качества продукции. Задачи и проблемы реализации стратегии «Нулевой уровень дефектов» требуют отдельного рассмотрения [2].

На современном этапе развития цифровизации производства одним из перспективных направлений является создание цифровых двойников, позволяющих обеспечивать на стадии проектирования выполнение требований ТЗ и снижение уровня дефектов. Современные системы позволяют проанализировать работоспособность изделия не только в статических условиях, но и провести моделирование работы изделия в эксплуатационных условиях, приближенных к реальным. Результаты моделирования могут учитываться при статической оценке качества продукции, когда результаты испытаний готовой продукции сравниваются с результатами моделирования цифрового двойника и вносятся коррективы в проектную и конструкторскую документацию для более эффективной оценки качества продукции.

Жизненный цикл изделий радиоэлектроники предусматривает анализ состояний будущего изделия в последовательности проектных и производственных процедур и операций (в том числе с использованием технологии цифровых двойников), а также синтез управлений на основе ИКК в виде обобщенного функционала «максимума вероятности обеспечения качества», включающего заданную вероятность P выполнения требований ТЗ [6]: $\Phi_0 = \max P(V_0, W_0)$, где V_0 и W_0 – «начальные» параметры и критерии и на последующих этапах их согласование вплоть до « n -го» этапа подготовки производства

$$\Phi = \max P[K_1 \geq K_{1_0}, K_2 \geq K_{2_0}, \dots, K_j \leq K_{j_0}, K_{j+1} \leq K_{(j+1)_0}, \dots, K_n \leq K_{n_0}], \quad (1)$$

где $\{K_j\}$, $1 \leq j \leq n$, – требования ТЗ, включающие основные требования (характеристики качества). Здесь под качеством понимается степень соответствия совокупности присущих характеристикам объекта требованиям. Функционал (1) представлен в общем виде, однако его вид на отдельных стадиях жизненного цикла принимает частные формы, в зависимости от актуальных на этой стадии характеристик качества.

На этапах проектирования изделия оказывается возможным осуществлять управление качеством продукции и обеспечение качества производства на этапах проектирования, технологической подготовки и производства. Для этого необходимо развивать и постоянно совершенствовать СМК¹.

Большинство российских производителей также ориентированы на этот мировой процесс, сопровождающийся постоянным совершенствованием за счет внедрения инноваций. Этот вопрос требует специального рассмотрения с точки зрения адаптации оборудования к российским условиям и его постепенной локализации. В то же время большое значение имеет достижение результативности таких технологий для обеспечения качества. В этом смысле имеет место разница по внедрению, нагрузке мощностей, гибкости во внедрении технологических инноваций.

Развитие и усложнение хозяйственной деятельности приводит к возникновению различных типов организационных структур управления. Наиболее широко распространены следующие четыре типа [5–9]:

- 1) функциональная структура, подразделения которой ориентированы на выполнение определенной функции организации;
- 2) дивизиональная структура, состоящая из частично автономных подразделений, ориентированных на конкретный сегмент потребителей, регион или линию продуктов;
- 3) проектная структура, которая постоянно видоизменяется для реализации конкретных проектов;
- 4) матричная структура, формирующаяся на принципах двойного подчинения [3].

Ключевые особенности управления качеством в основных типах организационных структур представлены в табл. 1.

В зависимости от организационной структуры предприятия оптимизация производственных процессов, внедрение технологических инноваций, применение элементов цифровизации и т.п. мо-

¹ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования.

гут происходить с разной степенью эффективности. Выделив общие критерии и показатели, можно дать оценку для каждой отдельно взятой структуры и предложить наиболее подходящий вариант реализации стратегии в области менеджмента качества с учетом формулы (1).

Таблица 1

Особенности управления качеством в различных оргструктурах

Характеристика / Тип структуры	Функциональная	Дивизиональная	Проектная	Матричная
Сложность построения (K_1)	Очень низкая	Низкая	Низкая	Высокая
Сложность внедрения СМК в соответствии с ISO-9001 (K_2)	Высокая	Средняя	Низкая	Низкая
Эффективность стат. контроля качества (K_3)	Средняя	Средняя	Низкая	Средняя
Эффективность инструментов СМК, ориентированных на конечный результат (K_4)	Низкая	Низкая	Средняя	Высокая
Эффективность инструментов СМК, ориентированных на численный промежуточный результат (K_5)	Средняя	Высокая	Средняя	Высокая

Принимая во внимание значимость самой системы менеджмента качества для предприятия в целом и для производственных процессов, в частности, необходимо учитывать особенности структуры СМК, от которой во многом будет зависеть эффективность внедрения технологических инноваций.

Результаты

В статье предложен подход оценки эффективности целевого функционирования с учетом особенностей окружения (организационной структуры предприятия) на основе интегрального критерия качества. В качестве целевого функционирования предложена стратегия «Нулевой уровень дефектов», при этом индексы пригодности и воспроизводимости определяют возможности процесса. Предложен синтез управлений на основе интегрального критерия качества в виде обобщенного функционала «максимума вероятности обеспечения качества», включающего вероятность выполнения требований ТЗ. Рассмотрены особенности организационных структур современных предприятий, реализующих требования к СМК.

Заключение

Актуальность рассмотренных в статье вопросов определяется выраженной дифференциацией российских предприятий по типу организационной структуры при общей высокой заинтересованности в развитии СМК. Проектная и матричная структуры в большей степени соответствуют процессному подходу, являющемуся основой СМК. Поэтому предприятия, условно относящиеся к малому и среднему бизнесу, могут развиваться более динамично. В то же время отнесение предприятий к названным категориям достаточно условно, так как интеллектуальные (умные) предприятия могут содержать несколько человек персонала и значительный производственный потенциал. Что касается развития и актуализации СМК, то в бюрократических иерархических структурах, как правило, реальные бизнес-процессы оказываются слабо связанными с высшим менеджментом и при необходимости реализуются в виде временных процессных цепочек. Это объясняется недостаточным уровнем организации или формальным отношением к СМК.

Список литературы

1. Коршунов Г. И. Обеспечение качества сложных систем : монография. СПб. : СПбГУВК, 2001.
2. Коршунов Г. И., Петрушевская А. А. Обеспечение качества продукции в интеллектуальных производствах электроники // Контроль качества продукции. 2021. № 8-9. С. 43–51.
3. Satoshi O., Y. Watabe: Saki Self-Programming Software Accelerates 3D Inspection and M2M Communication // Manufacturing Production Technology, Hardware & Services, 2018.

4. Сольнищев Р. И., Коршунов Г. И. Об инструментарию проектирования и производства кибер-физических систем // Наука и бизнес: пути развития. 2020. № 6. С. 102–107.
5. Быкова А. Организационные структуры управления. М. : ОЛМА-ПРЕСС Инвест: институт экономических стратегий, 2003. С. 22–59.
6. Пономарев С. В., Соседов Г. А., Мищенко Е. С. [и др.]. Управление качеством процессов и продукции : в 3-х кн. Кн. 2: Инструменты и методы менеджмента качества процессов в производственной, коммерческой и образовательной сферах : учеб. пособие / под ред. д-ра техн. наук, проф. С. В. Пономарева. Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2012. С. 78–161.
7. Катернюк А. В. Исследование систем управления. Введение в организационное проектирование : учеб. пособие / А. В. Катернюк. М. : Высшее образование, 2009. 315 с.
8. Гафорова Е. Б., Гафоров Ж. С. Совершенствование системы менеджмента предприятия на основе матричной структуры управления // Стандарты и качество. 2008. № 7. С. 66–69.
9. Версан В. Г. Менеджмент качества как подсистема матричной структуры управления предприятием // Стандарты и качество. 2008. № 5. С. 56–59.

References

1. Korshunov G.I. *Obespechenie kachestva slozhnykh sistem: monografiya = Quality assurance of complex systems : monograph*. Saint Petersburg: SPbGUVK, 2001. (In Russ.)
2. Korshunov G.I., Petrushevskaya A.A. Product quality assurance in intelligent electronics manufacturing. *Kontrol' kachestva produktsii = Product quality control*. 2021;(8-9):43–51. (In Russ.)
3. Satoshi O., Y. Watabe: Saki Self-Programming Software Accelerates 3D Inspection and M2M Communication. *Manufacturing Production Technology, Hardware & Services*, 2018.
4. Sol'nitsev R.I., Korshunov G.I. About tools for designing and manufacturing cyber-physical systems. *Nauka i biznes: puti razvitiya = Science and business: ways of development*. 2020;(6):102–107. (In Russ.)
5. Bykova A. *Organizatsionnye struktury upravleniya = Organizational management structures*. Moscow: OLMA-PRESS Invest: institut ekonomicheskikh strategiy, 2003:22–59. (In Russ.)
6. Ponomarev S.V., Sosodov G.A., Mishchenko E.S. [et al.]. *Upravlenie kachestvom protsessov i produktsii: v 3-kh kn. Kn. 2: Instrumenty i metody menedzhmenta kachestva protsessov v proizvodstvennoy, kommercheskoy i obrazovatel'noy sferakh: ucheb. posobie = Quality management of processes and products : in 3 books. Book 2: Tools and methods of process quality management in the industrial, commercial and educational spheres : textbook*. Tambov: Izd-vo TGTU, 2012:78–161. (In Russ.)
7. Katernyuk A.V. *Issledovanie sistem upravleniya. Vvedenie v organizatsionnoe proektirovanie: ucheb. posobie = Research of control systems. Introduction to Organizational Design : textbook*. Moscow: Vyssee obrazovanie, 2009:315. (In Russ.)
8. Gafforova E.B., Gafforov Zh.S Improvement of the enterprise management system based on the matrix management structure. *Standarty i kachestvo = Standards and quality*. 2008;(7):66–69. (In Russ.)
9. Versan V.G. Quality management as a subsystem of the matrix structure of enterprise management. *Standarty i kachestvo = Standards and quality*. 2008;(5):56–59. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Геннадий Иванович Коршунов

доктор технических наук, профессор,
генеральный директор ООО «ПАНТЕСгрупп»
(Россия, г. Санкт-Петербург,
пр. Ириновский, 2);
профессор кафедры инноватики
и интегрированных систем качества,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67);
профессор Высшей школы
киберфизических систем и управления,
Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет
(Россия, г. Санкт-Петербург,
ул. Политехническая, 29)
E-mail: kgi@pantes.ru

Gennady I. Korshunov

Doctor of technical sciences, professor,
General Director of PANTESgroup, Ltd
(2 Irinovskiy avenue, St. Petersburg, Russia);
professor of the sub-department of innovation
and integrated quality systems,
Saint Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation
(67 Bolshaya Morskaya street, St. Petersburg, Russia);
professor of Higher School of cyberphysical
systems and management,
Saint Petersburg State Polytechnic University
(29 Polytechnicheskaya street, St. Petersburg, Russia)

Сергей Леонидович Поляков

кандидат технических наук,
доцент кафедры инноватики
и интегрированных систем качества,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67)
E-mail: ssera83@mail.ru

Владислав Иванович Романец

студент,
Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет
(Россия, г. Санкт-Петербург,
ул. Политехническая, 29)
E-mail: romanec-2000@yandex.ru

Sergey L. Polyakov

Candidate of technical sciences,
associate professor of the sub-department
of innovation and integrated quality systems,
Saint Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation
(67 Bolshaya Morskaya street, St. Petersburg, Russia)

Vladislav I. Romanets

Student,
Saint Petersburg State Polytechnic University
(29 Polytechnicheskaya street, St. Petersburg, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 06.09.2021

Поступила после рецензирования/Revised 17.10.2021

Принята к публикации/Accepted 05.11.2021

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

TECHNOLOGICAL BASIS FOR IMPROVING RELIABILITY AND PRODUCT QUALITY

УДК 349.6/349.7/621.039

doi:10.21685/2307-4205-2021-4-10

К ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОМУ ОБОСНОВАНИЮ ПОДЗЕМНОГО ОБЪЕКТА ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНОЙ СТАДИИ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА

В. Н. Комлев

Апатиты, Россия
komleva_ap@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассмотрены геологические условия российской площадки глубинного захоронения радиоактивных отходов около Енисея. Не только изолированно в границах заданной площадки, как было принято прежде, но и с учетом более масштабных факторов: тектоника литосферных плит, свойства ряда аналогичных функционально площадок в переходных условиях (Балтика–Енисей–Тихий океан), районирование локальной смежной территории по полезным ископаемым, наличие вблизи площадки других объектов захоронения. *Материалы и методы.* В таком смысловом соединении предложено изучать на стадии разведки главный для безопасности инженерно-геологический параметр горного массива – состояние подземной гидросферы. Отмечена необходимость надежной нормативно-правовой базы. *Результаты и выводы.* По результатам первичных стадий работ по пункту глубинного захоронения РАО выявлены недостатки применения и исполнения законодательства и технических норм. Сформулировано предложение о правовой экспертизе подготовленных для участка «Енисейский» документов.

Ключевые слова: геологическое захоронение радиоактивных отходов, подземное строительство, могильник, безопасность, гидравлическая проницаемость пород, право, технические нормы

Для цитирования: Комлев В. Н. К горно-геологическому обоснованию подземного объекта заключительной стадии ядерного топливного цикла // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 4. С. 81–97. doi:10.21685/2307-4205-2021-4-10

TO MINING AND GEOLOGICAL VALIDATION OF THE UNDERGROUND OBJECT OF THE FINAL STAGE OF THE NUCLEAR FUEL CYCLE

V.N. Komlev

Apatity, Russia
komleva_ap@mail.ru

Abstract. *Background.* The geological conditions of the Russian site for deep burial of radioactive waste near the Yenisei are considered. Not only isolated within the boundaries of a given site, as was the case before. But also taking into account more ambitious factors: tectonics of lithospheric plates, properties of a number of functionally similar sites in transitional conditions (Baltic–Yenisei–Pacific Ocean), zoning of the local adjacent territory by mineral resources, the presence of other disposal facilities near the site. *Materials and methods.* In such a semantic connection, it is proposed to study at the exploration stage the main engineering-geological parameter of the rock mass for safety –

the state of the underground hydrosphere. The need reliable regulatory and legal framework was noted. *Results and conclusions.* Based on the results of the initial stages of work on the deep disposal site for radioactive waste, shortcomings in the application and implementation of legislation and technical standards were identified. A proposal has been formulated for a legal examination of documents prepared for the Yeniseisky site.

Keywords: geological disposal of radioactive waste, underground construction, waste storage facility, safety, hydraulic permeability rocks, law, technical regulations

For citation: Komlev V.N. To mining and geological validation of the underground object of the final stage of the nuclear fuel cycle. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;(4):81–97. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-4-10

Предисловие

Настоящая статья как оценочное профессиональное суждение автора для понимания долговременного будущего посвящена анализу опубликованной в открытых источниках информации по теме захоронения особо опасных радиоактивных отходов (РАО) в России.

В мировой практике использования ядерной энергии выделяют заключительную стадию ядерного топливного цикла (ЯТЦ), которую реализуют по одному из двух вариантов: с переработкой отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) или без нее. Важно, что оба варианта в части подземного строительства приводят к принципиально неразличимым подземным объектам глубинно-геологического захоронения либо отходов высокой активности (ВАО) и долгоживущих от переработки ОЯТ, либо непосредственно (прямое захоронение) ОЯТ [1, с. 8].

Россия пока предпочитает основную часть ОЯТ перерабатывать и планирует создать в Красноярском крае, на участке «Енисейский», в пределах ЗАТО Железногорск, на промышленной территории ФГУП «Горно-химический комбинат» (ГХК) национальный шахтного типа ПГЗРО (архейские гнейсы, на глубине 450–550 м) пункт глубинного захоронения РАО 1 и 2 классов опасности, твердых отходов. Речь идет об объекте, у которого по международным представлениям перспектива на миллион лет экологических тревог и на сотни миллиардов долларов затрат только в обозримом будущем. По принципу условной паритетности военных и гражданских ядерных программ СССР/России и США объем российских РАО предположительно можно оценивать лишь в сравнении с американскими. А российский ПГЗРО в центре страны – с совокупностью двух (WIPP и Yucca Mountain) американских в приграничной (как и китайский Beishan) пустыне.

Законодательство и технические нормы

Связанные с любым местом размещения аспекты, прежде всего, безопасности федерального ПГЗРО принципиально нуждаются в надежном доказательстве на базе законодательства, норм и правил в области использования и охраны недр. Естественно, что должна быть уверенность в правильности/надежности самой базы – сформированной подборки регулирующих документов. В связи с этим каждый из подготовленных, обычно в разное время и разными исполнителями (в том числе разных ведомств), обосновывающих ПГЗРО материалов по части законов и технических норм целесообразно, видимо, тестировать, используя разработанный внешними экспертами перечень необходимых для контроля регулирующих документов и их разделов/пунктов. Тестировать последовательно и порознь по факторам: **ОБОЗНАЧЕННЫЕ ИСПОЛНИТЕЛЯМИ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ РЕГУЛИРУЮЩИЕ ДОКУМЕНТЫ** (в первую очередь, так как заведомое неприменение важных регулирующих документов, ошибочные ориентиры, ущербность выбранной для процедуры обоснования нормативно-правовой базы практически неизбежно порождают нарушения) и **ИСПОЛНЕНИЕ ЭТИХ ДОКУМЕНТОВ**.

К сожалению, при создании ПГЗРО присутствуют, похоже, непрофессиональная, несвязная, неполная и во многом неадекватная горно-геологическая трактовка истории, будущего и объемов работ, идентификации и свойств массива пород, некоторых других важных позиций, а также далеко не в полном объеме применение регулирующих документов (их исполнение и соответствие результатов нормам также далеки от безупречных), недостаточная открытость экономических показателей, принятых разрешительных документов, геологических материалов по участку «Енисейский»¹ [2].

Например, предписано (Закон № 190-ФЗ от 11 июля 2011 г. «Об обращении с радиоактивными отходами...», статья 12, п.2), что захоронение твердых высокоактивных долгоживущих и твердых

¹ Ядерный могильник на Енисее и норвежская Беллона. URL: <https://proza.ru/2018/11/07/898> ; Научные эксперты о ядерном могильнике. URL: <https://proza.ru/2020/06/25/1546> ; Радиоактивные отходы как повод подумать о вечном. URL: <https://proza.ru/2018/02/13/284>

среднеактивных долгоживущих радиоактивных отходов осуществляется в пунктах глубинного захоронения РАО, обеспечивающих локализацию таких отходов в соответствии с Законом о недрах. Стало быть, «в соответствии с Законом о недрах» относится и к Железногорску. Кстати, Закон о недрах рассматривал нормы захоронения РАО в рамках проблемы регулирования отношений при использовании недр в целях, не связанных с добычей полезных ископаемых, уже до и вне указаний Закона № 190-ФЗ. Поэтому, как только сложное многоэтапное обращение с особой опасностью РАО доходит до захоронения, как только функцией создаваемого объекта объявляется обоснование (наука) или реализация (промышленность) захоронения этих РАО, главенствующая роль и необходимость неукоснительного соблюдения переходят к Закону о недрах¹.

Не все причастные к проблеме об этом помнят. В «Стратегическом мастер-плане» исследований в обоснование безопасности ПГЗРО в Нижнеканском массиве» для «строительства ПГЗРО и создаваемой «параллельно» с ним ПИЛ (подземной исследовательской лаборатории)» Закон о недрах не обозначен/отсутствует в качестве ориентира «в рамках горизонта планирования 2070 г.» [3], как и в препринте «Обоснование долговременной безопасности захоронения ОЯТ и РАО на 10 000 и более лет: методология и современное состояние» [4]. В как бы основополагающем (выпущен позже начала работ и оформления основных разрешений) документе «Стратегия создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов» Закон о недрах не упоминается (раздел 2), зато объявляется вопреки Закону, что «создаваемые... сооружения ПИЛ... предназначены для захоронения... РАО классов 1 и 2» (раздел 4) [5]. Закон о недрах, по мнению специалистов стратегического планирования захоронения РАО (А. А. Ковальчук, слайд 2), к основе их решений не относится [6]. В условиях действия лицензии Ростехнадзора ГН-01,02-304-3318 не прописано (по крайней мере, напрямую) обязательное выполнение Закона о недрах². В. А. Караулов (ОАО «Красноярская горно-геологическая компания») в выводах приложения 3 протокола ГКЗ – ФБУ «Государственная комиссия по запасам полезных ископаемых» не указывает соответствие условий участка «Енисейский» Закону о недрах³.

В 2015 г. ФБУ «Институт проблем безопасного развития атомной энергетики» (ИБРАЭ РАН) отмечал, что до 2011 г. (участок «Енисейский» был уже запущен в работу – В.К.) в России отсутствовали правовые требования по захоронению РАО [7, с. 7]. Это не соответствует действительности: уже действовали, например, Закон о недрах (1992 г.), НП-050-03 «Размещение ядерных установок ядерного топливного цикла (ЯУ ЯТЦ). Основные критерии и требования по обеспечению безопасности» (2003) и НП-055-04 «Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности» (2004). Неточности про Закон о недрах и федеральные НП, видимо, воспроизведены не один раз ([8]: введение, с. 6; глава 2; разделы 2.1, 2.3; список литературы; трансляция статьи 12 Закона № 190-ФЗ относительно ВАО без важного указания на Закон о недрах, с. 57).

При выборе и экспертизе площадки и района ПГЗРО никем пока не задействованы федеральные нормы и правила НП-050-03, п. 1.1 которых напрямую предписывает их применение для такого случая. Хотя в перечне «Нормативные документы» на сайте ФГУП «НО РАО» (Национального оператора по обращению с радиоактивными отходами) НП-050-03 присутствуют, а Свидетельством Госкорпорации «Росатом» от 07.03.2012 № ГК-С008 ФГУП «НО РАО» было признано организацией, пригодной эксплуатировать ядерные установки (см. Приложение и Материалы обоснования лицензии, МОЛ, на размещение и сооружение..., том 1, с. 13 [9]). Если ПГЗРО не является ЯУ ЯТЦ, то какие эксплуатируемые ФГУП «НО РАО» сооружения ими являются?⁴

Труднопонимаем лицензируемый вид деятельности лицензии ГН-01,02-304-3318 (которая должна быть документом конкретных и однозначных действий в рамках строго определенной одной стадии пользования недрами, а также строго определенных объемов и типов РАО, а не основанием для опережающих волюнтаристских рассуждений о странных вариантах). Нужно

¹ Закон о недрах и радиационная безопасность страны. URL: <https://proza.ru/2020/09/20/903>

² Лицензия Ростехнадзора ГН-01,02-304-3318. На размещение и сооружение пункта хранения радиоактивных отходов. Объект, на котором и/или в отношении которого проводится заявленная деятельность: стационарные объекты и сооружения, не относящиеся к ядерным установкам, радиационным источникам и предназначенные для хранения радиоактивных веществ, хранения или захоронения радиоактивных отходов в составе подземной исследовательской лаборатории / ФГУП «НО РАО». М., 2016. URL: http://www.gosnadzor.ru/service/list/reestr_licences_170fz/license.php?licNum=%D0%93%D0%9D-01%2C02-304-3318

³ Протокол ГКЗ № 4523 от 03-02-2016. URL: <https://yadi.sk/i/Nbvvx8zrv58tlQ>

⁴ ФГУП «НО РАО». Филиалы и отделение. URL: <http://www.norao.ru/about/affiliates/>

еще доказать, что витиеватая (изобретено комплексное пользование недрами: воедино сведены наука, а также хранение, захоронение и ненормативная «окончательная изоляция» РАО!) формулировка вида деятельности в этой лицензии и МОЛ не противоречит терминологии и сути Закона о недрах, НП-055-14 (которые заменили НП-055-04), Закона о лицензировании и НП-050-03. Терминологии МАГАТЭ (ядерная установка nuclear facility, с. 284, п. 3) эта формулировка вряд ли соответствует [10].

Заявленный вид деятельности есть следствие попытки механистически объединить результаты разных по причинам, обстоятельствам и смыслу работ, выполнявшихся на территории и вблизи ГХК в связи с проблемой захоронения твердых РАО.

Даже в материалах к ФЦП ЯРБ-2 (Федеральная целевая программа «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016 – 2020 годы и на период до 2030 года»), дополнительно к массе аналогичных публикаций в СМИ, представитель ФГУП «НО РАО» излагает историю вопроса и суть лицензируемого вида деятельности, мягко говоря, лукаво [11]. Достаточно сказать, что к 2000 г. (моменту возникновения лишь идеи участка «Енисейский») были не только найдены, но и изучены площадки на Новой Земле и территории ПО «Маяк» (ВНИПИпромтехнологии), Кольском полуострове (Горный институт Кольского НЦ РАН), сформировано надежное научное направление поиска площадок такого ранга в пределах урановых месторождений (ИГЕМ РАН), вышло Распоряжение Правительства России № 1576-р от 27.08.92 (подготовлено Институтом динамики геосфер и Горным институтом Кольского НЦ РАН) о создании ПИЛ на Кольском полуострове.

Основные этапы (можно, видимо, выделить три) и главные особенности/цели локальных работ на территории и вблизи ГХК проявляются при анализе первичных публикаций.

Первый (1992–2001). Нижнеканский массив гранитов. Сведения о участке «Енисейский» и федеральном ПГЗРО отсутствуют. Локальный ПГЗРО запланирован исключительно для РАО ГХК. Добротный обзор работ 1992–1998 гг. дан в работе [12]. Приведем некоторые факты из этой публикации. В конце 1992 г. по поручению ГХК был сформирован коллектив специалистов, представлявший около 15 организаций и предприятий. Задача – определить возможность и найти участок для безопасного захоронения ВАО завода РТ-2 (ГХК вряд ли должен был иметь полномочия ставить задачу поиска и обоснования площадки для федерального ПГЗРО). Три научно-исследовательских и проектно-изыскательских темы, комплексная программа от 1994 г., утвержденная заместителем министра Н. Н. Егоровым и академиком Н. П. Лаверовым, ФЦП № 1030 от 1995 г. на 1996–2005 гг. – внушительное планирование исследований. Надежность информации контролировалась сопоставлением результатов, полученных различными организациями. Всеми группами исследователей независимо друг от друга наиболее перспективными были признаны гранитоиды Нижнеканского массива и участки «Итатский» и «Каменный». В принципе, древнейшие гнейсовые толщи ближайшего окружения рассмотренных (Белогорский, Таракский, Нижнеканский) гранитоидных массивов не были оставлены без внимания. Но такие гнейсы не вошли в число перспективных структур. Ни в планах «начала пути», ни в описании выполненных работ, ни в планах завершения работ (включая детальную разведку) не упоминаются ни участок «Енисейский», ни гнейсы Атамановского кряжа Саян (вмещающие подземный комплекс ГХК породы), ни федеральный ПГЗРО, ни ПИЛ формата горных выработок. Таким образом, этот этап, к сожалению, не является этапом изучения участка «Енисейский».

Второй (2002–2012). Работы впервые начаты за пределами Нижнеканского массива (резкий переход от гранитов к породам их западного обрамления), вблизи Енисея, на контактирующих с мощными отложениями юры архейских гнейсах, ПГЗРО с ПИЛ/ПИЛ в составе ПГЗРО, смешанная/неадекватная терминология, искажение истории работ, РАО ГХК уже лишь как частный случай, упоминание НП-055-04 без Закона о недрах, начало оформления (2008) предпроектной документации на базе результатов бурения лишь одной «глубокой» скважины 1-Е, «на основании выполненных предпроектных исследований (какая стадия геологического изучения – В.К.?) определены характеристики массива горных пород в районе площадки строительства объекта, **обеспечивающие пригодность массива для окончательной изоляции РАО**» [13].

Третий (с 2013 г. по настоящее время). Продолжение работ на участке «Енисейский», «стационарные объекты и сооружения, не относящиеся к ядерным установкам, радиационным источникам и предназначенные для хранения радиоактивных веществ, хранения или захоронения радиоактив-

ных отходов в составе ПИЛ»¹, оформление разрешительных документов – серьезное несоответствие условий участка «Енисейский» международному опыту, требованиям Закона о недрах и ряда других регулирующих документов [2].

Для сравнения и правильного/полного понимания ситуации: в материалах лицензии Роснедр КРР 16117 ЗД от 22.07.16 (со странным сроком действия, по результатам поисковой и оценочной стадий геологического изучения), хотя (вопреки правилам) и не обозначены выдавшие/согласовавшие разрешение на пользование земельным участком органы, а она сама по состоянию на 15.04.21 отсутствует (!) на сайте ФГУП «НО РАО», в части лицензируемого вида деятельности четко и однозначно записано: «захоронение радиоактивных отходов в глубоких горизонтах», участок «Енисейский», никаких других вариантов нет².

Общим итогом перечисленных административно-процессуальных нарушений/системных ошибок/тотальной забывчивости/странной ментальности авторов Енисейского проекта можно, видимо, назвать фактическое неприменение (автоматически – невыполнение) ст. 12 (п. 2) Закона № 190-ФЗ. Что, одновременно, обусловило несоответствие многих реалий создания ПГЗРО горно-геологическим нормам Закона о недрах и связанных с ним документов.

Ограничения промышленной территории ГХК

Вблизи площадки ПГЗРО уже имеются разные, ядерного топливного цикла, объекты длительного размещения (хранение и захоронение) РАО и ОЯТ, комплекс переработки ОЯТ и другие в составе ядерно-космического кластера. Завершают захоронение промышленных реакторов ГХК по способу «на месте» и эксплуатируют полигон «Северный» (юрские осадочные пласты-коллекторы во впадине скального архейского фундамента, захоронение жидких РАО). Документом НП-050-03 предусмотрен соответственно этому факту «учет наличия в районе размещения и на площадке ЯУ ЯТЦ других действующих, сооружаемых и проектируемых объектов использования атомной энергии, зданий, относящихся к категории взрывопожарной и пожарной опасности, объектов, содержащих токсичные и коррозионно-активные вещества, а также транспортных путей, аварии на которых могут оказывать воздействие на ЯУ ЯТЦ» (п. 2.1 и 4.2.1). Предусмотрены также «ограничения техногенного воздействия на ЯУ ЯТЦ действующих ядерных установок, расположенных в районе размещения и на площадке ЯУ ЯТЦ» (п. 2.5).

Рисунки страниц 27, 29, 30, 45, 47, 50, 194 [14], 13 [12] и публичных МОЛ (2015, 2020 и 2021 годов) для других соседствующих объектов дают обобщенную (более полную, нежели лишь в МОЛ-2015 только для пункта захоронения РАО) ситуационную картину промышленной территории ГХК, площадки ПГЗРО и сопряженных территорий (административные границы, горный и земельный отводы, геоморфология, геология). Промышленная территория ГХК (гнейсовый «полуостров») зажата между Енисеем и угленосными (и, скорей всего, обводненными) образованиями юры (долина притока Енисея Большая Тель – долина Черского). От площадки ПГЗРО (блок 37) до Енисея – 4, 5 км, до блока 38 (юрские отложения в составе долины Черского, по А. Ю. Озерскому [15] – наличие водонасыщенных угленосных месторождений) – 2 км.

