

СОДЕРЖАНИЕ

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

Пчельникова-Гротова О. Н.
ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ НА ОСНОВЕ
СИСТЕМЫ ФУНКЦИОНАЛЬНО-СТОИМОСТНОГО АНАЛИЗА..... 5

Абрамов О. В.
НЕКОТОРЫЕ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОГЕННЫМИ РИСКАМИ..... 13

Коршунов Г. И.
МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СРЕД ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ
ЦИФРОВОГО УПРАВЛЕНИЯ В КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ..... 23

Волотов Е. М., Волотова Т. А., Митрофанов И. В., Митрофанов Е. И.
МОДЕЛЬ ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРАЕКТОРИИ
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ
НА БАЗЕ ВИДЕОКАМЕР ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ 29

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ
И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ**

Садыхов Г. С., Кудрявцева С. С.
НИЖНЯЯ ДОВЕРИТЕЛЬНАЯ ГРАНИЦА СРЕДНЕГО
ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ..... 38

Якимов А. Н.
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ
МИКРОВОЛНОВЫХ АНТЕНН К ВНЕШНИМ ДЕФОРМИРУЮЩИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ..... 46

Китаев В. Н., Дремков М. А., Уралев А. А.
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ СОЕДИНИТЕЛЬ С ФУНКЦИЕЙ
ЗАЩИТЫ ОТ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА 55

Мостовской М. В., Слепцов В. В., Куликова Н. Н.
ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ
И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЛАЗЕРНЫХ УСТАНОВОК..... 62

Перевертов В. П., Кузин Н. А., Юрков Н. К.
КАЧЕСТВО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ИНТЕГРАЦИИ
ГИБРИДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ТРАНСПОРТНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ 72

Дмитриев С. А., Симонова Е. С.
АНАЛИЗ ОТКАЗОВ И ПОВРЕЖДЕНИЙ АВИАЦИОННЫХ
ДВИГАТЕЛЕЙ ЗА ПЕРИОД 2007–2020 гг. 81

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Иванов А. И., Иванов А. П., Горбунов К. А.

НЕЙРОСЕТЕВОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ БИОМЕТРИИ В КОД
АУТЕНТИФИКАЦИИ: ДОПОЛНЕНИЕ ЭНТРОПИИ ХЭММИНГА
ЭНТРОПИЕЙ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ РАЗРЯДАМИ..... 91

Звенигородский И. И., Зырянов Ю. Т., Ульшин Д. И.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И КАЧЕСТВА СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ
И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА ЗАГЛУБЛЕННОГО СООРУЖЕНИЯ..... 99

Ключников А. В.

КОНСТРУКТИВНЫЙ ОБЛИК СТЕНДА ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОГО
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАССОИНЕРЦИОННОЙ АСИММЕТРИИ
ДЛИННОМЕРНЫХ ТЕЛ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОЙ БАЛАНСИРОВКИ..... 106

Панкин А. М., Калютик А. А., Костарев В. С.

КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВНУТРИЗОННОГО ДЕТЕКТОРА НЕЙТРОНОВ
В СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА..... 118

Недопекин Н. В.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА РЕЖИМЫ
РАБОТЫ РЕЗОНАТОРА ВОЛНОВОГО ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ГИРОСКОПА..... 126

Борщев Н. О.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ЗАХОЛАЖИВАНИЯ
АЗОТНО-ГЕЛИЕВОГО КРИОСТАТА..... 133

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Masloboev A. V.

SYSTEMATIC APPROACH FOR ENSURING THE RESILIENCE OF ECOLOGICAL-ECONOMIC
SYSTEMS OF THE RUSSIAN ARCTIC (PART 1. RESILIENCE MANAGEMENT PRINCIPLES) 142

CONTENT

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

Pchel'nikova-Grotova O.N.

IMPROVING THE QUALITY OF PRODUCTS ON THE BASIS
OF THE SYSTEM OF FUNCTIONAL-COST ANALYSIS..... 5

Abramov O.V.

SOME SOLUTIONS TO THE PROBLEM OF TECHNOGENIC RISK MANAGEMENT 13

Korshunov G.I.

SIMULATION OF PHYSICAL ENVIRONMENTS FOR OPTIMIZATION
OF DIGITAL CONTROL IN CYBER-PHYSICAL SYSTEMS..... 23

Volotov E.M., Volotova T.A., Mitrofanov I.V., Mitrofanov E.I.

ERROR MODEL OF DETERMINING THE TRAJECTORY PARAMETERS WHEN USING
A REGISTRATION SYSTEM ON THE BASIS OF GENERAL VIDEO CAMERAS..... 29

DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

Sadykhov G.S., Kudryavtseva S.S.

LOWER CONFIDENCE LIMIT OF THE MEAN RESIDUAL
OPERATING LIFE OF NON-RESTORABLE ITEMS 38

Yakimov A.N.

ENSURING THE SENSITIVITY OF FINITE ELEMENT MODELS
OF MICROWAVE ANTENNAS TO EXTERNAL DEFORMING ACTIONS 46

Kitaev V.N., Dremkov M.A., Uralev A.A.

ES-PROTECTED ELECTRIC CONNECTOR 55

Mostovskoy M.V., Sleptsov V.V., Kulikova N.N.

INCREASING THE RELIABILITY OF THE INFORMATION-MEASURING
AND CONTROL SYSTEM OF THE ELECTRIC DRIVE OF LASER INSTALLATIONS 62

Perevertov V.P., Kuzin N.A., Yurkov N.K.

QUALITY OF FORMING PARTS IN THE INTEGRATION
OF HYBRID TECHNOLOGIES OF TRANSPORT ENGINEERING 72

Dmitriev S.A., Simonova E.S.

FAILURES AND DAMAGES OF AERO ENGINES FROM 2007 TO 2020 81

DIAGNOSTIC METHODS FOR ENSURING RELIABILITY AND QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

Ivanov A.I., Ivanov A.P., Gorbunov K.A.

NEURAL NETWORK CONVERSION OF BIOMETRY INTO
AUTHENTICATION CODE: ADDITION OF HAMMING ENTROPY
WITH ENTROPY OF CORRELATION RELATIONS BETWEEN DISCHARGES 91

Zvenigorodsky I.I., Zyryanov Yu.T., Ulshin D.I.

THE USE OF NEURAL NETWORK REGULATORS TO IMPROVE
THE ENERGY EFFICIENCY AND QUALITY OF THE VENTILATION
AND AIR CONDITIONING SYSTEM OF A BURIED STRUCTURE 99

Klyuchnikov A.V.

DESIGN OF A MEASUREMENT STAND FOR PRECISION DETERMINATION
OF THE MASS-INERTIA ASSYMETRY OF LONG ITEMS BY DYNAMIC BALANCING 106

Pankin A.M., Kalyutik A.A., Kostarev V.S.

IN-CORE NEUTRON DETECTOR MONITORING
UNDER STEADY AND DYNAMIC REACTOR CONDITIONS 118

Nedopekin N.V.

EVALUATION OF THE EFFECT OF AMBIENT TEMPERATURE
ON THE OPERATION MODES OF THE CAVITY OF A WAVE SOLID-STATE GYROSCOPE 126

Borshchev N.O.

THEORETICAL ESTIMATION OF THE COOLING TIME OF A NITROGEN-HELIUM CRYOSTAT 133

SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS

Masloboev A.V.

SYSTEMATIC APPROACH FOR ENSURING THE RESILIENCE OF ECOLOGICAL-ECONOMIC
SYSTEMS OF THE RUSSIAN ARCTIC (PART 1. RESILIENCE MANAGEMENT PRINCIPLES) 142

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

УДК 621.396.6:004.9

doi:10.21685/2307-4205-2023-1-1

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ ФУНКЦИОНАЛЬНО-СТОИМОСТНОГО АНАЛИЗА

О. Н. Пчельникова-Гротова

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия
grotova@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Современные способы повышения эффективности производства и повышения качества продукции, использующие функционально-стоимостной анализ (ФСА), главную роль отводят стоимостной оценке бизнес-процессов. Предлагаемая методика, положенная в основу разработанной системы, на первый план выдвигает функциональный подход к анализу объектов, что позволяет сформулировать предложения по совершенствованию как конкретных изделий, так и бизнес-процессов на всех уровнях их организации. *Материалы и методы.* Методика исследования заключается в последовательном построении имитационных моделей объекта анализа. Применение экспертных оценок на всех этапах моделирования дает возможность получить оригинальные решения по улучшению качества и повышению конкурентоспособности анализируемого объекта. Методика ФСА полностью соответствует восьми принципам менеджмента качества, представляющим основу стандартов семейства ИСО 9000:2015. *Результаты и выводы.* Разработанные алгоритмы и программы системы ФСА позволяют пользователям в сжатые сроки исследовать объекты различного уровня и применения. Решения, получаемые в результате анализа, носят нетривиальный характер и способствуют достижению оптимального соотношения «цена–качество». Предложенная методика иллюстрируется примерами анализа изделия с помощью автоматизированной системы ФСА.

Ключевые слова: функционально-стоимостной анализ, имитационное моделирование, экспертная оценка, техническая система, бизнес-процесс

Для цитирования: Пчельникова-Гротова О. Н. Повышение качества продукции на основе системы функционально-стоимостного анализа // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 5–12. doi:10.21685/2307-4205-2023-1-1

IMPROVING THE QUALITY OF PRODUCTS ON THE BASIS OF THE SYSTEM OF FUNCTIONAL-COST ANALYSIS

O.N. Pchelnicova-Grotova

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia
grotova@mail.ru

Abstract. *Background.* Modern methods of increasing production efficiency and improving product quality, using functional cost analysis (FSA), assign the main role to the valuation of business processes. The proposed methodology, which is the basis of the developed system, brings to the fore a functional approach to the analysis of objects, which makes it possible to formulate proposals for improving both specific products and business processes at all lev-

els of their organization. *Materials and methods.* The research methodology consists in the consistent construction of simulation models of the object of analysis. The use of expert assessments at all stages of modeling makes it possible to obtain original solutions to improve the quality and increase the competitiveness of the analyzed object. The FSA methodology is fully consistent with the eight principles of quality management, which are the basis of the ISO 9000:2015 family of standards. *Results and conclusions.* The developed algorithms and programs of the FSA system allow users to explore objects of various levels and applications in a short time. The solutions obtained as a result of the analysis are non-trivial and contribute to the achievement of the optimal quality-price ratio. The proposed technique is illustrated by examples of product analysis using an automated FSA system.

Keywords: functional cost analysis, simulation modeling, expert assessments, technical system, business process

For citation: Pchelnikova-Grotova O.N. Improving the quality of products on the basis of the system of functional-cost analysis. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(1):5–12. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-1-1

Введение

В настоящее время практически каждая компания в экономически развитых странах использует методологию функционально-стоимостного анализа (ФСА) для решения задач повышения конкурентоспособности продукции путем повышения качества при одновременном снижении ее себестоимости. Такой подход к рассмотрению любого изделия основан на том, что потребителя интересует не продукт сам по себе, а его функции, качество их выполнения и затраты на приобретение этого качества, т.е. оптимальное соотношение «цена–качество».

Метод ФСА основан на представлении, что в любом объекте (изделие, процесс, управленческая структура) есть скрытые резервы его совершенствования за счет повышения его функциональных возможностей и снижения избыточных затрат [1]. Рассматриваемая здесь система оказывает пользователю практическую интеллектуальную поддержку в выявлении этих резервов путем последовательного построения ряда моделей, анализа этих моделей для выявления недостатков объекта и формулирования задач по их устранению.

В качестве объекта анализа в системе ФСА используется понятие «техническая система» (ТС) [2], которая представляет собой систему, включающую хотя бы один искусственный элемент и имеющую целью удовлетворение хотя бы одной потребности человека. Выделение элементов в техническую систему носит субъективный характер. Для ТС характерен закон S-образного развития [3], в соответствии с которым совершенствование любой ТС происходит по кривой, содержащей три этапа: 1 – медленный рост (зарождение); 2 – быстрое лавинообразное нарастание; 3 – стабилизация характеристик системы. После выполнения последнего этапа развитие системы прекращается.

Организация работы в системе ФСА

Задачей ФСА является создание усовершенствованной ТС (УТС), полученной в результате устранения выявленных недостатков и имеющей по сравнению с исходной системой более высокие функциональные показатели при меньших затратах (рис. 1).

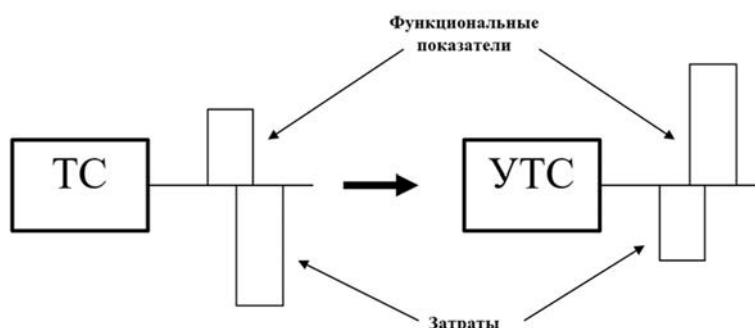


Рис. 1. Совершенствование технической системы

Рассматриваемая система ФСА состоит из нескольких блоков (рис. 2) и позволяет проводить анализ как по отдельным блокам (пошаговый режим), выбирая доступный блок по ходу анализа, так и по заранее выбранному пути (маршрутный режим).

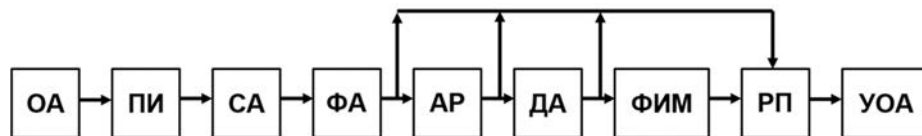


Рис. 2. Структура системы: ТС – техническая система; ПИ – блок подготовки информации; СА – блок структурного анализа; ФА – блок функционального анализа; АР – блок анализа ресурсов; ДА – блок диагностического анализа; ФИМ – блок функционально-идеального моделирования; РП – блок решения проблемы; УТС – усовершенствованная техническая система

Порядок работы блоков системы

Блок подготовки информации (ПИ) предназначен для ввода исходных данных, необходимых для начала работы с системой. Такими данными являются:

- название объекта анализа (ОА);
- цель анализа;
- условия использования ОА (типовая ситуация использования ОА на одной из стадий жизненного цикла);
- фамилия сотрудника, проводящего анализ.

Например, для устройства, предназначенного для очистки поверхностей [4], в блоке подготовки информации нужно ввести следующие данные:

- клинер;
- модернизация объекта;
- удаление грязи с поверхности;
- Иванов А. И.

В **блоке структурного анализа (СА)** выполняется построение структурной модели и проводится ее анализ. Сначала определяются состав ОА и иерархия его элементов, представляющие компонентную модель. Каждый объект рассматривается как система, в состав которой, кроме компонентов (элементов ОА), могут входить подсистемы, сама система в свою очередь является частью системы более высокого уровня (надсистемы) (рис. 3).

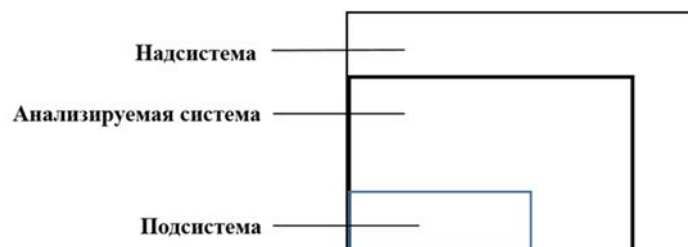


Рис. 3. Иерархия составных частей объекта анализа

В компонентную модель ОА входят элементы надсистемы, с которыми его компоненты взаимодействуют в заданных условиях использования. На разных стадиях жизненного цикла объекта в надсистему могут входить: оборудование, материалы, производственное помещение, объект функции, источник энергии, транспортные средства, упаковка, элементы внешней среды и т.д.