Эта промтерритория – место уже существующих наземных и подземных объектов, возможное взаимовлияние которых необходимо учитывать. Ее ресурс для размещения сейчас новых объектов ограничен или вообще исчерпан. Современный славный подземный комплекс ГХК с захороненными навечно реакторами (если говорить об интегральных свойствах горы – зона техногенного разуплотнения гнейсов, гигантские объемы вынудой скальной породы [16]), как ни печально (после вывода из эксплуатации, нет вечных производств), – будущие каналы сбора воды и «естественных» водотоков, которые не улучшат и без того сложную в контексте ПГЗРО гидрогеологию общего массива.

¹ Лицензия Ростехнадзора ГН-01,02-304-3318. На размещение и сооружение пункта хранения радиоактивных отходов. Объект, на котором и/или в отношении которого проводится заявленная деятельность: стационарные объекты и сооружения, не относящиеся к ядерным установкам, радиационным источникам и предназначенные для хранения радиоактивных веществ, хранения или захоронения радиоактивных отходов в составе подземной исследовательской лаборатории / ФГУП «НО РАО». М., 2016. URL: http://www.gosnadzor.ru/service/list/reestr_licences_170fz/license.php?licNum=%D0%93%D0%9D-01%2C02-304-3318

² Лицензия Роснедр КРР 16117 ЗД. На захоронение радиоактивных отходов в глубоких горизонтах / ФГУП «НО РАО». М., 2016. URL: <https://rfgf.ru/license/itemview.php?iid=2717774>

Два крупных подземных объекта (подземные пустоты и потревоженный горный массив): не будет ли негативное воздействие друг на друга и на породный целик между ними уже на стадии строительства ПГЗРО? С юга чередой, практически вплоты, – Железногорск, Сосновоборск и Красноярск.

В США, Китае, Швеции и Финляндии целевой горизонт ПГЗРО запланировано вскрывать наклонными спиралеподобными технологическими выработками – туннелями за внешним контуром зоны захоронения РАО. Туннелями вскрывали и подземный комплекс ГХК. В концептуальных проектах Горного института Кольского НЦ РАН для подхода к целевому интервалу предложено использовать принципиально похожую на зарубежный вариант обособленную выработку – многофункциональный уклон (например, Концепция подземного хранилища отработавшего ядерного топлива судовых ядерных энергетических установок на Кольском полуострове).

А российский ПГЗРО начинают вертикальными технологическими стволами непосредственно в будущую рабочую зону [17]. Не следствие ли это тесноты на гнейсовом «острове»? Кроме того, такие стволы на стадии автономного существования ПГЗРО (даже при качественном заполнении их внутреннего свободного/технологического объема, например, бентонитом) могут быть эффективными рукотворными «водосточными трубами/коллекторами» для поступления воды в подземный комплекс с земной поверхности и из массива (скорее всего, так как бетон/тюбинги их стенок без ремонта не сохраняют герметичность и сотню лет – потекут). И никакие памперсы на стенках ПИЛ по планам подземных исследований не дадут прогноза долговременного флюидного режима в зоне РАО.

Впервые (с помощью стволов «под одной крышей») так предлагали строить ПГЗРО и в пределах санитарно-защитной зоны ПО «Маяк» [18], т.е. этот подход осознан давно соответственно общему стремлению Росатома, вопреки мировой тенденции, создавать федеральные пункты захоронения РАО на пока охраняемых территориях своих крупных уже действующих производственных комплексов (Новоуральск, Озерск, Северск, Железногорск), обрамляя южную часть Западно-Сибирской низменности – нефтегазовой провинции (усиливая потенциальные риски штатного и аварийного ее радиационного загрязнения [19]). Но подземного пространства для надежного маневра выработками ПГЗРО в назначенном варианте (при горно-геологических осложнениях или желаемом наращивании объемов захоронения РАО/строительстве новых очередей объекта) при этом, похоже, нет.

Информация к размышлению о будущем Железногорска: не полностью раскрытая всего лишь шестидесятилетняя (не миллион лет!) история постепенно разраставшегося ядерного кластера в Сосновом Бору – необходимы новые законодательные нормы и инструменты для обеспечения ядерной и социально-экологической безопасности объектов [20].

Геологические ограничения участка и района

Участок «Енисейский» принадлежит Атамановскому кряжу Саян – тектоническому узлу Западно-Сибирской плиты, Сибирской платформы и Алтае-Саянской орогенической области. Русло и берега Енисея, маркирующего глобальную континентальную неоднородность/глобальный геологический переход, не будут миллион лет безразличными к динамике земной коры, наложенной на динамику реки. В пределах той же промышленной территории комплексно следят за состоянием горного массива объекта-аналога (см. протокол ГКЗ, В. А. Караулов и А. А. Верчеба¹).

Массив участка «Енисейский» сложен. Особое внимание при его изучении и эксплуатации должно быть уделено флюидному режиму, влиянию разломно-блоковой структуры земной коры на состояние подземной гидросферы. Важно не только наличие в массиве блоков с относительно низкой водопроницаемостью, но и наличие по их границам зон повышенной водопроницаемости (мощностью 0,2–13 м). В условиях масштабных горных работ и последующего автономного функционирования многозвенного ПГЗРО с прогревом пород и подземных вод до 100–150 градусов [21, 22], при благоприятных для образования трещин растягивающих напряжениях в горе и ее «потряхивании» отголосками землетрясений в соседних регионах, именно сеть таких границ будет определять безусловное присутствие и динамику воды в массиве и горных выработках с РАО – главный фактор выноса радиоактивности.

¹ Протокол ГКЗ № 4523 от 03-02-2016. URL: <https://yadi.sk/i/Nbvvx8zrv58tlQ>

На исходную/природную монолитность пород ПГЗРО трудно рассчитывать в принципе, исходя из представлений о процессах в земной коре. Север (Заангарье) и юг (Саяны) региона – провинции месторождений золота и урана, генетически обусловленные геодинамической историей территории. Кроме того, «Грандиозность позднемеловых движений можно считать доказанной, и надежда, что гнейсы в районе участка «Енисейский» ими не затронуты – явный самообман. К тому же в течение кайнозоя... были новые... подвижки, о чем свидетельствуют разломы... Подновления разломов происходят иногда и сейчас», породы целевого интервала для ПГЗРО выходят на поверхность вне участка «Енисейский» [23]. Они могут быть независимо изучены там. Результатом движений является и сброс размером не менее 200 м на глубине 500 м полигона «Северный» (поперечный геологический разрез ПГЗ ЖРО полигон «Северный» [24, с. 20]). Следы разнонаправленных подвижек с потерей консолидации гнейсов на участке «Енисейский» и пример непрекращающегося поступления через целевой интервал воды массива в скважину отмечены в разделе XLI [22].

Картина должна быть дополнена учетом обстоятельства, что сложный по структурно-тектоническим характеристикам гнейсовый «полуостров» контактирует по всему интервалу глубин с сотнями метров юрских отложений, содержащих водонасыщенные (возможно, водонапорные) высокой проницаемости слои. Возможен механизм питания глубинной водой целевого интервала. Факт существования в гнейсах участка «Енисейский» восходящего потока подземных вод может получить еще одно обоснование. Предстоящая геологоразведка должна быть дополнена глубоким бурением (не менее 1 км) не только по гнейсам, но и по юре (причем как вдоль восточной границы пород, так и по западной).

Для полигона «Северный», вмещающие пласты-коллекторы скальных пород которого и участка «Енисейский» однотипны, не исключена возможность гидрологической связи поверхностных вод с областью разгрузки загрязненных подземных горизонтов [25]. Эти же породы средней трещиноватости, вмещающие один из подземных объектов ГХК, содержат жильные включения, многочисленные (мощностью до 0,5 м) зоны рассланцевания и дробления. Однако имеется и зона дробления мощностью до 40 м, а также мощная зона рассланцевания [26]. Утверждают важное обстоятельство: достоверные исторические и современные инструментальные данные о сейсмичности этого района отсутствуют [27].

Анализ изучения участка «Енисейский» выявил целый ряд существенных пробелов и неопределенностей в информации о геологической среде, которая необходима согласно существующим нормативным документам [28–30]¹. Например, глубокие скважины были пройдены за пределами структурного тектонического блока, в котором запланировано размещение ПГЗРО. Отсутствует описание керна скважин, нет достоверной геологической карты земной поверхности масштаба 1:2000. Кроме этого, часть экспериментального материала, в частности данных геофизического изучения участка, была утеряна и т.д.²

Район участка «Енисейский» относится к зоне активного орогенеза, т.е. процесс его формирования как горного сооружения еще не закончен. Поэтому «подходящие» гидрогеологические условия и характеристики в таком блоке, существующие на момент начала строительства ПГЗРО, не могут гарантироваться на весь проектируемый срок его эксплуатации. За длительный период геодинамические процессы способны кардинально изменить гидрогеологический режим в геологической среде, но наибольшую угрозу представляет вероятность тектонической деструкции структурно-тектонических блоков. Участок «Енисейский» располагается на западной границе Нижнеканского гранитоидного массива и вмещающих его докембрийских толщ гнейсов, точнее – полностью в гнейсах вблизи границы с гранитами [30, рис. 2]. Такие зоны экзоконтактов магматических тел, как правило, отличаются повышенной трещиноватостью и структурной неоднородностью.

Тектоническая мотивация выбора участка «Енисейский» до конца не обоснована: разломы на данной территории в настоящее время являются активными, скорости относительных вертикальных движений и зоны динамического влияния активных разломов слабо изученные, сравнительно с нор-

¹ Федеральные нормы и правила: Оценка исходной сейсмичности района и площадки размещения объекта использования атомной энергии при инженерных изысканиях и исследованиях. РБ-019-17; Размещение ядерных установок ядерного топливного цикла. Основные критерии и требования по обеспечению безопасности. НП-050-03.

² Там же.

мами, возможно, велики [28–30]. Согласно НП-055-14 (п. 53), породный массив должен быть однородной структуры и низкой трещиноватости; целесообразно размещение площадки в районах, не испытывающих интенсивные тектонические движения.

«На участке выделено два блока – 37 и 38. Но 38-й отвергли из-за наличия водонасыщенных угленосных месторождений» [14]. Впервые применительно к участку «Енисейский» дали повод задуматься о возможном опасном соседстве (природные вода и метан с наложенным радиолизом от РАО). Пласты угля повышенной водопроницаемости (наряду с другими недостатками) ранее фиксировали вблизи полигона «Северный» [31].

Юрские отложения Западно-Сибирского плитного комплекса вторгаются на сопряженную территорию достаточно близко от площадки ПГЗРО (восточнее) в виде широкой долины Черского (а также юго-западнее) [12, с. 13]. К возможности проявлений угля на участке «Енисейский» и в окрестностях (на путях питания/разгрузки подземных вод) с разных позиций (полезные ископаемые, подземные пожары, геомеханика, гидрогеология) необходимо относиться очень внимательно. Это ведь промышленная территория ГХК в контурах Канско-Ачинского угольного бассейна, Приенисейского горнопромышленного района [32]. И соседние с ней районы Красноярского края (Сухобузимский, Березовский, Емельяновский) – часть угленосной (с проявлениями урана) провинции [33, табл. 25 и 27]. А статус ЗАТО вряд ли предполагал проведение здесь ранее изысканий по части полезных ископаемых. Возможно, по этой причине зафиксировано мнение в протоколе ГКЗ, что на участке «Енисейский» полезные ископаемые отсутствуют. Механизм появления юрских отложений, с которыми связаны проявления углей, в пределах ЗАТО Железногорск объясняют нам карты МОЛ и статья Р. М. Лобацкой [34].

Месторождения угля с водой – весомое основание для отказа от площадки/участка ПГЗРО, а не только от отдельного блока! В протоколе ГКЗ информация о углях не замечена. Необходимы, видимо, ревизия представленных на экспертизу геологических данных и дальнейшее изучение массива на стадии детальной разведки до начала горных работ.

Создание российского ПГЗРО и соответствующее пользование недрами позиционируют как абсолютно безопасное дело – «стройка века и на века» [35, 36]. Такая позиция – результат ошибочных взглядов, сформированных ранее: «Главной гарантией является гидрогеологическая характеристика горной породы, которая образовалась в архей-протерозойский период развития Земли (от 2500 до 541 ± 1 млн лет назад). За это время разрушению подверглись только первые 30 м пород массива (и стали доступны для проникновения поверхностных вод). По прогнозам вода с поверхности попадет в зону размещения отходов не ранее, чем через 15 миллионов лет. Срок потенциальной опасности объекта оценивается в 2 миллиона лет. Геологическая среда является основным барьером по обеспечению экологической безопасности. Зона размещения объекта находится в горных породах (водонепроницаемых с застойным режимом трещинно-поровых вод). Движение подземных вод носит нисходящий характер и не выходит на поверхность» [37].

Однако в последние годы представления о геологических условиях участка «Енисейский» и их соответствии существующим нормам, с учетом требований Закона о недрах, коренным образом меняются [20, 21, 38, 39].

Взгляд за пределы участка «Енисейский», территории ГХК, района работ и нашего времени

Российский ПГЗРО – природно-техногенная генерирующая энергию геосистема сложного внутриконтинентального перехода, входящая в эффективный водосборный бассейн Енисея. А если это будет прототипом/надеждой для дальнейшего развития идеи (в каком направлении?) за рубежом? В настоящее время сброс жидких РАО Фукусимы в океан все более приобретает черты плановой неизбежной практики. И ураганы самовольно моют территорию. Но здесь ждут и много твердых РАО [40].

При демонтаже/выводе из эксплуатации ядерных объектов Японии, Республики Корея и КНДР (серьезный рынок полного цикла услуг в части ядерных технологий «бэк-энд») где-то будут хоронить значительные объемы образующихся при этом РАО. Где? Если в национальном варианте, то фактически – в еще более сложной переходной зоне «суша-море». Других территорий у этих стран нет. Для такой переходной зоны были и российские предложения: научные и управленческие [41, 42]. Этот вариант, конечно, не будет аналогом Балтики, где побережье и дно (граниты) осваивают для ПГЗРО Швеция и Финляндия. И скорей всего потребуется обоснование или обоснованный

запрет (например, во имя защиты общего Тихого океана) при, вероятно, внимательном постоянном сравнении с потенцией амбициозного (конкурентные преимущества [5] и возможность изменения статуса ПГЗРО [43]) Енисейского проекта. Правда, в том числе и при сравнении относительно механизма триггерной активизации «спящих» негативных факторов под воздействием деформационных тектонических волн от удаленных сильных землетрясений [44].

ПГЗРО – вечность в рамках жизни человечества. Но пока концепция его создания и реальные дела вряд ли учитывают нарождающиеся процессы даже ближайших ста лет. Прогнозы долговременной обеспеченности углеводородами (традиционные нефть и газ, неорганические/глубинные нефть и газ, газогидраты), новые энергетические технологии (на основе возобновляемых источников, термо-ядерные и др.), экологические трудности переработки ОЯТ, принцип нераспространения – все это и, возможно, другое может достаточно быстро обернуться ненужностью/невозможностью массовой переработки ОЯТ и общемировой потребностью его прямого захоронения (и сейчас уже значимого). Соответственно, требования к ПГЗРО резко повысятся.

В контексте вечности создаваемого объекта ЯТЦ необходимо глубокое понимание человека и общества. Например, на базе художественного, религиозного и философского наследия Ф. М. Достоевского и опыта исследователей его творчества [45].

Послесловие

При создании ПГЗРО на всех этапах работ безусловным и обязательным является применение и исполнение ст. 12 (п. 2) Закона № 190-ФЗ «Об обращении с РАО».

Многие аспекты безопасности федерального пункта захоронения радиоактивных отходов нуждаются в дополнительном надежном доказательстве на базе разведочной стадии геологического изучения площадки, а также законодательства, норм и правил в области использования и охраны недр. Эти мысли никем не отрицаются, но и не порождают, к сожалению, адекватного действия по их реализации.

При утверждении «стройка века и на века» геология дела (главный гарант масштабной безопасности) должна быть изучена полно и безупречно. Этот этап работ уж совсем не должен сопровождаться комплексом нарушений, как предшествующий [46]. Ведь в ИБРАЭ РАН (научное руководство Енисейским проектом) не исключают, «что спустя несколько десятков лет мы вынуждены будем... искать другое место» [47]. Хотя, например, комиссия по экологии Общественного совета Госкорпорации «Росатом» вообще не видит какие-либо работы по Красноярскому ПГЗРО приоритетными в 2021 г. [48].

Материалы выбора, изучения и обоснования района и площадки размещения ПГЗРО (геологические задания и проекты на выполнение поисковой и оценочной стадий изучения участка «Енисейский», планируемое геологическое задание на разведочную стадию, геологические отчеты по работам предварительных стадий, протоколы ГКЗ по рассмотрению работ, прежде всего, № 4523 от 03-02-2016), документ «Стратегия создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов», проект ПГЗРО, лицензии на изучение массива участка «Енисейский» с земной поверхности и изнутри (из ПИЛ), создание ПГЗРО и захоронение РАО как отражающие все отдельные и важные этапы пользования недрами должны для повышения безопасности неукоснительно соответствовать «Закону о недрах» (с сопутствующими документами), НП-055-14, «Закону о лицензировании» и, возможно, НП-050-03, которыми в дело давно введены географо-горно-геологические критерии, по факту недостаточно применявшиеся до сих пор, а также научному подходу к решению проблемы и отобранном временем лучшим образцам международного опыта [2, 20, 21].

Целесообразна не только геологическая (как предлагалось в [38, 39] и других публикациях), но отдельно и правовая экспертиза (исследование документов, их анализ на соответствие формы и содержания действующему законодательству РФ, как в настоящий момент, так и в ретроспективе).

Гнейсы как таковые, глобальной (плита-платформа) и локальной (древние гнейсы и относительно молодая интрузия гранитов вблизи мощных еще более молодых юрских осадков) переходных зон, ограниченные в размерах, назначенные без должного для национального ПГЗРО выбора, без детальной разведки, без возможности профессиональной и объективной оценки безопасности, с выявленными негативными инженерно-геологическими характеристиками, уже нагруженные стратегическими объектами, в контуре угольного бассейна/провинции месторождений полезных ископаемых, в центре страны, вблизи крупной реки и города-миллионника Красноярска (а не в приграничной пустыне, как в США и Китае), не соответствующие по ряду критериев требованиям зако-

подательства и технических норм, международным подходам! А есть ли вообще подобное в мировой практике выбора площадок для крупных захоронений РАО наивысшей опасности? Автор настоящей статьи не знает таких примеров.

Полезно, вероятно, выйти из ситуации сложной тесноты, отказаться от идеи «под одной крышей», найти для федерального (!) ПГЗРО другую территорию/площадку – разгрузить ЗАТО Железнодорожск и промышленную территорию ГХК («фундамент»). Это может быть модернизацией планов ради сохранения главных смыслов идеи надежного ПГЗРО на территории России и главных объектов ГХК.

Приложение

О возможной принадлежности ПГЗРО к объектам ядерного топливного цикла и применимости дополнительных требований к району и площадке его размещения

ВОПРОСЫ:

1. Имеет ли по факту ПГЗРО участка «Енисейский» статус ядерной установки, сооружения, комплекса ЯТЦ?

2. Распространяется ли на ПГЗРО участка «Енисейский» действие документа НП-050-03?

НП-050-03. Размещение ядерных установок ядерного топливного цикла. Основные критерии и требования по обеспечению безопасности. Действующий документ.

Настоящие федеральные нормы и правила устанавливают основные критерии и требования по обеспечению безопасности к районам размещения и площадкам ядерных установок ядерного топливного цикла.

1.1. Настоящий нормативный документ распространяется на ЯУ ЯТЦ – сооружения, комплексы, установки для производства и переработки ядерного топлива и ядерных материалов, включая установки по конверсии плутония оружейного качества, производству плутонийсодержащего топлива, обращению со свежим и отработавшим плутонийсодержащим топливом и образующимися при этом радиоактивными отходами, за исключением объектов, добывающих уран.

Проекция положений НП-050-03 на захоронение РАО в ЗАТО Железнодорожск

1. Захоронение РАО является завершающей стадией обращения с этими отходами.

2. Действующие и планируемые пункты захоронения РАО (ПГЗРО ПУГРов, ПГЗРО на участке «Енисейский» и полигон «Северный») предназначены для захоронения РАО от деятельности ГХК по обращению с ОЯТ, включая переработку.

3. Для этих пунктов захоронения РАО выполняются исследования и необходимы Заключение по ядерной безопасности их функционирования (например, ПГЗРО участка «Енисейский» [49, 50], полигон «Северный»¹). И даже для РАО 3 и 4 классов Заключение по ядерной безопасности необходимо².

При этом (Техническое задание ФГУП «НО РАО» в [49]) разработка Заключение по ядерной безопасности на проект ПГЗРО для класса 1 регламентирована требованиями п. 8.3, 9.1.5–9.1.7 стандарта СТО 95 12001–2016 «Основные правила ядерной безопасности при производстве, использовании, переработке, хранении и транспортировании ядерных делящихся материалов (ПБЯ-06-00-2016)» и пунктом 4.15 федеральных норм «Правила ядерной безопасности для объектов ядерного топливного цикла» НП-063-05. А Заключение по ядерной безопасности должно соответствовать требованиям СТО 95 12001–2016 (ПБЯ-06-00-2016), НП-063-05, НП-069-14, НП-093-14 и НП-055-14, т.е. в данном случае ПГЗРО (даже и уже по НП-055-14 «Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности», соответственно ТЗ ФГУП «НО РАО»).

Примечательно, что в создании НП-050-03 принимали участие сотрудники ФГБУН «Геофизический центр РАН», работающие с 2005 г. на промышленной территории ГХК и сопряженных площадках по тематике геодинамической безопасности как ПГЗРО, так и ядерно-опасных объектов ГХК [28].

Для пунктов захоронения РАО оценку ядерной безопасности регламентируют также федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Требования к составу и со-

¹ ТЗ 319/127 от 05.03.21 на оказание услуг по разработке заключения по ядерной безопасности... / ФГУП «НО РАО», Железнодорожский филиал (https://vk.com/wall-66070450_7020).

² ПЛАН-ГРАФИК закупок товаров, работ, услуг для обеспечения федеральных нужд на 2017 год / ФГУП «НО РАО» (п. 168, <https://zakupki.gov.ru/epz/orderplan/printForm/view.html?printFormId=9721126>).

держанию отчета по обоснованию безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов» (НП-100-17)¹.

4. В Перечне нормативных документов на сайте ФГУП «НО РАО» обозначены²:

Общие положения обеспечения безопасности объектов ядерного топливного цикла. НП-016-05 (ОПБ ОЯТЦ);

Основные правила учета и контроля ядерных материалов НП-030-12;

Положение о порядке расследования и учета нарушений в работе объектов ядерного топливного цикла. НП-047-11. Ростехнадзор, 2011;

Правила обеспечения безопасности при выводе из эксплуатации ядерных установок ядерного топливного цикла. НП-057-04. Ростехнадзор, 2004;

Требования к содержанию плана мероприятий по защите персонала в случае аварии на предприятии ядерного цикла. НП-077-06. Ростехнадзор, 2006;

Положение о порядке объявления аварийной готовности, аварийной обстановки и оперативной передачи информации в случае радиационно опасных ситуаций на предприятиях ядерного топливного цикла. НП-078-06. Ростехнадзор, 2006;

Размещение ядерных установок ядерного топливного цикла. Основные критерии и требования по обеспечению безопасности. НП-050-03. Госатомнадзор, 2003.

ФГУП «НО РАО» предписано выполнять нормы работ применительно к ядерным сооружениям, комплексам и установкам ЯТЦ.

5. ПГЗРО на участке «Енисейский» создается для поддержки решения задачи высшего приоритета – переработки ОЯТ. «Важно, что во всех случаях перспективные ядерные топливные циклы должны быть обеспечены надежной и безопасной системой удаления избыточной активности, являющейся в прямом смысле не подлежащими дальнейшему использованию материалами, т.е. радиоактивными отходами. Самые опасные из них нуждаются в размещении в геологическом объекте» [51]. Участником реализации Стратегии создания ПГЗРО является НТС № 5 Госкорпорации «Росатом» «Завершающая стадия ядерного топливного цикла».

6. Видимо, в номенклатуре планируемых к захоронению в федеральном ПГЗРО Железногорска заметное место будут занимать и РАО 1 и 2 классов опасности других комбинатов Росатома, где выполняются работы со свежим или отработавшим ядерным топливом.

7. Действуют также, например, при выводе из эксплуатации открытого бассейна-хранилища РАО № 365 ГХК [52]:

НП 016-05 «Общие положения обеспечения (ядерной и радиационной) безопасности объектов ядерного топливного цикла (ОПБ ОЯТЦ)»;

НП-070-06 «Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов объектов ядерного топливного цикла»;

НП-077-06 «Требования к содержанию плана мероприятий по защите персонала в случае аварии на предприятии ядерного топливного цикла»;

НП-057-17 «Правила обеспечения безопасности при выводе из эксплуатации ядерных установок ядерного топливного цикла» (с. 20, 142).

Вывод по важному вопросу схемы работ в томе 1:

Реализация намечаемой деятельности по выбранному варианту вывода из эксплуатации «Ликвидация объекта ядерного топливного цикла, реализуемая способом «Немедленная ликвидация объекта ЯТЦ» при безусловном соблюдении ядерной и радиационной безопасности является наилучшим вариантом (с. 22).

8. Свидетельством Госкорпорации «Росатом» от 07.03.2012 № ГК-С008 ФГУП «НО РАО» было признано организацией, пригодной эксплуатировать ядерные установки.

Заключение

Пожалуй, необходимо признать:

1. ДА, ПГЗРО НА УЧАСТКЕ «ЕНИСЕЙСКИЙ» ЯВЛЯЕТСЯ ЯДЕРНЫМ ОБЪЕКТОМ (УСТАНОВКОЙ, СООРУЖЕНИЕМ, КОМПЛЕКСОМ) ЯТЦ: 1. Напрямую, соответственно п.1.1

¹ Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Требования к составу и содержанию отчета по обоснованию безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов» (НП-100-17).

² Нормативные документы / ФГУП «НО РАО». URL: <http://www.norao.ru/about/docs/>

НП-050-03; 2. Аналогично статусу всех/других объектов обращения с РАО на промышленной территории ГХК, технологических спутников ГХК, на которые распространяются нормы и правила для ЯУ ЯТЦ и для которых оформляются Заключения по ядерной безопасности; 3. Соответственно термину МАГАТЭ в контексте Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами ([10], ядерная установка nuclear facility, с. 284, п. 3); 4. Соответственно комплексному смыслу применяемого политологами/политиками термина «ядерная безопасность» [53].

П. ДА, ДЕЙСТВИЕ НП-050-03 НА ПГЗРО участка «Енисейский» РАСПРОСТРАНЯЕТСЯ.

Список литературы

1. Экономика ядерного топливного цикла. М., 1999.
2. Комлев В. Н. Глубинный ядерный могильник. URL: <https://proza.ru/2020/05/10/812>.
3. Стратегический мастер-план исследований в обоснование безопасности ПГЗРО в Нижнеканском массиве. URL: <http://www.ibrae.ac.ru/contents/451/>
4. Обоснование долговременной безопасности захоронения ОЯТ и РАО на 10 000 и более лет: методология и современное состояние. URL: <http://radwaste-journal.ru/docs/116/prepr2019i03.pdf>
5. Стратегия создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов. URL: [http://en.ibrae.ac.ru/docs/Radwaste_Journal_2\(3\)18/114_120_Strategy.pdf](http://en.ibrae.ac.ru/docs/Radwaste_Journal_2(3)18/114_120_Strategy.pdf)
6. Ковальчук А. А. Национальный оператор по обращению с РАО: основы, планы и реализация деятельности по захоронению РАО // Имплементация Соглашения об информационном взаимодействии государств – участников СНГ при перемещении радиоактивных источников : программа Междунар. науч.-практ. семинара и технического тура для участников Международного научно-практического семинара (ФГУП «НО РАО», 5 декабря 2018 г.). М. : Комиссия государств-участников Содружества Независимых Государств по использованию атомной энергии в мирных целях. URL: <http://sng-atom.com>
7. Обзор зарубежных практик захоронения ОЯТ и РАО. М., 2015. URL: <http://xn---2030-bwe0hj7au5h.xn--p1ai/upload/iblock/d5a/d5a48e55bcd4d5c8df15fe4a91d08723.pdf>
8. Особые радиоактивные отходы. М., 2015. URL: <http://xn---2030-bwe0hj7au5h.xn--p1ai/upload/iblock/cc5/cc536086a1af77aab435d88b1581f79a.pdf>
9. Материалы обоснования лицензии, МОЛ, на размещение и сооружение не относящегося к ядерным установкам пункта хранения РАО, создаваемого в соответствии с проектной документацией на строительство объектов окончательной изоляции РАО (Красноярский край, Нижне-Канский массив) в составе подземной исследовательской лаборатории. Т. 1. С. 13. URL: <http://www.norao.ru/ecology/mol>
10. Глоссарий МАГАТЭ по вопросам безопасности. 2007. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/IAEASafetyGlossary2007/Glossary/SafetyGlossary_2007r.pdf
11. Красильников В. Мнение эксперта / ФЦП ЯРБ-2: Федеральная целевая программа «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2030 года». URL: <http://xn---2030-bwe0hj7au5h.xn--p1ai/expertise/expert-opinion/detail.php?ID = 2005> ; <http://xn---2030-bwe0hj7au5h.xn--p1ai/society/news/v-no-rao-rasskazali-o-spetsifike-sozdaniya-podzemnoy-laboratorii-v-nizhnekanskom-massive>
12. Андерсон Е. Б., Даценко В. М., Кирко В. И. [и др.] Результаты комплексных геологических исследований Нижнеканского массива для обоснования возможности его использования для захоронения отвержденных радиоактивных отходов // Исследования гранитоидов Нижнеканского массива для захоронения РАО. СПб., 1999. С. 14–23.
13. Лобанов Н. Ф. Создание подземной исследовательской лаборатории в Нижнеканском массиве скальных пород: выбор участка и современное состояние работ. URL: http://www.atomeco.org/mediafiles/u/files/Prezentation_31_10_2013/Lobanov.pdf
14. Материалы обоснования лицензии (включая материалы оценки воздействия на окружающую среду) на осуществление деятельности в области использования атомной энергии «Эксплуатация пункта хранения ядерных материалов. Стационарное сооружение, предназначенное для хранения ядерных материалов – водоохлаждаемое хранилище облученных тепло выделяющих сборок ядерных реакторов типа ВВЭР-1000, содержащих отработавшее ядерное топливо». URL: <https://sibghk.ru/images/services/docpack/2021/05/001.pdf>
15. В подземной лаборатории пройдет более 150 исследований // Город и горожане. Железногорск. 2017. URL: <http://www.gig26.ru/news/reklama/nid-11876.html>
16. Скала / ФГУП «Горно-химический комбинат». URL: <https://sibghk.ru/images/pdf/skala/skala.pdf>
17. Способы строительства ПГЗРО в разных странах: США (URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2020/02/28/101784>), Китае (URL: <https://bezrao.ru/n/4384>), Швеции (URL: <https://bezrao.ru/n/3381>), Финляндии (URL: <https://bezrao.ru/n/72>) и России (URL: <http://bezrao.ru/n/1038>; <https://www.atomic-energy.ru/news/2017/01/11/65022>).
18. Гупало Т.А. Перспективы развития технологий подземной изоляции радиоактивных отходов в России. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-razvitiya-tehnologiy-podzemnoy-izolyatsii-radioaktivnyh-othodov-v-rossii/viewer>

19. Комлев В. Н. Рецензия на брошюру А. Никитина о подземной исследовательской лаборатории // Вестник ТюмГУ. Экология и природопользование. 2019. Т. 5, №1. С. 141–153.
20. SOSновый Бор, ядерный кластер южного берега Финского залива и уроки Чернобыля. URL: <http://decommission.ru/> от 02.05.2021.
21. Комлев В. Н. Глубинное захоронение радиоактивных отходов: требования и реальность // Маркшейдерский вестник. 2020. № 6. С. 61.
22. Комлев В. Н. Закон о недрах и радиационная безопасность страны. URL: <https://proza.ru/2020/09/20/903>
23. Васильев Н. Ф. Отзыв на статью // Уральский геологический журнал. 2021. № 1. С. 58–59.
24. Баринов А. С., Ткаченко А. В., Спешилов С. Л. Глубинная закачка жидких радиоактивных отходов. URL: http://www.atomeso.org/mediafiles/u/files/Prezentation_31_10_2013/Speshilov.pdf
25. Вакуловский С. М. Оценка радиационного воздействия Горно-химического комбината на экосистему Енисей // Безопасность Окружающей Среды. 2008. № 2: Радиационный мониторинг. С. 40–43.
26. Зверев А.Б. Результаты натурных исследований устойчивости камерных сооружений подземной атомной станции // Тезисы докладов международной конференции «Использование подземного пространства страны для повышения безопасности ядерной энергетики», Апатиты, 1992.
27. Дзедобоев Б. А., Гвишиани А. Д., Белов И. О. [и др.]. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений на основе алгоритма с единственным чистым классом обучения: I. Алтай–Саяны–Прибайкалье. $M \geq 6.0$ // Физика Земли. 2019. № 4. С. 33–47.
28. Татаринов В. Н., Морозов В. В., Колесников И. Ю. [и др.]. Устойчивость геологической среды как основа безопасной подземной изоляции радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива // Надежность и безопасность энергетики. 2014. № 1. С. 25–29.
29. Колесников И. Ю., Морозов В. Н., Татаринов В. Н., Татарина Т. А. Напряженно-деформированное энергетическое районирование геологической среды для размещения экологических инфраструктурных объектов // Инноватика и экспертиза. 2017. № 2. С. 77–88.
30. Морозов В. Н., Татаринов В. Н., Кафтан В. И., Маневич А. И. Подземная исследовательская лаборатория: геодинамические и сейсмотектонические аспекты безопасности // Радиоактивные отходы. 2018. № 3. С. 16–29.
31. Гвишиани А. Д., Татаринов В. Н. Системная оценка факторов, определяющих устойчивость геологической среды при захоронении высокоактивных радиоактивных отходов // Вестник НЯЦ РК. 2019. № 2. С. 44–50.
32. Красноярский горнохимический комбинат (ГХК). URL: <http://www.yabloko.ru/Publ/Atom/atom00016.html>
33. Клер В. Р. Канско-Ачинский буроугольный бассейн. URL: http://www.mining-enc.ru/images/k/4/ kan-skoachinskij_ugolnyj_bassejn_resize.jpg
34. Схема территориального планирования Красноярского края. URL: http://minstroy.krskstate.ru/dat/bin/art_attach/7633_9_stp_kk_tom_vi_prilojeniy_castx_1.pdf
35. Лобацкая Р. М. Разломно-блоковая структура Байкало-Енисейского разлома в районе эксплуатации объектов ядерной энергетики // Геодинамика и тектоника. 2014. № 5. С. 547–562.
36. Стройка века и на века / ФГУП «НО РАО». URL: <http://norao.ru/press/multimedia/2495/>
37. Красноярский «могильник»: разговор начистоту. URL: <http://online.newslab.ru/noran>
38. Комлев В. Н. Геологическое изучение площадки российского пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (Первый шаг – всегда самый сложный) // Маркшейдерский вестник. 2021. № 1. С. 48–54.
39. Комлев В. Н. К обоснованию пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (рецензия на две статьи о геологическом изучении места) // Уральский геологический журнал. 2021. № 1. С. 53–58.
40. Утилизация радиоактивных отходов в Фукусиме обойдется недешево. URL: <http://bezrao.ru/n/4296>
41. Курильский остров Симушир может стать хранилищем радиоактивных отходов. URL: <https://ecosakh.ru/category/glavnaya/raze/simushir/>; <https://sakhalin.info/news/9807>
42. Радиоактивные отходы превратят в минералы. URL: <https://www.nkj.ru/news/18950/>
43. Возможность изменения статуса ПГЗРО. URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2021/06/08/114625> ; <https://www.atomic-energy.ru/news/2021/06/01/114399> ; <http://bezrao.ru/n/4437> ; <https://www.atomic-energy.ru/news/2021/04/22/113523> ; <http://www.atomic-energy.ru/interviews/2017/01/16/71717> ; <http://www.atomic-energy.ru/interviews/2018/03/15/84085>
44. Гарагаш И. А., Лобковский Л. И. Деформационные тектонические волны как возможный триггерный механизм активизации эмиссии метана в Арктике // Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11, № 41. С. 42–50.
45. Комлева Е. Ядерное человечество и Ф. М. Достоевский. URL: <http://www.mstu.edu.ru/science/actions/conferences/files/gum2011-9.pdf>
46. Ковач Т. Про пункт захоронения высокоактивных радиоактивных отходов в Железногорске. URL: <https://groups.google.com/g/enwl/c/PcnanPXU55Y>
47. Представители Российской академии наук ответили на вопросы о подземной лаборатории. URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2020/07/16/105480>
48. В Москве прошло очередное заседание Общественного совета Росатома. URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2021/03/26/112659>

49. Веселов М. Могильник Росатома: лицензия есть, стройка идет, заключения о безопасности – нет. URL: https://babr24.com/n2f/2020/6/_na_razrabotku_zakluceniy_po_yrb_rao_1_klassa.pdf ; <https://babr24.com/kras/?IDE = 201692>
50. Бейгул В. П., Мартынов К. В., Захарова Е. В, Еремин Е. А. Анализ процессов локализации делящихся радионуклидов в технологической скважине для обоснования ядерной безопасности глубинного захоронения радиоактивных отходов. URL: <https://www.atomic-energy.ru/technology/99896>
51. Крюков О. В. Краткий комментарий к утверждению «Стратегии создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов». URL: <http://radwaste-journal.ru/docs/journals/3/016i017ikryukov-16-17.pdf>
52. Вывод из эксплуатации открытого бассейна-хранилища радиоактивных отходов № 365 ФГУП «ГХК», том I. URL: <https://sibghk.ru/images/services/docspack/2021/04/001.pdf>
53. Золотухин И. Н., Бобыло А. М. Ядерная безопасность в Юго-Восточной Азии: вызовы и направления сотрудничества // Ойкумена. Регионоведческие исследования. 2020. № 4. С. 137–147.

References

1. *Ekonomika yadernogo toplivnogo tsikla = Economics of the nuclear fuel cycle*. Moscow, 1999. (In Russ.)
2. Komlev V.N. *Glubinnyy yadernyy mogil'nik = Deep nuclear burial ground*. (In Russ.). Available at: <https://proza.ru/2020/05/10/812>
3. *Strategicheskij master-plan issledovaniy v obosnovanie bezopasnosti PGZRO v Nizhnekanskom massive = Strategic master plan of research to substantiate the safety of PGZRO in the Nizhnekansk massif*. (In Russ.). Available at: <http://www.ibrae.ac.ru/contents/451/>
4. *Obosnovanie dolgovremennoy bezopasnosti zakhoroneniya OYaT i RAO na 10 000 i bolee let: metodologiya i sovremennoe sostoyanie = Substantiation of long-term safety of SNF and RW disposal for 10,000 years or more: methodology and current state*. (In Russ.). Available at: <http://radwaste-journal.ru/docs/116/prepr2019i03.pdf>
5. *Strategiya sozdaniya punkta glubinnogo zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov = Strategy for creating a deep disposal site for radioactive waste*. (In Russ.). Available at: [http://en.ibrae.ac.ru/docs/Radwaste_Journal_2\(3\)18/114_120_Strategy.pdf](http://en.ibrae.ac.ru/docs/Radwaste_Journal_2(3)18/114_120_Strategy.pdf)
6. Koval'chuk A.A. National operator for the management of radioactive waste: fundamentals, plans and implementation of activities for the disposal of radioactive waste. *Implementatsiya Soglasheniya ob informatsionnom vzaimodeystvii gosudarstv – uchastnikov SNG pri peremeshchenii radioaktivnykh istochnikov: programma Mezhdunar. nauch.-prakt. seminarov i tekhnicheskogo tura dlya uchastnikov Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo seminarov (FGUP «NO RAO», 5 dekabrya 2018 g.) = Implementation of the Agreement on information interaction of the CIS member states during the movement of radioactive sources : the program of International Scientific and practical. seminar and technical tour for participants of the International Scientific and Practical Seminar (FSUE "NO RAO", December 5, 2018)*. Moscow: Komissiya gosudarstv-uchastnikov Sodruzhestva Nezavisimykh Gosudarstv po ispol'zovaniyu atomnoy energii v mirnykh tselyakh. (In Russ.). Available at: <http://sng-atom.com>
7. *Obzor zarubezhnykh praktik zakhoroneniya OYaT i RAO = Review of foreign practices of SNF and RW disposal*. Moscow, 2015. (In Russ.). Available at: <http://xn---2030-bwe0hj7au5h.xn--p1ai/upload/iblock/d5a/d5a48e55bcd4d5c8df15fe4a91d08723.pdf>
8. *Osobyje radioaktivnye otkhody = Special radioactive waste*. Moscow, 2015. (In Russ.). Available at: <http://xn---2030-bwe0hj7au5h.xn--p1ai/upload/iblock/cc5/cc536086a1af77aab435d88b1581f79a.pdf>
9. *Materialy obosnovaniya litsenzii, MOL, na razmeshchenie i sooruzhenie ne odnosyashchegosya k yadernym ustanovkam punkta khraneniya RAO, sozdavaemogo v sootvetstvii s proektnoy dokumentatsiey na stroitel'stvo ob"ektov okonchatel'noy izolyatsii RAO (Krasnoyarskiy kray, Nizhne-Kanskiy massiv) v sostave podzemnoy issledovatel'skoy laboratorii = Materials substantiating the license, they say, for the placement and construction of a non-nuclear RW storage facility, created in accordance with the project documentation for the construction of RW final isolation facilities (Krasnoyarsk Territory, Nizhne-Kansky Massif) as part of a subsurface research laboratory*. 1:13. (In Russ.). Available at: <http://www.norao.ru/ecology/mol>
10. *Glossariy MAGATE po voprosam bezopasnosti. 2007 = The IAEA Safety Glossary*. (In Russ.). Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/IAEASafetyGlossary2007/Glossary/SafetyGlossary_2007r.pdf
11. Krasil'nikov V. *Mnenie eksperta = Expert opinion*. FTsP YaRB-2: Federal'naya tselevaya programma «Obespechenie yadernoy i radiatsionnoy bezopasnosti na 2016–2020 gody i na period do 2030 goda». (In Russ.). Available at: <http://xn---2030-bwe0hj7au5h.xn--p1ai/expertise/expert-opinion/detail.php?ID = 2005>; <http://xn---2030-bwe0hj7au5h.xn--p1ai/society/news/v-no-rao-rasskazali-o-spetsifike-sozdaniya-podzemnoy-laboratorii-v-nizhnekanskom-massive>
12. Anderson E.B., Datsenko V.M., Kirko V.I. [et al.] The results of comprehensive geological studies nizhnegorskogo array to justify its use for the burial of the cured-tion of radioactive waste. *Issledovaniya granitoidov Nizhnekanskogo massiva dlya zakhoroneniya RAO = Studies of granitoids nizhnegorskogo array for the disposal of radioactive waste*. Saint Petersburg, 1999:14–23. (In Russ.)

13. Lobanov N.F. *Sozdanie podzemnoy issledovatel'skoy laboratorii v Nizhnekanskom massive skal'nykh porod: vybor uchastka i sovremennoe sostoyanie rabot = The construction of an underground research laboratory in Nizhnekamska the solid rock: site selection and contemporary works.* (In Russ.). Available at: http://www.atomeco.org/mediafiles/u/files/Prezentetion_31_10_2013/Lobanov.pdf
14. *Materialy obosnovaniya litsenzii (vkluychaya materialy otsenki vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu) na osushchestvlenie deyatel'nosti v oblasti ispol'zovaniya atomnoy energii «Ekspluatatsiya punkta khraneniya yadernykh materialov. Statsionarnoe sooruzhenie, prednaznachennoe dlya khraneniya yadernykh materialov – vodookhlazhdaemoe khranilishche obluchennykh teplovydelyayushchikh sborok yadernykh reaktorov tipa VVER-1000, soderzhashchikh otrabotavshee yadernoe toplivo» = Materials substantiating the license (including environmental impact assessment materials) for activities in the field of nuclear energy use "Operation of a nuclear materials storage facility. A stationary facility designed for the storage of nuclear materials is a water-cooled storage of irradiated fuel assemblies of VVER-1000 nuclear reactors containing spent nuclear fuel".* (In Russ.). Available at: <https://sibghk.ru/images/services/docpack/2021/05/001.pdf>
15. More than 150 studies will take place in the underground laboratory. *Gorod i gorozhane. Zheleznogorsk = City and citizens. Zheleznogorsk.* 2017. (In Russ.). Available at: <http://www.gig26.ru/news/reklama/nid-11876.html>
16. *Skala = Rock.* FGUP «Gorno-khimicheskiy kombinat». (In Russ.). Available at: <https://sibghk.ru/images/pdf/skala/skala.pdf>
17. *Sposoby stroitel'stva PGZRO v raznykh stranakh: SShA = Methods of construction of PGZRO in different countries: USA.* (In Russ.). (Available at: <https://www.atomic-energy.ru/news/2020/02/28/101784>), *Kitae* (Available at: <https://bezrao.ru/n/4384>), *Shvetsii* (Available at: <https://bezrao.ru/n/3381>), *Finlyandii* (Available at: <https://bezrao.ru/n/72>) i *Rossii* (Available at: <http://bezrao.ru/n/1038>; <https://www.atomic-energy.ru/news/2017/01/11/65022>).
18. Gupalo T.A. *Perspektivy razvitiya tekhnologiy podzemnoy izolyatsii radioaktivnykh otkhodov v Rossii = Prospects for the development of technologies for underground isolation of radioactive waste in Russia.* (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-razvitiya-tehnologiy-podzemnoy-izolyatsii-radioaktivnyh-otkhodov-v-rossii/viewer>
19. Komlev V.N. Review of A. Nikitin's brochure about the underground research laboratory. *Vestnik TyumGU. Ekologiya i prirodopol'zovanie = Bulletin of TSU. Ecology and nature management.* 2019;5(1):141–153. (In Russ.)
20. *SOSnoyy Bor, yadernyy klaster yuzhnogo berega Finskogo zaliva i uroki Chernobylya = Sosnoyy Bor, the nuclear cluster of the southern coast of the Gulf of Finland and the lessons of Chernobyl.* (In Russ.). Available at: http://decommission.ru/ot_02.05.2021
21. Komlev V.N. Deep burial of radioactive waste: requirements and reality. *Marksheyderskiy vestnik = Surveying Bulletin.* 2020;(6):61. (In Russ.)
22. Komlev V.N. *Zakon o nedrakh i radiatsionnaya bezopasnost' strany = The law on subsoil and radiation safety of the country.* (In Russ.). Available at: <https://proza.ru/2020/09/20/903>
23. Vasil'ev N.F. Review of the article. *Ural'skiy geologicheskii zhurnal = Ural Geological Journal.* 2021;(1): 58–59. (In Russ.)
24. Barinov A.S., Tkachenko A.V., Speshilov S.L. *Glubinnaya zakachka zhidkikh radioaktivnykh otkhodov = Deep injection of liquid radioactive waste.* (In Russ.). Available at: http://www.atomeco.org/mediafiles/u/files/Prezentetion_31_10_2013/Speshilov.pdf
25. Vakulovskiy S.M. Assessment of the radiation impact of the Mining and Chemical Plant on the ecosystem of the Yenisei. *Bezopasnost' Okruzhayushchey Sredy = Environmental Safety.* 2008;(2):40–43. (In Russ.)
26. Zverev A.B. Results of field studies of stability of chamber structures of an underground nuclear power plant. *Tezisy dokladov mezhdunarodnoy konferentsii «Ispol'zovanie podzemnogo prostranstva strany dlya povysheniya bezopasnosti yadernoy energetiki» = Abstracts of the international conference "the Use of underground space to enhance the safety of nuclear power".* Apatity, 1992. (In Russ.)
27. Dzeboev B.A., Gvishiani A.D., Belov I.O. [et al.]. Detection areas of possible occurrence of large earthquakes on the basis of the algorithm with only pure grade: I. Altai–Sayan–Baikal region. $M \geq 6.0$. *Fizika Zemli = Physics of the Earth.* 2019;(4):33–47. (In Russ.)
28. Tatarinov V.N., Morozov V.V., Kolesnikov I.Yu. [et al.]. Stability of the geological environment as a basis for safe underground isolation of radioactive waste and spent nuclear fuel. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Reliability and safety of energy.* 2014;(1):25–29. (In Russ.)
29. Kolesnikov I.Yu., Morozov V.N., Tatarinov V.N., Tatarinova T.A. Stress-strain energy zoning of the geological environment for the placement of ecological infrastructure facilities. *Innovatika i ekspertiza = Innovatika i expertize.* 2017;(2):77–88. (In Russ.)
30. Morozov V.N., Tatarinov V.N., Kaftan V.I., Manevich A.I. Underground research laboratory: geodynamic and seismotectonic aspects of safety. *Radioaktivnye otkhody = Radioactive waste.* 2018;(3):16–29. (In Russ.)
31. Gvishiani A.D., Tatarinov V.N. Systemic assessment of factors determining the stability of the geological environment during the disposal of highly radioactive waste. *Vestnik NYATs RK = Bulletin of the National Research Center of the Republic of Kazakhstan.* 2019;(2):44–50. (In Russ.)

32. *Krasnoyarskiy gornokhimicheskiy kombinat (GKhK) = Krasnoyarsk Mining and Chemical Combine (GCK)*. (In Russ.). Available at: <http://www.yabloko.ru/Publ/Atom/atom00016.html>
33. Kler V.R. *Kansko-Achinskiy burougol'nyy basseyn = Kansk-Achinsk brown coal basin*. (In Russ.). Available at: http://www.mining-enc.ru/images/k/4/kanskoachinskiy_ugolnyj_bassejn_resize.jpg
34. *Skhema territorial'nogo planirovaniya Krasnoyarskogo kraya = Territorial planning scheme of the Krasnoyarsk Territory*. (In Russ.). Available at: http://minstroy.krskstate.ru/dat/bin/art_attach/7633_9_stp_kk_tom_vi_prilojeniy_castx_1.pdf
35. Lobatskaya R.M. Fault-block structure of the Baikal-Yenisei fault in the area of operation of nuclear power facilities. *Geodinamika i tektonika = Geodynamics and tectonics*. 2014;(5):547–562. (In Russ.)
36. *Stroyka veka i na veka = Construction of the century and for the ages*. FGUP «NO RAO». (In Russ.). Available at: <http://norao.ru/press/multimedia/2495/>
37. *Krasnoyarskiy «mogil'nik»: razgovor nachistotu = Krasnoyarsk "burial ground": a straight talk*. (In Russ.). Available at: <http://online.newslab.ru/noran>
38. Komlev V.N. Geological study of the site of the Russian point of deep burial of radioactive waste (The first step is always the most difficult). *Marksheyderskiy vestnik = Surveying Bulletin*. 2021;(1):48–54. (In Russ.)
39. Komlev V.N. To substantiate the point of deep burial of radioactive waste (review of two articles on the geological study of the site). *Ural'skiy geologicheskii zhurnal = Ural Geological Journal*. 2021;(1):53–58. (In Russ.)
40. *Utilizatsiya radioaktivnykh otkhodov v Fukusime oboydetsya nedешеvo = Disposal of radioactive waste in Fukushima will not be cheap*. (In Russ.). Available at: <http://bezrao.ru/n/4296>
41. *Kuril'skiy ostrov Simushir mozhet stat' khranilishchem radioaktivnykh otkhodov = The Kuril island of Simushir may become a repository of radioactive waste*. (In Russ.). Available at: <https://ecosakh.ru/category/glavnaya/raze/simushir/>; <https://sakhalin.info/news/9807>
42. *Radioaktivnye otkhody prevratyat v mineral = Radioactive waste will be turned into minerals*. (In Russ.). Available at: <https://www.nkj.ru/news/18950/>
43. *Vozmozhnost' izmeneniya statusa PGZRO = The possibility of changing the status of the PGZRO*. (In Russ.). Available at: <https://www.atomic-energy.ru/news/2021/06/08/114625>; <https://www.atomic-energy.ru/news/2021/06/01/114399>; <http://bezrao.ru/n/4437>; <https://www.atomic-energy.ru/news/2021/04/22/113523>; <http://www.atomic-energy.ru/interviews/2017/01/16/71717>; <http://www.atomic-energy.ru/interviews/2018/03/15/84085>
44. Garagash I.A., Lobkovskiy L.I. Deformation of tectonic waves as a possible trigger mechanism of activation of methane emission in the Arctic. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: ecology and economy*. 2021;11(41): 42–50. (In Russ.)
45. Komleva E. *Yadernoe chelovechestvo i F. M. Dostoevskiy = Nuclear humanity and F. M. Dostoevsky*. (In Russ.). Available at: <http://www.mstu.edu.ru/science/actions/conferences/files/gum2011-9.pdf>
46. Kovach T. *Pro punkt zakhoroneniya vysokoaktivnykh radioaktivnykh otkhodov v Zheleznogorske = About the disposal point of highly radioactive waste in Zheleznogorsk*. (In Russ.). Available at: <https://groups.google.com/g/enwl/c/PenanPXU55Y>
47. *Predstaviteli Rossiyskoy akademii nauk otvetili na voprosy o podzemnoy laboratorii = Representatives of the Russian Academy of Sciences answered questions about the underground laboratory*. (In Russ.). Available at: <https://www.atomic-energy.ru/news/2020/07/16/105480>
48. *V Moskve proshlo ocherednoe zasedanie Obshchestvennogo soveta Rosatoma = A regular meeting of the Rosatom Public Council was held in Moscow*. (In Russ.). Available at: <https://www.atomic-energy.ru/news/2021/03/26/112659>
49. Veselov M. *Mogil'nik Rosatoma: litsenziya est', stroyka idet, zaklyucheniya o bezopasnosti – net = Rosatom burial ground: there is a license, construction is underway, there are no safety conclusions*. (In Russ.). Available at: https://babr24.com/n2f/2020/6/_na_razrabotku_zakluceniy_po_yrb_raq_1_klassa.pdf; <https://babr24.com/kras/?IDE=201692>
50. Beygul V.P., Martynov K.V., Zakharova E.V., Eremin E.A. *Analiz protsessov lokalizatsii delyashchikhsya radionuklidov v tekhnologicheskoy skvazhine dlya obosnovaniya yadernoy bezopasnosti glubinnogo zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov = Analysis of the processes of localization of fissile radionuclides in a technological well to substantiate the nuclear safety of deep burial of radioactive waste*. (In Russ.). Available at: <https://www.atomic-energy.ru/technology/99896>
51. Kryukov O.V. *Kratkiy kommentariy k utverzhdeniyu «Strategii sozdaniya punkta glubinnogo zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov» = A brief comment on the approval of the "Strategy for the creation of a point of deep burial of radioactive waste"*. (In Russ.). Available at: <http://radwaste-journal.ru/docs/journals/3/016i017ikryukov-16-17.pdf>
52. *Vyvod iz ekspluatatsii otkrytogo basseyna-khranilishcha radioaktivnykh otkhodov № 365 FGUP «GKhK», tom I = Decommissioning of the outdoor pool-storage of radioactive waste No. 365 of FSUE "GKhK", volume I*. (In Russ.). Available at: <https://sibghk.ru/images/services/docpack/2021/04/001.pdf>
53. Zolotukhin I.N., Bobylo A.M. Nuclear safety in Southeast Asia: challenges and directions of cooperation. *Oyukumena. Regionovedcheskie issledovaniya = Oikumena. Regional studies*. 2020;(4):137–147. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Николаевич Комлев

инженер-физик, пенсионер

(г. Апатиты, Россия)

E-mail: komleva_ap@mail.ru

Vladimir N. Komlev

engineer-physicist, retired

(Apatity, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 09.09.2021

Поступила после рецензирования/Revised 11.10.2021

Принята к публикации/Accepted 15.11.2021

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ РЕЗИСТОРОВ В АППАРАТНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

А. Ю. Доросинский¹, О. В. Прокофьев², И. Ю. Семочкина³

¹ Научно-производственное предприятие «Сонар», Пенза, Россия
^{2,3} Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия
¹ antik_r13@mail.ru, ² prokof_ow@mail.ru, ³ ius1961@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Непроволочные резисторы являются одним из самых массовых видов радиодеталей. Их количество в современной радиоаппаратуре достигает более одной трети (40 %) от общего количества всех резисторов. Следовательно, надежность работы современных радиоэлектронных устройств в значительной степени зависит от качества этих резисторов. Отсюда основными требованиями при их разработке остается повышение тактико-технических и эксплуатационных характеристик. Кроме того, при разработке непроволочных резисторов необходимо учитывать, что в современных условиях радиоэлектронная аппаратура может подвергаться воздействию радиоактивных излучений, а также работать на больших высотах и в условиях космических скоростей. Поэтому в настоящее время работы в области повышения устойчивости резисторов к механическим и климатическим воздействиям являются востребованными. *Материалы и методы.* Перспективным направлением в области совершенствования переменных резисторов для достижения лучших тактико-технических и эксплуатационных параметров является использование металлокерамических пленок в качестве резистивного элемента, так как появляется возможность создавать весьма миниатюрные подстроечные потенциометры с бесконечной разрешающей способностью. *Результаты.* Сформулированы технические ограничения проволочной технологии изготовления резистивных элементов. Представлены и теоретически обоснованы эксплуатационные преимущества металлокерамических резистивных элементов перед проволочными. Выполнен сравнительный анализ непроволочных переменных резисторов на основе металлопленочных элементов, металлокерамики и проводящих пластмасс. Указаны особенности технологии изготовления потенциометров с керметным резистивным элементом. Даны рекомендации по дальнейшему направлению работ в области создания металлокерамических переменных резисторов. *Выводы.* Возможность создания прецизионных потенциометров с принципиально новыми требованиями по точности, надежности и качеству определяется совершенствованием способов управления процессом нанесения металлокерамических паст и повышением точности поддержания температуры обжига в печах. Продолжение исследований электрофизических свойств металлокерамики позволит найти новые подходы к улучшению воспроизводимости параметров.

Ключевые слова: резистивный материал, металлокерамика, проводящая пластмасса, переменный резистор, резистивный элемент, технология

Для цитирования: Доросинский А. Ю., Прокофьев О. В., Семочкина И. Ю. Перспективы применения композиционных резисторов в аппаратном обеспечении информационно-измерительных систем // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 4. С. 98–105. doi:10.21685/2307-4205-2021-4-11

PROSPECTS FOR THE USE OF COMPOSITE RESISTORS IN THE HARDWARE OF INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEMS

A.Yu. Dorosinskiy¹, O.V. Prokof'ev², I.Yu. Semochkina³

¹ Research and Production Enterprise "Sonar", Penza, Russia
^{2,3} Penza State Technological University, Penza, Russia
¹ antik_r13@mail.ru, ² prokof_ow@mail.ru, ³ ius1961@gmail.com

Abstract. *Background.* Non-wire resistors are one of the most popular types of radio components. Their number in modern radio equipment reaches more than one third (40 %) of the total number of all resistors. Consequently, the reliability of modern electronic devices largely depends on the quality of these resistors. Hence, the main requirements for their development remain the improvement of tactical, technical and operational characteristics. In addition, when developing non-wire resistors, it is necessary to take into account that in modern conditions radio-electronic

equipment can be exposed to radioactive radiation, as well as work at high altitudes and in conditions of cosmic velocities. Therefore, at present, work in the field of increasing the resistance of resistors to mechanical and climatic influences is in demand. *Materials and methods.* A promising direction in the field of improving variable resistors to achieve the best tactical, technical and operational parameters is the use of metal-ceramic films as a resistive element, since it becomes possible to create very miniature tuning potentiometers with infinite resolution. *Results.* The technical limitations of the wire manufacturing technology of resistive elements are formulated. The operational advantages of metal-ceramic resistive elements over wire ones are presented and theoretically substantiated. A comparative analysis of non-wire variable resistors based on metal-film elements, cermet and conductive plastics has been performed. The features of the manufacturing technology of potentiometers with a kermet resistive element are indicated. Recommendations are given on the further direction of work in the field of creating metal-ceramic variable resistors. *Conclusions.* The possibility of creating precision potentiometers with fundamentally new requirements for accuracy, reliability and quality is determined by the improvement of methods for controlling the process of applying ceramic-metal pastes and increasing the accuracy of maintaining the firing temperature in furnaces. The continuation of studies of the electrophysical properties of cermets will allow us to find new approaches to improving the reproducibility of parameters.

Keywords: resistive material, cermet, conductive plastic, variable resistor, resistive element, technology

For citation: Dorosinskiy A.Yu., Prokofev O.V., Semochkina I.Yu. Prospects for the use of composite resistors in the hardware of information and measurement systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;(4):98–105. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-4-11

Введение

Непроволочные резисторы как элементы преобразователей информационно-измерительных систем и радиоэлектронной аппаратуры являются одними из самых массовых видов радиодеталей в силу хороших тактико-технических параметров и низкой стоимости.