Например, в надсистему ОА «КЛИНЕР» вводят элементы «Источник энергии» и «загрязнение».

Далее устанавливается наличие/отсутствие связи между компонентами ОА, в результате чего получается матрица, представляющая собой компонентную модель ОА. Если связь между компонентами существует, проводится описание этих связей во времени (постоянно, периодически или разово) и в пространстве (в непосредственном контакте, в контакте через третий элемент или через поле).

Если компоненты взаимодействуют между собой, то один из них должен совершать некоторое полезное действие, целью которого является функционирование ОА. Это действие должно быть описано в модели. Если при этом возникает какой-либо нежелательный эффект, то его также следует указать.

Например, компонентная модель клинера включает компоненты КОРПУС, ПОРШЕНЬ, ПРУЖИНА, РАСТВОРИТЕЛЬ, ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ и ЗАГРЯЗНИТЕЛЬ. Компоненты ПОРШЕНЬ–ПРУЖИНА взаимодействуют *постоянно, в непосредственном контакте*. При этом полезное действие – *перемещать поршень*, нежелательного эффекта нет.

Блок функционального анализа (ФА) предназначен для выявления и формулировки функций ОА, ранжирования функций и построения функциональной модели ОА в виде причинно-следственных цепочек функций методом FAST [5], который основан на постепенном описании всей цепочки, в которой функции последовательно связаны между собой. При этом компоненты рассматриваются только с точки зрения выполняемых ими функций, абстрагируясь от их вещественного воплощения. Сначала определяется направленность функции, так как при взаимодействии компонентов один из них (активный) воздействует на другой (пассивный). Затем формулируется главная функция ее носителя, состоящая из действия и объекта функции (рис. 4). В формулировке функции может также присутствовать дополнение, описывающее время, место, направление функции и т.п.



Рис. 4. Структура формулирования функции

После формулировки главных функций всех компонентов проводится ранжирование функций, т.е. определение значимости этих функций относительно главной. В порядке убывания значимости выделяют следующие ранги функций: главная (Г), основная (О), вспомогательная (В) и ненужная (Н).

Например, функциональная модель клинера имеет следующий вид:

- КЛИНЕР – удалять грязь – Г
- РАСТВОРИТЕЛЬ – удалять грязь – В
- КОРПУС – удерживать растворитель – В
- ПОРШЕНЬ – перемещать растворитель – В
- ПРУЖИНА – перемещать поршень – Н

Блок анализа ресурсов (АР) предназначен для экспертной оценки качества выполнения компонентами требуемых функций с помощью сравнения фактического значения параметра с требуемым [6]. Различают нормальный, избыточный и недостаточный ресурс по функциям в зависимости от качества ее выполнения (рис. 5). Наличие избыточных и недостаточных ресурсов является недостатком ОА. Их своевременное выявление и устранение – один из способов совершенствования ТС.

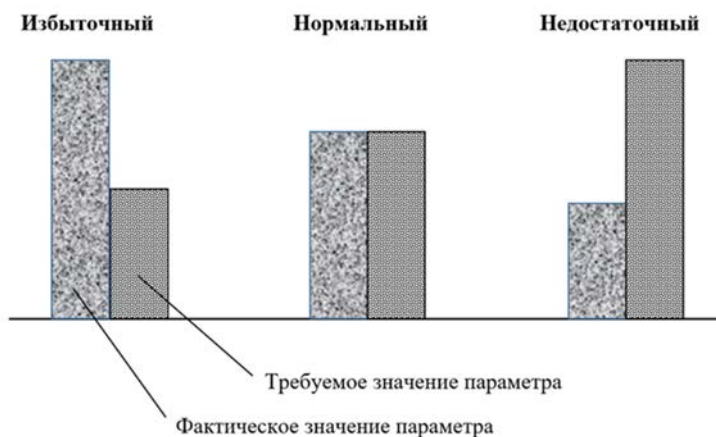


Рис. 5. Виды ресурсов по функциям

- Например, ПОРШЕНЬ
- Функция – перемещать растворитель – В
- Параметр – скорость перемещения
- Фактическое значение – 20 мм/с
- Требуемое значение – 25 мм/с
- Ресурс функции недостаточный.

Блок диагностического анализа (ДА) предназначен для нахождения в АО компонентов, требующих совершенствования, а также должен сформулировать предложения по устранению недостатков. Анализ проводится путем сравнения проблемной, функциональной и затратной значимостей компонентов, которые определяются в большинстве случаев методом экспертных оценок [7].

При оценке проблемной значимости экспертам предоставляется возможность оценить в процентах недостатки каждого компонента и сформулировать предложения по их устранению.

В ходе анализа функциональной значимости оценивается вклад каждого компонента в выполнение главной функции АО. При этом учитывается ранг главной функции компонентов, а также количество и значимость дополнительных функций.

Затратная значимость компонентов оценивается по нескольким статьям затрат (на материалы, на покупные изделия, трудовые, на сборку и др.), после чего полученные оценки по разным статьям приводятся к общим единицам измерения. В результате выявляются компоненты с избыточным уровнем затрат (компоненты 2 и 5, рис. 6).

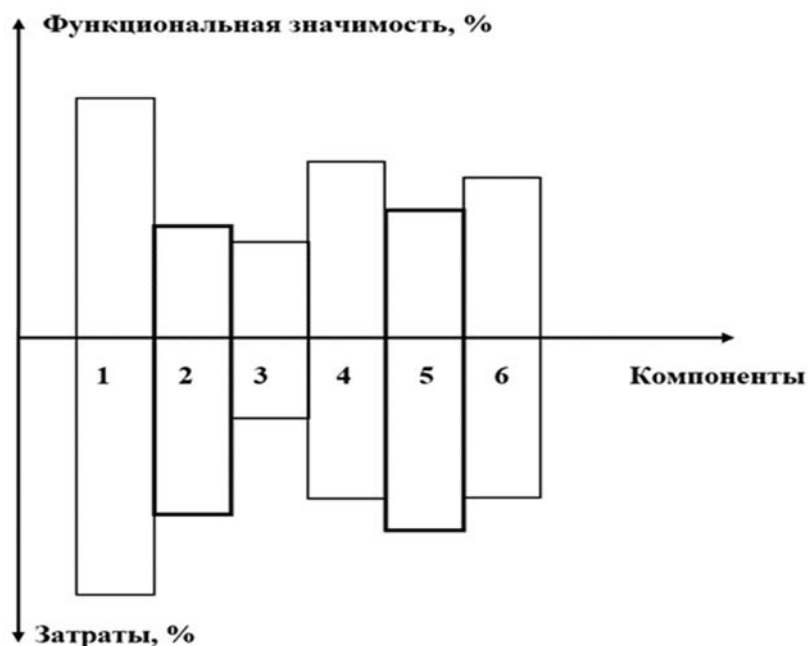


Рис. 6. Сравнительная оценка функциональной и затратной значимости

В результате все компоненты разделяются на три группы приоритетов, определяющие, в каком порядке они будут рассматриваться при дальнейшем анализе. К первой группе приоритетов система относит компоненты, сумма оценок которых составляет около 75 %, ко второй – около 20 %, к третьей – оставшиеся компоненты.

Далее можно перейти к функционально-идеальному моделированию, представляющему собой процедуру анализа, в результате которой происходит повышение идеальности АО за счет эффективного выполнения полезных функций минимальным числом компонентов.

Блок функционально-идеального моделирования (ФИМ) предназначен для преобразования функциональной модели ОА в функционально-идеальную и формулировки задач по ее реализации. Таким образом, функционально-идеальная модель содержит меньшее количество функций и, следовательно, меньшее число компонентов по сравнению с исходной моделью. При исключении компонента из модели ОА его функции либо ликвидируются, либо передаются остальным компонентам. Уменьшить число компонентов (свернуть компонент) в модели ОА (рис. 7) можно тремя способами.



Рис. 7. Фрагмент функциональной модели ОА

Способ 1. Случай отсутствия объекта функции (рис. 8).



Рис. 8. Фрагмент первого способа свертывания компонента 1

При выполнении этого условия анализируемый компонент (1, см. рис. 8) и его функция $F1$ становятся ненужными, и их можно исключить из состава ОА. Но в этой ситуации необходимо проанализировать условия свертывания компонента (2, см. рис. 8), на который была направлена удаляемая функция, с точки зрения обеспечения выполнения функции $F2$. Этот процесс можно повторять для всех компонентов ОА, связанных причинно-следственной цепочкой функций, до тех пор, пока в объекте не появятся недопустимые изменения.

Способ 2. Функцию выполняет сам объект функции (рис. 9).



Рис. 9. Фрагмент второго способа свертывания компонента 1

При выполнении второго условия из ОА исключается только анализируемый компонент (1, см. рис. 9), а его функцию $F1$ начинает выполнять компонент (2, см. рис. 9), на который было направлено действие функции. Для этого компонент следует изменить так, чтобы он самостоятельно смог выполнять перенесенную на него функцию.

Способ 3. Функцию выполняют оставшиеся элементы ОА (рис. 10).

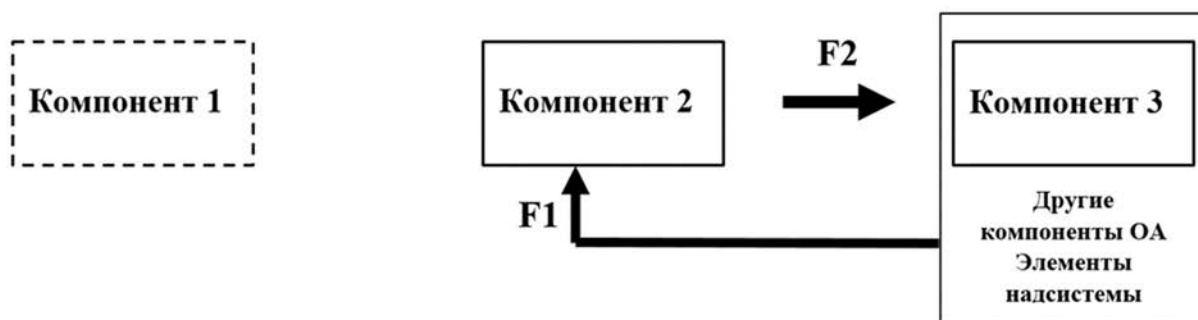


Рис. 10. Фрагмент третьего способа свертывания компонента 1

При исключении компонента (1, рис. 10) согласно третьему условию его функции передаются другим компонентам ОА или элементам надсистемы. Для элементов, на которые переносится функция $F1$ удаляемого элемента, необходимо сформулировать предложения по их изменению таким образом, чтобы они смогли выполнять перенесенную функцию.

Например, для АО «КЛИНЕР» анализ условий свертывания выглядит следующим образом:

Для компонента ПРУЖИНА и его функции – *перемещать поршень*.

1. Нет компонента ПОРШЕНЬ.

2. Функцию *перемещать поршень* выполняет сам компонент ПОРШЕНЬ.

3. Функцию *перемещать пружину* выполняют компоненты – КОРПУС, РАСТВОРИТЕЛЬ или элементы надсистемы.

В результате анализа условий свертывания ликвидирован компонент ПРУЖИНА и его функция *перемещать поршень* передана компоненту ПОРШЕНЬ.

Предложено сделать ПОРШЕНЬ и ПРУЖИНУ единым элементом, выполняющим функцию «перемещать поршень», конструктивно в качестве такого элемента можно использовать сильфон.

Заключение

Программная реализация рассматриваемой системы позволила существенно упростить и формализовать работу специалистов на всех этапах моделирования в ФСА. Разработанная система предоставляет возможность совместной работы конструкторов, технологов, организаторов производства и экспертов из различных отраслей над возникающими проблемами, что особенно важно в современных условиях, когда стандарты качества в международной экономике ориентированы на процессный подход к управлению производством. Мониторинг всех процессов жизненного цикла объектов анализа позволяет существенно повысить конкурентоспособность организаций в результате снижения затрат на объекты с одновременным повышением их ценности для потребителя. Широкое применение методов экспертных оценок, в частности «мозгового штурма», позволяет на основе рекомендаций системы ФСА найти нестандартные варианты совершенствования объектов анализа.

Благодаря тому, что в основу ФСА положен системный подход, предлагаемая система имеет очень широкую сферу применения: от совершенствования конкретных изделий и процессов до систем подготовки и управления производством, а также для исследования деятельности и перспектив развития организаций и программ различного уровня.

Список литературы

1. Шеремет А. Д., Ковалев А. П. Функционально-стоимостный анализ : учеб. пособие. М. : Изд-во эконом. ф-та МГУ им. М. В. Ломоносова, 2017. 204 с.
2. Скуратович А. И. Интеллектуальная система поддержки проведения функционально-стоимостного анализа – ИМ-ФСА. // Журнал ТРИЗ. 1991. № 2. С. 27–34.
3. Альтшуллер Г. С. Творчество как точная наука. Теория решения изобретательских задач. М. : Сов. радио, 1979. 184 с.
4. Гротова О. Н. Функционально-стоимостной анализ создания устройств информационной и вычислительной техники : учеб. пособие. М. : Изд-во МАИ, 2002. 44 с.
5. Никитина Е. Б. Функционально-стоимостный анализ : учеб. пособие. Пермь, 2021. 100 с. URL: www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/nikitinafunkcionalno-stoimostnyj-analiz.pdf
6. Викентьев И. Л. Перечень контрольных вопросов для выявления и использования ресурсов при решении простых производственных задач // Журнал ТРИЗ. 1992. № 3. С. 67–68.
7. Орлов А. И. Организационно-экономическое моделирование : учебник в 3 ч. Ч. 2. Экспертные оценки. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 486 с.

References

1. Sheremet A.D., Kovalev A.P. *Funktional'no-stoimostnyy analiz: ucheb. posobie = Functional and cost analysis : textbook*. Moscow: Izd-vo ekonom. f-ta MGU im. M.V. Lomonosova, 2017:204. (In Russ.)
2. Skuratovich A.I. Intelligent support system for functional and cost analysis - IM-FSA. *Zhurnal TRIZ = Journal of TRIZ*. 1991;(2):27–34. (In Russ.)
3. Al'tshuller G.S. *Tvorchestvo kak tochnaya nauka. Teoriya resheniya izobretatel'skikh zadach = Creativity as an exact science. Theory of solving inventive problems*. Moscow: Sov. radio, 1979:184. (In Russ.)
4. Grotova O.N. *Funktional'no-stoimostnoy analiz sozdaniya ustroystv informatsionnoy i vychislitel'noy tekhniki: ucheb. posobie = Functional and cost analysis of the creation of information and computer technology devices : textbook*. Moscow: Izd-vo MAI, 2002:44. (In Russ.)
5. Nikitina E.B. *Funktional'no-stoimostnyy analiz: ucheb. posobie = Functional and cost analysis : textbook*. Perm, 2021:100. (In Russ.). Available at: www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/nikitinafunkcionalno-stoimostnyj-analiz.pdf
6. Vikent'ev I.L. List of control questions for identifying and using resources in solving simple production tasks. *Zhurnal TRIZ = Journal of TRIZ*. 1992;(3):67–68. (In Russ.)
7. Orlov A.I. *Organizatsionno-ekonomicheskoe modelirovanie: uchebnyk v 3 ch. Ch. 2. Ekspertnye otsenki = Organizational and economic modeling : textbook in 3 hours 2. Expert assessments*. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2011:486. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Ольга Николаевна Пчельникова-Гротова

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры цифровых технологий
и информационных систем,
Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)
(Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4)
E-mail: grotova@mail.ru

Olga N. Pchelnikova-Grotova

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of digital technologies and information systems,
Moscow Aviation Institute
(National Research University)
(4 Volokolamsk highway, Moscow, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 21.11.2022

Поступила после рецензирования/Revised 23.12.2022

Принята к публикации/Accepted 20.01.2023

НЕКОТОРЫЕ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОГЕННЫМИ РИСКАМИ

О. В. Абрамов

Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения
Российской академии наук, Владивосток, Россия
abramov@iacp.dvo.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассмотрена задача управления техногенными рисками сложных систем ответственного назначения. *Материалы и методы.* Основное внимание уделено синтезу стратегии управления техногенными рисками на основе принципа гарантированного результата и с использованием идей функционально-параметрического направления теории надежности. *Результаты и выводы.* Созданные с использованием гарантирующего подхода алгоритмы формирования стратегии управления техногенными рисками достаточно просты в реализации и позволяют в условиях существенной ограниченности и неопределенности исходных данных находить стратегию управления техногенными рисками, гарантирующую безотказность систем и высокое качество функционирования.