Основными направлениями в совершенствовании данных изделий остаются: расширение температурных пределов; повышение допустимой удельной мощности рассеяния, дающей возможность уменьшить размеры и вес изделий; увеличение точности изготовления резисторов относительно номинального значения сопротивления; повышение надежности. Значительное место отводится работам по снижению тепловых шумов. У переменных резисторов дополнительно стремятся снизить шумы, возникающие при перемещении подвижного контакта и повысить точность воспроизведения функциональной характеристики.

Актуальным остается и повышение устойчивости резисторов к механическим и климатическим воздействиям [1, 2].

Отдельное внимание уделяется созданию особо малогабаритных резисторов, получивших название миниатюрных и микроминиатюрных, предназначенных для работы в малогабаритных схемах для нужд роботостроения, военной и космической техники.

За последнее время изучению металлокерамических материалов уделяется много внимания. В результате достигнуты большие успехи в области выбора материалов, их оптимальных конструкций и специальных методов производства. По литературным данным металлокерамика перспективна не только при изготовлении жаропрочных, абразивных и механически прочных деталей в электропромышленности, но и как проводящий материал для непроволочных резисторов [3].

В настоящее время практически все подстроечные резисторы, выпускаемые отечественной и зарубежной промышленностью, имеют металлокерамические резистивные элементы в силу их низкой стоимости, хороших эксплуатационных параметров и низких требований к точности воспроизведения функциональной характеристики.

Технические ограничения проволочной технологии изготовления резистивных элементов

При необходимости получения высоких точностных характеристик как правило используют проволочную технологию получения резистивных элементов, поскольку резистивные элементы, изготовленные намоткой проволоки или ленты на непроводящий сердечник, характеризуются хорошей стабильностью и высокой точностью воспроизведения функциональной характеристики. Подобные требования предъявляются к такому классу изделий, как потенциометры.

Тем не менее потенциометры с проволочным резистивным элементом имеют узкий диапазон сопротивления, ограниченный низким омическим сопротивлением резистивных материалов, пригодных для применения в этих изделиях, и минимальными размерами проволоки или ленты [4]. С увеличением числа витков возрастает разрешающая способность, но в некоторых случаях ее не

хватает для получения желаемого значения установленного сопротивления. С этой точки зрения непроволочные резистивные элементы имеют потенциальное преимущество, так как обладают бесконечной разрешающей способностью.

Номинальные значения сопротивлений проволочных потенциометров лежат в пределах от 1000 до 50000 Ом, поскольку при меньших значениях они обладают большими шумами, повышенным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) и ухудшенным разрешением в сравнении с непроволочными чувствительными элементами. Кроме того, непроволочные резисторы в цепях переменного тока работают лучше, чем проволочные, так как они обладают меньшей индуктивностью и емкостью между обмоткой и корпусом.

Более того, благодаря применению непроволочных резистивных элементов можно избежать множества проблем, имеющих место при применении проволочных резистивных элементов, таких как ослабление витка, застревание частиц металла между витками, обрыв проволоки, приводящий к катастрофическому отказу, возникновение кратковременной дуги, испаряющей металл, при коротком замыкании и пр.

При этом использование непроволочных резистивных элементов в прецизионных потенциометрах осложняется невозможностью получения требуемых характеристик, позволяющих обеспечить высокую точность, а также невозможностью применения методик коррекции функциональной характеристики, таких как электрическое и механическое профилирование [4].

Тем не менее данная тема представляет практический интерес, так как внедрение технологий, позволяющих получать непроволочные резистивные элементы с требуемыми параметрами функциональной характеристики, позволило бы существенно повысить технические возможности и эксплуатационные свойства потенциометров.

Материалы, используемые при создании непроволочных резистивных элементов

Для непроволочных резистивных элементов в настоящее время используются три вида материалов: металлические пленки, токопроводящие пластмассы и металлокерамика [1, 3].

Резисторы, изготовленные нанесением тонких металлических пленок на основания из непроводящих материалов пульверизацией или испарением в вакууме, используют металлы и сплавы с относительно низкими омическими сопротивлениями, такие как палладий, никель, хром и др. Такие резисторы с большой величиной номинального сопротивления иногда имеют толщину проводящей пленки в несколько десятков мономолекулярных слоев материала. Металлопленочные резисторы в случае тонких пленок подвергаются большим изменениям от воздействия электрических токов и флуктуаций температуры и, кроме того, критичны к воздействиям механического нажима и истирания.

Пластмассовый резистивный элемент обеспечивает высокие номиналы сопротивлений и дает наибольшее полное число поворотов ротора, до возникновения внезапного отказа, что объясняется ровной поверхностью дорожки и большим объемом резистивного материала (рис. 1) [1].

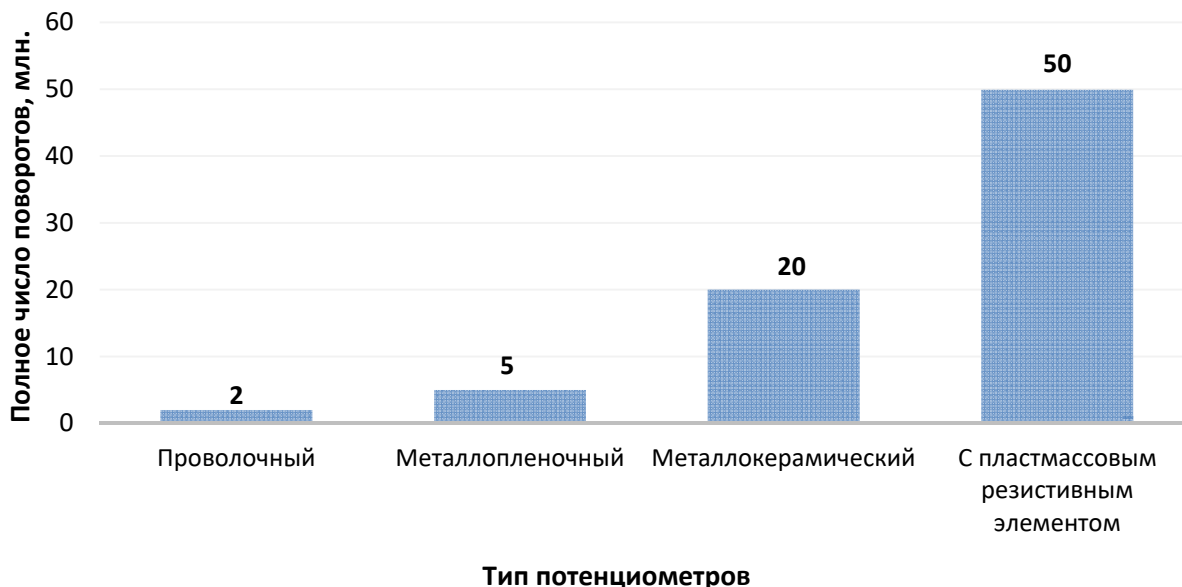


Рис. 1. Средний ресурс перемещения подвижного контакта

Поверхность металлокерамических потенциометров также позволяет получить хорошую износостойчивость за счет применения более мягкого контакта. Вследствие этого металлокерамические резистивные элементы успешно выдерживают до 20 млн оборотов без нагрузки (рис. 1). Прочная поверхность металлокерамического элемента обеспечивает также максимальный срок службы при сильной вибрации. При этом из-за образования искрения у выводов элементов при нагруженном подвижном контакте срок службы снижается, но и в этом случае он выше, чем у проволочных [3, 4].

По сути, металлокерамические резистивные элементы представляют собой керметную пленку, толщиной от 0,0125 до 0,125 мм, что значительно толще металлопленочных, воженную в керамическую подложку. Металлокерамические резистивные элементы имеют настолько сильную адгезию с подложкой, что исключается их отслаивание. В качестве проводящего материала могут использоваться: чистые металлы (Rh, Pt, Al, Zn, W), силициды металлов (MoSi_2), окислы металлов (ZnO , CdO , Jn_2O_3 , WO_3) и карбиды (WC и др.).

Основные электрические характеристики потенциометров на основе металлокерамики в сравнении со свойствами других типов потенциометров представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики	Однооборотные проволочные	Многооборотные проволочные	Проводящие пластмассы	Металлопленочные	Металлокерамические
Наилучшее разрешение, %	0,08	0,01	0	0	0
Наилучшая линейность, %	на выводах	0,10	0,10	1,00	-
	средняя	0,10	0,007	0,50	1,0
Применение в цепях переменного тока	Среднее	Плохое	Хорошее	Хорошее	Хорошее
Число оборотов	1	2–40	1	1	1–20
Воспроизведение нелинейной характеристики	Да	Да	Да	Да	Нет
Основное применение	Общего назначения	Высокоточн.	Вспомог.	Вспомог.	Вспомог.

Одним из основных преимуществ металлокерамических потенциометров по сравнению с проволочными и пластмассовыми является возможность эксплуатации при высоких температурах. Технология позволяет изготавливать элементы, рассчитанные на рабочую температуру + 200 °С и могут работать непродолжительное время при + 300 °С. Рабочая температура проволочных и пластмассовых обычно не выше + 125 °С и + 150 °С. В среднем температурном диапазоне металлокерамические и проволочные потенциометры ведут себя приблизительно одинаково, но при температуре выше + 150 °С работают только металлокерамические потенциометры, сохраняя хорошую стабильность. Испытания показали, что при данных температурах и при электрической нагрузке в течение 10 000 ч наибольшее изменение величины сопротивления порядка 0,5 – 1 % наблюдается в течение первых 100 ч, при этом максимальное изменение сопротивления после 1000 ч непрерывной нагрузки 0,5 Вт при 125°С не превышает + 7 % (средняя величина + 3 %).

Эксплуатация прецизионных металлокерамических потенциометров при температуре выше +150 °С ограничивается только температурным пределом используемых смазок.

Сравнение свойств различных типов непроволочных резисторов и прецизионных потенциометров представлено в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение свойств различных типов непроволочных резисторов и прецизионных потенциометров

Рабочие характеристики		Проволочные	Металлокерамические	Пластмассовые	Металлопленочные
1		2	3	4	5
Электрические	Диапазон сопротивлений	3	5	5	2
	Характеристики по переменному току	4	5	5	5
	Мощность	4	5	5	3
	Электрическая прочность	5	5	5	5
	Сопротивление изоляции	3	5	4	5

Окончание табл. 2

	1	2	3	4	5
Точностные	Линейность	5	4	4	4
	Разрешение	4	5	5	5
	Электрический угол	5	4	4	4
	Мертвый ход	4	5	5	5
	ТКС	5	4	3	4
	Начальный скачок напряжения	5	4	4	4
	Сопротивление выводов	4	5	5	5
Механические	Шумы	4	5	5	5
	Размеры и вес	3	5	4	3
	Моменты вращения	4	5	5	5
	Скорость поворота	4	5	5	5
	Механический угол	5	3	3	3
Устойчивость к воздействиям окружающей среды	Вероятный срок службы (полное число оборотов)	1	4	5	2
	Влажность	4	5	3	5
	Вибрации, удары, ускорение	4	5	5	5
	Срок службы	5	5	4	5
	Тепловой удар	5	5	4	5
	Повышенная температура	3	5	4	5
Прочие свойства	Пониженная температура	4	5	5	5
	Получение нелинейной функции	5	5	5	4
	Введение дополнительных шунтирующих сопротивлений	3	5	4	3
	Наличие короткозамкнутых участков резистивных элементов	3	5	4	5
	Отводы напряжения	5	5	4	3
Отводы тока	5	4	3	2	

Оценка свойств резисторов производилась по пятибалльной шкале (наилучшее качество оценивается как 5). В табл. 2 отмечены наиболее существенные различия по основным электрическим характеристикам, точности и рабочим параметрам. Приведены сравнительные данные по размерам, весу и ожидаемому сроку службы.

Диаграмма, построенная по данным табл. 2, представлена на рис. 2.

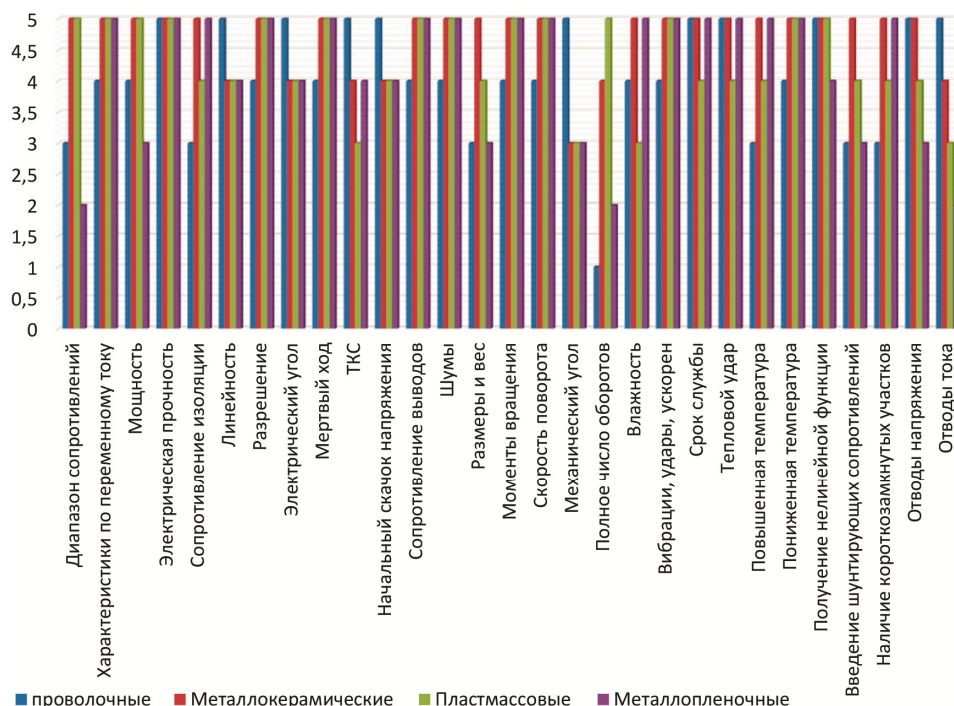


Рис. 2. Сравнительные характеристики резисторов, изготовленных на основе различных технологий

Данная диаграмма наглядно отражает совокупное преимущество резисторов, построенных на основе различных технологий.

Наилучшие значения ТКС среди непроволочных потенциометров имеют металлокерамические и металлопленочные. Они обеспечивают ТКС в широком диапазоне величин сопротивлений не хуже $\pm (100-400) \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$.

Пластмассовые пленки в большинстве случаев обладают большим отрицательным ТКС от 300×10^{-6} до $-1000 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$, у металлокерамических резисторов ТКС имеет более широкий разброс, чем у лучших проволочных, но он перекрывает больший диапазон сопротивлений. Если разброс ТКС для проволочных потенциометров от $\pm 100 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ до $\pm 800 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$, то у металлокерамических минимум ограничивается значением $\pm 400 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$. При этом номинал металлокерамических и пластмассовых потенциометров находится в пределах от 10 Ом до 10 МОм, а у проволочных до 100 кОм.

Особенности технологии изготовления потенциометров с керметным резистивным элементом

Кермет дает возможность получить непроволочный, неиндуктивный, неорганический резистивный элемент, почти с бесконечной разрешающей способностью, способный работать при повышенных температурах. Также кермет дает низкий ТКС, хотя и не такой, как в некоторых проволочных или даже металлопленочных потенциометрах. Однако кермет дает возможность получить более высокие пределы сопротивлений в малых габаритах, низкие шумовые и лучшие высокочастотные характеристики, хорошую воспроизводимость и надежность [4].

В табл. 3 дается сравнение свойств типовых металлокерамических резисторов с проволочными.

Таблица 3

Сравнение свойств типовых металлокерамических резисторов с проволочными

Тип резисторов	Металлокерамический	Проволочный
Предел сопротивлений	От 10 Ом до 100 кОм	От 10 Ом до 100 МОм
Шумовые характеристики	Средние	Низкие / средние
Разрешение	Высокое	Среднее
Цена	Низкая / средняя	Высокая
Максимальная нагрузка	5 Вт	5 Вт
Окружающая температура под нагрузкой	От 125 до 175 °С	125 °С
Максимальная окружающая температура / перегрев	275 °С	175 °С
Стабильность под нагрузкой	Высокая	Высокая
Износостойчивость	Средняя	Высокая
Влагоустойчивость	Высокая	Высокая
Термостабильность	Высокая	Высокая

Материалы, используемые в металлокерамических резисторах, по своей природе способны работать при более высоких температурах, чем материалы проволочных или пластмассовых резисторов, и, соответственно, они могут рассеивать гораздо большую мощность. Рассеяние мощности металлокерамических потенциометров в 3–4 раза больше рассеяния мощности проволочных потенциометров и потенциометров из проводящей пластмассы [3]. Номинальная мощность проволочных потенциометров обычно ограничивается температурными характеристиками органических покрытий каркаса или самого материала каркаса, в то время как номинальная мощность пластмассовых потенциометров ограничивается температурой пластмассового связующего. Металлокерамические потенциометры могут работать с перегрузкой до 30–40 Вт в течение короткого промежутка времени.

Теоретически металлокерамические потенциометры можно получить с очень точным допуском номинального сопротивления, так как его значение можно регулировать. Применение сравнительно высоких напряжений приводит к микросварке частиц металлов или окислов и уничтожению диэлектрических барьеров, тем самым снижая величины сопротивлений. Производственными методами можно получить сопротивление с допуском $\pm 10\%$. Для получения допуска порядка $\pm 5\%$ и менее регулировку можно производить с помощью пескоструйного инструмента. В прецизионных схемах может быть использован процесс регулирования сопротивления даже после законченной сборки и герметизации.

Чтобы повысить величину сопротивления, необходимо удалить резистивный материал. Из-за небольших физических размеров резисторов для этой цели кроме пневмоабразивных систем можно использовать алмазные сверла.

Воспроизводимость характеристик зависит от толщины пленки и точности регулирования температуры, причем окончательное удельное сопротивление резистивной пленки зависит от соотношения проводящей и связующей фаз.

Намного сложнее дело обстоит с получением высокой линейности, так как существующие методики не позволяют корректировать функциональную характеристику изделия после изготовления резистивного элемента и, как следствие, этот факт предъявляет повышенные требования к процедурам технологического процесса, таких как контроль равномерности нанесения керметной пасты на подложку и пр.

Еще одним существенным преимуществом керметной технологии является то, что металлокерамический элемент имеет большой срок службы, в течение которого он дает небольшое изменение линейности, общего сопротивления, шума и величины реактивных составляющих полного сопротивления.

Также металлокерамические резистивные элементы обладают хорошей устойчивостью к катастрофическим выходам из строя, исключительным химическим и электрическим противодействием водяным парам и большинству других жидкостей. На обожженный резистивный элемент не действует радиация и окислительная среда. Объясняется это тем, что стеклянная матрица металлокерамического резистивного элемента и основание из стеатита способствуют защите резистора от проникновения влаги. Проволочные и пластмассовые потенциометры испытывают изменение сопротивления и падение сопротивления изоляции при влажности из-за сравнительно большого поглощения влаги материалами покрытия. Металлокерамические потенциометры обеспечивают изменение сопротивления не более 20 % после 50-суточного пребывания при 98 % влажности. При этом металлокерамический резистивный элемент хорошо выдерживает вибрацию, так как он почти не изнашивается. Основной износ наблюдается в конструкции с контактом [5].

Заключение

Таким образом, исследования показали, что наиболее перспективными во всех отношениях являются металлокерамические пленки по сравнению с другими типами непроволочных резистивных элементов.

Развитие данной технологии позволяет создать весьма миниатюрные подстроечные потенциометры с бесконечной разрешающей способностью. Теоретически предел разрешающей способности существует, так как у них имеет место некоторая «зернистость», но с помощью измерительных приборов обнаружить ее не представляется возможным. Поэтому разработка непроволочных переменных резисторов на основе металлокерамики является перспективным направлением, так как позволяет создать изделия с высокими эксплуатационными характеристиками.

С целью развития технологии целесообразным является продолжение работы в направлениях:

- реализации управления процессом нанесения металлокерамических паст в плане формирования элемента с требуемыми параметрами линейности функциональной характеристики;
- повышения точности поддержания температуры обжига в печах;
- продолжения исследований электрофизических свойств металлокерамики;
- улучшения воспроизводимости параметров;
- поиска новых металлокерамических материалов.

Все это обеспечит возможность создания прецизионных потенциометров с принципиально новыми требованиями по точности, надежности и качеству.

Список литературы

1. Доросинский А. Ю., Недорезов В. Г. Проводящие пластические материалы, используемые для построения резистивных элементов потенциометров // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2018. Т. 2. С. 229–230.
2. Доросинский А. Ю., Данилова Е. А., Герасимов О. Н. [и др.]. Способы улучшения механических характеристик резистивных элементов и методы их расчета // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 1. С. 84–92.

3. Доросинский А. Ю., Недорезов В. Г. Особенности изготовления металлокерамических резистивных элементов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2018. Т. 2. С. 230–231.
4. Белевцев А. Т. Потенциометры. М. : Машиностроение, 1969.
5. Доросинский А. Ю., Герасимов О. Н., Березин М. Н. Исследование влияния воздействия вибрационных нагрузок на конструкционные материалы изделий электронной техники // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 3. С. 37–42.

References

1. Dorosinskiy A.Yu., Nedorezov V.G. Conductive plastic materials used for the construction of resistive elements of potentiometers. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2018;2:229–230. (In Russ.)
2. Dorosinskiy A.Yu., Danilova E.A., Gerasimov O.N. [et al.]. Ways to improve the mechanical characteristics of resistive elements and methods of their calculation. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and Quality of Complex Systems*. 2018;(1):84–92. (In Russ.)
3. Dorosinskiy A.Yu., Nedorezov V.G. Features of manufacturing of metal-ceramic resistive elements. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2018;2:230–231. (In Russ.)
4. Belevtsev A.T. *Potentsiometriy = Potentiometers*. Moscow: Mashinostroenie, 1969. (In Russ.)
5. Dorosinskiy A.Yu., Gerasimov O.N., Berezin M.N. Investigation of the impact of vibration loads on structural materials of electronic equipment products. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and Quality of Complex Systems*. 2017;(3):37–42. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Антон Юрьевич Доросинский

кандидат технических наук,
генеральный директор,
Научно-производственное предприятие «Сонар»
(Россия, г. Пенза, ул. Центральная 1В)
E-mail: antik_r13@mail.ru

Олег Владимирович Прокофьев

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

Ирина Юриевна Семочкина

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры информационных
технологий и систем,
Пензенский государственный технологический
университет
(Россия, г. Пенза, проезд Байдукова /
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: ius1961@gmail.com

Anton Yu. Dorosinskiy

Candidate of technical sciences,
general manager,
Scientific and production enterprise "Sonar"
(1V Tsentralnaya street, Penza, Russia)

Oleg V. Prokofev

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)

Irina Yu. Semochkina

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)

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

Поступила в редакцию/Received 30.08.2021

Поступила после рецензирования/Revised 20.09.2021

Принята к публикации/Accepted 15.11.2021

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ КОЛИЧЕСТВА НЕЙРОНОВ В СКРЫТОМ СЛОЕ В ЦЕЛЯХ ПОВЫШЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ НАЗЕМНОЙ ЦЕЛИ

А. И. Годунов¹, С. В. Шишков², С. Т. Балаян³, Ф. Х. Аль Сафтли⁴

¹ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

² Филиал Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева в г. Пензе, Пенза, Россия

^{3,4} Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, Воронеж, Россия

¹ Godunov@pnzgu.ru, ² sergej.shishkov.75@mail.ru, ³ bst76@yandex.ru, ⁴ fadi79@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Высокая точность распознавания типовых наземных объектов оптико-электронными следящими системами может быть достигнута за счет оптимизации параметров искусственной нейронной сети (ИНС) такими, как: размерность и структура входного сигнала ИНС, синапсы нейронов сети, количество нейронов каждого слоя сети и количество слоев сети. *Материалы и методы.* Рассматриваются существующие алгоритмы оптимизации обучения ИНС при определении количества нейронов во входном, скрытом и выходном слоях ИНС в целях повышения вероятности распознавания образов наземной цели. Исследуются факторы улучшения обучения ИНС, определения количества нейронов в скрытом слое для распознавания изображений наземных объектов в таких алгоритмах, как алгоритм Левенберга – Марквардта, алгоритм байесовской регуляризации, масштабируемом алгоритме сопряженных градиентов и в разработанном алгоритме. *Результаты и выводы.* Исследуется возможность использования разработанного алгоритма в подсистеме информации и управления ракетой при телевизионном самонаведении на цель. Осуществлена программная реализация разработанного алгоритма с использованием языка программирования Matlab.

Ключевые слова: оптимизация, нейронная сеть, скрытый слой, обучение нейронной сети, алгоритм Левенберга – Марквардта, алгоритм байесовской регуляризации, масштабируемый алгоритм сопряженных градиентов, распознавание, вероятность, цель

Для цитирования: Годунов А. И., Шишков С. В., Балаян С. Т., Аль Сафтли Ф. Х. Разработка алгоритма оптимизации обучения нейронной сети при определении количества нейронов в скрытом слое в целях повышения вероятности распознавания образов наземной цели. 2021. № 4. С. 106–118. doi:10.21685/2307-4205-2021-4-12

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR OPTIMIZING NEURAL NETWORK TRAINING WHEN DETERMINING THE NUMBER OF NEURONS IN A HIDDEN LAYER IN ORDER TO INCREASE THE PROBABILITY OF RECOGNIZING IMAGES OF A GROUND TARGET

A.I. Godunov¹, S.V. Shishkov², S.T. Balanyan³, F.Kh. Al' Saftli⁴

¹ Penza State University, Penza, Russia

² Branch of the Military Academy of Logistics named after Army General A.V. Khrulev in Penza, Penza, Russia

^{3,4} Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin, Voronezh, Russia

¹ Godunov@pnzgu.ru, ² sergej.shishkov.75@mail.ru, ³ bst76@yandex.ru, ⁴ fadi79@yandex.ru

Abstract. *Background.* High accuracy of recognition of typical ground objects by optoelectronic tracking systems can be achieved by optimizing the parameters of an artificial neural network (INS) such as: the dimension and structure of the INS input signal, synapses of network neurons, the number of neurons of each network layer and the number of network layers. *Materials and methods.* The existing algorithms for optimizing the training of the INS are considered when determining the number of neurons in the input, hidden and output layers of the INS in order to increase the probability of recognizing images of a ground target. The factors of improving the training of the INS, determining the number of neurons in the hidden layer for recognizing images of ground objects in such algorithms as the Levenberg – Marquardt algorithm, the Bayesian regularization algorithm, the scalable conjugate

gradient algorithm and the developed algorithm are investigated. *Results and conclusions.* The possibility of using the developed algorithm in the subsystem of information and missile control during television homing on the target is investigated. The software implementation of the developed algorithm using the Matlab programming language is carried out.

Keywords: optimization, neural network, hidden layer, neural network training, Levenberg – Marquardt algorithm, Bayesian regularization algorithm, scalable conjugate gradient algorithm, recognition, probability, goal

For citation: Godunov A.I., Shishkov S.V., Balanyan S.T., Al' Saffli F.Kh. Development of an algorithm for optimizing neural network training when determining the number of neurons in a hidden layer in order to increase the probability of recognizing images of a ground target. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;(4):106–118. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-4-12

Введение

В теории искусственных нейронных сетей (ИНС) существуют две актуальных проблемы, одной из которых является выбор оптимальной структуры нейронной сети, а другой – построение эффективного алгоритма обучения нейронной сети.

Оптимизация нейронной сети направлена на уменьшение объема вычислений при условии сохранения точности решения задачи на требуемом уровне. Параметрами оптимизации в нейронной сети могут быть:

- размерность и структура входного сигнала нейросети;
- синапсы нейронов сети. Они упрощаются с помощью удаления из сети или заданием «нужной» или «оптимальной» величины веса синапса;
- количество нейронов каждого слоя сети;
- количество слоев сети.

Вторая проблема заключается в разработке качественных алгоритмов обучения нейросети, позволяющих за минимальное время настроить нейросеть на распознавание заданного набора входных образов.

Обучение нейронной сети представляет собой многокритериальную задачу нелинейной оптимизации. Ее целью является поиск оптимального набора весовых коэффициентов (экстремума функции) для минимизации ошибки сети (рис. 1).

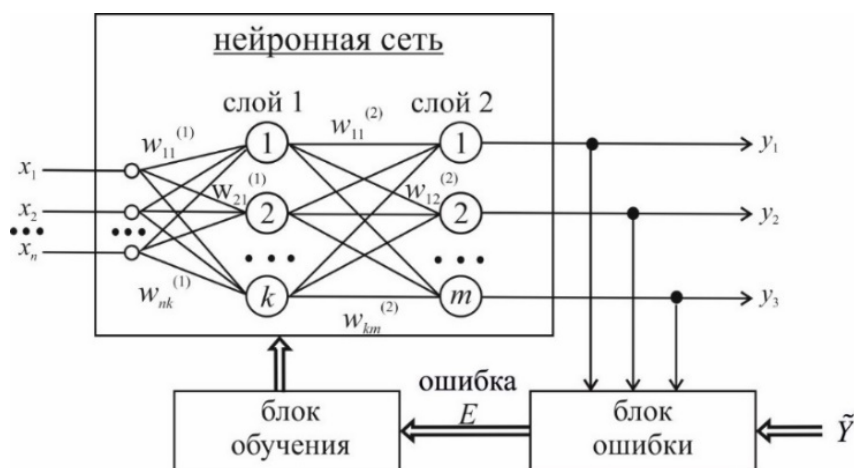


Рис. 1. Обучение многослойной нейронной сети

Процесс обучения нейронной сети заключается в необходимости настройки сети таким образом, чтобы для некоторого множества входов давать желаемое (или, по крайней мере, близкое, сообразное с ним) множество выходов.

Выбор нейросетевой архитектуры

Создание архитектуры нейронной сети означает указание количества слоев каждого типа и количества нейронов в каждом из этих слоев [1].

Выбор нейросетевой архитектуры может быть сделан в зависимости от решаемой задачи, имеющихся исходных данных и планируемых алгоритмов обучения. Так, для решения задач клас-

сификации, аппроксимации и прогнозирования применимы сети прямого распространения [2]. Главным представителем сетей такого класса является многослойный персептрон, структура которого показана на рис. 2.

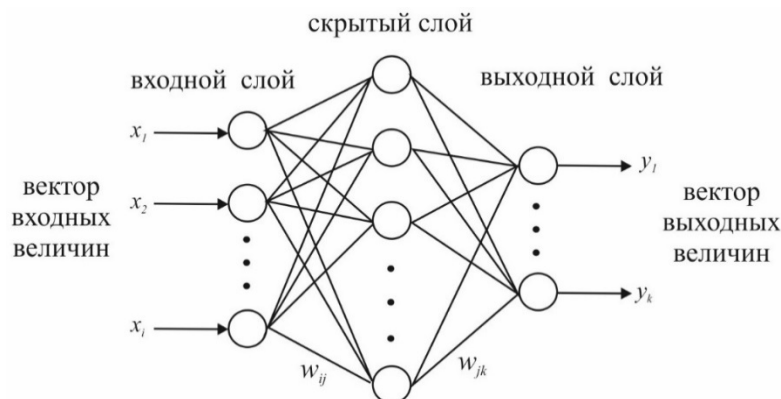


Рис. 2. Многослойный персептрон

В качестве исходных данных имеем [3]:

- размерность вектора входного сигнала (N_x);
- размерность вектора выходного сигнала (N_y);
- количество особых точек на изображении цели обучающей выборки (N_p).