Ключевые слова: надежность, риск, параметр, прогноз, случайный процесс, мониторинг, техническое состояние, управление рисками, гарантирующий подход

Для цитирования: Абрамов О. В. Некоторые решения проблемы управления техногенными рисками // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 13–22. doi:10.21685/2307-4205-2023-1-2

SOME SOLUTIONS TO THE PROBLEM OF TECHNOGENIC RISK MANAGEMENT

O.V. Abramov

Institute for Automation and Control processes, Far Eastern Branch
of Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia
abramov@iacp.dvo.ru

Abstract. *Background.* The problem of managing technogenic risks of complex engineering systems of responsible purpose is considered. *Materials and methods.* The main attention is paid to the synthesis of a strategy for managing technogenic risks based on the principle of guaranteed results and using the ideas of the functional-parametric direction of reliability theory. *Results and conclusions.* The algorithms created using the guaranteeing approach for the formation of a technogenic risk management strategy are quite simple to implement and allow, in conditions of significant limitations and uncertainty of the initial data, to find a strategy for managing technogenic risks that guarantees the reliability of systems and high quality of functioning.

Keywords: reliability, risk, parameter, forecast, random process, monitoring, technical condition, risk management, guaranteeing approach

For citation: Abramov O.V. Some solutions to the problem of technogenic risk management. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(1):13–22. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-1-2

Введение

Наблюдаемый в последние годы высокий уровень чрезвычайных ситуаций техногенного характера делает актуальным решение целого ряда новых задач теории рисков [1–3]. Проблема снижения техногенных рисков приобретает особую актуальность применительно к техническим объектам ответственного назначения, отказы которых связаны с большими материальными потерями или катастрофическими последствиями. В большинстве своем это сложные системы, изготавливаемые в небольшом числе экземпляров, эксплуатирующиеся в отличающихся условиях и реализующие экстремальные технологии. Такие технические системы иногда называют уникальными (УТС). Риск обычно связывают с наступлением некоторого, вообще говоря, случайного события, которое называют рисковым событием из возможного семейства событий, описывающих рассматриваемую рис-

ковую ситуацию. При исследовании техногенных рисков в качестве рискового события чаще всего рассматривается потеря работоспособности (отказ) технической системы, характеристиками которой является наработка (время безотказной работы) или момент отказа. Их вероятностные характеристики определяются обычно методами математической статистики и теории надежности. К сожалению, при исследовании УТС ответственного назначения для их получения найти представительную статистику отказов не представляется возможным. Это связано с тем, что их отказы являются редкими событиями. Больше того, задача состоит не в накоплении статистики отказов, а в их предотвращении. В этих условиях перспективным при решении задачи управления техногенными рисками может стать использование идей функционально-параметрического направления (ФП-подхода) теории надежности и теории техногенных рисков [4–6].

В соответствии с методологией функционально-параметрического направления теории техногенных рисков процесс функционирования системы и ее техническое состояние в любой момент времени определяются конечным набором некоторых переменных – параметров системы, а все отказы (рисковые события) есть следствие отклонений параметров от их исходных (номинальных, расчетных) значений [6]. Формой проявления отказа является выход параметров состояния технической системы за пределы области допустимых значений (области работоспособности), при этом возникают задачи оценки (прогнозирования) момента наступления рискового события и принятия управленческих решений (прекращения эксплуатации или проведения профилактических коррекций параметров). В данной работе предлагаются некоторые решения проблемы управления и прогнозирования техногенных рисков, возникающих в процессе эксплуатации сложных технических систем ответственного назначения.

Основные положения функционально-параметрического направления теории техногенных рисков

В основе методологии функционально-параметрического подхода теории рисков лежат следующие основные принципы:

- процесс функционирования системы и ее техническое состояние в любой момент времени определяются конечным набором некоторых переменных – параметров системы;
- накопление различных воздействий на систему приводит к изменениям ее параметров и вследствие этого к возможности перехода в иное качественное состояние;
- наступление рискового события (отказа) есть следствие отклонений параметров от их исходных (номинальных, расчетных) значений, а формой проявления отказа является выход параметров за пределы области допустимых значений (области работоспособности).

При решении задачи управления техногенными рисками на основе ФП-подхода необходимо уметь оценивать текущее техническое состояние системы, прогнозировать изменения технического состояния (момент перехода в предельное состояние), а также определять соответствующие суммарные и единовременные эксплуатационные расходы, связанные с мониторингом состояния, проведением профилактических мероприятий и с ущербом, вызванным наступлением рискового события.

Пусть $y(t)$ – случайный процесс изменения параметров состояния технической системы, статистические характеристики которого полагаются известными. Задана область допустимых изменений этого параметра (область работоспособности). Рисковое событие (отказ) в этом случае наступает в момент выхода случайного процесса $y(t)$ за пределы области работоспособности [7], а нахождение вероятности наступления рискового события можно свести к решению задачи о выбросах случайных процессов [8, 9]. Заметим, что результаты анализа рисков основаны при таком подходе на априори заданных закономерностях изменений параметров всего ансамбля объектов рассматриваемого типа и не учитывают индивидуальных особенностей отдельного конкретного объекта, а поэтому носят «групповой» характер. Рассчитанная с использованием таких результатов стратегия управления риском может быть рекомендована для всех объектов данного типа независимо от того, насколько каждый из них отличается от среднестатистического. Поэтому она оправдана лишь в тех случаях, когда эксплуатируемые объекты статистически однородны (имеют небольшой разброс индивидуальных характеристик качества), а рисковые события не связаны с большими материальными потерями или катастрофическими последствиями.

Для УТС стратегия управления техногенными рисками должна учитывать индивидуальные особенности каждой конкретной системы и условий ее эксплуатации. Такую стратегию и соответствующие ей риски будем называть индивидуальными. Эффект от использования индивидуальной стратегии управления рисками определяется главным образом следующими факторами:

- возможностью в наибольшей степени использовать ресурс каждой конкретной системы, что достигается уменьшением числа преждевременных вмешательств в ее работу;
- возможностью предотвращения наступления рискованных событий (отказов), вызываемых выходом определяющих параметров системы за пределы области работоспособности, что достигается своевременным прекращением эксплуатации или проведением профилактических мероприятий.

Индивидуальное управление рисками возможно при условии получения текущей информации о действительном техническом состоянии каждой системы, т.е. реализация индивидуального подхода требует непрерывного или дискретного контроля и анализа ее технического состояния.

В основе индивидуального подхода лежит прогнозирование изменений параметров технического состояния системы, осуществляемое по результатам контроля. Прогнозирование состояния по одной реализации, т.е. по наблюдениям за одной конкретной системой, может проводиться только при наличии известных априорных характеристик процессов, протекающих в аналогичных системах (модели случайного процесса дрейфа параметров), и данных о характеристиках ошибок контроля и других помех.

Основные трудности при решении задачи прогнозирования состояния для синтеза стратегии управления техногенными рисками связаны с тем, что прогноз приходится осуществлять для каждого объекта индивидуально, при ограниченном объеме исходной информации (по небольшому набору результатов контроля) и в присутствии помех (ошибок контроля и выбранной модели изменения параметров), статистические свойства которых достоверно не известны. В этих условиях классические методы математической статистики и теории случайных процессов теряют свои привлекательные свойства, а их использование для прогнозирования момента наступления рискованного события приводит к существенным ошибкам и невысокой достоверности прогноза.

Основы методологии управления техногенными рисками

Под управлением рисками будем понимать некоторый набор мероприятий, направленных на изменение технического состояния объекта управления т.е. характеристик случайного процесса $y(t)$. Цель управления находится в соответствии с требованиями обеспечения безотказности и заданного или оптимального качества функционирования объекта и может в общем случае рассматриваться как достижение экстремума некоторого критерия оптимальности. Указанный критерий представляет собой функционал, определяемый на допустимом множестве Q с элементами y, u, t , где y – вектор параметров состояния объекта; u – вектор управляющих воздействий, $t \in T$ время эксплуатации. С учетом конкретных возможностей на управление u накладываются определенные ограничения $u \in U$. Цель управления может быть представлена в виде

$$G_0(y, u, t) = \text{extr}, G_j(y, u, t) \in C_j, j = \overline{1, l}, \quad (1)$$

где $G_j(y, u, t)$ – критерий оптимальности управления, элементы которого определены на множестве Q .

Введем понятие стратегии управления, под которой можно понимать функцию $u(\tau, y)$ со значениями из U , где $\tau = \tau(y, t)$ определяет моменты приложения управляющих воздействий (сроки проведения технического обслуживания). Вследствие случайности аргументов функция $u(\tau, y)$ является случайной. Для устранения этой неопределенности можно принять $\tau = \tau(y^*, t)$ и $u(\tau, y^*)$, где y^* – оценка случайного вектора y . Упорядоченная тройка $u(\tau, y^*) \in U \times T \times Y^*$, где Y^* – множество значений оценок y^* ; определяет для каждого $t \in T$ управление $u \in U$. При этом множество Q можно определить как множество пар отображений $(y^*(t), u(t))$ на множестве T , удовлетворяющих условиям $y^* \in Y^*, u \in U, G_j(y, u, t) \in C_j, j = \overline{1, l}$.

Таким образом, стратегия управления есть функция $u(\tau, y^*)$, где $\tau = \tau(y^*, t)$, а задача управления рисками может быть представлена в виде

$$g^* = \text{extr} G(y^*, u, t), \quad (2)$$

$$\{ u(\tau, y^*): \tau \in T, y^* \in Y^*, u \in U \},$$

где g^* – значение критерия, соответствующее оптимальной стратегии управления.

Множество управлений включает в себя контроль и регулировку $y(t)$. По результатам контроля (последовательности измерений $\{z_t\}$, $t \in T_k \in T$) могут быть найдены вместо старых (априорных) новые (апостериорные) статистические характеристики случайного процесса $y(t)$. Поэтому контроль можно условно рассматривать как управляющее воздействие, направленное на изменение статистических характеристик $y(t)$. Целью регулировки является восстановление заданного качества функционирования объекта путем принудительного изменения параметров его технического состояния $y(t)$. В результате регулировки состояние объекта изменяется на некоторое значение $r \in R \subset U$, где R – множество регулировок r . Математическая модель регулировки может быть представлена в виде [10, 11]

$$y_r^* = y^* + r, \quad (3)$$

где y_r^* – оценка состояния объекта после регулировки; y^* – оценка $y(t)$ до регулировки.

Можно считать, что регулировка состоит в смещении случайного процесса $y(t)$ на определенное значение r . Это приводит к изменению статистических характеристик $y(t)$, в частности, к изменению его математического ожидания. Следовательно, существует общность результатов воздействия контроля и регулировки на техническое состояние объекта $y(t)$. Она не затрагивает различий в физической природе рассматриваемых мероприятий по управлению рисками. Так, в процессе контроля поступает дополнительная информация о состоянии объекта. Учет этой информации приводит к изменению статистических характеристик $y(t)$. При регулировке новых, ранее неизвестных сведений о состоянии объекта не представляется. Изменение статистических характеристик $y(t)$ происходит путем непосредственного воздействия на процесс $y(t)$. Указанные различия существенно влияют на вид зависимости $u(\tau, y^*)$.

Для неконтролируемых объектов поиск оптимальной стратегии управления рисками сводится к установлению соответствия между величинами регулировок случайного процесса $y(t)$ и моментами времени их проведения. Поскольку решение такой задачи осуществляется только по априорной информации, то перед началом эксплуатации объекта можно найти функцию $r(t)$, $r \in R$, которая и определяет закон управления случайным процессом $y(t)$ в функции времени, т.е. $u(t)$. Следовательно, при $U \equiv R$ решение задачи (2) поиска $u^{opt}(\tau, y^*)$ можно представить как $r^{opt}(t) \equiv u^{opt}(t)$. При этом задачу поиска $r^{opt}(t)$ можно рассматривать как расширение задачи оптимальной настройки [11].

Если в класс допустимых управлений U входят контроль и регулировка $y(t)$, т.е. $R \subset U$, то обойти трудности, связанные с нахождением стратегии управления в виде $u(\tau, y^*)$ не удастся. Решение задачи (2) в этом случае необходимо получить в общем виде. Выбор метода поиска $u(\tau, y^*)$ зависит от конструкции критерия оптимальности $G(y, u, t)$ [12].

Рассмотрим задачу определения стратегии управления техногенными рисками с использованием принципа гарантированного результата (в минимаксной постановке) [13]. В соответствии с целью управления (1) данная задача может быть представлена в виде

$$g^* = \min_{u(t) \in U(t)} \max_{y(t) \in Y(t)} G(y, u, t). \quad (4)$$

Функция, доставляющая минимум максимуму (или максимум минимуму) критерия $G(y, u, t)$, является искомой минимаксной (или максиминной) стратегией управления рисками.

Использование минимаксного (или максиминного) принципа обеспечивает нахождение равномерно наилучшего правила решения задачи, т.е. равномерно наилучшей стратегии управления рисками $u(t)$. Условием существования указанной стратегии является наличие седловой точки функционала $G(y, u, t)$ по параметрам оптимизации. Вместе с тем характерной чертой минимаксного подхода является отсутствие готового рецепта для определения структуры решения задачи, т.е. не существует достаточно общей и эффективной процедуры поиска минимаксной (максиминной) стратегии управления рисками $u(t)$. Выбор метода решения задач (4) в каждом отдельном случае должен производиться на основании опыта и интуиции исследователя, исходя из конкретных особенностей задачи (конструкция критерия, формы представления исходных данных и т.п.). Такое положение в значительной мере обесценивает достоинства минимаксного подхода при определении стратегии управления рисками. С другой стороны, если удастся установить, что выбранная в условиях априорной неопределенности стратегия $u(t)$ удовлетворяет принципу минимакса (максимина), то это,

безусловно, является положительным фактором, поскольку гарантирует некоторый определенный уровень риска (прибыли), понизить (повысить) который в данных условиях невозможно.