При этом выбираем:

- общее число нейронов в сети и число нейронов по слоям;
- функции активации нейронов;
- способ задания коэффициентов синоптической связи.

При построении нейронной сети накладываются следующие ограничения:

- число слоев в выходном слое равно числу классов;
- все входные сигналы подаются всем нейронам.

Количество нейронов входного слоя напрямую зависит от размерности исходного пространства входных данных (размерности выборки) [1]. Количество нейронов выходного слоя зависит от решаемой задачи и так же, как для входного слоя, от способов кодирования. Так, при решении задач анализа главных компонент и сжатия информации размерность выходного слоя берется точно такой же, как и входного. Для решения задач управления выходной слой обычно представлен одним нейроном. При классификации количество нейронов выходного слоя определяется методом кодирования тех классов, к которым может быть отнесен входной вектор [1].

Количество нейронов скрытого слоя

Основной задачей при построении нейронной сети является определение числа скрытых слоев и числа нейронов в скрытых слоях, так как число нейронов во входном и выходном слоях определяется известным числом входов и выходов сети. Проблема выбора количества скрытых элементов многослойного персептрона заключается в том, что с одной стороны, число скрытых элементов должно быть достаточным для решения поставленной задачи, а с другой – не должно быть слишком большим, чтобы обеспечить необходимую обобщающую способность сети и избежать переобучения.

В общем, при решении задач распознавания в сети с одним скрытым слоем входной вектор преобразуется в некоторое новое пространство, которое может иметь другую размерность, а затем гиперплоскости, соответствующие нейронам выходного слоя, разделяют его на классы. Таким образом, сеть распознает не только характеристики исходных данных, но и «характеристики характеристик», сформированные скрытым слоем. Сеть с одним скрытым слоем, содержащим нейроны со ступенчатой функцией активации, способна осуществить произвольную классификацию особых точек четырехмерного пространства. Более того, одного скрытого слоя нейронов с функцией активации достаточно для аппроксимации любой границы между классами или некоторой функции со сколь угодно высокой точностью [2].

Необходимое количество нейронов в скрытых слоях персептрона можно определить по формуле, являющейся следствием из теорем Арнольда – Колмогорова – Хехт – Нильсена. Однако эта

теорема не конструктивна, это лишь теорема существования, в ней не заложена методика определения числа нейронов в сети для некоторой конкретной обучающей выборки. Для первоначальной оценки числа нейронов в скрытых слоях однородных нейронных сетей часто используется формула для оценки необходимого числа синоптических весов N_w в многослойной сети [3]:

$$\frac{N_y Q}{1 + \log_2(Q)} \leq N_w \leq \left(\frac{Q}{N_x} + 1 \right) (N_x + N_y + 1) + N_y, \quad (1)$$

где N_y – размерность выходного сигнала; Q – число элементов множества обучающих примеров; N_w – необходимое число синоптических связей; N_x – размерность входного сигнала.

Оценив с помощью этой формулы необходимое число синоптических связей N_w , можно рассчитать необходимое число нейронов в скрытых слоях. Например, число нейронов скрытого слоя ($N_{ск}$) двухслойного персептрона будет равно

$$N_{ск} = \frac{N_w}{N_x + N_y}. \quad (2)$$

Для определения числа нейронов в скрытом или скрытых слоях существуют эмпирически обоснованные правила. Считается, что количество нейронов в скрытом слое должно быть в несколько раз меньше количества обучающих примеров при условии наличия избыточности обучающих данных.

Суммируя выше сказанное, для большинства задач можно было бы, вероятно, получить достойную производительность, установив конфигурацию скрытого слоя, используя только два правила:

- 1) количество скрытых слоев равно единице;
- 2) количество нейронов в этом слое является средним между количеством нейронов во входном и выходном слоях и быть в несколько раз меньше количества обучающих примеров при условии наличия избыточности обучающих данных [1]:

$$N_{ск} = \frac{N_x + N_y}{2}. \quad (3)$$

Обучение нейронных сетей

Точность аппроксимации зависит от эффективности процедур обучения, поэтому при использовании нейронных сетей в прикладных задачах большое внимание уделяется алгоритмам, которые позволяют максимально точно «подстроить» весовые коэффициенты в зависимости от обучающей выборки [4].

Обучение нейронных сетей прямого распространения – это процесс определения значений весов сети на основе примеров, образующих обучающее множество для сети с n входами и m выходами, состоит из N входных и выходных значений – обучающих примеров. Структура обучающего множества имеет вид

$$\langle \tilde{X}, \tilde{Y} \rangle = \{(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)\}_{i=1, \overline{N}}, \quad (4)$$

где $\tilde{x}_i \in R^n$ – входной вектор из i -го примера, $\tilde{y}_i \in R^m$ – вектор желаемого выхода; R^n – множество входных сигналов; R^m – множество выходных сигналов.

Степень близости вектора-ответа нейросети y_i на i -м примере и соответствующего вектора желаемый выход \tilde{y}_i при текущем векторе весов нейронной сети $w \in R^W$, где W – количество весовых коэффициентов нейронной сети прямого распространения (НСПР), характеризуется мгновенным функционалом качества обучения (Q_i) [5]:

$$Q_i = Q(\varepsilon_i(w)) = \varepsilon_i^T(w) \cdot V \cdot \varepsilon_i(w), \quad (5)$$

где $\varepsilon_i(w) = y_i(w) - \tilde{y}_i$, $\varepsilon_i \in R^m$ – вектор отклонений фактических выходов сети от желаемого выхода, V – определенная матрица, задающая взвешенную норму вектора $\varepsilon_i(w)$. Обычно $V \in R^{m \times m}$ – единичная матрица, что сводит функционал к евклидовой норме вектора отклонений:

$$Q(\varepsilon_i(w)) = \varepsilon_i^T(w) \cdot \varepsilon_i(w) = (y_i(w) - \tilde{y}_i)^T (y_i(w) - \tilde{y}_i) = \sum_{i=1}^m (y_i(w) - \tilde{y}_i)^2. \quad (6)$$

Степень соответствия сети данным из обучающего множества задается интегральным функционалом качества обучения $(E(w))$ [5]:

$$E(w) = \sum_{i=1}^N Q_i(w) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^m (y_i(w) - \tilde{y}_j)^2. \quad (7)$$

Для случая с одним выходом ($m = 1$) и с учетом его обозначения, как $F(x_i, w)$ – функция активации нейронов, принимает следующий вид:

$$E(w) = \sum_{i=1}^N Q_i(w) = \sum_{i=1}^N (y_i(w) - \tilde{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^N (F(x_i, w) - \tilde{y}_i)^2. \quad (8)$$

Цель обучения НСПР – это определение такого вектора весов w^* , чтобы уравнение (8) принимало минимальное значение, что превращает процесс обучения сети в решение задачи безусловной оптимизации:

$$w^* = \arg \min_{w \in R^v} E(w). \quad (9)$$

Для решения (9) существует множество алгоритмов. На основе метода обратного распространения ошибки были основаны три алгоритма, которые могут быть использованы для обучения искусственной нейронной сети, которые, в свою очередь, были включены в программный пакет Matlab. Это алгоритм Левенберга – Марквардта, алгоритм байесовской регуляризации и масштабируемый алгоритм сопряженных градиентов.

Алгоритм сопряженных градиентов. В задаче обучения нейронной сети алгоритм сопряженных градиентов применяется для минимизации квадратичной функции вида $f(w)$ [6]:

$$f(w) = \frac{1}{2} w^T G w - b^T w + c, \quad (10)$$

где w – количество весовых коэффициентов; G – матрица Гесссиана; b, c – постоянные значения.

Направление поиска экстремума выбирается так, чтобы оно было ортогональным и сопряженным со всеми предыдущими значениями направления градиента (p_k):

$$p_k = -g_k + \beta_{k-1} p_{k-1}, \quad (11)$$

где $g_k = g(w_k)$ – фактическое значение направления градиента; β_k – коэффициент, используемый для определения сопряженного направления.

Изменение весов рассчитывается по формуле

$$w_{k+1} = w_k + \alpha_k p_k. \quad (12)$$

Коэффициент α_k используется для определения сопряженного направления. Значение α_k должно минимизировать $f(w_{k+1})$, для расчета можно применить алгоритм золотого сечения или другой линейный алгоритм поиска минимума. Для расчета коэффициента β_k применяется формула Флетчера – Ривза:

$$\beta_k = \frac{g_k^T \cdot g_k}{g_{k-1}^T \cdot g_{k-1}}. \quad (13)$$

Для квадратичных функций алгоритм сопряженных градиентов находит минимум за n шагов (n – размерность пространства поиска), поэтому алгоритм нуждается в перезапуске на каждом $n + 1$ шаге. Для метода Флетчера – Ривза это выполняется с помощью $\beta_k = 0$. Полный алгоритм выглядит следующим образом:

- 1) инициализация весов $w_k (k = 1)$;
- 2) расчет градиента $g_1 = \nabla f(w_1)$;

- 3) определение направления $p_1 = -g_1$;
 - 4) расчет $\alpha_k = \arg \min [f(w_k + \alpha_k p_k)]$;
 - 5) коррекция весовых коэффициентов $w_{k+1} = w_k + \alpha_k p_k$;
 - 6) если ошибка (E) незначительна – остановить обучение;
 - 7) если $k + 1 > n$ установить $w_1 = w_{k+1}$, $k = 1$ и перейти к шагу 2;
 - 8) определить $k = k + 1$;
 - 9) рассчитать $g_{k+1} = \nabla f(w_{k+1})$, $\hat{\alpha}_k$, вектор направления $p_{k+1} = -g_{k+1} + \beta_k p_k$ и перейти к шагу 4.
- Для расчета градиента на этапах 2 и 9 используется целевая функция ошибки нейронной сети:

$$f(w) = \frac{1}{2N} \sum_n \sum_j (y_{nj} - \tilde{y}_{nj})^2, \quad (14)$$

где N – количество обучающих образов; y_{nj} и \tilde{y}_{nj} – фактический и желаемый выходы сети соответственно.

Алгоритм Левенберга – Марквардта

Для устранения указанных недостатков обычно используется информация высокого порядка об $E(w)$. В рамках квадратичной аппроксимации ошибки в окрестности точки w имеет вид [5]:

$$E(w + \Delta w) \approx E(w) + \nabla E(w) \Delta w + \frac{1}{2} \Delta w^T \nabla^2 E(w) \Delta w. \quad (15)$$

На основе квадратичной аппроксимации разработаны широко известные алгоритмы Гаусса – Ньютона и Левенберга – Марквардта (ЛМ-алгоритм), которые сводят задачу (9) для (15) к уравнению

$$\nabla E(w) + \nabla^2 E(w) \Delta(w) = 0, \quad (16)$$

$$\nabla E(w) = \frac{\partial \varepsilon(w)}{\partial w} \cdot \varepsilon(w) = \frac{\partial (y(w) - \tilde{y})}{\partial w} \cdot \varepsilon(w) = \frac{\partial F(x, w)}{\partial w} \cdot \varepsilon(w), \quad (17)$$

$$\nabla^2 E(w) = \left(\frac{\partial \varepsilon(w)}{\partial w} \right)^T \cdot \frac{\partial \varepsilon(w)}{\partial w} + \sum_{i=1}^N \varepsilon(w) \nabla^2 \varepsilon(w). \quad (18)$$

Ключевое различие между ними – подход к вычислению матрицы Гессе $\nabla^2 E(w)$. Если представить (18) в виде

$$H = J^T \cdot J + S, \quad (19)$$

где S – информация о вторых производных, то для алгоритма Гаусса – Ньютона $S = 0$, в то время как в ЛМ-алгоритме S аппроксимируется эвристическими правилами.

Исходя из (16)–(19), алгоритм Левенберга – Марквардта заключается в решении уравнения относительно Δw [5]:

$$\underbrace{(J^T J)}_H + \underbrace{\lambda I}_S \Delta(w) = J^T \varepsilon(w), \quad (20)$$

или в другой интерпретации

$$\begin{aligned} (J^T J + \lambda I) \delta &= J^T \tilde{\varepsilon}(w), \\ \tilde{\varepsilon}(w) &= -\varepsilon(w) = \tilde{y} - y(w), \end{aligned} \quad (21)$$

где λ – коэффициент затухания Левенберга; δ – вектор, состоящий из величин приращения весов; I – единичная матрица.

Найденный вектор δ позволяет изменить вектор весов w . Элементы вектора w обычно упорядочиваются сначала по слою, затем по нейронам и, наконец, по весу каждого нейрона и его смещению [5].

Параметр λ задается изначально и определяет поведение алгоритма, делая его более похожим на градиентный или алгоритм Гаусса – Ньютона. В самом начале обучения, когда функция $F(x, w)$ подобрана грубо, удобно использовать алгоритм наискорейшего спуска, поэтому λ выбирается относительно большим. По мере уточнения коэффициентов w более эффективным становится алгоритм Гаусса – Ньютона (при этом λ становится малой величиной; при $\lambda = 0$ метод вырождается в алгоритм Гаусса – Ньютона). Так, ЛМ-алгоритм реализует адаптивную модель с явной аппроксимацией S и без нее.

В результате процедура, реализующая обучающий цикл НСПР, имеет вид [5]:

- 1) построить матрицу Якоби J ;
- 2) рассчитать градиент ошибки $g = J^T \tilde{\varepsilon}(w)$;
- 3) рассчитать приближенную матрицу Гессе с помощью матрицы Якоби $H^* = J^T J$;
- 4) решить уравнение $(H^* + \lambda I)\delta = g$ относительно неизвестного вектора δ ;
- 5) вычислить $E(w + \delta)$;
- 6) если $E(w + \delta) < E(w)$, то $\lambda = \nu\lambda$ и перейти на шаг 4, иначе $\lambda := \lambda | \nu$, $E(w + \delta) := E(w)$ и закончить цикл обучения.

Алгоритм байесовской регуляризации обучения

В байесовском подходе выбор решения f ведется в рамках некоторой модели H – набора ограничивающих условий. Решение выбирается как наиболее вероятное по формуле Байеса [7]:

$$P(f | D, H) = \frac{P(D | f, H)P(f | H)}{P(D | H)}, \quad (22)$$

где $P(f | D, H)$ – вероятность выбора функции f для описания данных D в рамках модели H ; $P(D | f, H)$ – вероятность того, что функция f генерирует данные D ; $P(f | H)$ – некоторая априорная вероятность выбора f в рамках модели H . Коэффициент $P(D | H)$ необходим, чтобы нормировать множество значений произведения $P(D | f, H)P(f | H)$ на единицу, придав ему, таким образом, смысл вероятности.

Насколько подходит тот или иной набор ограничивающих условий H для описания данных, определяет как раз знаменатель формулы Байеса [7]:

$$P(D | H) = \sum_f P(D | f, H)P(f | H) = \sum_f P(D, f | H). \quad (23)$$

В научно-технической литературе имеется термин *evidence* (доказательство). Чем больше *evidence*, тем соответствующая модель более предпочтительна [7].

Сделав несколько предположений о внешнем виде вероятностей в формуле (22), можно найти параметр регуляризации исходя из принципа максимального правдоподобия. Если предположить, что данные зашумлены гауссовым шумом, тогда вероятность порождения функцией $f(x)$ данных $D = \{y_i, \bar{x}_i\}_{i=1}^L$ можно оценить следующим выражением [7, 8]:

$$P(D | f) = \frac{1}{Z_X} \exp\left(-\beta \sum_{i=1}^L (y_i - f(\bar{x}_i))^2\right). \quad (24)$$

Возьмем стабилизирующий функционал в гауссовой форме:

$$\Omega = \sum_{n=1}^N w_n^2. \quad (25)$$

Ему соответствует априорная вероятность:

$$P(f | H) = \frac{1}{Z_A} \exp\left(-\alpha \sum_{n=1}^N w_n^2\right). \quad (26)$$

Максимизация вероятности:

$$P(f | D, H) = \frac{1}{Z_M} \exp(-M), \quad (27)$$

где $M = \beta \sum_{i=1}^L (y_i - f_i)^2 + \alpha \sum_{n=1}^N w_n^2$ сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений:

$$\sum w_m A_{mn} = B_n, \quad (28)$$

где $A_{mn} = \beta \sum_{i=1}^L \psi_{mi} \psi_{ni}$, $n \neq m$, $A_{nn} = \beta \sum_{i=1}^L \psi_{ni}^2 + \alpha$, $B_n = \beta \sum_{i=1}^L y_i \psi_{ni}$; ψ_{ni} – базисная функция; A_{nn}, A_{mm}, B_n – симметричные матрицы с положительными элементами главной диагонали; α, β – параметры модели обучения.

В качестве значений α и β берутся те, при которых *evidence* максимально. Таким образом, чтобы их определить, можно, например, получить аналитическое выражение для *evidence*, а затем градиентными методами найти его максимум. Легко показать, что

$$\ln P(D | H) = \ln Z_M - \ln Z_A - \ln Z_X, \quad (29)$$

$$Z_M = \int d^N w_n \times \exp \left(-\beta \sum_{n=1}^N \left(\bar{y} - \sum_{n=1}^N w_n \bar{\psi}_n \right)^2 - \alpha \sum_{n=1}^N w_n^2 \right),$$

$$Z_A = \int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left(-\alpha \sum_{n=1}^N w_n^2 \right) = \left(\frac{2\pi}{\alpha} \right)^{\frac{N}{2}}, \quad Z_X = \left(\frac{\pi}{\beta} \right)^{\frac{L}{2}},$$

где Z_A, Z_M, Z_X – нормировочные коэффициенты; через $\bar{\psi}_n$ обозначены векторы значений n -й базисной функции в точках $\{\bar{x}_i\}_{i=1}^L$, а через \bar{y} – вектор значений искомой функции в этих точках.

Подробности вычисления этого интеграла описаны в работе [8]. В результате приходим к следующему приближенному выражению для *evidence*:

$$\ln P(D | H) = \sum_{n=1}^N \left(\frac{(\beta \bar{y} \bar{\psi}_n)^2}{A_{nn}} - \ln A_{nn} - \beta \sum_{m \neq n} \bar{\psi}_n \bar{\psi}_m w_n w_m \right) + \frac{N}{2} \ln \alpha - \beta \bar{y} + \frac{L}{2} \ln \beta - \frac{L}{2} \ln \pi. \quad (30)$$

Данный функционал содержит коэффициенты разложения $\{w_n\}_{n=1}^N$, для нахождения которых из формулы (20), в свою очередь, необходимо знать значения параметров α и β . В таких случаях обычно пользуются (Expectation Maximization / ожидание максимизация) EM-алгоритмом [7]:

– на первом шаге случайным образом фиксируют параметры модели α , β и вычисляют значения $\{w_n\}_{n=1}^N$ из уравнения (28);

– на втором шаге находят новые параметры α и β путем поиска максимума функционала (30) при текущих значениях коэффициентов разложения $\{w_n\}_{n=1}^N$.

Далее параметры модели, полученные на втором шаге, используют для получения новых коэффициентов разложения и т.д. При байесовском подходе к регуляризации задач обучения нейронной сети многократно повторяются эти шаги. Таким образом, алгоритм сводится к некоторому решению $f(\bar{x})$ [7].

Моделирование

Для проведения экспериментов была разработана программа в среде Matlab для обучения нейронной сети, состоящей из двух слоев (входной и скрытый) с использованием алгоритма Левенберга – Марквардта, алгоритма байесовской регуляризации, масштабируемого алгоритма сопряженных градиентов и разработанного алгоритма. Количество нейронов в скрытом слое определялось с использованием теории Арнольда – Колмогорова – Хехт – Нильсена (1) по критериям максимальной вероятности распознавания объекта и минимального времени обучения (рис. 3).

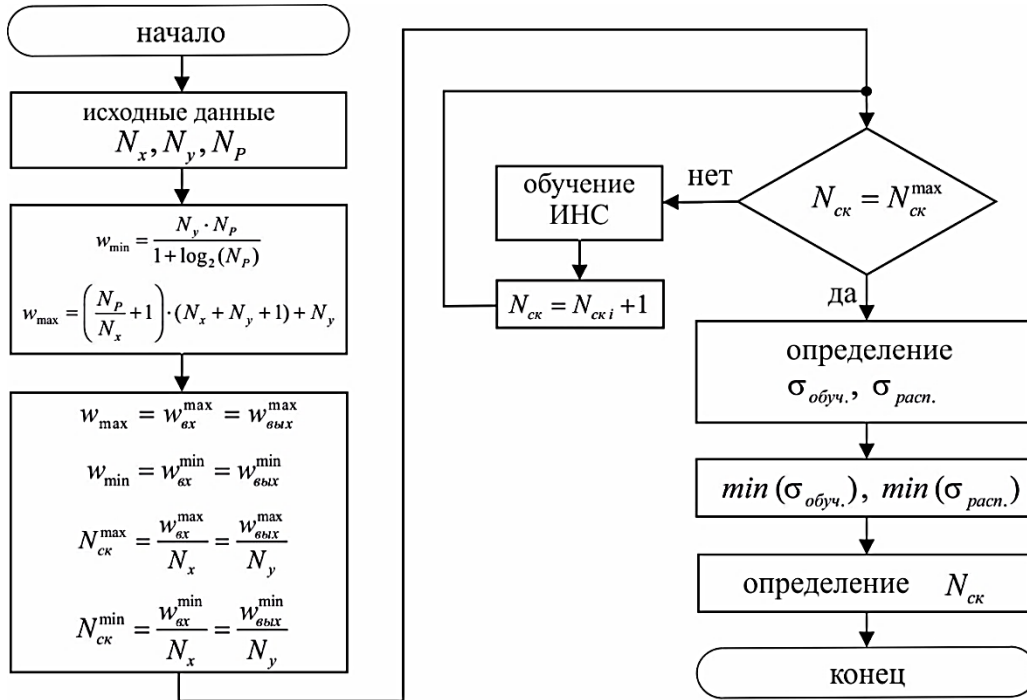


Рис. 3. Разработанный алгоритм оптимизации обучения нейронной сети при определении количества нейронов в скрытом слое

При этом N_p – количество особых точек на изображении цели [9] обучающей выборки ($N_p = 2098$); N_y – размерность выходного сигнала ($N_y = 2$ jeep или tank); N_x – размерность входного сигнала ($N_x = 64$); $w_{вх}^{max}, w_{вых}^{max}$ – максимальное количество весов между входным и скрытым слоем, максимальное количество весов между скрытым и выходным слоем соответственно; $w_{вх}^{min}, w_{вых}^{min}$ – минимальное количество весов между входным и скрытым слоем, минимальное количество весов между скрытым и выходным слоем соответственно; w_{max}, w_{min} – максимальное и минимальное количество весов соответственно; $N_{ск}$ – количество нейронов в скрытом слое; $T_{обуч}$ – время обучения; $P_{расп}$ – вероятность распознавания; $\sigma_{обуч}$ – ошибка обучения; $\sigma_{расп}$ – ошибка распознавания.

Проведены исследования по определению количества нейронов в скрытом слое, вероятности распознавания объекта и времени обучения нейронной сети (рис. 4–6).

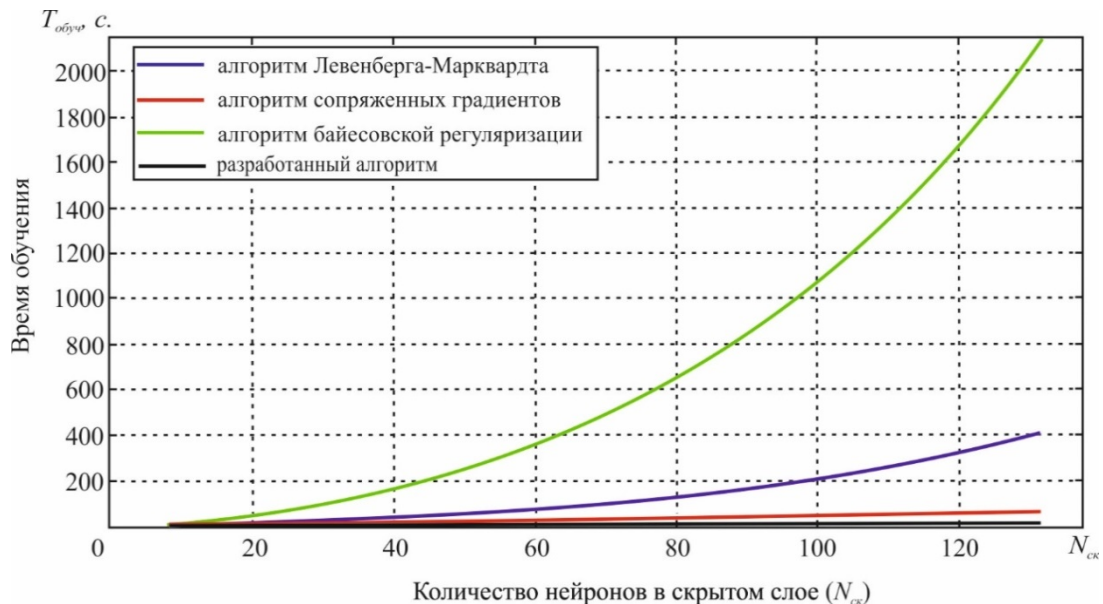


Рис. 4. Зависимость времени обучения ИНС от количества нейронов в скрытом слое ($N_{ск}$)

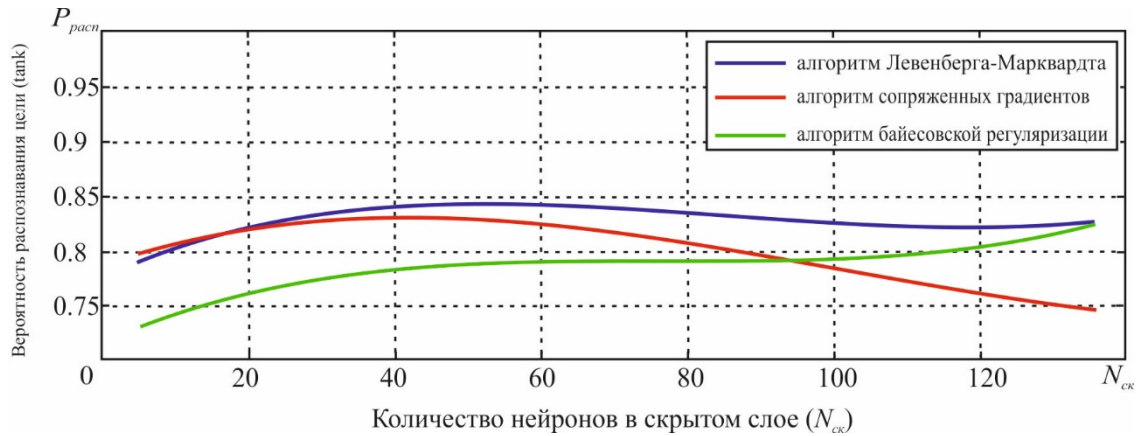


Рис. 5. Зависимость вероятности распознавания цели (tank) ИНС от количества нейронов в скрытом слое ($N_{ск}$)

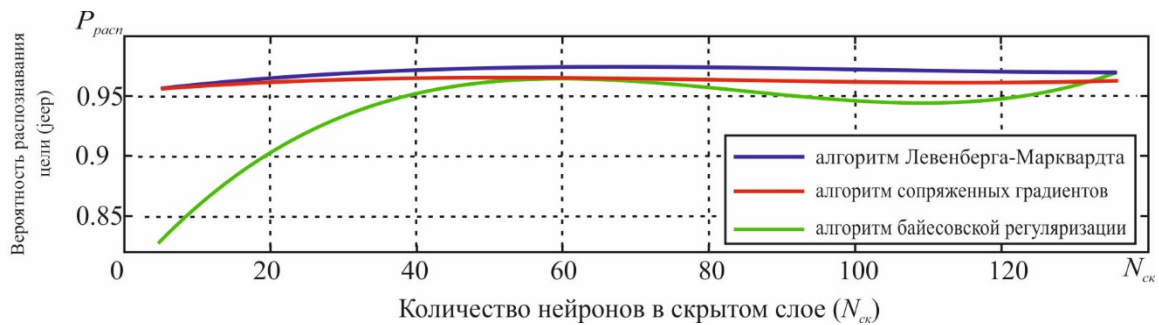


Рис. 6. Зависимость вероятности распознавания цели (jeep) ИНС от количества нейронов в скрытом слое ($N_{ск}$)

На рис. 4–6 показано, что время обучения многослойного персептрона нейронной сети для байесовского алгоритма к регуляризации обучения больше, чем у алгоритма Левенберга – Марквардта и масштабируемого алгоритма сопряженных градиентов, у которого время обучения меньше, чем у остальных. Вероятность распознавания цели (tank или jeep) у алгоритма Левенберга – Марквардта больше, чем у масштабируемого алгоритма сопряженных градиентов и байесовского алгоритма организации обучения.

Эмпирически определяется количество нейронов в скрытом слое с использованием уравнений (1), (3) и с помощью алгоритма Левенберга – Марквардта по критерию максимальной вероятности распознавания объекта (см. рис. 3). В результате оптимальное число нейронов в скрытом слое составило $N_{ск} = 37$ с вероятностью распознавания объекта $P_{расп} \approx 0,99$ (рис. 7, 8).