Как отмечалось выше, важным элементом методологии управления техногенными рисками является прогнозирование изменений параметров технического состояния системы, осуществляемое по результатам контроля. Одним из достаточно эффективных методов прогноза в условиях неопределенности может стать метод индивидуального гарантированного прогноза [14, 15]. Метод гарантированного прогноза позволяет определить некоторую область, в пределах которой гарантированно будут находиться параметры технического состояния исследуемого объекта в заданный упрежденный момент времени. В отличие от традиционных вероятностно-статистических методов прогноза он позволяет получать решение при отсутствии сведений о вероятностных характеристиках ошибок наблюдений и других помех. Метод основан на использовании экстремальных свойств полиномов Карлина [16] и идеях минимаксного оценивания. Он позволяет при поиске минимаксной стратегии управления рисками получить данные о пределах (границах) изменения случайного процесса $\mathbf{y}(t) \in Y(t)$. Иначе говоря, относительно $\mathbf{y}(t)$ задать $\mathbf{b}^-(t) \leq \mathbf{y}(t) \leq \mathbf{b}^+(t), \forall t \in T$, где $\mathbf{b}^-(t)$ и $\mathbf{b}^+(t)$ – некоторые детерминированные функции. Можно считать, что по структуре $\mathbf{b}^-(t)$ и $\mathbf{b}^+(t)$ идентичны реализациям $\mathbf{y}(t)$, т.е. $\mathbf{b}^-(t)$ и $\mathbf{b}^+(t)$ – граничные (экстремальные) реализации случайного процесса $\mathbf{y}(t)$ [14], $Y(t) = \{\mathbf{y} \in R^n : \mathbf{b}^-(t) \leq \mathbf{y}(t) \leq \mathbf{b}^+(t)\}$.

При аппроксимации $\mathbf{y}(t)$ зависимостью

$$\mathbf{y}(t) = A\mathbf{F}, \quad (5)$$

где $\mathbf{F} = \{f_i(t)\}_{i=0}^n$ – набор детерминированных функций времени, A – матрица случайных (неопределенных) коэффициентов функции, $\mathbf{b}^-(t)$ и $\mathbf{b}^+(t)$, $t \in T$, можно определить как

$$\mathbf{b}^-(t) = B^-\mathbf{F}, \quad (6)$$

$$\mathbf{b}^+(t) = B^+\mathbf{F}, \quad (7)$$

где $B^+ = \|b_{ij}^+\|_{i=1, j=0}^{n,m}$, $B^- = \|b_{ij}^-\|_{i=1, j=0}^{n,m}$ – матрицы неслучайных коэффициентов.

Если функции $\mathbf{b}^-(t)$ и $\mathbf{b}^+(t)$ известны, то информация для решения задачи (4) определена. При этом оказываются излишними и не могут быть использованы любые другие данные о техническом состоянии объекта на множестве T , в том числе и результаты наблюдений случайного процесса $\mathbf{y}(t)$, $t \in T$. Соответственно, искомая стратегия при априори заданных $\mathbf{b}^-(t)$ и $\mathbf{b}^+(t)$ может быть представлена как $\mathbf{u}(t) \equiv \mathbf{r}(t)$, $U \equiv R$.

Если функции $\mathbf{b}^-(t)$ и $\mathbf{b}^+(t)$ заданы не полностью, например, с точностью до параметров B^+ и B^- (из выражений (6), (7)), то поступающая в процессе контроля $\mathbf{y}(t)$ информация может быть использована для устранения имеющейся неопределенности. Очевидно, что в этом случае контрольные измерения $\mathbf{y}(t)$ должны входить в состав допустимых управлений, а искомая стратегия будет $\mathbf{u}(t)$, $\mathbf{u} \in U \supset R$ (результат решения задачи (4)). При этом для нахождения неизвестных параметров функций необходимо использование определенной процедуры. Такая процедура должна обладать свойствами, обеспечивающими возможность ее применения в условиях ограниченности исходных данных (дискретный контроль $\mathbf{y}(t)$ в присутствии ошибок с неизвестными стохастическими свойствами).

Содержание основного этапа гарантированного управления рисками составляет задача поиска оптимальной (в минимаксном смысле) стратегии управления. Постановка этой задачи связана с определением последовательности, характера и величины управляющих воздействий, элементами множества которых являются наблюдения за состоянием технического объекта и регулировки его параметров (или замены отдельных блоков, узлов, элементов, угрожающих безотказности функционирования объекта на заданном интервале времени T). При этом в зависимости от информационного обеспечения, избранного критерия оптимальности, возможности управления, условий эксплуатации и т.п. в рамках общей постановки рассматриваемой задачи можно выделить ряд частных ее разновидностей. Так, при использовании разных критериев оптимальности возникают задачи формирования тех или иных стратегий гарантированного управления рисками. В частности, применение кри-

терия гарантированного времени безотказной работы обуславливает решение задачи поиска $\mathbf{u}^{opt}(\tau, \mathbf{y}^*)$, обеспечивающей:

- максимум гарантированного времени безотказной работы объекта (времени до момента наступления рискованного события) при заданных ограничениях на ресурсы и возможности управления;
- заданное гарантированное время безотказной работы при минимальном расходе ресурса.

Для критерия гарантированного уровня материальных потерь при эксплуатации технического объекта на множестве T искомая стратегия управления (и соответственно решение задач определения такой стратегии) может быть представлена как стратегия, обеспечивающая:

- гарантированный минимум общих эксплуатационных потерь (или гарантированная максимальная эффективность эксплуатации);
- минимум гарантированных эксплуатационных потерь на отдельных отрезках интервала T .

В зависимости от возможностей управления рисками, наличия информации о закономерностях дрейфа параметров объекта и имеющихся ресурсах, среди разновидностей общей задачи можно выделить:

- задачи поиска глобально оптимальных стратегий гарантированного управления рисками;
- задачи определения локально-оптимальных стратегий;
- задачи нахождения вырожденных стратегий гарантированного управления рисками.

Приведенные выше задачи не исчерпывают всего многообразия разновидностей задач определения стратегий гарантированного управления рисками, но отражают основные особенности других таких задач и являются наиболее типичными для практики.

Локально-оптимальные стратегии гарантированного управления рисками

Трудности, связанные с нахождением оптимальной минимаксной стратегии гарантированного управления рисками, часто вынуждают прибегать к определенным упрощениям и вводить аппроксимацию. Такой подход является традиционным в теории оптимального управления и часто применяется на практике из-за большей простоты достижения конкретных результатов. Особенно велико значение этого перехода в условиях априорной неопределенности, когда уместно пойти на некоторые упрощения, без которых найти решение задачи чрезвычайно сложно либо вообще невозможно [12].

Вышеизложенное касается задачи построения стратегии гарантированного управления рисками

$$g^* = \min_{\mathbf{u}(t) \in U(t)} \max_{\mathbf{b}^-(t) \leq \mathbf{y}(t) \leq \mathbf{b}^+(t)} G(\mathbf{y}, \mathbf{u}, t), \quad (8)$$

в которой поиск необходимо осуществлять в условиях, когда границы возможных изменений параметров технического состояния $\mathbf{y}(t)$ априори не определены, т.е. область $[\mathbf{b}^-(t), \mathbf{b}^+(t)]$ не задана. Из-за недостатка априорных сведений при решении задачи (8) невозможно заранее установить функциональное соответствие между $\mathbf{y}(t)$ и ожидаемыми результатами гарантированного управления рисками, т.е. априори определить $\mathbf{u}^{opt}(\tau, \mathbf{y}^*)$. Построение области возможных значений параметров технического состояния и формирование искомой стратегии в задаче (8) требуется осуществлять на основе данных, получаемых в процессе управления рисками. Найти в такой ситуации глобально оптимальную стратегию управления чрезвычайно трудно. Для преодоления возникающих здесь трудностей можно аппроксимировать глобально-оптимальную стратегию управления совокупностью локально-оптимальных стратегий. При этом каждая из локально-оптимальных стратегий для уменьшения ошибки аппроксимации должна быть адаптивной, т.е. обладать способностью к улучшению по мере накопления данных об изменениях $\mathbf{y}(t) \in Y(t)$. Для нахождения области $[\mathbf{b}^-(t), \mathbf{b}^+(t)]$ можно использовать метод гарантированного прогноза [14].

Рассмотрим задачу поиска адаптивной локально-оптимальной стратегии гарантированного управления рисками с использованием минимаксного прогноза состояния технического объекта. Пусть управление рисками состоит в проведении в фиксированные моменты времени $\{\tau_i\}_{i=0}^p$, $\tau_i \in T$ контрольных измерений или совмещенных с контролем регулировок $\mathbf{y}(t)$. При этом на интервале $[\tau_0, \tau_k] \in T$, $k < p$ можно без ущерба нормального функционирования объекта лишь контролировать $\mathbf{y}(t)$. Другими словами, существует некоторый интервал, где заведомо известно, что регулировки $\mathbf{y}(t)$ не потребуются (рискованное событие не произойдет). Этот интервал $[\tau_0, \tau_k]$ можно назвать интерва-

лом накопления информации. Далее пусть относительно ошибки контроля $e(t)$ известно только, что она лежит в пределах $[c_1(t), c_2(t)]$. Функция потерь $H(y)$ задана. Затраты на проведение одной регулировки составляют χ . Изменение технического состояния объекта $y(t)$ на интервале эксплуатации можно описать в виде зависимости (5). Требуется найти такую стратегию управления рисками, реализация которой обеспечивает гарантированный минимум эксплуатации потерь на множестве T .

Поставленная задача является разновидностью задачи (4) формирования минимаксной стратегии $u^{opt}(\tau, y^*)$ по критерию затрат, связанных с эксплуатацией – S_T . Она может быть представлена как [6]

$$g^* = \inf_{r \in R} \sup_{B^- \leq A \leq B^+} \left\{ \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} H(A, r, t) dt + w_i \chi \right\}, \quad (9)$$

где B^-, B^+ – параметры функций $b^-(t)$ и $b^+(t)$ экстремальных реализаций, образующих «конус прогноза» [5], $b^-(t) \leq y(t) \leq b^+(t)$, $t > \tau_i$, $i \geq k$, $w_i = \begin{cases} 0, & r \notin R, \\ 1, & r \in R, \end{cases} \quad i = \overline{k, p}$.

Алгоритм решения задачи (9) состоит в следующем:

- 1) на интервале $[\tau_0, \tau_k] \in T$ по результатам измерений случайного процесса $y(t)$ с помощью алгоритма гарантированного прогноза строятся экстремальные реализации $b^-(t)$, $b^+(t)$ и определяются параметры B^-, B^+ ;
- 2) вычисляются g^* и соответствующие ему настройки r (если $r \notin R$, то регулировка $y(t)$ в момент τ_k не производится);
- 3) осуществляется контрольное измерение $y(t)$ в момент τ_{k+1} , с помощью алгоритма минимаксного гарантированного прогноза уточняются B^- и B^+ ;
- 4) повторяется п. 2 для момента τ_{k+1} (определяется необходимость регулировки $y(t)$ в момент τ_{k+1});
- 5) процедура повторяется, начиная с п. 3, до тех пор, пока $\tau_{k+1} \in T$.

Предложенный алгоритм является однозначным, локально-оптимальным и адаптивным.

Другой разновидностью задачи (4) является задача построения $u^{opt}(\tau, y^*)$ по критерию гарантированного времени безотказного функционирования.

Пусть гарантированное управление техногенными рисками состоит в проведении в некоторые моменты времени контрольных измерений и регулировок $y(t)$ или только контрольных измерений $y(t)$. Ошибки контроля лежат в пределах $[c_1(t), c_2(t)]$. На интервале $[\tau_0, \tau_k]$ проводить регулировки $y(t)$ не требуется. Изменения технического состояния объекта $y(t)$ можно описать с помощью зависимости (5). Требуется определить стратегию управления рисками, гарантирующую безотказность функционирования объекта при условии, что время между двумя управлениям будет не меньше ΔT . При этом, если $y(t) \in D$, где D – заданная область работоспособности [9], то объект функционирует нормально.

Сформулированная задача может быть представлена в виде

$$\tau_{i+1}^* = \max_{r \in R} \min_{A=B^-, B^+} \{ \tau : y(A, r, \tau) \notin D \}, \quad (10)$$

при $\tau_{i+1}^* - \tau_i^* \geq \Delta T$, где B^-, B^+ – параметры функций $b^-(t)$ и $b^+(t)$, $b^-(t) \leq y(t) \leq b^+(t)$, $t > \tau_i$, $i \geq k$.

Алгоритм решения задачи (10) состоит в следующем:

- 1) по данным контроля $y(t)$ на интервале $[\tau_0, \tau_k]$ определяются параметры B^- и B^+ ;
- 2) вычисляются τ_{k+1}^* и величина $r \in R$ для τ_k (если $r \notin R$, то регулировка в момент τ_k не проводится);
- 3) если $\tau_{i+1}^* - \tau_i^* \geq \Delta T$, то осуществляется контрольное измерение $y(t)$ в момент τ_{k+1}^* , с помощью минимаксного прогноза уточняются B^- и B^+ (при $\tau_{i+1}^* - \tau_i^* \leq \Delta T$ формирование $u^{opt}(\tau, y^*)$ завершается);
- 4) повторяется п. 2 для τ_{k+2}^* (если $r \notin R$, то регулировка в момент τ_{k+1}^* не проводится).

Далее процедура повторяется, начиная с п. 3, до тех пор, пока $\tau_{i+1}^* - \tau_i^* \geq \Delta T$.

Нетрудно заметить, что представленный алгоритм является однозначным, локально-оптимальным и адаптивным. Эффективность такого алгоритма, как и описанного выше, можно оценить, сравнивая гарантированное время безотказного функционирования объекта без управления с полученным при применении предложенного алгоритма.

Наиболее общим и естественным критерием оптимальности гарантированного управления рисками является критерий, имеющий экономическую природу. В конечном счете, мы всегда стремимся так управлять объектом, чтобы суммарный эффект от его использования во время эксплуатации был бы максимальным. Одним из таких показателей является, в частности, показатель гарантированного уровня общих материальных затрат S_T . Для формирования искомой стратегии $\mathbf{u}_g^{opt}(\tau, \mathbf{y}^*)$, учитывая аддитивность критерия S_T , можно применить принцип оптимальности Беллмана [17]. За счет аддитивности S_T на основе принципа оптимальности Беллмана может быть достигнута глобально-оптимальная стратегия гарантированного управления рисками $\mathbf{u}_g^{opt}(\tau, \mathbf{y}^*)$ пошаговой минимизацией критерия S_T . Соответствующие алгоритмы являются адаптивными, так как совместно с принятием основных решений оценивают сложившуюся обстановку, чем улучшают процесс принятия решений. Они, как правило, могут быть реализованы в рекуррентном виде [15, 18].

Заключение

Исследованы некоторые пути решения проблемы управления техногенными рисками, источником которых являются постепенные отказы. Особую важность решение этой проблемы приобретает применительно к уникальным системам ответственного назначения, отказы которых приводят к существенным материальным потерям или катастрофическим последствиям.

В статье основное внимание уделено синтезу стратегии управления техногенными рисками на основе принципа гарантированного результата и с использованием идей функционально-параметрического направления теории надежности. Особенность возникающих задач состоит в том, что они решаются в условиях неполной и не всегда достоверной информации, управления ищутся на основе прогноза, а результат управления должен быть гарантирован. Для решения задачи выбора оптимальной стратегии управления техногенными рисками используется минимаксный принцип, гарантирующий получение положительного результата даже в самых неблагоприятных условиях. Отметим также, что созданные с использованием гарантирующего подхода алгоритмы формирования стратегии управления техногенными рисками достаточно просты в реализации и позволяют в условиях существенной ограниченности и неопределенности исходных данных находить стратегию управления техногенными рисками, гарантирующую безотказность и высокое качество функционирования исследуемых объектов.

Список литературы

1. Острейковский В. А. Теория техногенного риска: математические методы и модели. Сургут : ИЦ СурГУ, 2013.
2. Aven T. Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundation // *European Journal of Operational Research*. 2016. № 25. P. 1–13.
3. Kaplan S., Garrick B. J. On the quantitative definition of risk // *Risk Analysis*. 1981. № 1. P. 11–27.
4. Abramov O., Dimitrov B. Reliability design in gradual failures: a functional-parametric approach // *Reliability: Theory & Applications*. 2017. Vol. 12, № 4. P. 39–48.
5. Abramov O. V., Nazarov D. A. Functional-Parametric Direction of Risk Theory // *The 13th Asian Control Conference (ASCC 2022)*. May 4–7, 2022 (Wed-Sat), International Convention Center. Jeju Island, Korea, IEEE, 2022. P. 1911–1913. doi:10.23919/ASCC56756.2022.9828266
6. Абрамов О. В. Об одном направлении теории техногенного риска // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019 (г. Москва, 17–20 июня 2019 г.) : сб. тр. / под общ. ред. Д. А. Новикова. М. : ИПУ РАН, 2019. С. 2827–2831.
7. Абрамов О. В., Назаров Д. А. Программно-алгоритмический комплекс построения, анализа и использования областей работоспособности // *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2015. № 2. С. 3–13.
8. Тихонов В. И., Хищенко В. И. Выбросы траекторий случайных процессов. М. : Наука, 1987.
9. Фомин Я. Н. Теория выбросов случайных процессов. М. : Связь, 1980.

10. Абрамов О. В. Выбор параметров настройки технических устройств и систем // Проблемы управления. 2011. № 4. С. 13–19.
11. Abramov O. V. Choosing optimal values of tuning parameters for technical devices and systems // Automation and Remote Control. 2016. Vol. 77, № 4. P. 594–603.
12. Репин В. Г., Тартаковский Т. П. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. М. : Сов. радио, 1977.
13. Гермейер Ю. Б. Введение в теорию исследования операций. М. : Наука, 1973.
14. Абрамов О. В. Основные особенности и свойства метода гарантированного прогноза // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 1. С. 3–10.
15. Abramov O., Nazarov D. Condition-based maintenance by minimax criteria // Applied Mathematics in Engineering and Reliability : Proceedings of the 1st International Conference on Applied Mathematics in Engineering and Reliability. Ho Chi Minh City, Vietnam, 2016. P. 91–94.
16. Карлин С., Стадден В. Чебышевские системы и их применение в анализе и статистике. М. : Наука, 1976. 586 с.
17. Беллман Р., Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования. М. : Наука, 1965. 458 с.
18. Абрамов О. В. Контроль и прогнозирование технического состояния систем ответственного назначения // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 4. С. 108–115.

References

1. Ostreykovskiy V.A. *Teoriya tekhnogennogo riska: matematicheskie metody i modeli = Technogenic risk theory: mathematical methods and models*. Surgut: ITs SurGU, 2013. (In Russ.)
2. Aven T. Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundation. *European Journal of Operational Research*. 2016;(25):1–13.
3. Kaplan S., Garrick B.J. On the quantitative definition of risk. *Risk Analysis*. 1981;(1):11–27.
4. Abramov O., Dimitrov B. Reliability design in gradual failures: a functional-parametric approach. *Reliability: Theory & Applications*. 2017;12(4):39–48.
5. Abramov O.V., Nazarov D.A. Functional-Parametric Direction of Risk Theory. *The 13th Asian Control Conference (ASCC 2022). May 4–7, 2022 (Wed-Sat), International Convention Center. Jeju Island, Korea, IEEE, 2022:1911–1913. doi:10.23919/ASCC56756.2022.9828266*
6. Abramov O.V. About one direction of the theory of technogenic risk. *XIII Vserossiyskoe soveshchanie po problemam upravleniya VSPU-2019 (g. Moskva, 17–20 iyunya 2019 g.): sb. tr. = XIII All-Russian meeting on management problems of VSPU-2019 (Moscow, June 17-20, 2019) : proceedings*. Moscow: IPU RAN, 2019:2827–2831. (In Russ.)
7. Abramov O.V., Nazarov D.A. Programmno-algorithmic complex of construction, analysis and use of areas of operability. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy = Information technologies and computing systems*. 2015;(2):3–13. (In Russ.)
8. Tikhonov V.I., Khimenko V.I. *Vybrosy traektoriy sluchaynykh protsessov = Emissions of trajectories of random processes*. Moscow: Nauka, 1987. (In Russ.)
9. Fomin Ya.N. *Teoriya vybrosov sluchaynykh protsessov = Theory of emissions of random processes*. Moscow: Svyaz', 1980. (In Russ.)
10. Abramov O.V. Choice of settings for technical devices and systems. *Problemy upravleniya = Control problems*. 2011;(4):13–19. (In Russ.)
11. Abramov O.V. Choosing optimal values of tuning parameters for technical devices and systems. *Automation and Remote Control*. 2016;77(4):594–603.
12. Repin V.G., Tartakovskiy T.P. *Statisticheskii sintez pri apriornoj neopredelennosti i adaptatsiya informatsionnykh system = Statistical synthesis with a priori uncertainty and adaptation of information systems*. Moscow: Sov. radio, 1977. (In Russ.)
13. Germeyer Yu.B. *Vvedenie v teoriyu issledovaniya operatsiy = Introduction to the theory of operations research*. Moscow: Nauka, 1973. (In Russ.)
14. Abramov O.V. Main features and properties of the guaranteed forecast method. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2017;(1):3–10. (In Russ.)
15. Abramov O., Nazarov D. Condition-based maintenance by minimax criteria. *Applied Mathematics in Engineering and Reliability: Proceedings of the 1st International Conference on Applied Mathematics in Engineering and Reliability*. Ho Chi Minh City, Vietnam, 2016:91–94.
16. Karlin S., Stadden V. *Chebyshevskie sistemy i ikh primeneniye v analize i statistike = Chebyshev systems and their application in analysis and statistics*. Moscow: Nauka, 1976:586. (In Russ.)
17. Bellman R., Dreyfus S. *Prikladnye zadachi dinamicheskogo programmirovaniya = Applied problems of dynamic programming*. Moscow: Nauka, 1965:458. (In Russ.)
18. Abramov O.V. Control and forecasting of the technical condition of systems of responsible purpose. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2018;(4):108–115. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Олег Васильевич Абрамов

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
главный научный сотрудник лаборатории
управления надежностью сложных систем,
Институт автоматизации и процессов управления
Дальневосточного отделения
Российской Академии наук
(Россия, г. Владивосток, ул. Радио, 5)
E-mail: abramov@iacp.dvo.ru

Oleg V. Abramov

Doctor of technical sciences, professor,
honored Scientist of the Russian Federation,
chief researcher of the laboratory
of complex systems reliability management,
Institute for Automation and Control processes,
Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences
(5 Radio street, Vladivostok, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 20.11.2022

Поступила после рецензирования/Revised 22.12.2022

Принята к публикации/Accepted 20.01.2023

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СРЕД ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ЦИФРОВОГО УПРАВЛЕНИЯ В КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Г. И. Коршунов

Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия
Санкт-Петербургский политехнический университет
имени Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия
kgi@pantes.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассмотрены модели физических сред для оптимизации цифрового управления в киберфизических системах, ориентированные на уровни целей в проблемной области. В статье цель киберфизических систем представлена как оптимизация взаимодействия с физическим миром на основе анализа спектра основного критерия. *Материалы и методы.* Формирование целей в проблемной области, что позволяет создавать базу знаний. Рассматриваемый подход существенно облегчается применением программных средств Python. Это позволяет избежать сложных математических вычислений и гибкую корректировку данных. Задачи управления включают достижение цели, уточнение параметров цели и декомпозицию управления в виде функций. *Результаты и выводы.* Математически физическая среда описана тремя пространственными измерениями и одним временным измерением. Интерпретация физической среды представлена как цифровая, так как кибернетическая подсистема принципиально является цифровой.

Ключевые слова: киберфизические системы, оптимизация, многоуровневые проблемные области, цель, цифровое управление

Для цитирования: Коршунов Г. И. Моделирование физических сред для оптимизации цифрового управления в киберфизических системах // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 23–28. doi:10.21685/2307-4205-2023-1-3

SIMULATION OF PHYSICAL ENVIRONMENTS FOR OPTIMIZATION OF DIGITAL CONTROL IN CYBER-PHYSICAL SYSTEMS

G.I. Korshunov

Saint-Petersburg State University of Airspace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia
kgi@pantes.ru

Abstract. *Background.* Models of physical environments are considered for optimizing digital control in cyber-physical systems (CPS), focused on the levels of goals in the problem area. In the article, the goal of the CPS is presented as an optimization of interaction with the physical world based on the analysis of the spectrum of the main criterion. *Materials and methods.* Formation of goals in the problem area, which allows to create a knowledge base. The considered approach is greatly facilitated by the use of Python software tools. This avoids complex mathematical calculations and flexible data adjustment. Management tasks include achieving the goal, refining the parameters of the goal and decomposition of management in the form of functions. *Results and conclusions.* Mathematically, the physical environment is described by three spatial dimensions and one temporal dimension. The interpretation of the physical environment is presented as digital, since the CP is fundamentally digital.

Keywords: cyber-physical systems, optimization, multilevel problem areas, goal, digital control

For citation: Korshunov G.I. Simulation of physical environments for optimization of digital control in cyber-physical systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(1):23–28. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-1-3

Введение

Задачи управления включают достижение цели, уточнение параметров цели и декомпозицию управления в виде функций (операций). Цель системы может определяться достижением системы значений ее базовых параметров или достижением желаемого состояния. С понятием цели всегда

связано понятие функций, приводящих систему к ее достижению. В статье цель КФС представлена как оптимизация взаимодействия с физическим миром. Под оптимизацией здесь понимается развитие какого-либо объекта или метода к наилучшему состоянию, а под физическим миром – объекты живой и неживой природы или искусственно созданные. Поскольку основными категориями в глобальном представлении являются материя и энергия, формулирование первичной цели КФС выполняется с применением энергетических критериев. Математически физическая среда является многообразием, состоящим из событий, описанных тремя пространственными измерениями (длина, ширина, высота) и одним временным измерением. Пространственно-временной континуум (ПВК) непрерывен и с математической точки зрения представляет собой многообразие с выбранной метрикой. В статье не преследуется цель углубленного исследования соответствующих теоретических проблем. Вместе с тем в киберфизических системах (КФС) должно быть достигнуто взаимодействие между развивающейся кибернетической подсистемой (КП) и физической подсистемой – средой (ФП). В этом смысле интерпретация ПВК физической среды должна быть представлена как цифровая, так как КП принципиально является цифровой. Но компьютеры не могут напрямую справиться с величинами в ПВК в общем случае. Примером реализации может служить множество точек, покрывающее выбранную для моделирования область, например, представленную матрицами. Для таких точек в пространстве обоснованно выбирается расстояние. Достижение сбалансированного взаимодействия КП и ФП представляет собой задачу оптимизации в условиях имеющегося уровня развития КФС. В основном это касается развития КП, в том числе моделирования ФП. Эти вопросы и соответствующие цели ставились как в общем виде в работах [1–3], так и касались объектов разного уровня: сенсоров [4], разного рода сред [5], промышленных предприятий. Однако локальные цели представляются в рамках многоуровневой системы, работающей на глобальные критерии [6]. В этой работе в качестве глобальных критериев представлены термодинамическая энергоэффективность и информация. Квантовая теория информации непосредственно связывает информацию с энергией через энтропию фон Неймана, которую можно считать основной физической характеристикой энергоинформационного процесса. Эта сложная задача представлена в работах Джона фон Неймана [7, 8] и здесь не рассматривается. Что касается информации, то многоуровневые системы создаются в проблемных областях, а информация должна накапливаться и обрабатываться в базах данных и базах знаний для последующего управления ФП с учетом предотвращения деградации ее свойств. Целью работы является оптимизация цифрового управления в киберфизических системах при формализации целей на уровнях проблемной области с применением программных средств. В статье и ссылках на работы автора с соавторами представлены цели и реализации управления в проблемных областях коррозионной защиты металлических сооружений, минимизации и нейтрализации вредных выбросов и сбросов предприятий и объектов транспорта. Развивается подход к цифровому жизненному циклу создания электроники.

Подробный анализ моделей применительно к КФС приведен в общем виде в работе [3]. Там, в частности, приведен перечень и анализ моделей. Рассмотрены достоинства и недостатки детерминированных моделей на основе ОДУ, которые могут использоваться для моделирования динамики физических систем, а также переход к недетерминированным моделям. Представляет интерес парадигма моделирования как математика исчисления и дифференциальных уравнений и парадигма моделирования как теория императивных программ в информатике. В настоящей статье приведены результаты, оценки и ссылки на работы автора по первому подходу к моделированию и некоторые результаты, иллюстрирующие второй подход.

Модели на основе уравнений математической физики

Такие модели на основе уравнений Пуассона и теплопроводности представлены в работах [10–13]. В задаче защиты от коррозии нахождение распределения поляризованного потенциала на поверхности подземных металлических трубопроводов требует знания распределения потенциала ϕ , создаваемого в грунте токами, протекающими через наружную поверхность трубопровода, имеющую контакт с грунтом. Расчет распределения потенциала производится в предположении, что подземные трубопроводы расположены в однородном проводящем полупространстве с удельным сопротивлением. Среда, с которой граничит полупространство, принимается непроводящей. В этих условиях распределение потенциала ϕ в проводящей среде является решением уравнения Пуассона [13, 14].

Задачи минимизации выбросов в атмосферу и сбросов в водную среду решены с применением уравнений диффузии и теплопроводности в работах [10–13]. Следует отметить, что применение та-

ких моделей связано со сложными вычислениями, а полученное выражение управления содержит влияние человеческого фактора.

Интеллектуальные сенсоры

Здесь предложено рассмотреть в качестве примеров интеллектуальные сенсоры, применение которых соответствует постановке задачи цифровизации управления.

Необходимость применения интеллектуальных сенсоров как в пространстве, так и во времени для реализации КФС продиктована требованиями учета динамики и организации обработки информации с актуализацией состояний в пространстве и во времени [15, 16]. Предложенные в этих работах схемы с применением параллельных процессов и обработкой информации от разнесенных в пространстве источников включают актуализацию отдельных источников для получения общего результата. Это позволяет обеспечить распределенную неалгоритмическую обработку смешанных по форме сигналов. Построение параллельных процессов используется и при обработке информации от одного источника, а актуализация процессов и выдача результатов разнесены во времени со сбором входной информации.

В работе [17] на основе уникальных полупроводниковых сенсоров выполняется анализ и управление измерениями многокомпонентных парогазовых смесей. Это обеспечивает высокую достоверность идентификации вещества-аналита. Введение каталитических примесей, нагрев до заданных температур в полной мере не снимают основной вопрос селективной идентификации веществ в многокомпонентных смесях. Повышение селективности достигается формированием мультисенсорных систем, составленных из сенсоров различного химического состава – сенсоров, основу которых составляет диоксид олова и различные каталитические примеси. Математическая модель построена с применением вейвлет-преобразования, что обусловлено частотно-временной локализацией как аналогового, так и цифрового массива полученной при измерении информации. Вейвлет-преобразование свободно от неопределенности в частотно-временной области [19].