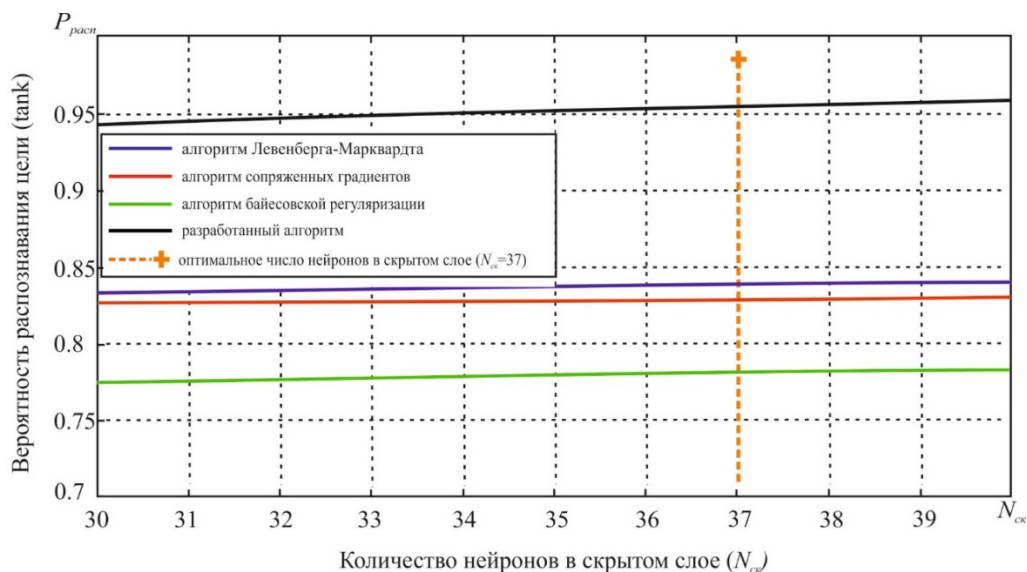


Рис. 7. Зависимость вероятности распознавания цели (tank) от количества нейронов в скрытом слое ($N_{ск}$)

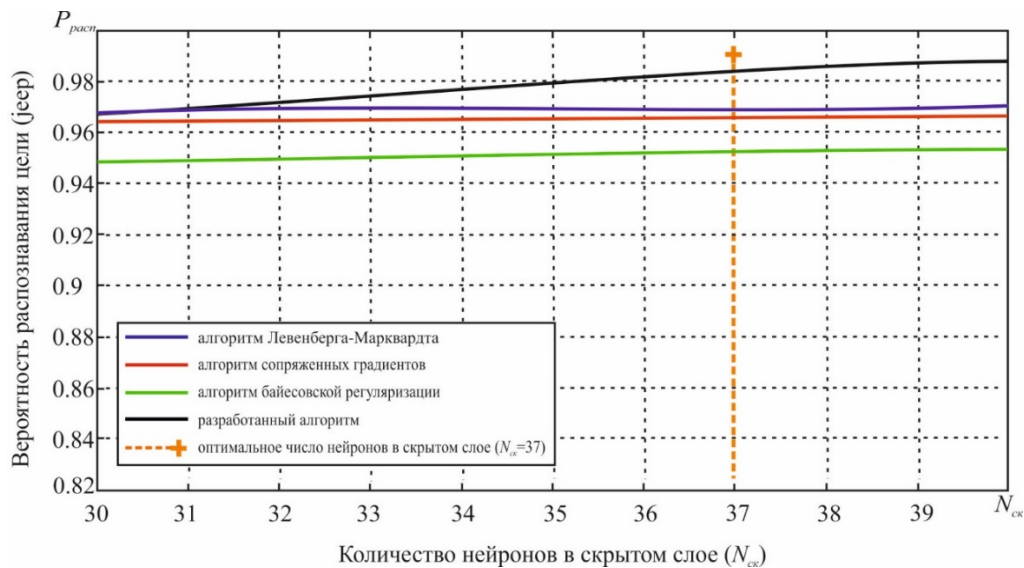


Рис. 8. Зависимость вероятности распознавания цели ($P_{расп}$) от количества нейронов в скрытом слое ($N_{ск}$)

При использовании части или всех весов нейронной сети $N_{ск} = 37$, полученных эмпирически, для определения количества нейронов в скрытом слое с помощью алгоритма масштабируемых сопряженных градиентов для обучения сети по критерию максимальной вероятности распознавания объекта получаем достаточно высокую вероятность распознавания объекта (рис. 7, 8).

Результаты

Процесс распознавания цели с помощью ИНС состоит из трех этапов. Первый – это извлечение признаков из эталонных изображений по алгоритму обнаружения особых точек SURF и формирование из них базы данных; второй этап – определение ($N_{ск}$) и обучение нейронной сети с использованием этих данных и желаемых выходов \tilde{y}_i ; третий этап – это этап распознавания объекта, в процессе которого извлечены признаки из текущего изображения и применены в входе построения нейронной сети.

Особая точка на изображении цели, полученная с помощью алгоритма SURF, состоит из 64 градиентов дескрипторов относительно особой точки, поэтому количество нейронов во входном слое (N_x) равно 64.

Количество нейронов в скрытом слое определялось экспериментально с использованием разработанного алгоритма по критерию максимальной вероятности распознавания объекта и в диапазоне количества нейронов в скрытом слое (30 ÷ 40) (см. рис. 7, 8). Таким образом, на этапе распознавания цели при использовании разработанной ИНС, в которой получено оптимальное число нейронов в скрытом слое ($N_{ск} = 37$), имеем возможность ее обучения с целью получения высокой вероятности распознавания образов наземной цели $P_{расп} \approx 0,99$ (см. рис. 7, 8).

Список литературы

1. Прус А. И. Разработка нейронной сети прямого распространения для решения задач прогнозирования и аппроксимации : магистерская диссертация. СПб. : СПбГУ, 2016. 324 с.
2. Евдокимов И. А., Солодовников В. И. Автоматизация построения нейронной сети в рамках объектно-ориентированного подхода. М. : Центр информационных технологий в проектировании (ЦИТИ) РАН, 2015. С. 34–45.
3. Методы классической и современной теории автоматического управления : учебник в 5 т. / под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. Т. 5: Методы современной теории автоматического управления. 784 с.
4. Пархоменко С.С. О сокращении времени обработки большого количества данных нейронными сетями методом Левенберга – Марквардта // Международный научно-исследовательский журнал. 2014. № 1. С. 123–134.
5. Пархоменко С. С., Леденева Т. М. Обучение нейронных сетей методом Левенберга-Марквардта в условиях большого количества данных // Вестник ВГУ. Сер.: Системный анализ и информационные технологии. 2014. № 2. С. 66–78.

6. Кучеренко А. Г. Обучение нейронной сети с использованием алгоритма сопряженных градиентов и множественной линейной регрессии для задачи прогнозирования спроса // ДГТУ экономические науки. Математические методы в экономике. 2009. № 1. С. 27–34.
7. Нужный А. С. Байесовский подход к регуляризации задачи обучения сети функций радиального базиса // Искусственный интеллект и принятие решений. 2015. № 1. С. 167–179.
8. Нужный А. С. Байесовская регуляризация в задаче аппроксимации функции по точкам с помощью ортогонализованного базиса // Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН. Математическое моделирование. 2011. Т. 23, № 9. С. 33–42.
9. Годунов А. И., Балаян С. Т., Егоров П. С. Сегментация изображений и распознавание объектов на основе технологии сверточных нейронных сетей // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 3. С. 62–73.

References

1. Prus A.I. *Razrabotka neyronnoy seti pryamogo rasprostraneniya dlya resheniya zadach prognozirovaniya i aproksimatsii: masterskaya dissertatsiya = Development of a neural network of direct propagation for solving forecasting and approximation problems : master's thesis.* Saint Petersburg: SPBGU, 2016:324. (In Russ.)
2. Evdokimov I.A., Solodovnikov V.I. *Avtomatizatsiya postroeniya neyronnoy seti v ramkakh ob"ektно-orientirovannogo podkhoda = Automation of building a neural network in the context of object-oriented approach.* Moscow: Tsentr informatsionnykh tekhnologiy v proektirovanii (TsITI) RAN, 2015:34–45. (In Russ.)
3. Pupkov K.A., Egorov N.D. (ed.). *Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya: uchebnyy v 5 t. = The methods of classical and modern theory of automatic control : tutorial in 5 volumes.* 2nd ed., rev. and suppl. Moscow: Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana, 2004;5:784. (In Russ.)
4. Parkhomenko S.S. On reducing the processing time of a large amount of data by neural networks using the Levenberg-Marquardt method. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal = International Research Journal.* 2014;(1):123–134. (In Russ.)
5. Parkhomenko S.S., Ledeneva T.M. Training of neural networks by the Levenberg-Marquardt method in conditions of a large amount of data. *Vestnik VGU. Ser.: Sistemyy analiz i informatsionnye tekhnologii = Vestnik VSU. Ser.: System analysis and information technologies.* 2014;(2):66–78. (In Russ.)
6. Kucherenko A.G. Neural network training using the algorithm of conjugate gradients and multiple linear regression for the problem of demand forecasting. *DGTU ekonomicheskie nauki. Matematicheskie metody v ekonomike = DSTU ekonomicheskie nauki. Mathematical methods in economics.* 2009;(1):27–34. (In Russ.)
7. Nuzhnyy A.S. Bayesian approach to regularization of the problem of training a network of radial basis functions. *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie resheniy = Artificial intelligence and decision-making.* 2015;(1):167–179. (In Russ.)
8. Nuzhnyy A.S. Bayesian regularization in the problem of function approximation by points using an orthonalized basis. *Fizicheskyy institut im. P. N. Lebedeva RAN. Matematicheskoe modelirovanie = Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences. Mathematical modeling.* 2011;23(9):33–42. (In Russ.)
9. Godunov A.I., Balanyan S.T., Egorov P.S. Image segmentation and object recognition based on convolutional neural network technology. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and Quality of Complex Systems.* 2021;(3):62–73. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Анатолий Иванович Годунов

доктор технических наук, профессор,
 профессор кафедры автоматизации и телемеханики,
 Пензенский государственный университет
 (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
 E-mail: Godunov@pnzgu.ru

Сергей Викторович Шишков

кандидат технических наук, доцент,
 доцент кафедры производства и эксплуатации
 ракетно-артиллерийского вооружения,
 Филиал Военной академии материально-технического
 обеспечения имени генерала армии
 А. В. Хрулева в г. Пензе
 (Россия, г. Пенза, Военный городок, 1)
 E-mail: sergej.shishkov.75@mail.ru

Anatoly I. Godunov

Doctor of technical sciences, professor,
 professor of the sub-department
 of automatics and telemechanics,
 Penza State University
 (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Sergey V. Shishkov

Candidate of technical sciences, associate professor,
 associate professor of the sub-department of production
 and operation of missile and artillery weapons,
 Branch of the Military Academy of Logistics
 named after Army General
 A.V. Khrulev in Penza
 (1 Voennyuy gorodok, Penza, Russia)

Сергей Товмасович Балабян

кандидат технических наук, доцент,
докторант кафедры авиационного вооружения
и эффективности боевого применения,
Военно-воздушная академия
имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина
(Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А)
E-mail: bst76@yandex.ru

Ф. Х. Аль Сафтли

адъюнкт,
Военно-воздушная академия
имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина
(Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А)
E-mail: fadi79@yandex.ru

Sergey T. Balanyan

Candidate of technical sciences, associate professor,
doctoral candidate of the sub-department
of aviation armament and effectiveness of combat use,
Air Force Academy named after professor
N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin
(54A Sarykh Bol'shevikov street, Voronezh, Russia)

F. H. Al Saftli

Adjunkt,
Air Force Academy named after professor
N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin
(54A Sarykh Bol'shevikov street, Voronezh, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 25.08.2021

Поступила после рецензирования/Revised 15.10.2021

Принята к публикации/Accepted 16.11.2021

АВТОМАТИЗАЦИЯ ВИЗУАЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ

А. Д. Тулегулов¹, Д. С. Ергалиев², Д. В. Зуев³, Б. А. Шабден⁴, Р. Абицаев⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Академия гражданской авиации, Алматы, Казахстан

¹ tad62@yandex.kz, ² DES-67@yandex.kz, ³ d.zuev@agakaz.kz, ⁴ b.shabden@agakaz.kz, ⁵ tad62@yandex.kz

Аннотация. *Актуальность и цели.* Практика показывает, что аварии и катастрофы, происходящие при разрушении элементов конструкций объектов, машин и изделий, почти всегда связаны с наличием в них дефектов. В данной статье предлагается к рассмотрению автоматизация процесса визуально-измерительного метода неразрушающего контроля. Целью данной работы является разработка программного комплекса, позволяющего автоматизировать работу специалиста, проводящего визуально-измерительный контроль. *Материалы и методы.* Рассматривается вариант создания базы данных 3D-моделей проверяемых образцов для дальнейшего получения траектории движения электронного микроскопа для создания снимков. *Результаты.* Создана база эталонных изображений поверхностей материалов без дефектов, изображений поверхностей материалов с примерами различных типов дефектов. *Выводы.* Сформированная база даст возможность анализа путем сравнения полученных результатов методами искусственного интеллекта со снимками, полученными во время дефектоскопии электронным микроскопом. Это в свою очередь даст возможность прогнозировать возможные отказы оборудования, а также отработать процесс формирования конечного изображения с указанием мест возможных дефектов.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, визуальный и измерительный контроль, искусственный интеллект, компьютерное зрение

Для цитирования: Тулегулов А. Д., Ергалиев Д. С., Зуев Д. В., Шабден Б. А., Абицаев Р. Автоматизация визуально-измерительного контроля // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 4. С. 119–126. doi:10.21685/2307-4205-2021-4-13

VISUAL MEASURING AUTOMATION CONTROL

A.D. Tulegulov¹, D.S. Yergaliyev², D.V. Zuev³, B.A. Shabden⁴, R. Abikaev⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Academy of Civil Aviation, Almaty, Kazakhstan

¹ tad62@yandex.kz, ² DES-67@yandex.kz, ³ d.zuev@agakaz.kz, ⁴ b.shabden@agakaz.kz, ⁵ tad62@yandex.kz

Abstract. *Background.* Practice shows that accidents and disasters occurring during the destruction of structural elements of objects, machines and products are almost always associated with the presence of defects in them. This article proposes the automation of the process of the visual measuring method (VIM) of non-destructive testing. The purpose of this work is to develop a software package that allows you to automate the work of a specialist conducting visual measurement control (VIC). *Materials and methods.* The option of creating a database of 3D models of the tested samples is being considered for further obtaining the trajectory of the electron microscope for creating images. *Results.* A database of reference images of material surfaces without defects, images of material surfaces with examples of various types of defects has been created. *Conclusions.* The formed base will make it possible to analyze by comparing the results obtained by artificial intelligence methods with images obtained during flaw detection with an electron microscope. This, in turn, will make it possible to predict possible equipment failures, as well as to work out the process of forming the final image, indicating the locations of possible defects.

Keywords: non-destructive testing, visual and measuring control, artificial intelligence, computer vision

For citation: Tulegulov A.D., Yergaliyev D.S., Zuev D.V., Shabden B.A., Abikaev R. Visual measuring automation control. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;(4):119–126. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-4-13

Введение

Практика показывает, что аварии и катастрофы, происходящие при разрушении элементов конструкций объектов, машин и изделий, почти всегда связаны с наличием в них дефектов. Все дефекты объединяются одним общим признаком: они ухудшают работоспособно-

сти продукции. В процессе развития техники бездефектность изделий всегда была важным фактором. Даже при использовании наилучших материалов, наиболее совершенных конструкций и технологических процессов в готовых изделиях могут быть дефекты.

Методы исследования

Для выявления дефектов используют различные виды контроля изделий и среди них важное место занимает визуальный и измерительный контроль (ВИК).

Этот вид контроля отличается от других видов границами спектральной области излучения, используемого для получения информации об объекте контроля. Видимое излучение, которое может непосредственно вызывать зрительное ощущение, возможно применять с использованием простейших измерительных средств [1].

Промышленные объекты работают во все более сложных условиях. При этом определение остаточного ресурса по результатам оптического контроля в условиях изношенности оборудования приобретает все большее значение, а относительный объем средств контроля, не требующих постоянного присутствия оператора-дефектоскописта, возрастает. Поэтому описанная в статье работа направлена на автоматизацию средств ВИК.

Оптический неразрушающий контроль применяется: в металлургии – для контроля геометрии проката труб, листов, профилей и т.д., проверки качества внутренней поверхности труб; в химической промышленности – для спектрального анализа контроля структуры пластмасс и полимеров; в производстве цемента – для гранулометрического анализа исходных материалов; в авиационной – для контроля внешних повреждений деталей и элементов; и т.д. [2].

Результаты

В качестве результатов исследования можно отметить следующее:

- 1) была осуществлена замена нетехнологичного оборудования на цифровое;
- 2) был автоматизирован процесс поиска дефектов с помощью искусственного интеллекта (ИИ);
- 3) были разработаны указания оператору-дефектоскописту для принятия мер, способствующих устранению возможных дефектов.

Выбор программного обеспечения для создания 3D-моделей испытываемых образцов с последующим выводом ключевых точек

STL – это каталог данных, который содержит примеры файлов «STL». «STL» означает «стереофотограмметрия» и указывает, что основная цель этого формата файла – описать форму трехмерного стационарного объекта.

Файл STL обычно имеет расширение имени файла «*.stl».

Файл STL содержит описание поверхности твердого тела, разложенного на треугольники. Вершины треугольников должны быть перечислены в порядке против часовой стрелки, если смотреть снаружи на поверхность. Также может быть указан нормальный вектор для треугольника.

Файл начинается с записи (которая может включать имя объекта) и заканчивается записью окончания файла. Каждый треугольник начинается с ключевого слова «facet» и заканчивается ключевым словом «endfacet». Вектор нормали, если он задан, включается как часть записи «facet» и идентифицируется ключевым словом «normal». Вектор нормали должен иметь единичную длину. Три вершины треугольника ограничены записями «outer loop» и «endloop». Каждая вершина описывается в записи вершины, в которой перечислены ее координаты (X, Y, Z). Пример хранения данных STL для одной из плоскостей данного образца показан на рис. 1.

Так как при экспортировании формат STL автоматически разбивает 3D-модель на треугольные плоскости, на выходе мы получаем координаты, описывающие каждую треугольную плоскость (1):

$$\text{vertex}_{n1} = [x_{n1}, y_{n1}, z_{n1}], \text{vertex}_{n2} = [x_{n2}, y_{n2}, z_{n2}], \text{vertex}_{n3} = [x_{n3}, y_{n3}, z_{n3}], \quad (1)$$

где n – номер точки.

Для каждой плоскости точек всего три, n – принято для удобства реализации цикла в программе.


```

3663 facet normal -0.256282 -0.844847 0.469630
3664 outer loop
3665 vertex -0.180240 -0.906128 0.382683
3666 vertex -0.318190 -0.768178 0.555570
3667 vertex -0.353553 -0.853554 0.382683
3668 endloop
3669 endfacet
    
```

Рис. 1. Координаты точек 3D-модели в ASCII

Именно эти координаты необходимы для дальнейшей сортировки массива координат, представленного ниже (2):

$$\text{plane}_m = [[\text{vertex}_{n1}], [\text{vertex}_{n2}], [\text{vertex}_{n3}]], \quad (2)$$

что равно записи (3):

$$\text{plane}_m = [[x_{n1}, y_{n1}, z_{n1}], [x_{n2}, y_{n2}, z_{n2}], [x_{n3}, y_{n3}, z_{n3}]], \quad (3)$$

где n – номер плоскости.

Камера перемещается к центру треугольника, координата которого вычислена по формуле

$$\text{plane}_{\text{ncenter}} = [x_{\text{ncenter}} = \frac{x_{n1} + x_{n2} + x_{n3}}{3}, y_{\text{ncenter}} = \frac{y_{n1} + y_{n2} + y_{n3}}{3}, z_{\text{ncenter}} = \frac{z_{n1} + z_{n2} + z_{n3}}{3}], \quad (4)$$

где n – номер плоскости.

Сравнивая координаты двух точек в пространстве вдоль оси X , если происходит смещение по Z , то камера поворачивается относительно оси Y образца, на угол α , который вычисляется по формуле (5):

$$\arccos \alpha = \frac{\text{plane1}_x \text{plane2}_x + \text{plane1}_y \text{plane2}_y}{\sqrt{\text{plane1}_x^2 + \text{plane1}_y^2} + \sqrt{\text{plane2}_x^2 + \text{plane2}_y^2}}. \quad (5)$$

Рассмотрены популярные CAD системы с целью выяснения возможностей функций для экспорта STL-файлов в их базовой конфигурации. В нее включены возможность экспорта отдельных деталей сборки в STL-файл, возможность экспорта сборки из нескольких деталей в один общий STL-файл (табл. 1).

Таблица 1

Поддержка STL в различных CAD системах

Система	Разработчик	Вывод сборки в один файл	Вывод сборки по деталям	Предпросмотр
Inventor Pro	Autodesk	есть	нет	нет
CATIA V5	Dassault Systems	есть	есть	есть
NX	UGS	есть	нет	есть
ProEngineer	PTC	есть	есть	есть
Solid Edge	UGS	есть	есть	нет
Solid Works	Dassault Systems	есть	есть	есть
Компас-3D	«Аскон»	есть	есть	есть

Из табл. 1 можно сделать вывод, что гибкий экспорт в STL-файл поддерживает довольно большое количество CAD-систем. Это позволяет работать с данным программным комплексом большому количеству людей, без дополнительного переобучения на новые CAD-системы [3].

Описание процесса сравнения искусственным интеллектом фрагментов со снимков с референсными изображениями дефектов

Одна из самых перспективных наук о компьютерах и программах – компьютерное зрение. Его смысл заключается в способности ИИ к распознаванию и определению сути картинки. Это важнейшая область в искусственном интеллекте, включающая сразу несколько действий: распознавание содержимого фотографии, определение предмета и его классификация или генерация. Поиск объектов на картинке скорее всего является важнейшей областью компьютерного зрения.

В рамках данной работы предлагается разработка ИИ на языке программирования Python с применением библиотек и фреймворков: RetinaNet, Numpy, SciPy, Matplotlib, ImageAI. Краткое описание алгоритма работы программы: создается переменная, в которой указывается путь к директории с файлом Python, RetinaNet, моделью и образом, далее необходимо объявить новый класс для поиска дефектов на снимке, после чего идет загрузка модели внутрь класса для поиска и наконец вызов функции обнаружения (распознавания объектов) и запуск парсинга пути начального и конечного изображений.

Для упрощения сравнения фотографий программным путем уменьшается насыщенность и увеличивается яркость в целях избавления от лишних оттенков, что уменьшает время обработки и соответственно нагрузку на ЭВМ. Если дефект найден – сохраняется оригинал изображения с указанием расположения дефекта для дальнейшего изучения (рис. 2).

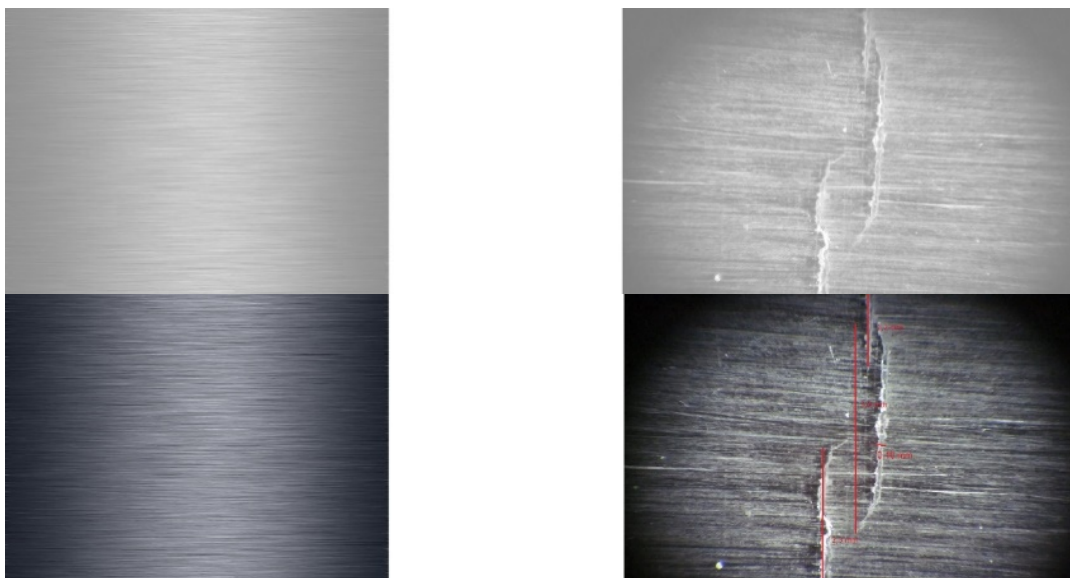


Рис. 2. Демонстрация сравнения идеального изображения (слева) с полученным снимком (справа)

Поиск коррозии требует большего количества задач от ИИ, так как помимо поиска на несоответствие референсного изображения со снимком, необходимо также добавить этап наложения возможных вариантов пораженных участков коррозией (рис. 3).

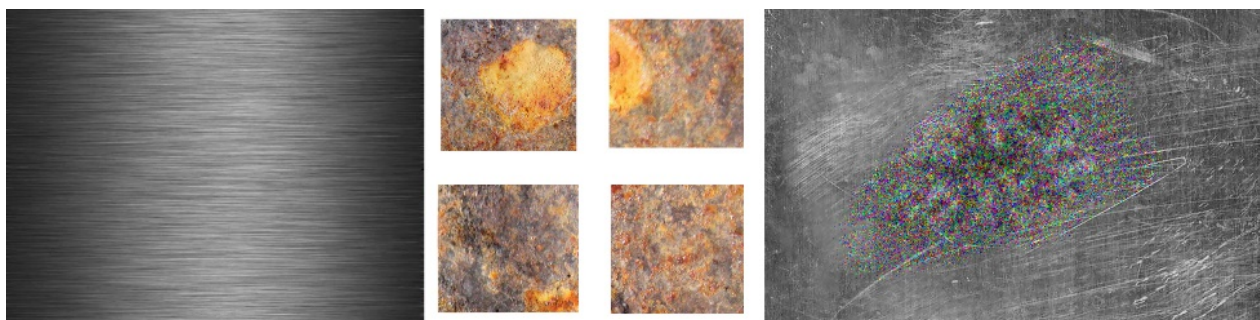


Рис. 3. Демонстрация сравнения идеального изображения (слева) с вариантами коррозии (по центру) и полученным снимком (справа)

**Указание на местоположение дефектов на UV развертке 3D-модели
для его дальнейшего поиска на испытываемом образце оператором-дефектоскопистом**

Считывание данных о местоположении координат точек видимых плоскостей 3D-модели в пространстве для дальнейшего развертывания и создания 2D-изображения – не новшество как для компьютерной графики, так и для математики в целом. Самый простой пример применения данной техники – картография, где 3D-модель земли представлена на 2D-картах. Конечно, существуют искажения и упущения в точности, для этого можно изменять уровень детализации, в данном случае количество точек (рис. 4).

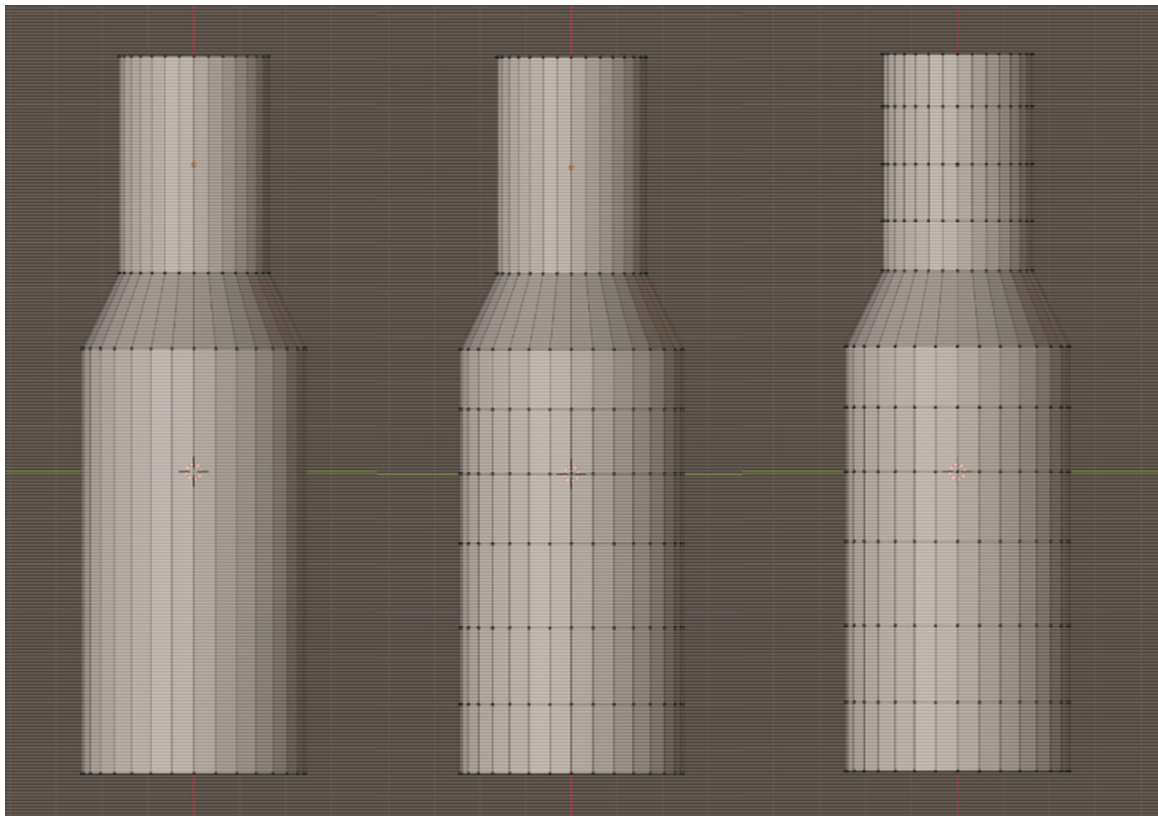


Рис. 4. Разный уровень детализации образца (слева направо: низкий, средний, высокий)

В картографии цилиндрическая проекция – семейство проекций, которые преобразуют меридианы в вертикали ($U = \text{const}$), а параллели в горизонталы ($V = \text{const}$). Одна из цилиндрических проекций – так называемая равнопромежуточная проекция (φ – широта, $[-\pi; \pi]$; λ – долгота, $[-\frac{1}{2}\pi; \frac{1}{2}\pi]$):

$$u = \frac{\varphi}{2\pi} + 0,5, \quad v = \frac{\lambda}{\pi} + 0,5. \quad (6)$$

Подобное преобразование можно применить и в компьютерной графике (рис. 5), для этого необходимо понимать, что преобразование вертикальных точек меридиан U будет происходить по оси X , а преобразование горизонтальных параллелей V будет происходить по оси Y [4].

Точки, выделенные черным цветом на изображениях, соответствуют точкам, описанным в пункте 5.1. Привязывая снимки, полученные с электронного микроскопа к данным точкам, в дальнейшем можно обозначить на UV развертке (создав новое изображение) места возможных дефектов (рис. 6).

Области, распознанные ИИ как зеленые, означают отсутствие обнаружения дефекта. Области, распознанные ИИ как красные, означают максимальное соответствие с референсными изображениями дефектов. Области, распознанные ИИ как желтые, могут означать несколько вариантов: снимок получился нечетким или ни одно из референсных изображений дефектов или изображение удовлетворяемого результата не удалось идентифицировать на полученном снимке, что требует повторного запуска дефектации или ручной работы оператора-дефектоскописта.