Модели оптимизации цифрового управления, ориентированные на уровни целей в проблемной области

Объект управления представлен выделенной областью ПВК со счетным числом точек $\{i(x, y, z, \Delta t, q)\}$, $0 < i < n$, где $x_i, y_i, z_i, \Delta t_i$ – пространственно-временные координаты точки, q_i – значение параметра или критерия в точке, n – выбранное число точек.

В качестве параметра или критерия в зависимости от рассматриваемого уровня может быть представлена достоверность данных сенсора, концентрация компонента жидкости или газа, уровень бракованных деталей, энергоэффективность и другие объекты в рассматриваемой проблемной области. Для уточнения числа точек и их координат используется анализ спектра, полученного на основе имеющегося распределения плотности вероятности q . Анализ спектра позволяет выявить наиболее значимые процессы в физической среде и на основе определенных периодических процессов уточнить как пространственно-временные координаты точек, так и их необходимое количество для формирования цели и оптимизации управления. В случае отсутствия явных периодических процессов применяются известные приближения из работ [18–20]. Аналогично рассматриваемые цели соответствуют многоуровневой проблемной области, а полученная и откорректированная информация может представлять содержимое баз данных и знаний. Это необходимо для дальнейшего развития проблемной области в условиях неопределенности. Рассматриваемый подход существенно облегчается применением современных программных средств Python [20].

Предлагаемый подход к оптимизации цифрового управления, ориентированный на уровни целей в проблемной области, включает следующие этапы:

- 1) формирование предварительной модели объекта цифрового управления в ПВК в формате массива [20];
- 2) нахождение предварительно актуальной (или по аналогу) плотности распределения вероятности управляемого показателя, локального или глобального критерия на заданном уровне проблемной области;
- 3) выполнение спектрального анализа и определение явных или скрытых периодичностей для управляемой величины [21, 22];
- 4) моделирование цифрового управления заданной величиной на основе модели отложенных данных Python;

5) оптимизация цифрового управления в режимах обучения на основе сбора большего числа выборок для обучения, количества данных использования упрощенной или усложненной модели в базе знаний;

6) введение корректировок в первичную модель, плотность распределения вероятности, результаты спектрального анализа;

7) формирование содержания базы знаний для выбранного уровня проблемной области на основе полученных промежуточных и окончательных результатов;

8) формирование цели следующего уровня на основе функций агрегирования Python;

9) прогнозирование развития КФС в проблемной области на основе формируемой базы знаний на основе задач классификации и регрессии, кластеризации и понижения размерности, представленных возможностями Python в режимах машинного обучения.

Предлагается использование языка программирования Python в решении задач машинного обучения как наиболее гибкого и адаптированного. Программные библиотеки языка программирования Python, такие как Keras, TensorFlow, и Scikit-learn, разработанные специально для машинного обучения, позволяют повысить точность получаемых результатов, скорость, надежность работы с различными мультимодальными системами, а также простоту создания прототипов для их последующей отладки. Однако для наиболее корректной работы и запуска на любой операционной системе с представленными библиотеками при встраивании их в цифровой производственный процесс необходимо наличие установленного интерпретатора не ниже версии Python 3.8+.

Заключение

Предложенный подход к моделированию и оптимизации управления в ФКС отличается от известных первичностью целевой направленности и представлением в многоуровневом пространстве, в качестве которого выступает проблемная область. Такой подход не исключает одноуровневого представления, однако дает возможность и динамически корректировать показатели, локальные и глобальную цель. Этому способствует применение программных средств Python. Работа с массивами данных, представляющих выбранную область в ПВК, существенно упрощает вычислительные процедуры, характерные для моделей на основе уравнений математической физики. Другим важным преимуществом является динамическое обновление данных и целей и возможность создания базы знаний для последующего управления и прогнозирования в условиях неполной определенности.

Обсуждение

Предложенные в статье модели и подход представлены для абстрактной проблемной области. Конкретные примеры разрабатываются для проблемной области минимизации загрязнений атмосферного воздуха и проблемной области бездефектного производства. Элементы подхода реализованы на отдельных этапах жизненного цикла КФС.

Список литературы

1. Lee E. A., Seshia S. A. Introduction to Embedded Systems, A Cyber-Physical Systems Approach. Second ed. MIT Press, 2017.
2. Arseniev D. G., Overmeyer L., Kälviäinen H., Katalinić B. Cyber-Physical Systems and Control // Springer Nature. 2020. Vol. 95.
3. Lee E. Fundamental Limits of Cyber-Physical Systems Modeling // ACM Transactions on Cyber-Physical Systems. 2016. № 1. P. 1–26. doi:10.1145/2912149.
4. Lee E. A. The past, present and future of cyber-physical systems: a focus on models // Sensors (Basel). 2015. Vol. 15. P. 4837–4869.
5. Korshunov G. I., Frolova E. A. Systems analysis of physical processes: its application in the creation of cyber-physical systems // Lecture Notes in Networks and Systems. 2021. Vol. 184. P. 417–429.
6. Korshunov G. I., Polyakov S. L. Information and thermodynamic fundamentals of cyber physical systems modeling // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1515. P. 022065.
7. Von Neumann J. Математические основы квантовой механики. Принстон : Изд-во Принстонского университета, 1955. ISBN 978-0-691-02893-4.
8. Von Neumann J. Thermodynamik quantenmechanischer Gesamtheiten // Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse. 1927. № 102. P. 273–291.

9. Beckman I. Computer science. Lecture course. Entropy and information. 2009. URL: <http://profbeckman.narod.ru/InformLekc.htm>
10. Sol'nitsev R. I., Korshunov G. I. Mathematical models of control systems "nature-technogenics" // Известия вузов. Приборостроение. 2012. № 12. С. 5–11.
11. Сольнищев Р. И., Коршунов Г. И. Система управления «природа–техногеника». СПб. : Политехника, 2013.
12. Korshunov G. I., Solnitsev R. I., Zhilnikova N. A., Polyakov S. L. Models of Cyber-Physical Control Systems for Pollution Minimization Technologies // Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. P. 442–450. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7970486>
13. Коршунов Г. И., Сольнищев Р.И., Фролова Е. А. Обеспечение качества и создание интеллектуальных систем коррозионной защиты трубопроводного транспорта энергоносителей // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 2. С. 92–101. doi:10.21685/2307-4205-2022-2-11
14. Korshunov G. I., Frolova E. A. Systems Analysis of Physical Processes: Its Application in the Creation of Cyber-Physical Systems // Lecture Notes in Networks and Systems. 2021. Vol 184. doi:10.1007/978-3-030-65857-1_35
15. Bondarenko P. N., Safyannikov N. M. Organization of soft coordination of streaming informational processes' interaction with states' actualization in space // 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements : proceedings (SCM 2017, 6 July 2017). 2017. P. 31–33.
16. Бондаренко П. Н. Структурная организация устройств с актуализацией состояний во времени // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Сер.: Информатика, управление и компьютерные технологии. 2016. № 4. С. 7–12.
17. Белозерцев А. И., Эль-Салим С. З. Эмпирическая модель идентификации вещества многокомпонентных парогазовых смесей // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 3. С. 10–17. doi:10.21685/2307-4205-2017-3-2
18. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М. : Советское радио, 1968. Кн. 2.
19. Novoseltseva M. Use of proper c-fractions for analysis of multi-frequency signals with hidden periodicities // Large-Scale Systems Control. 2013. Vol. 41. P. 93–112.
20. Прохоренков А. М., Качала Н. М. Использование методов нечеткой логики для определения классификационных характеристик случайных процессов // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2006. Т. 9, № 3. С. 514–521.
21. Вандер П. Дж. Python для решения сложных задач: наука о данных и машинное обучение. СПб. : Питер, 2020. 576 с.
22. Леонидов В. В. Конспект лекций «Вейвлет-преобразование» : учеб. пособие. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016.

References

1. Lee E.A., Seshia S.A. *Introduction to Embedded Systems, A Cyber-Physical Systems Approach. Second ed.* MIT Press, 2017.
2. Arseniev D.G., Overmeyer L., Kälviäinen H., Katalinić B. Cyber-Physical Systems and Control. *Springer Nature*. 2020;95.
3. Lee E. Fundamental Limits of Cyber-Physical Systems Modeling. *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*. 2016;(1):1–26. doi:10.1145/2912149
4. Lee E.A. The past, present and future of cyber-physical systems: a focus on models. *Sensors (Basel)*. 2015;15:4837–4869.
5. Korshunov G.I., Frolova E.A. Systems analysis of physical processes: its application in the creation of cyberphysical systems. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2021;184:417–429.
6. Korshunov G.I., Polyakov S.L. Information and thermodynamic fundamentals of cyber physical systems modeling. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1515:022065.
7. Von Neumann J. *Matematicheskie osnovy kvantovoy mekhaniki = Mathematical foundations of quantum mechanics*. Princeton: Izd-vo Princstonskogo universiteta, 1955. (In Russ.). ISBN 978-0-691-02893-4.
8. Von Neumann J. Thermodynamik quantenmechanischer Gesamtheiten. *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*. 1927;(102):273–291.
9. Beckman I. Computer science. Lecture course. Entropy and information. 2009. Available at: <http://profbeckman.narod.ru/InformLekc.htm>
10. Sol'nitsev R.I., Korshunov G.I. Mathematical models of control systems "nature-technogenics". *Izvestiya vuzov. Priborostroenie = Izvestiya vuzov. Instrumentation*. 2012;(12):5–11.
11. Sol'nitsev R.I., Korshunov G.I. *Sistema upravleniya «priroda–tekhnenika» = Control system "nature-technogenics"*. Saint Petersburg: Politekhnik, 2013. (In Russ.)
12. Korshunov G.I., Solnitsev R.I., Zhilnikova N.A., Polyakov S.L. Models of Cyber-Physical Control Systems for Pollution Minimization Technologies. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022:442–450. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7970486>

13. Korshunov G.I., Sol'nitsev R.I., Frolova E.A. Quality assurance and the creation of intelligent corrosion protection systems for pipeline transport of energy carriers. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(2):92–101. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-2-11
14. Korshunov G.I., Frolova E.A. Systems Analysis of Physical Processes: Its Application in the Creation of Cyber-Physical Systems. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2021;184. doi:10.1007/978-3-030-65857-1_35
15. Bondarenko P.N., Safyannikov N.M. Organization of soft coordination of streaming informational processes' interaction with states' actualization in space. *20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements: proceedings (SCM 2017, 6 July 2017)*. 2017:31–33.
16. Bondarenko P.N. Structural organization of devices with actualization of states in time. *Izvestiya SPbGETU «LETI». Ser.: Informatika, upravlenie i komp'yuternye tekhnologii = Izvestiya SPbSETU "LETI". Ser.: Informatics, management and computer technologies*. 2016;(4):7–12. (In Russ.)
17. Belozertsev A.I., El'-Salim S.Z. Empirical model of substance identification of multicomponent vapor-gas mixtures. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2017;(3):10–17. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2017-3-2
18. Levin B.R. *Teoreticheskie osnovy statisticheskoy radiotekhniki = Theoretical foundations of statistical radio engineering*. Moscow: Sovetskoe radio, 1968;bk. 2. (In Russ.)
19. Novoseltseva M. Use of proper c-fractions for analysis of multi-frequency signals with hidden periodicities. *Large-Scale Systems Control*. 2013;41:93–112.
20. Prokhorenkov A.M., Kachala N.M. Using fuzzy logic methods to determine the classification characteristics of random processes. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Murmansk State Technical University*. 2006;9(3):514–521. (In Russ.)
21. Vander P.Dzh. *Python dlya resheniya slozhnykh zadach: nauka o dannykh i mashinnoe obuchenie = Python for solving complex problems: data science and machine learning*. Saint Petersburg: Piter, 2020:576. (In Russ.)
22. Leonidov V.V. *Konspekt lektsiy «Veyvlet-preobrazovanie»: ucheb. posobie = Lecture notes "Wavelet transform" : textbook*. Moscow: MGTU im. N.E. Baumana, 2016. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Геннадий Иванович Коршунов

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инноватики и управления качеством, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67); профессор Высшей школы киберфизических систем и управления, Санкт-Петербургский политехнический университет имени Петра Великого (Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29)
E-mail: kgi@pantes.ru

Gennady I. Korshunov

Doctor of technical sciences, professor, professor of the sub-department of innovation and quality control, Saint Petersburg State University of Airspace Instrumentation (67 Bolshaya Morskaya street, Saint Petersburg, Russia); professor of the higher school of cyber-physical systems and management, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University (29 Politekhnicheskaya street, Saint Petersburg, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 21.01.2023

Поступила после рецензирования/Revised 17.02.2023

Принята к публикации/Accepted 25.02.2023

МОДЕЛЬ ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРАЕКТОРИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ НА БАЗЕ ВИДЕОКАМЕР ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ

Е. М. Волотов¹, Т. А. Волотова², И. В. Митрофанов³, Е. И. Митрофанов⁴

¹ Филиал «Взлет» Московского авиационного института (национальный университет),
Ахтубинск, Астраханская обл., Россия

² Ахтубинская кадетская школа-интернат имени П. О. Сухого, Ахтубинск, Астраханская обл., Россия

³ Войсковая часть 15650, Ахтубинск, Астраханская обл., Россия

⁴ Технологический парк космонавтики «Линкос», Щербинка, Москва, Россия
1, 2, 3, 4 volotovevgenii@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Для определения параметров траектории различных летательных аппаратов, а также их взаимного расположения в воздушном пространстве в настоящее время широко используются системы обработки информации, зарегистрированной с помощью видеокамер общего назначения. Однако до настоящего времени не до конца определены области применения систем регистрации с использованием видеокамер общего назначения, а также точность получаемых параметров траектории. Поэтому создание модели погрешности, учитывающей все факторы, влияющие на точность определения параметров траектории, является актуальной задачей. *Материалы и методы.* В процессе получения информации по траектории можно выделить три составляющие этого процесса – регистрацию, технологические линии обработки и методы, алгоритмы и программы. Поэтому для создания модели погрешности и анализа факторов, влияющих на точность определения параметров траектории, необходимо рассмотреть указанные составляющие процесса их получения. *Результаты.* Проведенный анализ показал, что погрешность определения параметров траектории определяется инструментальными погрешностями. Тогда математическая модель рассматриваемой погрешности будет представлена в виде объединения инструментальной систематической погрешности, состоящей из погрешности во временной привязке обрабатываемых видеок кадров, и погрешности, вносимой угловой ценой пикселя, а также случайной внутренней погрешности, состоящей из погрешности геодезической привязки видеокамер и ориентиров, погрешности, вносимой оператором при обработке, а также методической погрешности. *Выводы.* Таким образом, на основе проведенного анализа системы регистрации на базе видеокамер общего назначения, технологической линии, методов, алгоритмов, программ и этапов обработки информации, а также выявленных при этом факторах, влияющих на точность определения параметров траектории, предложена математическая модель общей погрешности их определения. Эта модель позволяет определить область применения систем регистрации с использованием видеокамер общего назначения и точность получаемых параметров траектории.

Ключевые слова: траекторные измерения, системы регистрации на базе видеокамер общего назначения, оптические средства траекторных измерений, объект наблюдения, обработка информации

Для цитирования: Волотов Е. М., Волотова Т. А., Митрофанов И. В., Митрофанов Е. И. Модель погрешности определения параметров траектории при использовании системы регистрации на базе видеокамер общего назначения // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 29–37. doi:10.21685/2307-4205-2023-1-4

ERROR MODEL OF DETERMINING THE TRAJECTORY PARAMETERS WHEN USING A REGISTRATION SYSTEM ON THE BASIS OF GENERAL VIDEO CAMERAS

E.M. Volotov¹, T.A. Volotova², I.V. Mitrofanov³, E.I. Mitrofanov⁴

¹ Branch «Vzlet» of the Moscow Aviation Institute (National University),
Akhtubinsk, Astrakhan region, Russia

² Akhtubinskaya cadet boarding school named after P.O. Sukhoi, Akhtubinsk, Astrakhan region, Russia

³ Military unit 15650, Akhtubinsk, Astrakhan region, Russia

⁴ Technological Park of Astronautics "Linkos", Shcherbinka, Moscow, Russia
1, 2, 3, 4 volotovevgenii@gmail.com

Abstract. *Background.* To determine the parameters of the trajectory of various aircraft, as well as their relative position in airspace, information processing systems registered with general purpose cameras are currently widely used. However, to date, the scope of registration systems using general-purpose cameras, as well as the accuracy of the obtained trajectory parameters, have not been completely determined. Therefore, the creation of an error model that takes into account all factors affecting the accuracy of determining the trajectory parameters is an urgent task. *Materials and methods.* In the process of obtaining trajectory information, three components of this process can be distinguished – registration, processing lines and methods, algorithms and programs. Therefore, to create a model of error and analysis of factors affecting the accuracy of determining the trajectory parameters, it is necessary to consider the indicated components of the process of obtaining them. *Results.* The analysis showed that the error in determining the parameters of the trajectory is determined by instrumental errors. Then the mathematical model of the considered error will be presented in the form of a combination of instrumental systematic error, consisting of the error in the temporal reference of the processed video frames and the error introduced by the angular price of the pixel, as well as a random internal error, consisting of the error of the geodetic reference of the cameras and landmarks, the error introduced by the operator when processing, as well as methodological error. *Conclusions.* Thus, based on the analysis of the registration system on the basis of general-purpose cameras, a technological line, methods, algorithms, programs and information processing steps, as well as the factors identified thereby affecting the accuracy of determining the trajectory parameters, a mathematical model of the general error of their determination is proposed. This model allows you to determine the scope of registration systems using general-purpose cameras and the accuracy of the obtained trajectory parameters.

Keywords: trajectory measurements, registration systems based on general-purpose video cameras, optical means of trajectory measurements, object of observation, information processing

For citation: Volotov E.M., Volotova T.A., Mitrofanov I.V., Mitrofanov E.I. Error model of determining the trajectory parameters when using a registration system on the basis of general video cameras. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(1):29–37. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-1-4

Введение

В настоящее время для определения параметров траектории различных летательных аппаратов, а также их взаимного расположения в воздушном пространстве широко используются системы обработки информации, зарегистрированной с помощью видеокамер общего назначения [1]. Для таких систем обработки разработаны методы определения положения объектов в пространстве. Эти методы являются автономными, так как не требуют дополнительно других наземных средств измерений. Однако до настоящего времени не до конца определены области применения систем регистрации с использованием видеокамер общего назначения [2–4], а также точность получаемых параметров траектории [5–6].

Процесс получения параметров траектории различных летательных аппаратов при использовании любых измерительных систем состоит из этапов регистрации и обработки [7–9]. При этом процесс обработки определяется как технологическими линиями, так и методами, алгоритмами и программами [10–18], используемыми в этих технологических линиях. Таким образом, в процессе получения информации по траектории можно выделить три составляющие этого процесса:

- регистрации;
- технологические линии обработки;
- методы, алгоритмы и программы.

Для создания модели погрешности и анализа факторов, влияющих на точность определения параметров траектории, необходимо рассмотреть указанные составляющие процесса их получения.

Система регистрации на базе видеокамер общего назначения предназначена для определения параметров траекторий летательных аппаратов, а также их взаимного расположения в воздушном пространстве. Определение параметров траектории осуществляется после обработки зарегистрированной видеоинформации на автоматизированном рабочем месте. Система регистрации на базе видеокамер общего назначения строится по принципу средств регистрации патрульного типа, устанавливается в заранее намеченной точке и неподвижно направляется в определенный сектор пространства. В зависимости от требуемой точности параметров траектории определяется количество видеокамер в системе регистрации. Основной задачей рассматриваемой системы во время проведения процесса регистрации является получение изображения объекта, траекторию которого необходимо определить, а также ориентиров с известными геодезическими привязками. Поэтому при подготовке к регистрации большое значение имеет процесс геодезической привязки видеокамер и ориентиров и его точность. Поскольку видеокамеры общего назначения не относятся к оптическим средствам траекторных измерений, им в большей степени присущи различного рода аберра-

ции. При использовании измерительных систем на их базе необходимо учитывать астигматизм и абберацию дисторсии. Еще одним важным вопросом при решении задачи регистрации является вопрос синхронизации используемых для регистрации видеокамер.

Таким образом, анализ процесса регистрации траектории различных летательных аппаратов, а также их взаимного расположения в воздушном пространстве системой видеокамер общего назначения показал, что точность получения параметров траектории зависит от геодезической привязки видеокамер и ориентиров, синхронизации по времени работы видеокамер, а также качества полученного видеоизображения.

Обработка информации, зарегистрированной видеокамерами общего назначения, осуществляется в послесеканном режиме на технологической линии, включающей прикладное программное обеспечение. При этом решается задача определения прямоугольных координат относительно заданной системы координат. Решение поставленной задачи осуществляется с помощью двух программ:

- программы дешифровки *avi*-файлов;
- программы расчета угловых направлений и прямоугольных координат объекта относительно заданной системы координат.

Входными данными для работы программы дешифровки *avi*-файлов являются видеоизображения объекта, траекторию которого необходимо определить, и ориентиров. Для программы расчета угловых направлений и прямоугольных координат объекта относительно заданной системы координат входными данными являются геодезические координаты ориентиров, массивы координат объекта и ориентиров, полученные на кадрах видеоизображения.

Для определения параметров траектории объекта регистрации используется пеленгационный метод определения прямоугольных координат, основанный на синхронном вычислении угловых направлений на объект по видеоинформации двух видеокамер. При этом реализованы следующие методы:

- определения угловых направлений на ориентиры [11];
- вычисления фокусного расстояния видеокамер [12, 14];
- определения положения оптических осей видеокамер [12];
- определения прямоугольных координат объекта [19, 20].

Полный цикл обработки информации, зарегистрированной видеокамерами общего назначения, представлен на рис. 1.



Рис. 1. Обработка информации системы регистрации на базе видеокамер общего назначения

Этап формирования данных. На этапе формирования данных оператор производит количественную и качественную оценку входных видеоданных путем просмотра зарегистрированных материалов. При этом проверяются наличие, полнота информации, пригодность материалов к обработке по качеству записи информации, а также возможность синхронизации по времени видеoinформации с обеих видеокамер. После анализа результатов просмотра принимается решение о пригодности тех или иных материалов к дальнейшей обработке.

Этап предварительной подготовки данных. На этапе предварительной подготовки данных при работе с видеoinформацией оператор, используя программу дешифровки *avi*-файлов, с помощью манипулятора «мышь» указывает координаты ориентиров и объекта на изображении видеокadra. Точность указанных оператором координат ориентиров и объекта зависит от качества видеоизображения и уровня квалификации оператора.

Этап обработки. На этапе обработки оператор с помощью программы расчета угловых направлений и прямоугольных координат объекта относительно заданной системы координат определяет фокусное расстояние для каждой видеокамеры и положение их оптических осей – азимуты и углы места. По вычисленным значениям фокусного расстояния объектива видеокамеры, положению оптической оси и координатам объекта на кадрах видеоизображения рассчитываются истинные направления на объект – азимут и угол места для каждой видеокамеры. Завершается этап обработки расчетом прямоугольных координат объекта.

Этап анализа результатов обработки. На этапе анализа результатов обработки оператор экспертным путем анализирует полученные результаты обработки с учетом априорных данных о летательном аппарате и делает выводы о достоверности полученных данных.

Таким образом, анализ технологической линии, методов, алгоритмов, программ и этапов обработки информации, полученной видеокамерами общего назначения, показал, что точность определения параметров траектории зависит от угловой цены пикселя видеоизображения, ошибки оператора и методической ошибки.

Проведенный анализ системы регистрации на базе видеокамер общего назначения, технологической линии, методов, алгоритмов, программ и этапов обработки информации позволяет сделать вывод о том, что основными факторами, влияющими на точность определения параметров траектории, являются:

- погрешности, вносимые оператором при обработке [13];
- погрешности геодезической привязки видеокамер и ориентиров [15, 17];
- астигматизм и абберация дисторсии оптической системы видеокамеры [16];
- погрешности во временной привязке обрабатываемых видеокadров от разных видеокамер [18];
- угловая цена пикселя;
- методическая погрешность.

Математическая модель общей погрешности – описание объекта с помощью математических формул, адекватно отражающих интересующий субъект и их погрешность, связи между ними, необходимые для проведения эксперимента.

Математическую модель погрешности определения параметров траектории в общем случае можно представить в виде объединения трех основных составляющих:

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_m \cup \sigma_{\text{и}} \cup \sigma_{\text{сл}},$$

где σ_m – методическая погрешность; $\sigma_{\text{и}}$ – инструментальная погрешность; $\sigma_{\text{сл}}$ – случайная погрешность.

Классификация погрешностей представлена на рис. 2. Рассмотрим эти погрешности более подробно.

Методическая погрешность – погрешность, вызванная несовершенством математической модели объекта исследований, методами проведения экспериментов и влиянием используемых при этом средств на сам объект. Методическая погрешность чаще всего является следствием различных допущений при использовании эмпирических уравнений.

Инструментальная погрешность – погрешность, обусловленная несовершенством используемых средств и влиянием изменяющихся при этом условий. Она делится на основную, дополнительную и динамическую.

Дополнительная погрешность – погрешность, связанная с правилами эксплуатации отличающихся от нормальных или вне технических условий.

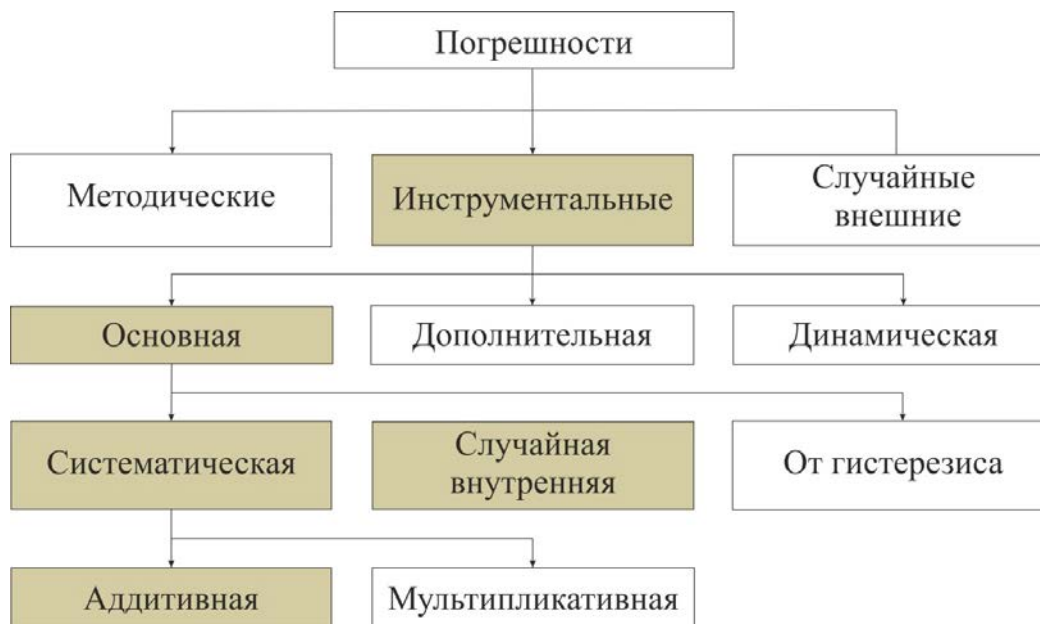


Рис. 2. Классификация погрешностей

Динамическая погрешность – погрешность, возникающая при условии, что исследуемая физическая величина изменяется со временем со скоростью, сравнимой с быстродействием используемых во время экспериментов средств.

Основная погрешность – это наиболее значимая погрешность, остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся случайным образом в процессе проведения экспериментов. Она, в свою очередь, делится на систематическую, случайную и погрешность гистерезиса.

Погрешность гистерезиса – разность показаний средств измерений, когда измерительная величина подходит к установившемуся значению параметра снизу и сверху.

Систематическая погрешность – погрешность, закономерно изменяющаяся при повторных вычислениях одной и той же величины. Она делится на аддитивную и мультипликативную.

Систематическая аддитивная погрешность – погрешность, закономерно изменяющаяся и не зависящая от определяемой величины.

Систематическая мультипликативная погрешность – погрешность, закономерно изменяющаяся и зависящая от определяемой величины.

Случайная погрешность – погрешность, вызванная действием многих известных и неизвестных внешних причин на определяемую величину. Случайная погрешность, порожденная процессами внутри самих средств, используемых в процессе проведения экспериментов, относится к инструментальной погрешности.

Анализ системы регистрации на базе видеокамер общего назначения, технологической линии, методов, алгоритмов, программ и этапов обработки информации показал, что погрешность определения параметров траектории определяется инструментальными погрешностями.

Тогда математическая модель рассматриваемой погрешности будет представлена в виде объединения инструментальной систематической и случайной внутренней погрешностей:

$$\sigma_{\Sigma} = (\Delta_t + \Delta_{\Pi}) \cup \sigma_{сл},$$

где σ_{Σ} – общая погрешность определения параметров траектории; Δ_t – систематическая погрешность во временной привязке обрабатываемых видеокадров от разных видеокамер; Δ_{Π} – систематическая погрешность, вносимая угловой ценой пикселя; $\sigma_{сл}$ – случайная внутренняя погрешность определения параметров траектории.

При этом случайная погрешность определения параметров траектории будет включать в себя случайную погрешность геодезической привязки видеокамер и ориентиров, случайную погрешность, вносимую оператором при обработке, а также методическую погрешность. С учетом взаимной некоррелированности указанных погрешностей случайная погрешность определения параметров траектории определяется следующим образом:

$$\sigma_{\text{сл}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial F}{\partial \zeta_i} \right)^2} \cdot \sigma_{\zeta_i},$$

где F – функция, реализующая метод определения параметров траектории; ζ – параметр, от которого зависит рассматриваемая функция F ; n – общее количество параметров, от которых зависит функция F ; σ_{ζ_i} – случайная погрешность определения каждого параметра ζ .

Используя предложенную математическая модель общей погрешности определения параметров траектории, при ее расчете можно действовать двумя способами:

– определить систематические погрешности во временной привязке обрабатываемых видеок кадров от разных видеокамер и вносимую угловой ценой пикселя, а затем исключить их из полученных параметров траектории;

– объединить систематическую и случайную составляющую общей погрешности определения параметров траектории путем перевода систематической погрешности в случайную погрешность.

Заключение

Таким образом, на основе проведенного анализа системы регистрации на базе видеокамер общего назначения, технологической линии, методов, алгоритмов, программ и этапов обработки информации, а также выявленных при этом факторах, влияющих на точность определения параметров траектории, предложена математическая модель общей погрешности их определения. Эта модель позволяет определить область применения систем регистрации с использованием видеокамер общего назначения и точность получаемых параметров траектории.