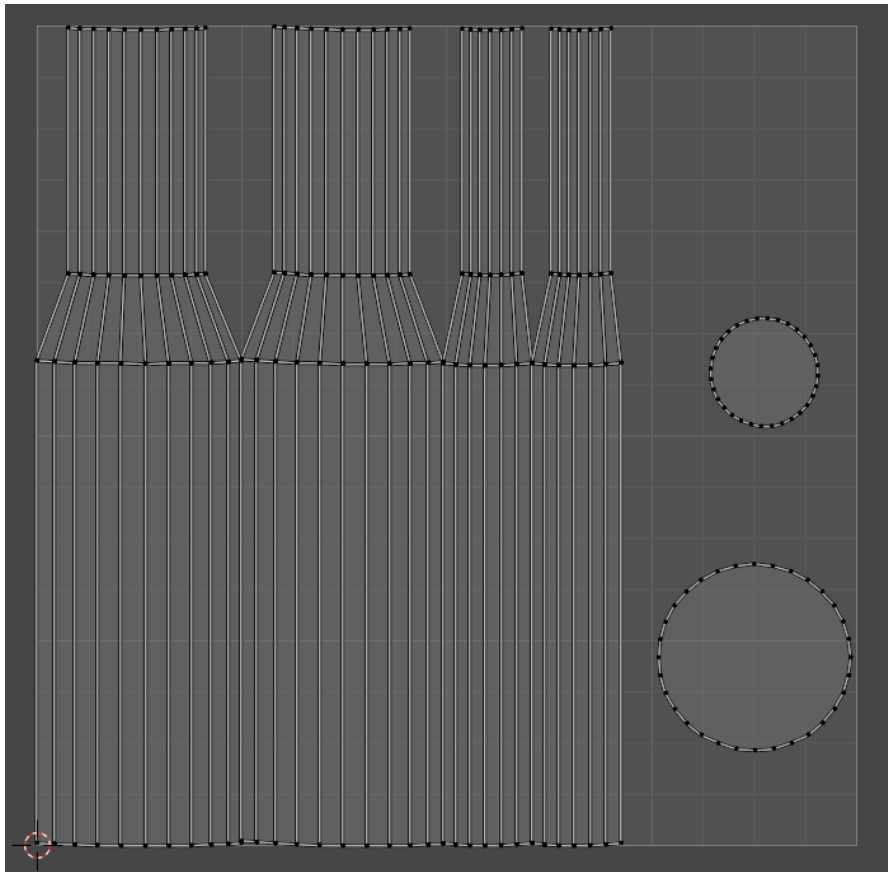


Рис. 5. Пример UV развертывания образца с низким уровнем детализации

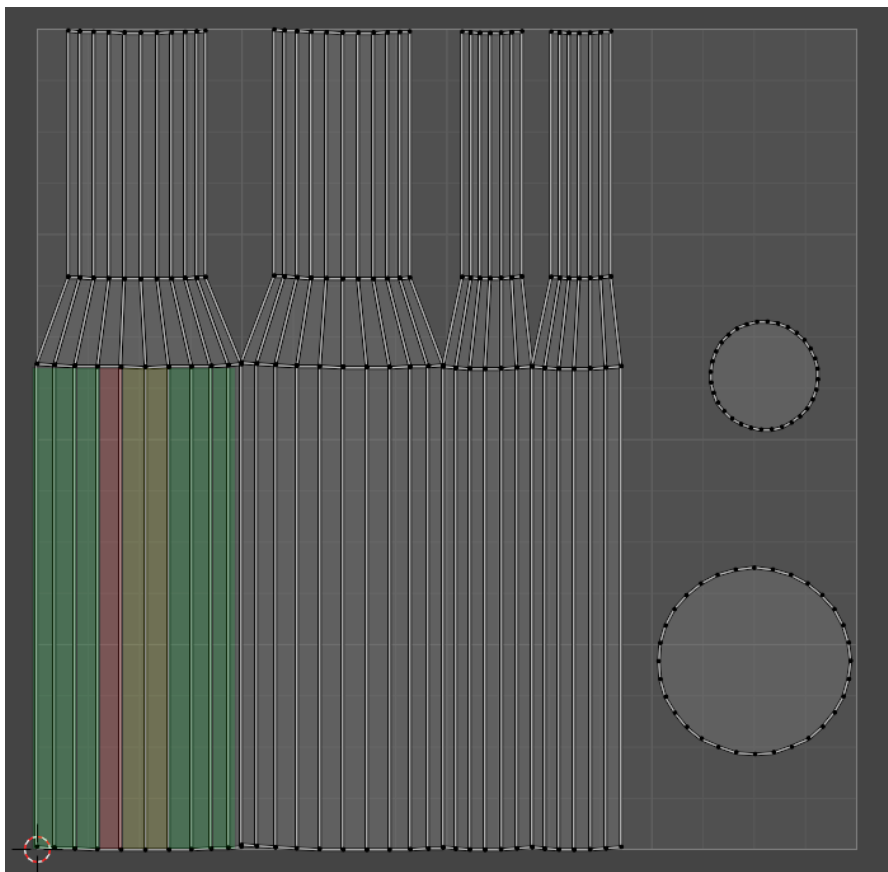


Рис. 6. Пример изменения UV развертки с применением цветовой градации

Заключение

Особенность предложенного метода заключается в возможности автоматизации работы дефектоскописта при использовании ВИК, что позволит эффективно управлять процессом обнаружения дефектов, а именно: заменить нетехнологичное оборудование на цифровое, например, лупу или микроскоп на электронный микроскоп. Что в свою очередь поможет автоматизировать процесс поиска дефектов с помощью искусственного интеллекта, основываясь на принципе сравнения изображений, а также упростит хранение и обработку данных, получаемую с помощью визуального и измерительного контроля.

После получения положительных результатов работы ИИ планируется реализация следующего этапа – программный комплекс развить до аппаратно-программного комплекса, т.е. создать прототип с автоматизированной, синхронной работой электронного микроскопа и приспособления, удерживающего образец.

Список литературы

1. Филинов В. Н., Кеткович А. А., Филинов М. В. Неразрушающий контроль. М. : Машиностроение, 2004. Т. 6. С. 376–377.
2. Клюев В. В., Соснин Ф. Р. Неразрушающий контроль. М., 2004. Т. 1. С. 8–9.
3. STL-формат для быстрого прототипирования. URL: http://www.cadcamcae.lv/hot/STL_n23_p64.pdf
4. Запорожченко А. В. Картографические проекции и методика их выбора для создания карт различных типов. Ногинск, 2007. С. 78–82.
5. Ергалиев Д. С., Тулегулов А. Д., Ахмадия А. А. Аксиоматическая постановка задачи для формирования математической модели диагностики бортовых комплексов оборудования воздушных судов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2012. Т. 1. С. 198–201.
6. Ергалиев Д. С., Тулегулов А. Д., Молдамурат Х. Применение информационных технологий для анализа физических свойств подстилающей поверхности // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2014. С. 348–350.

References

1. Filinov V.N., Ketkovich A.A., Filinov M.V. *Nerazrushayushchiy kontrol' = Non-destructive testing*. Moscow: Mashinostroenie, 2004;6:376–377. (In Russ.)
2. Klyuev V.V., Sosnin F.R. *Nerazrushayushchiy kontrol' = Non-destructive testing*. Moscow, 2004;1:8–9. (In Russ.)
3. *STL-format dlya bystrogo prototipirovaniya = STL-format for rapid prototyping*. (In Russ.). Available at: http://www.cadcamcae.lv/hot/STL_n23_p64.pdf
4. Zaporozhchenko A.V. *Kartograficheskie proektsii i metodika ikh vybora dlya sozdaniya kart razlichnykh tipov = Cartographic projections and methods of their selection for creating maps of various types*. Noginsk, 2007:78–82. (In Russ.)
5. Ergaliev D.S., Tulegulov A.D., Akhmediya A.A. Axiomatic formulation of the problem for the formation of a mathematical model of diagnostics of on-board complexes of aircraft equipment. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2012;1: 198–201. (In Russ.)
6. Ergaliev D.S., Tulegulov A.D., Moldamurat Kh. Application of information technologies for the analysis of physical properties of the underlying surface. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2014:348–350. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Амандос Дабысович Тулегулов

кандидат физико-математических наук, доцент,
заведующий кафедрой
авиационной техники и технологий,
Академия гражданской авиации
(Казахстан, г. Алматы, ул. Ахметова, 44)
E-mail: tad62@yandex.kz

Amandos D. Tulegulov

Candidate of physical and mathematical sciences,
associate professor,
head of the sub-department
of aviation engineering and technology,
Academy of Civil Aviation
(44 Akhmetova street, Almaty, Kazakhstan)

Дастан Сырымович Ергалиев

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

Дмитрий Вячеславович Зуев

магистр технических наук,
преподаватель кафедры кафедры
авиационной техники и технологий,
Академия гражданской авиации
(Казахстан, г. Алматы, ул. Ахметова, 44)
E-mail: d.zuev@agakaz.kz

Бахытгуль Абайкызы Шабден

магистр технических наук,
преподаватель кафедры
авиационной техники и технологий,
Академия гражданской авиации
(Казахстан, г. Алматы, ул. Ахметова, 44)
E-mail: b.shabden@agakaz.kz

Роман Абикаев

студент,
Академия гражданской авиации
(Казахстан, г. Алматы, ул. Ахметова, 44)
E-mail: tad62@yandex.kz

Dastan S. Ergaliev

Ph.D., associate professor,
professor of the sub-department
of aviation engineering and technology,
Academy of Civil Aviation
(44 Akhmetova street, Almaty, Kazakhstan)

Dmitry V. Zuev

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

Bakhytgul A. Shabden

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

Roman Abikaev

Student,
Academy of Civil Aviation
(44 Akhmetova street, Almaty, Kazakhstan)

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

Поступила в редакцию/Received 15.08.2021

Поступила после рецензирования/Revised 20.09.2021

Принята к публикации/Accepted 10.10.2021

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS

УДК 004.9, 351.74, 353.9, 614.8.01
doi:10.21685/2307-4205-2021-4-14

REGIONAL MANAGEMENT CENTER FRAMEWORK FOR G2C-FEEDBACK AND PUBLIC SAFETY SUPPORT

A.V. Masloboev

Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia
masloboev@iimm.ru

Abstract. *Background.* For the purposes of management activities efficiency enhancement of the public authorities at regional level within the bounds of digital economy, the study examines organizational, systems engineering and technological issues of the development and functioning of regional management centers in the Russian Federation aimed at problem monitoring and public safety situational analysis on the basis of G2C(Government-to-Citizen)-feedback support and digital communications. *Materials and methods.* The state-of-the-art and development trends of regional management centers are considered. The structure and functional correlation between the regional management centers and situational centers, as well as the possible ways of its integration into the system of distributed situational centers are analyzed and discussed. Based on the principles of the systems approach the conceptual model of a typical regional management center is designed. The backbone composition and deployment experience of regional management center of the Murmansk region are explored and represented. *Results and conclusions.* The framework and implementation techniques of the virtual regional management center in the paradigm of multi-agent cyber-physical systems based on knowledge processing and network-centric control foundations are proposed. The key problems of regional management digital transformation by the use of situational and regional management centers have been identified. It is shown that for the effective application in practice of such control centers both a scientific substantiation of the implemented solutions and an appropriate normative and legal basis, regulating its functioning, are required.

Keywords: problem monitoring, situational control, regional management center, security, decision-making support, digital platform, information and analytical system

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of the State Research Program of the Institute for Informatics and Mathematical Modeling of the Kola Science Centre of RAS (project No. 0226-2019-0035).

For citation: Masloboev A.V. Regional management center framework for G2C-feedback and public safety support. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;(4):127–138. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-4-14

ОБЛИК ЦЕНТРА УПРАВЛЕНИЯ РЕГИОНОМ ДЛЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЛАСТЬ – НАСЕЛЕНИЕ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОБЩЕСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

А. В. Маслобоев

Кольский научный центр Российской академии наук, Апатиты, Россия
masloboev@iimm.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Для повышения эффективности управленческой деятельности органов государственной власти регионального уровня в условиях цифровой экономики в работе исследуются организационные, системотехнические и технологические вопросы создания и функционирования центров

управления регионами на территории Российской Федерации, направленных на решение задач проблемного мониторинга и ситуационного анализа общественной безопасности на основе обеспечения обратной связи с населением и цифровых коммуникаций. *Материалы и методы.* Рассматриваются текущее состояние и тенденции развития центров управления регионами. Анализируются структура и функциональное соотношение центров управления регионами и ситуационных центров, а также обсуждаются пути их интеграции в систему распределенных ситуационных центров. На основе принципов системного подхода строится концептуальная модель типового центра управления регионом. Приведены состав и опыт развертывания центра управления регионом Мурманской области. *Результаты и выводы.* Предложены архитектура, подход и средства реализации виртуального центра управления регионом в парадигме мультиагентных киберфизических систем, основанных на знаниях и теории сетцентрического управления. Определены ключевые проблемы цифровой трансформации регионального управления с применением ситуационных центров и центров управления регионами. Показано, что для их эффективного использования на практике требуется как научное обоснование внедряемых решений, так и соответствующая нормативно-правовая база, регламентирующая их работу.

Ключевые слова: проблемный мониторинг, ситуационное управление, центр управления регионом, безопасность, поддержка принятия решений, цифровая платформа, информационно-аналитическая система

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания ИИММ КНЦ РАН (НИР № 0226-2019-0035).

Для цитирования: Маслобоев А. В. Облик центра управления регионом для взаимодействия власть–население и обеспечения общественной безопасности // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 4. С. 127–138. doi:10.21685/2307-4205-2021-4-14

Introduction

Any critical or emergency situation, such as a pandemic or economic depression, is a powerful impetus on the development of new technologies and situational management tools. It is not possible more than meets the eye to manage the country or independent regions in such extreme conditions without wide application of situational centers, information and analytical centers intended for monitoring and control, video conferencing aids, intelligent decision support and management systems. Regional and sectoral situational centers operating in behalf of national security ensuring of the country are multifunctional and solve a wide range of urgent problems: timely detection, scenario modeling and prediction of critical situations in the socio-economic and military-political spheres, monitoring of public safety and analysis of international situation, comprehensive information support of public authorities management activity, control over the fulfillment of decrees and commissions of the President of the Russian Federation and the Government of the Russian Federation, coordination and methodological maintenance of the large-scale projects and national programs implementation. The scale and complexity of these problems in terms of interconnection of the sustainable socio-economic development goals and national security ensuring principles, as well as rational distribution and optimization of the resources used condition on necessity to expand the intellectual component of the distributed situational center system by developing and integrating regional management centers (RMC) into its composition, strengthening the feedback between society and the state in pressing problem solving and enhancing the accounting adequacy of this connection in the current public administration processes at all levels of decision-making – municipal, regional, federal. In March 2020 the problem of RMC development and functioning organization in the constituent entities of the Russian Federation was assigned by the President of the country in the List of commissions to the Government of the Russian Federation in the issue of the meeting with the Council of the local self-government development, which took place in Krasnogorsk, Moscow area at the end of January 2020¹.

First of all, the RMC are focused on the municipal level and are designed to enhance the efficiency of public administration and regional management through the establishment of closer information interaction between regional authorities and the population by means of an unified digital platform used for citizens' appeal processing and analyzing incoming from different sources in real-time, including at the expense of active use of the high end technologies and popular means of infocommunications – social networks and mobile messaging applications (messengers). At the regional level the RMC corresponds one of the key system-forming elements of the situational center at the appropriate level of the regional management hierarchy. At the same time, the RMC and regional situational centers cannot be opposed to each other, since

¹ О создании и функционировании Центров управления регионами в субъектах Российской Федерации (Перечень поручений Президента РФ от 1 марта 2020 г. № Пр-354, п. 1 16), п. 3, п. 12 3)). URL: <http://kremlin.ru/acts/assignments/orders/62919>

they complement each other organizationally and functionally, have a similar functioning logic and also use common technical regulations and interaction standards. In other words, the RMC is a simplified project of the regional situational center. Today, the RMC is positioned as an effective tool of digital management within the bounds of goals and directions realization of the national program "Digital Economy of the Russian Federation"¹. Basically, this tool allows operability and authority's situational awareness enhancement of the emerging problems solving at various level in the regions in the field of digitalization of public administration and regional management. In addition, it provides on-line monitoring, strategic planning and quality control of the managerial decisions execution based on the diverse information processing and analysis on the status of regional elements and subsystems incoming from the region population.

This study examines the state-of-the-art and development trends of RMC in the context of up-to-date challenges and threats. The organizational, technical and technological foundations of the RMC engineering from the standpoint of a systems approach are discussed. The correlation issues between the RMC and the situational centers at the conceptual level are explored. The information model and functional structure of a typical RMC are represented. The architecture and implementing techniques of the virtual RMC in the paradigm of agent-based cyber-physical systems based on knowledge analysis and processing are proposed.

Background and Organizational Foundations of RMC

The agenda of society and public administration digital transformation based on the use of the distributed situational center system and RMCs is in section of the first priority area of the Scientific and Technological Development Strategy of the Russian Federation: «pt. A) the transition to advanced digital, intelligent manufacturing technologies, robotic systems, novel materials and design methods, development of Big Data processing systems, machine learning and artificial intelligence»².

Situational centers and RMCs are intended for being a certain intelligent buffer between the variety of data sources and information users (population – government) integrated and processed in order to quality and validity enhancement of the managerial decisions made at different levels of public administration – federal, regional, municipal, sectoral, object, etc. to provide a timely preventive response of the national security system of the country in the face of new challenges and threats of various nature.

Providing G2C-feedback with population on various classes of socio-economic development problems of territories is not only one the significant objectives of the public authorities activities, but also a strategic area of the scientific and technical policy of the Ministry of Internal Affairs of Russia until 2030 [1] in terms of public safety and situational management digitalization support. For this purposes, a great deal of digital services and platforms intended for the citizen appeals processing have recently appeared in our country and abroad, But these are separated information and analytical systems for managers and officials of different levels for the most part. Integration of these systems into a single whole will allow expanding their functionality and organizing integrated monitoring and comprehensive analysis of emerging problems in the socio-economic and socio-political spheres. That will promote the operationability and quality enhancement of managerial decision-making. The RMCs developed in the constituent entities of the Russian Federation starting from 2020 and which are an integral part of the project implementation of smart cities and smart regions are intended to become such a real integrator.

First of all, let's define what the RMC is. The RMC is often referred to as a situational or information-analytical center, and is sometimes mistakenly confused with a call-center. It is quite important to separate these concepts. Regional situational centers were initially developed to collect and analyze diverse information on the current situation in the region, cause-and-effect analysis of the possible crisis situations in the region, as well as its consequences prediction. As a rule, the functionality of regional situational centers also includes the hot link of the regional administration to the federal level. In the judgment of many experts, the RMC is an operating tool for independent monitoring of the situation, management and communication for the municipal level. Ideologically, the RMC functioning is first of all based on the principle of operational response to citizen appeals on problem issues (Fig. 1) incoming from various sources (inter-departmental electronic document management system, e-mail, social networks, hot line with the popula-

¹ Программа "Цифровая экономика Российской Федерации" (утв. Распоряжением Правительства РФ № 1632-п от 28 июля 2017 г.). URL: <http://static.government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB79I5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf>

² Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации (утв. Указом Президента РФ № 642 от 01 декабря 2016 г.). URL: <http://static.kremlin.ru/media/acts/files/0001201612010007.pdf>

tion, specialized information Internet portals, etc.), that is primarily the authority of municipalities. The RMC provides all this data acquisition, gathering, storage, generalization and integration, and on the basis of this big data structuring and analysis prepares and ejects the appropriate recommendations and proposals to the municipal and regional authorities on making or adjusting certain managerial decisions in a specific situation focusing on social needs. In other words, the RMC is a center of generalization, and it is a correct systems integrative approach. But this approach is not legally fixed anywhere or is partially reflected in the existing normative acts and regulatory documents on the operating of the RMC and situational centers. The leading role of the RMC in generalization and integration of all information on the regional situation should be supported and corroborated at the legislative level.

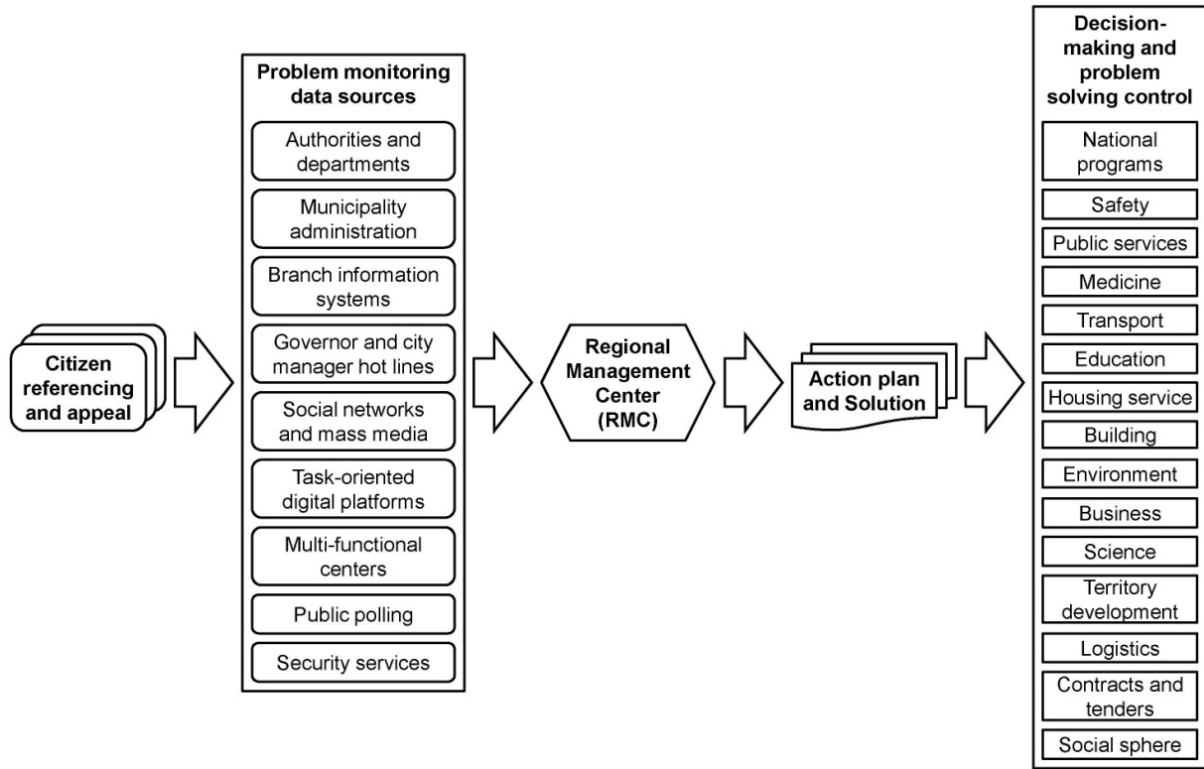


Fig. 1. The generic conception of the RMC

For the effective regional management the RMC functionality should include monitoring systems of citizen moods in social networks and the mass media [2]. The on-line monitoring of information resources of social networks is a critical element of G2C-feedback along with poll and sociological research. Without population feedback it is almost impossible to manage the regional development based only on historical data.

Currently, there are not so many full-fledged situational centers in the regions. They are either under implementation or are just developing. Thereby, problem-solving of development and deployment of the RMC seems to be economically less costly, prompter and easier in terms of organizational and technological standpoint. If the RMC functionality is supplemented with toolset for monitoring of the operational situation, scenario analysis and forecasting of the socio-economic regional development and situational control techniques that support managerial decision-making in regional crisis situations, then we will acquire a full-fledged situational center. Thus, the RMC is although an independent stand-alone system, but only a framework of the full-fledged situational center.

The organizational and personnel structure of RMC requires the involvement of dozens or even hundreds of executives of different categories to support the efficient functioning of RMC, including public servants who combine jobs in the RMC and are actually estranged from their direct official duties on-site in municipal and regional authorities. Such an evident gap can negatively affect the management quality targets. In addition, the RMC functioning in crises and emergencies, such as a pandemic, can be hampered or even paralyzed by anti-virus protection requirements. Therefore, this approach to the maintenance staff formation and the RMC operating organization is not entirely reasonable in terms of the state-of-the-art

trend of management total digitalization and automation based on intelligent information technologies and decision support systems.

The RMC should function in accordance with sufficiently well-tested standards of situational centers [3]. Standardization in the RMC operation is the use of uniform requirements for the system organization and technological solutions, technical regulations and a common regulatory framework, standard software platforms and interaction models, which provides reduction in time and financial costs under development, adoption and operation of the RMC. At the same time, the problem of import substitution is being solved also. In general, the standards should be the same both for situational centers and RMC.

According to ISO R 56875-2016, a situational center is defined as a stationary or mobile program-technical complex equipped with the necessary systems of data acquisition and processing on the state of monitoring objects, situational analysis, operational response to threat sources of the emergency and crisis situations¹. Situational center is intended for effective interaction support of the anti-crisis management services and means, generation of consistent decisions and control actions in order to loss minimization of threat implementation in the area of responsibility of the relevant management authorities, execution control and monitoring of the measures taken and decisions made. In other words, the situational center is an intelligent information and analytical system that handles a variety of managerial decision scenarios for different classes of situations, a proven set of computer models for various nature risks and threat assessment, an up-to-date legal and regulatory framework and supports the application of subject-oriented knowledge bases and represents a distributed information infrastructure at the same time.

Functionally and technologically, the typical structure of the RMC does not fundamentally differ from the standard architecture of the situational center and is shown in Fig. 2.

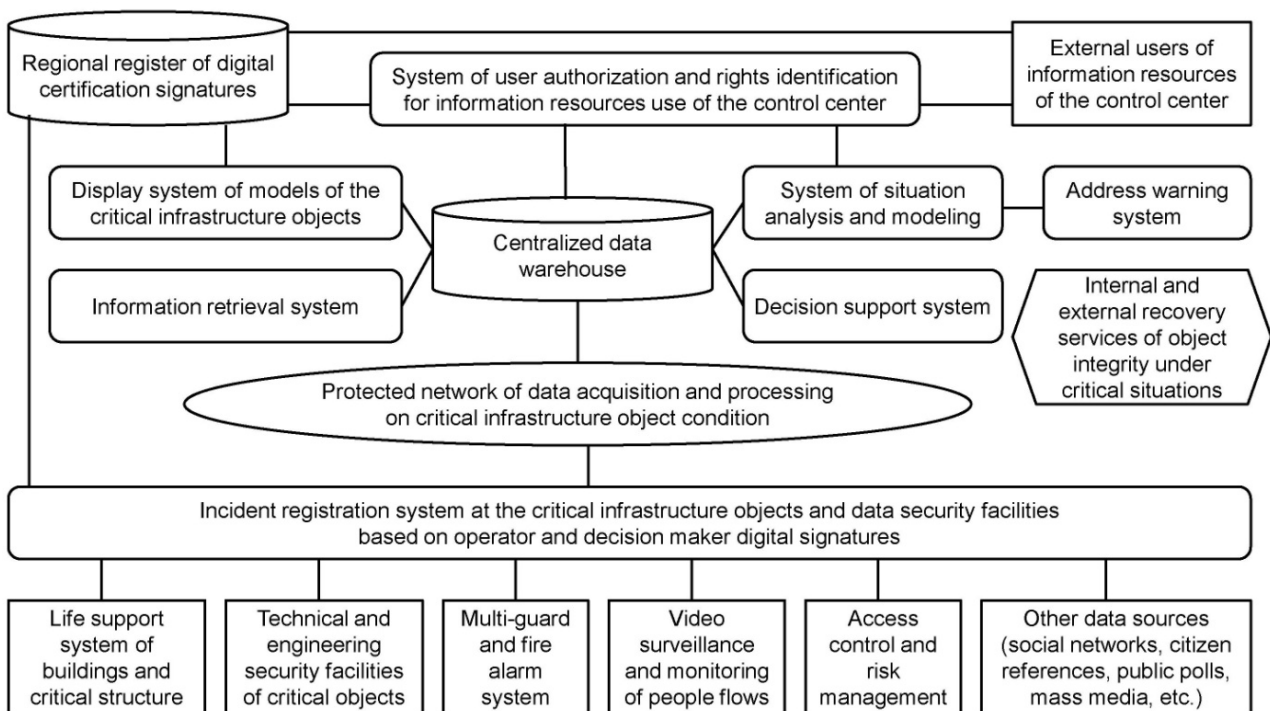


Fig. 2. The standard structure of the RMC and situational center

Within the bounds of infrastructure of regions and municipalities a number of specialized organizations focused on safety state monitoring of the secured groups of objects problem-solving are assigned and distinguished. In the structure of these organizations appropriate information-analytical and situational centers to the certain regional life areas (energy, transport, public safety, environment, elimination of accident and emergency situations, etc.) are designed. Some individual situational centers are specialized in the state assessment

¹ ГОСТ Р 56875-2016. Информационные технологии. Системы безопасности комплексные и интегрированные. Типовые требования к архитектуре и технологиям интеллектуальных систем мониторинга для обеспечения безопасности предприятий и территорий.

problem-solving of the personnel and population safety, public safety, environmental safety, radiation and chemical protection, energy, transport, industrial production and technologies, utilities and others.

It is necessary to make the efforts in advance to development and continuously enhancement of such a situational management infrastructure at the regional level on the basis of which the RMC will effectively function and operate. So far, this has not been fully achieved. Pioneering solutions of the RMC development in terms of advanced research and experience in deploying a system of situational centers, methodology and technologies are proposed, e.g. by St. Petersburg Information and Analytical Center and Federal Research Center "Informatics and Control of the Russian Academy of Sciences" whose developments are successfully used in practice to problem-solving of public administration digitalization on the basis of situational centers in St. Petersburg and Moscow.

The most rational management structure of RMC and situational centers interaction subject to above-stated, as well as the requirements fulfillment of the President of the Russian Federation Decree No. 648 ("On the formation of a distributed situational center system operating on the basis of unified interaction procedure", July 25, 2013), is following [4]:

- 1) the RMC to support the management activities of local authorities are developing at the municipal level;
- 2) the RMC issue summary data to the regional situational center (governor, chief executive or mayor), that processes strategic and operational information on the region state and situation, as well as incoming data on the population social needs and moods;
- 3) the regional situational centers arrange and build communications with the situational centers of the plenipotentiaries of President of the Russian Federation in federal districts, situational centers of the federal executive authorities, as well as situational centers of the Government and the President of the Russian Federation on the basis of Unified system of interdepartmental electronic interaction application.

At present, such management and interaction structure developed earlier at the federal level harmoniously combines the goals and objectives of the situational centers and RMC functioning within the general system of public administration.

The concept of RMC is widely and in detail variously discussed by the research community and in the literature devoted to the theory and practice of development and implementation of the situational management tools and techniques [5–8]. And the experience of the RMC design and adoption in the regions of Russia is actively popularized at scientific and technical conferences and in mass media by using the specific examples of RMC [9–11], quite a number of which can be recommended as a reference model for the further replication and integration into the distributed situational center system of the country. The generic conceptual model and functioning logic of the RMC are represented in Fig. 3.

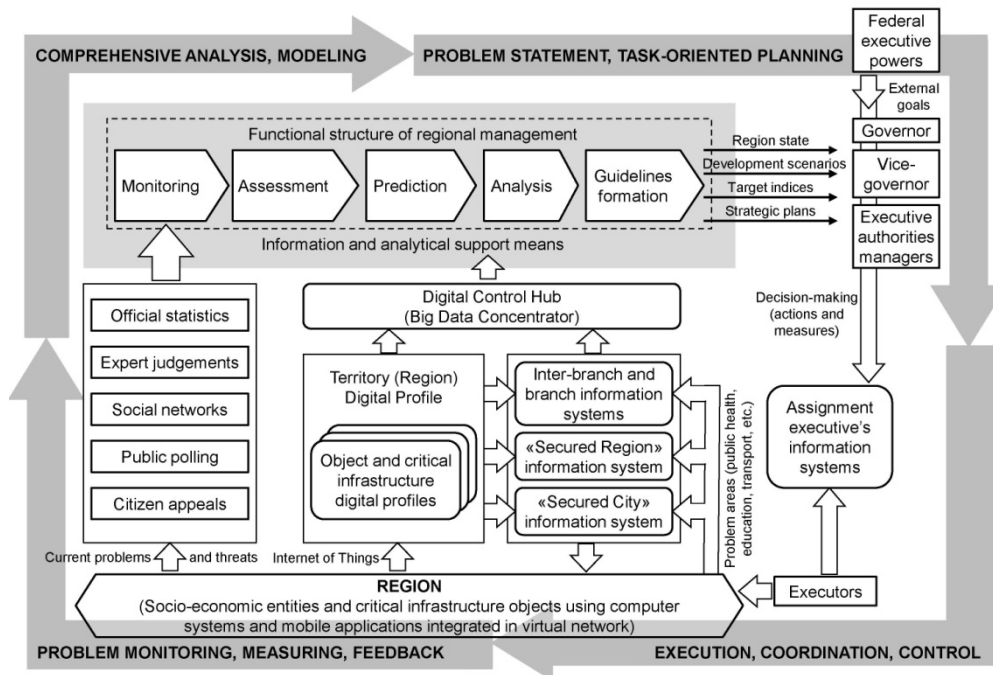


Fig. 3. The conceptual model and functioning logic of the RMC

However, the scientific potential of RMC is developing very slowly today. This is partly due to the initial deviation from a systems approach under development and adoption of situational centers in the public administration system. Insufficient scientific substantiation of the methodology itself for engineering and integrating the backbone components of situational centers has led to such consequences. At once, there are three key problems of the digital transformation of regional management and public administration using situational centers and RMC that can be assigned [5]:

1) the lack of a systems approach under generation of conceptual and regulatory documents, i.e. the situational centers and RMC deployment without accounting the backbone components and methods of its integration;

2) the insufficient scientific substantiation of decisions made in situational centers and RMC, i.e. the research organizations are practically not involved in situational management processes at the regional, federal and international levels;

3) the exigence and deficiency of highly skilled engineering specialists for the digitalization of public administration and situational centers and RMC maintenance, first of all, specialists in the field of mathematical and computer modeling, experienced programmers, interdisciplinary experts and system analysts with deep knowledge in various subject areas and capable of problem statement for mathematicians, modelers, technology and software developers.

For the efficient use in practice of the distributed situational center system and RMC, all of these problems must be end-to-end solved in an integrated manner. Artificial intelligence will not be able to refer and cope with these problems on its own.

Approach to Technological Implementation of RMC

In terms of the flexibility of management distributed information environment deployment, saving and optimization of the shared resources use, one of the effective approaches to RMC development is RMC technological implementation based on the multi-agent virtual cyber-physical system technologies using knowledge processing techniques and functioning on the network-centric principle. As an example of the virtual situational management centers implementation can be the multi-agent technology for management and decision-making process virtualization (in terms of the digital economy – digitalization) proposed in study [12]. Such a technological solution expects the step-by-step formation and configuration of the RMC integrated digital platform based on the physical world objects mapping into virtual space via the environment model generation of the three artificially simulated realities: a multi-agent executive environment, a knowledge semantic space and a problem-oriented information space. The executive environment is a system of agents and Web-services. The knowledge semantic space is generated on the basis of ontological models of the object domains which the agents are intended for. The information space is a professional social network that connects all the stakeholders and responsible participants of the regional development management processes, as well as the sets of problem-oriented information resources and digital services.

Traditionally, there are two basic procedures of such virtualization implementation – hardware-controlled virtualization (intelligent robotic and cyber-physical system engineering) [13] and software virtualization (development of the autonomous pro-active programs – agents) [14]. When designing the RMC, it is reasonable to use these methods in combination to achieve the maximum effect of the management digitalization. This approach to management digitalization provides the high variability of modeling the physical world control objects, the capability of implicit impact on the physical world critical objects and control over their state on the basis of object information management, as well as the synthesis of new knowledge for situational management due to the self-organization of system elements, machine learning, knowledge gathering and postprocessing.

In terms of the above, the RMC is a virtual pro-active intelligent system that should be built on the basis of autonomous agent or Web-service technologies and Semantic Web technologies. It should have a network-centric service-oriented architecture and support such attributes as openness, distribution, adaptability and the ability to self-organization.

Though the imperfection of the regulatory framework and some organizational difficulties in positioning virtual cyber-physical systems within the structure of public administration and regional management, the application of agent technologies in the field of management activities digital transformation based on RMC and situational centers is stipulated by three determinants: the high dynamics of the management entities functioning environment, the need to decentralized decision-making coordination and the

human factor accounting, which is manifested in the active impact of the controlled system on the management processes.

Thus, as a technological basis for the RMC integrated digital platform implementation we propose application of the autonomous software agent technology, ontologies, agent learning methods, simulation tools, integration tools of heterogeneous information resources and digital services. The set of RMC implementation tools is schematically shown in Fig. 4.

The proposed toolkit for engineering and functioning organization of unified digital platform of the RMC does not contradict the currently used development standards of the situational centers and RMC, but complements and expands its technological capabilities at the expense of agent-based virtualization techniques of decision-making processes in terms of formation of the network-centric information infrastructure for situational management of regional development. The implementation techniques of virtual RMC support such attributes as interoperability (compatibility) and portability, and therefore well correlate and integrate with the typical components of situational centers and RMC.

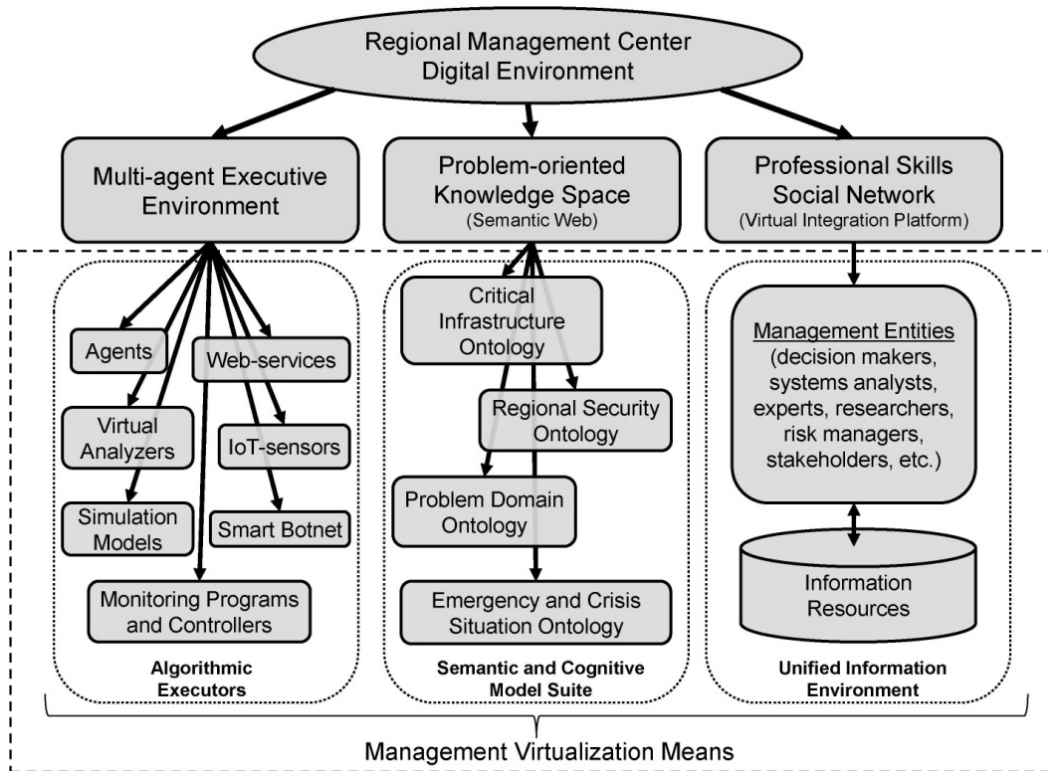


Fig. 4. The implementation techniques and tools of the virtual RMC

In addition, at various levels of the RMC functional organization the following types of resource support are used: personnel, financial, program-technical, algorithmic, informational, instrumental, organizational and legal. The composition of the program-technical support includes a set of general-system programs, special software and technical documentation (operating systems, programming systems, development toolkit, test and diagnostic programs, telecommunications and information security means), functional software (workstations, database management systems), a set of hardware and technology (computing systems, devices for collecting, storing and outputting information, data transfer devices, office automation equipment, operational materials) that ensure the regular functioning of the RMC backbone components for the goals and objectives realization of the RMC. Information support includes intersystem and non-systemic sets of primary, processed and integrated data. Algorithmic support is a set of mathematical models and methods used in the information-analytical system of the RMC for situational analysis, management and data processing problem-solving. The organizational and legal support of the RMC includes a set of organizational and technical regulations for the interaction specifying of software, hardware and service personnel of the RMC under development and operation of RMC and corresponds a set of legal norms that determine the design process, legal position and functioning rules of RMC, as well as regulating the procedure for data accessing, transformation and application in accordance with current legislation.

RMC experience of Murmansk region

Within the bounds of President Commissions of the Russian Federation (March 1, 2020, Order No. 354) the special-purpose hardware-software system "Unified Digital Platform for Regional Management" was introduced throughout Russia¹. This project funding was organized by autonomous non-profit organization «Dialog» under national program «Digital Economy of Russian Federation» realization². The RMC expects taking control over eight main fields of the regional socio-economic system management: public health, education, social policy, energy sector, roads, transport, housing-communal services and domestic waste disposal. For each area the RMC is using a set of key indices for operational planning and assessment of the responsible services activities. At that, citizen appeals are the main source of raw data for the assessment. Thereby, a unified platform for regional management provides digitalization of the key components of regional management.

The digital regional management platform of Murmansk region was developed under IT-project of the JSC «Rusatom Infrastructure Solutions». The adoption was preceded by business process in-depth analytics for the purpose of regional life areas selection that most urgently need digitalization. In 2019-2021 the implementation of "Smart Region" and "Smart City" projects has been launched in Murmansk region. At the same time a G2C(Government-to-Citizen)-feedback portal "Our North" (www.nashsever51.ru) has been deployed. The Investment portal of Murmansk region has been also updated. The development of tourist guide portal and information system "Land and settlements improvement" is carrying out. The detailed RMC solution includes following components of sectoral information systems: "Intelligent accounting system for building, housing renovation (service) of the courtyard and public areas, municipal facilities located in the Murmansk region", "Monitoring system for the municipalities cleaning control in Murmansk region", «Unified data warehouse», «Multi-level digital control panel for regional management», «Problem statement and commission execution control, project management», «Form designer of data acquisition» and «Business process management system». The introduction of the RMC-technology allowed features and performance enhancement both of the G2C-feedback and the activities assessment of regional authorities. The architecture and system components of the unified digital management platform of Murmansk region are shown in Fig. 5.

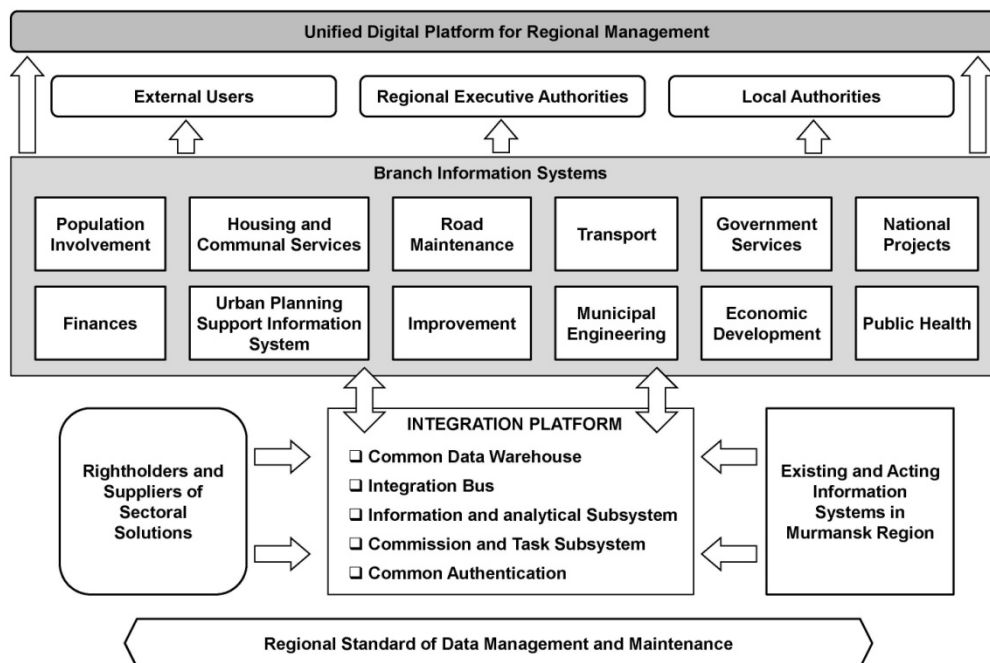


Fig. 5. The architecture of the integrated digital platform for regional management [15]

¹ О создании и функционировании Центров управления регионами в субъектах Российской Федерации (Перечень поручений Президента РФ от 1 марта 2020 г. № Пр-354, п. 1.16, п. 3, п. 12.3). URL: <http://kremlin.ru/acts/assignments/orders/62919>

² Программа "Цифровая экономика Российской Федерации" (утв. Распоряжением Правительства РФ № 1632-п от 28 июля 2017 г.). URL: <http://static.government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB79I5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf>

The RMC of Murmansk region is designed and developing on the basis of Information Technologies Center of Murmansk Region under support of the Ministry of Digital Development of Murmansk region. The RMC is focused on aggregating all possible information on problems and appeals of citizens, on-line processing and analysis of the data obtained and the formation of a general heat map of the socio-economic problems of the region. On the basis of this information the forecasts of regional development in particular situations will be made, various scenarios of anti-crisis management will be simulated and analyzed, variants generation of regional problems solving actions will be carried out and the execution control of taken measures and made decisions will be fulfilled. First of all, the access to summary data and analytical information is organized for the governor and departmental officials of the region.

At the same time it is operating a situational center on the basis of Information Technologies Center of Murmansk region for the purpose of activities digitalization of the executive authorities. This center is aimed at organizing inter-sectoral interaction and assistance to the RMC specialists responsible for information processing received from departments and municipalities. At the moment, the 20 information system integration at the level of 16 regional departments has been carried out. In the future, federal structures that are operating on the territory of the region will be connected to the situational center systems.

As of 2020, at the initial stage of development the RMC of Murmansk region consisted of 16 staff servants, including 12 operators and 4 analysts. 8 specialists were involved in maintenance of the situational center. For the year of functioning the resources and staff of the new situational management structure have step-by-step expanded due to the involvement and formation of operational and analytical groups of profiled departmental specialists. This made it possible to coordinate the strategic plans and programs implementation to achieve the activities targets of the regional authorities in 2021.

The RMC provide the following capabilities:

- on-line problem monitoring and formation of the complex visual «heat map» of regional problems;
- identification of social tension points and burst, and problem dynamics analysis in section of the territories;
- automatic classification of citizen appeals by subject area, object categories and terms of problem-solving, the use of typed response templates;
- time frame reduction of citizen problem processing and solving in the region, providing guaranteed problem solutions with delayed deadlines;
- ensuring transparency for the regional population of the passing and processing process of citizen appeals through a unified access point to the United Regional Management Platform with auto-notification by e-mail or phone;
- providing high-quality targeted request responses to population of the region;
- simplification of citizen messages processing by the departmental, administration and lower organization executives by means of duplicate identification and automatically generation of standard responses to duplicate messages;
- quality control of made decisions implementation and activity assessment of departments, administrations and lower organizations;
- preparation of consolidated analytical data for the higher authorities and the region officials to strategy and priorities determination of measures financing to solve regional problems;
- population informing of the region on the public administration authorities activities and directions of development, causes of problems, available services and the public opinion poll results.

Conclusion

For the purpose of efficiency enhancement of the public administration transformation under digital economy at the expense of development and application of the distributed situational center system, it is extremely necessary to constantly improve the system itself as a whole, and individual situational centers of various level which form its composition from the design and implementation of new situational centers to specification synthesis and dynamic configuration of situational centers subject to uncertainty of the emerging management problems and high dynamics of the external environment. Therein, the desired effect can be achieved through the comprehensive automation of the development process and information and analytical support of the situational centers at all stages of the situational center life-cycle, as well as through the application of program-technical and normative assurance appropriate and relevant to decision-making and management problem solving within the conceptual, virtual and organizational levels of the situational center functioning.

To address these issues the study considers a framework of regional management center and contributes it as a possible way of the current system of distributed situational centers functionality extension and efficiency enhancement. Proposed specification and use-case of the typical regional management center as a component of this system are quite urgent both for G2C-feedback and public safety ensuring in the region. It is also needed to coordination and operability support of the regional development problems promptly solving. The implementing technique of the regional management center framework provides flexible integration within the situational center of the region and operational reconfiguration of its decision support system subject to management problem specification or context of the current situation.

In practice, the approach of regional management centers implementation allows to smooth over such unwanted factors that hinder the development of regional situational center infrastructure as the high cost and long period of engineering and implementation of situational center systems for municipal, regional and federal public authorities, security services, agencies and corporations, as well as the problems of interaction coordination between the distributed components of decision-making process in situational centers of the region, and the complexity of its integration into the unified digital environment and support after its commissioning into activity of the one or another department or organization. Other possible positive effects include a potential growth in the number of management problems solved per unit of time in the regional situational centers and the minimization of resource and temporal costs under various operating modes (normal functioning, strategic planning, crisis situation, etc.) of the situational centers.

General statements and guidelines of this study will be used under implementation of the «National security strategy of Russian Federation» (approved by President of Russian Federation Decree no. 400, July 2, 2021)¹ in the Murmansk region as the proposals to development of regional management center and appropriate digital platform for managing information-analytical support in accordance with the List of commissions to the government given by the President of Russian Federation at March 1, 2020, Order no. 354².

References

1. Betskov A.V. On the scientific and technical policy of the Ministry of Internal Affairs of Russia until 2030. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2020;1:26–29. (In Russ.)
2. Datyev I.O., Fedorov A.M., Shchur A.L. Framework for Civic Engagement Analysis Based on Open Social Media Data. *Artificial Intelligence and Bioinspired Computational Methods: Advances in Intelligent Systems and Computing in R. Silhavy Eds*. Cham: Springer International Publishing, 2020:586–597.
3. Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M., Pukhov G.G. Methodology and technologies for creating and using decision support systems in situational centers for managing complex objects. *Materialy XI Rossiyskoy mul'tikonferentsii po problemam upravleniya = Materials of the XI Russian Multi-conference on Management problems*. Saint Petersburg: TsNII «Elektropribor», 2018:17–30. (In Russ.)
4. Zakharov Yu.N. On the consistency and correlation of the concepts situational center and regional management center. *Perspektivnye napravleniya razvitiya otechestvennykh informatsionnykh tekhnologiy: materialy VI mezhreg. nauch.-prakt. konf. = Promising directions of development of domestic information technologies : materials of the VI interreg. scientific-practical conf.* Sevastopol, 2020:10–12. (In Russ.)
5. Zatsarinnyy A.A. Methodological aspects of strategic goal setting in the conditions of digital transformation of Russia. *Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem (MLSD'2019): materialy XII Mezhdunar. konf. = Managing the development of large-scale systems (MLSD'2019) : proceedings of the XII International conference*. Moscow: IPU RAN, 2019:230–236. (In Russ.)
6. Masloboev A.V., Putilov V.A. *Informatsionnoe izmerenie regional'noy bezopasnosti v Arktike = Informational dimension of regional security in the Arctic*. Apatity: KNTs RAN, 2016:222. (In Russ.)
7. Shabanov D.V. SDG – how to create a working tool. *Byudzhet = Budget*. 2020;(9):53–55. (In Russ.)
8. Istomin K.A. SDG is not a federal overseer, but a regional assistant. *Byudzhet = Budget*. 2021;(3):46–49. (In Russ.)
9. Razumovskiy D.O. SDG – a new tool for managing the region. *Byudzhet = Budget*. 2020;(12):26–28. (In Russ.)
10. Bocharov S.V. SDG is primarily a system. *Byudzhet = Budget*. 2020;(12):29–33. (In Russ.)
11. Rymar M.A. SDG – a new word in public administration. *Byudzhet = Budget*. 2021;(1):32–36. (In Russ.)
12. Masloboev A.V. A technology for dynamic synthesis and configuration of multi-agent systems of regional security network-centric control. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and Quality of Complex Systems*. 2020;(3):112–120.

¹ Стратегия национальной безопасности Российской Федерации (утв. Указом Президента РФ № 400 от 02 июля 2021 г.). URL: <http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/QZw6hSk5z9gWq0pID1ZzmR5cER0g5tZC.pdf>

² О создании и функционировании Центров управления регионами в субъектах Российской Федерации (Перечень поручений Президента РФ от 1 марта 2020 г. № Пр-354, п. 1 16), п. 3, п. 12 3). URL: <http://kremlin.ru/acts/assignments/orders/62919>

13. Yurkov N.K. Methodology of synthesis of adaptive self-healing systems. *Poluprovodnikovye materialy v sovremennoy mikro- i nanoelektronike: materialy Vseros. nauch.-tekhn. konf., posvyashch. pamyati professora B. A. Bilalova = Semiconductor materials in modern micro- and nanoelectronics : materials of All-Russian scientific and technical conf., dedicated. the papers of Professor B. A. Bilalov*. Makhachkala, 2020:24–32. (In Russ.)
14. Wooldridge M. *An Introduction to MultiAgent Systems*. Second Edition. John Wiley & Sons, 2009:484.
15. Abramov A. «Umnyy region» v Zapolyar'e: kak upravlyat' oblast'yu na osnove dannyykh = "Smart region" in the Arctic: how to manage an area based on data. (In Russ.). Available at: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/cmrm/608018be9a79472938598fff>

Список литературы

1. Бецков А. В. О научно-технической политике МВД России до 2030 года // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2020. Т. 1. С. 26–29.
2. Datyev I. O., Fedorov A. M., Shchur A. L. Framework for Civic Engagement Analysis Based on Open Social Media Data // *Artificial Intelligence and Bioinspired Computational Methods: Advances in Intelligent Systems and Computing in R. Silhavy Eds*. Cham: Springer International Publishing, 2020. P. 586–597.
3. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М., Пухов Г. Г. Методология и технологии создания и использования систем поддержки принятия решений в ситуационных центрах при управлении сложными объектами // *Материалы XI Российской мультikonференции по проблемам управления*. СПб. : ЦНИИ «Электроприбор», 2018. С. 17–30.
4. Захаров Ю. Н. О непротиворечивости и соотношении понятий ситуационный центр и центр управления регионом // *Перспективные направления развития отечественных информационных технологий : материалы VI межрег. науч.-практ. конф. / науч. ред. Б. В. Соколов*. Севастополь, 2020. С. 10–12.
5. Зацаринный А. А. Методологические аспекты стратегического целеполагания в условиях цифровой трансформации России // *Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2019) : материалы XII Междунар. конф. / под общ. ред. С. Н. Васильева, А. Д. Цвиркуна. М. : ИПУ РАН, 2019. С. 230–236.*
6. Маслобоев А. В., Путилов В. А. Информационное измерение региональной безопасности в Арктике. Апатиты : КНЦ РАН, 2016. 222 с.
7. Шабанов Д. В. ЦУР – как создать рабочий инструмент // *Бюджет*. 2020. № 9. С. 53–55.
8. Истомина К. А. ЦУР – это не федеральный надсмотрщик, а региональный помощник // *Бюджет*. 2021. № 3. С. 46–49.
9. Разумовский Д. О. ЦУР – новый инструмент управления регионом // *Бюджет*. 2020. № 12. С. 26–28.
10. Бочаров С. В. ЦУР – это прежде всего система // *Бюджет*. 2020. № 12. С. 29–33.
11. Рымар М. А. ЦУР – новое слово в государственном управлении // *Бюджет*. 2021. № 1. С. 32–36.
12. Masloboev A. V. A technology for dynamic synthesis and configuration of multi-agent systems of regional security network-centric control // *Надежность и качество сложных систем*. 2020. № 3. С. 112–120.
13. Юрков Н. К. Методология синтеза адаптивных самовосстанавливающихся систем // *Полупроводниковые материалы в современной микро- и нанoelektronike : материалы Всерос. науч.-техн. конф., посвящ. памяти профессора Б. А. Билалова*. Махачкала, 2020. С. 24–32.
14. Wooldridge M. *An Introduction to MultiAgent Systems*. Second Edition. John Wiley & Sons, 2009. 484 p.
15. Абрамов А. «Умный регион» в Заполярье: как управлять областью на основе данных. URL: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/cmrm/608018be9a79472938598fff>

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Владимирович Маслобоев

доктор технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник,
Институт информатики и математического
моделирования технологических процессов
Кольского научного центра Российской академии наук
(Россия, Апатиты, ул. Ферсмана, 24А)
E-mail: masloboev@iimm.ru

Andrey V. Masloboev

Doctor of technical sciences, associate professor,
leading researcher,
Institute of Informatics and Mathematical Modelling
of Technological Processes of Kola Science Centre
of the Russian Academy of Sciences
(24A Fersmana street, Apatity, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 20.06.2021

Поступила после рецензирования/Revised 10.09.2021

Принята к публикации/Accepted 25.10.2021

ПАМЯТИ ПРОФЕССОРА В. А. ПУТИЛОВА

IN MEMORY OF PROFESSOR V.A. PUTILOV



08.02.1947–18.11.2021

Редакция журнала с прискорбием сообщает, что 18 ноября 2021 г. ушел из жизни научный руководитель Института информатики и математического моделирования ФИЦ «Кольский научный центр Российской академии наук», заслуженный деятель науки Российской Федерации, лауреат Премии Правительства РФ в области науки и техники, доктор технических наук, профессор Путилов Владимир Александрович.

Со дня организации и основания в 1989 г. Института информатики и математического моделирования технологических процессов КНИЦ РАН являлся его директором. С 2017 г. являлся научным руководителем Института информатики и математического моделирования Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр РАН».

После окончания в 1971 г. Ленинградского института авиационного приборостроения поступил в аспирантуру, где под руководством М. Б. Игнатьева занимался разработкой и исследованием методов контроля и коррекции ошибок моделирования процессов с распределенными параметрами на ЦВМ, а также моделированием и разработкой алгоритмов для многоуровневых распределенных систем управления комплексными экспериментальными исследованиями и испытаниями. В 1974 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Разработка и исследование методов контроля и коррекции ошибок моделирования процессов с распределенными параметрами на ЦВМ».

После окончания аспирантуры с 1974 по 1989 г. работал в Сибирском институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн СО АН СССР. В период 1976–1988 гг. руководил работами по созданию системы автоматизации научных исследований на уникальной исследовательской установке – Сибирском солнечном радиотелескопе, а также работой по научно-техническим программам ГКНТ СССР. Старший научный сотрудник (1985). В итоге была создана территориально-распределенная автоматизированная система, обеспечивающая реализацию комплексных исследований солнечно-земных связей, за что в 1997 г. был удостоен Премии Правительства РФ в области науки и техники. В 1988 г. защитил докторскую диссертацию на тему «Модели и структурно-алгоритмическая организация многоуровневых распределенных систем управления комплексными экспериментальными исследованиями и испытаниями». В 1993 г. присвоено ученое звание профессора.

Владимир Александрович известен в научном мире как основатель нового направления в автоматизированном проектировании информационных технологий для управления сложными трудноформализуемыми системами – функционально-целевого подхода, предложенного им в начале 1980-х гг., развитого теоретически и внедренного в широком диапазоне приложений. На основе предложенного подхода разработаны модели и методы концептуального проектирования структурно-алгоритмической организации и программного обеспечения многоуровневых распределенных автоматизированных систем для научных исследований. Опубликован ряд работ по функционально-целевому синтезу и анализу моделей системной динамики и соответствующих информационных технологий для управления развитием региональных социально-экономических систем.

Владимир Александрович – автор и соавтор более 300 научных работ, в том числе 10 монографий по вопросам анализа, синтеза сложных систем и практической реализации информационных технологий в научных исследованиях и наукоемких приложениях. Научный руководитель исследований института, ряда хозяйственных работ и международных проектов. Член оргкомитетов и программных комитетов национальных и международных конференций.

Под руководством В. А. Путилова 26 сотрудников института подготовили и защитили диссертации на соискание ученых степеней, из них – 6 докторов наук и 20 кандидатов наук. В частности, в его лаборатории работает самый молодой в Мурманской области доктор технических наук, защитивший докторскую диссертацию в 33 года. В. А. Путилов руководит созданной им на базе института научной школой «Разработка информационных технологий управления региональным развитием», которая в 2006 г. была включена в перечень ведущих научных школ России.

С 1991 г. занимался созданием Кольского филиала Петрозаводского государственного университета, который организован как центр университетского образования, тесно интегрированный с КНЦ РАН. С 1994 по 2015 г. возглавлял созданный филиал, который за годы своего развития стал одним из ведущих вузов в Мурманской области – центром подготовки специалистов для различных сфер деятельности в регионе.

В. А. Путилов награжден медалью ордена «За заслуги перед Отечеством» II степени (1999), орденом Дружбы (2005). Почетный работник высшего профессионального образования РФ (2009). В 2011 г. ему присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки Российской Федерации». Имеет другие почетные грамоты РАН, Министерства образования и науки РФ.

Память о В. А. Путилове как основателе нового направления в автоматизированном проектировании информационных технологий для управления сложными трудноформализуемыми системами не померкнет в научном мире. Его ученики и созданная им научная школа продолжат начатое им дело.

Выражаем искренние соболезнования родным и близким, его соратникам и ученикам!