Список литературы

1. Митрофанов Е. И., Волотов Е. М., Ефимов Н. А., Митрофанов И. В. Система обработки информации материалов видеорегистрации при испытаниях образцов авиационной техники и вооружения // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2014. Т. 2. С. 10–15.
2. Чернуха В. Н. Новокшенов Ю. В., Плякота С. И. Основы испытаний авиационной техники. Часть вторая. М. : Издание ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1994. 334 с.
3. Лобейко В. И. Современные подходы к организации испытаний сложных систем : монография. Астрахань : Астраханский государственный университет, 2006. 332 с.
4. Старусев А. В. Метод оценки и обеспечения качества испытаний автоматизированных систем // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2014. № 4. С. 197–204.
5. Луцков Ю. И., Чупахин А. П. Погрешности видеоаппаратуры при проведении траекторных измерений // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. № 9–1. С. 120–126.
6. Николаева А. П. Особенности оценки погрешности измерительных систем при испытаниях авиационной техники при летных испытаниях // Метрология в XXI веке : доклады науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и специалистов. Менделеево, 2013. С. 118–124.
7. Огородничук Н. Д. Обработка траекторной информации. Часть I: Методы реализации пространственной (структурной, параметрической) избыточности измерений при решении нелинейных задач контроля недетерминированных траекторий. Киев : Изд-во КВВАИУ, 1981. 141 с.
8. Жданюк Б. Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений. М. : Советское радио, 1978. 384 с.
9. Волотов Е. М., Нестеров С. В., Митрофанов И. В. [и др.]. Автоматизированная обработка траекторной информации системы регистрации на базе видеокамер общего назначения // Научные ведомости. Белгородского государственного университета. Сер.: Экономика. Информатика. 2018. Т. 45, № 4. С. 786–792. doi:10.18413/2411-3808-2018-45-4-786-792
10. Гумаров С. Г., Корсун О. Н. Метод определения динамической погрешности оптических станций траекторных измерений // Метрология. 2011. № 3. С. 16–23.
11. Волотов Е. М., Халютин С. П. Метод определения направлений на объект при использовании видеосредств // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2012. № 185. С. 69–76.
12. Волотов Е. М. Метод определения фокусного расстояния видеокамеры при оценке летно-технических характеристик летательного аппарата // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2012. № 4. С. 76–83.
13. Митрофанов И. В., Волотов Е. М., Митрофанов Е. И. Ошибки оператора при компараторной обработке информации видеорегистрации // X Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н. Е. Жуковского: сб. докл. Всерос. науч.-техн. конф. М. : Издательский дом Академии им. Н. Е. Жуковского, 2013. С. 250–254.

14. Митрофанов Е. И., Степанченко Ю. А., Волотов Е.М. [и др.]. Оценка точности методов определения фокусного расстояния видеосредств, используемых в системах видеорегистрации // XI Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н. Е. Жуковского : сб. докл. Всерос. науч.-техн. конф. М. : Издательский дом Академии им. Н. Е. Жуковского, 2014. С. 278–282.
15. Волотов Е. М., Нестеров С. В., Митрофанов И. В. [и др.]. Разработка типовых методов установки видеокамер системы регистрации конечного участка траектории объекта наблюдения // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2018. № 2. С. 127–136.
16. Волотов Е. М., Нестеров С. В., Митрофанов И. В. [и др.]. Метод устранения искажений изображения, вносимых за счет дисторсии объектива видеокамеры // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 12. С. 283–291.
17. Волотов Е. М., Нестеров С. В., Митрофанов И. В., Кокорина С. Б. Методы устранения грубых ошибок и уточнения координат привязки средств регистрации и ориентиров // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 4. С. 142–149. doi:10.21685/2307-4205-2018-16
18. Митрофанов И. В., Волотов Е. М., Болгов А. И. [и др.]. Метод определения времени рассогласования регистрации двух видеокамер общего назначения // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2018. № 4. С. 81–89.
19. Волотов Е. М., Митрофанов И. В., Балык О. А. [и др.]. Регистрация и обработка материалов внешнетраекторных измерений при испытаниях авиационной техники : учеб. пособие. М. : Изд-во МАИ, 2018. 92 с.
20. Митрофанов И. В., Волотов Е. М., Ефимов Н. А. [и др.]. Определение траекторных параметров авиационной техники, полученных по материалам видеорегистрации : учеб. пособие. М. : Изд-во МАИ, 2018. 68 с.

References

1. Mitrofanov E.I., Volotov E.M., Efimov N.A., Mitrofanov I.V. Information processing system of video recording materials during testing of samples of aircraft equipment and weapons. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2014;2:10–15. (In Russ.)
2. Chernukha V.N. Novokshonov Yu.V., Plyaskota S.I. *Osnovy ispytaniy aviatsionnoy tekhniki. Chast' vtoraya = Fundamentals of testing of aviation equipment. Part Two*. Moscow: Izdanie VVIA im. prof. N.E. Zhukovskogo, 1994:334. (In Russ.)
3. Lobeyko V.I. *Sovremennye podkhody k organizatsii ispytaniy slozhnykh sistem: monografiya = Modern approaches to the organization of testing of complex systems : monograph*. Astrakhan': Astrakhanskiy gosudarstvennyy universitet, 2006:332. (In Russ.)
4. Starusev A.V. Method of evaluation and quality assurance of automated systems tests. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: management and high technologies*. 2014;(4):197–204. (In Russ.)
5. Lutskov Yu.I., Chupakhin A.P. Errors of video equipment during trajectory measurements. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of Tula State University. Technical sciences*. 2014;(9–1):120–126. (In Russ.)
6. Nikolaeva A.P. Features of error estimation of measuring systems during tests of aviation equipment during flight tests. *Metrologiya v XXI veke: doklady nauch.-prakt. konf. molodykh uchenykh, aspirantov i spetsialistov = Metrology in the XXI century : reports of scientific and practical conf. of young scientists, postgraduates and specialists*. Mendeleev, 2013:118–124. (In Russ.)
7. Ogorodniyчук N.D. *Obrabotka traektornoy informatsii. Chast' I: Metody realizatsii prostranstvennoy (strukturnoy, parametricheskoy) izbytochnosti izmereniy pri reshenii nelineynykh zadach kontrolya nedeterminirovannykh traektoriy = Processing of trajectory information. Part I: Methods for implementing spatial (structural, parametric) redundancy of measurements in solving nonlinear control problems of non-deterministic trajectories*. Kiev: Izd-vo KVVAIU, 1981:141. (In Russ.)
8. Zhdanyuk B.F. *Osnovy statisticheskoy obrabotki traektornykh izmereniy = Fundamentals of statistical processing of trajectory measurements*. Moscow: Sovetskoe radio, 1978:384. (In Russ.)
9. Volotov E.M., Nesterov S.V., Mitrofanov I.V. [et al.]. Automated processing of trajectory information of the registration system based on general-purpose video cameras. *Nauchnye vedomosti. Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Ekonomika. Informatika = Scientific bulletin. Belgorod State University. Ser.: Economics. Computer science*. 2018;45(4):786–792. (In Russ.). doi:10.18413/2411-3808-2018-45-4-786-792
10. Gumarov S.G., Korsun O.N. Method for determining the dynamic error of optical trajectory measurement stations. *Metrologiya = Metrology*. 2011;(3):16–23. (In Russ.)
11. Volotov E.M., Khalyutin S.P. Method of determining directions to an object when using video media. *Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoy aviatsii = Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation*. 2012;(185):69–76. (In Russ.)
12. Volotov E.M. Method for determining the focal length of a video camera when evaluating the flight characteristics of an aircraft. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = News of higher educational institutions. Volga region. Technical sciences*. 2012;(4):76–83. (In Russ.)

13. Mitrofanov I.V., Volotov E.M., Mitrofanov E.I. Operator errors during comparator processing of video registration information. *X Nauchnye chteniya po aviatsii, posvyashchennye pamyati N.E. Zhukovskogo: sb. dokl. Vseros. nauch.-tekhn. konf. = X Scientific readings on aviation dedicated to the memory of N. E. Zhukovsky: a collection of reports of the All-Russian scientific and technical conf.* Moscow: Izdatel'skiy dom Akademii im. N.E. Zhukovskogo, 2013:250–254. (In Russ.)
14. Mitrofanov E.I., Stepanchenko Yu.A., Volotov E.M. et al. Evaluation of the accuracy of methods for determining the focal length of video media used in video recording systems. *XI Nauchnye chteniya po aviatsii, posvyashchennye pamyati N.E. Zhukovskogo: sb. dokl. Vseros. nauch.-tekhn. konf. = XI Scientific readings on aviation dedicated to the memory of N. E. Zhukovsky : a collection of reports of the All-Russian scientific and technical. conf.* Moscow: Izdatel'skiy dom Akademii im. N.E. Zhukovskogo, 2014:278–282. (In Russ.)
15. Volotov E.M., Nesterov S.V., Mitrofanov I.V. et al. Development of standard methods for installing video cameras of the registration system of the final section of the trajectory of the object of observation. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technologies.* 2018;(2):127–136. (In Russ.)
16. Volotov E.M., Nesterov S.V., Mitrofanov I.V. et al. A method for eliminating image distortions introduced due to distortion of the camera lens. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of Tula State University. Technical sciences.* 2018;(12):283–291. (In Russ.)
17. Volotov E.M., Nesterov S.V., Mitrofanov I.V., Kokorina S.B. Methods of eliminating gross errors and clarifying the coordinates of the binding of registration tools and landmarks. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2018;(4):142–149. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2018-16
18. Mitrofanov I.V., Volotov E.M., Bolgov A.I. et al. Method for determining the time of mismatch of registration of two general-purpose video cameras. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technologies.* 2018;(4):81–89. (In Russ.)
19. Volotov E.M., Mitrofanov I.V., Balyk O.A. et al. *Registratsiya i obrabotka materialov vneshnetraektornykh izmeneniy pri ispytaniyakh aviatsionnoy tekhniki: ucheb. posobie = Registration and processing of materials of external vector measurements during tests of aviation equipment : textbook.* Moscow: Izd-vo MAI, 2018:92. (In Russ.)
20. Mitrofanov I.V., Volotov E.M., Efimov N.A. et al. *Opreделение traektornykh parametrov aviatsionnoy tekhniki, poluchennykh po materialam videoregistratsii: ucheb. posobie = Determination of trajectory parameters of aviation equipment obtained from video recording materials : textbook.* Moscow: Izd-vo MAI, 2018:68. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Евгений Михайлович Волотов

кандидат технических наук, доцент кафедры
испытания авиационной техники,
Филиал «Взлет» Московского авиационного
института (национальный университет)
(Россия, Астраханская область, г. Ахтубинск,
ул. Добролюбова, 5)
E-mail: volotovevgenii@gmail.com

Татьяна Александровна Волотова

учитель физики и информатики,
Ахтубинская кадетская школа-интернат
имени П. О. Сухого,
(Россия, Астраханская область,
г. Ахтубинск, ул. Шоссе Авиаторов, 7)
E-mail: volotovevgenii@gmail.com

Игорь Викторович Митрофанов

кандидат технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник,
Войсковая часть 15650
(Россия, Астраханская область, г. Ахтубинск-7)
E-mail: volotovevgenii@gmail.com

Evgeniy M. Volotov

Candidate of technical sciences, associate professor
of the sub-department of aviation technology testing,
Moscow Aviation Institute (National University)
Branch «Vzlet» in Akhtubinsk
(5 Dobrolyubova street, Akhtubinsk,
Astrakhan region, Russia)

Tatyana A. Volotova

Teacher of physics and computer science,
Akhtubinskaya cadet boarding school
named after P.O. Sukhoi
(7 Shosse Aviatorov street, Akhtubinsk,
Astrakhan region, Russia)

Igor V. Mitrofanov

Candidate of technical sciences, associate professor,
senior researcher,
Military unit 15650
(Akhtubinsk-7, Astrakhan region, Russia)

Евгений Игоревич Митрофанов

инженер-программист,

Технологический парк космонавтики «Линкос»

(Россия, г. Москва, г. Щербинка, ул. Дорожная, 5)

E-mail: volotovevgenii@gmail.com

Evgeniy I. Mitrofanov

Engineer-programmer,

Technological Park of Astronautics "Linkos"

(5 Dorozhnaya street, Shcherbinka, Moscow, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 20.12.2022

Поступила после рецензирования/Revised 17.01.2023

Принята к публикации/Accepted 16.02.2023

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

УДК 62.192

doi:10.21685/2307-4205-2023-1-5

НИЖНЯЯ ДОВЕРИТЕЛЬНАЯ ГРАНИЦА СРЕДНЕГО ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

Г. С. Садыхов¹, С. С. Кудрявцева²

^{1,2} Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия
¹ gsadykhov@gmail.com, ² kudryavctva@bmstu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В практических задачах оценки среднего остаточного ресурса невосстанавливаемых объектов объем количества наблюдаемых объектов весьма ограничен. Поэтому доверие к точным (статистическим) оценкам среднего остаточного ресурса крайне низко. В связи с этим возникает актуальная задача – повысить доверие к наблюдаемому объему наблюдений. *Материалы и методы.* Один из способов решения этой задачи – найти нижние доверительные границы среднего остаточного ресурса при заданной доверительной вероятности. *Результаты.* Поэтому в настоящей работе установлены нижние доверительные границы среднего остаточного ресурса невосстанавливаемых технических объектов при заданной доверительной вероятности. Установленные границы справедливы для любого закона расходования ресурса невосстанавливаемых объектов. Приведен пример расчета нижней доверительной границы среднего остаточного ресурса для объектов малого объема выборки. *Выводы.* Доказана формула расчета нижних доверительных границ среднего остаточного ресурса для любого закона расходования ресурса невосстанавливаемых технических объектов.

Ключевые слова: выборка, средний остаточный ресурс, вероятность безотказной работы, нижняя доверительная граница

Для цитирования: Садыхов Г. С., Кудрявцева С. С. Нижняя доверительная граница среднего остаточного ресурса невосстанавливаемых объектов // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 38–45. doi:10.21685/2307-4205-2023-1-5

LOWER CONFIDENCE LIMIT OF THE MEAN RESIDUAL OPERATING LIFE OF NON-RESTORABLE ITEMS

G.S. Sadykhov¹, S.S. Kudryavtseva²

^{1,2} Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
¹ gsadykhov@gmail.com, ² kudryavctva@bmstu.ru

Abstract. *Background.* In practical problems of estimating the mean residual operating life of non-restorable items, the amount of observed items is very limited. Therefore, confidence in point (statistical) estimates of the mean residual operating life is extremely low. In this regard, an actual problem arises – to increase confidence in the ob-

served volume of observations. *Materials and methods.* One of the ways to solve this problem is to find the lower confidence bounds of the mean residual operating life for a given confidence probability. *Results.* Therefore, in this paper, the lower confidence limits of the mean residual operating life of non-restorable items are established for a given confidence probability. The established limits are valid for any law of operating life consumption of non-restorable items. An example of calculating the lower confidence limit of the mean residual operating life for small sample size items is given. *Conclusions.* The formula for calculating the lower confidence limits of the mean residual operating life for any law of operating life consumption of non-restorable items is proved.

Keywords: sample, mean residual operating life, reliability function, lower confidence limit

For citation: Sadykhov G.S., Kudryavtseva S.S. Lower confidence limit of the mean residual operating life of non-restorable items. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(1):38–45. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-1-5

Введение

Пусть безотказные наработки невозстанавливаемого объекта сверх времени τ цензурированы сверху величиной l . Введем случайную величину $\eta_l(\tau)$, которая равна величине безотказной наработки, если внутри интервала времени (τ, l) у объекта отказа не было, т.е. $\eta_l(\tau) = l - \tau$, при $\zeta > l$, где ζ – наработка до отказа либо равна величине $\zeta - l$, если отказ произошел на интервале (τ, l) , т.е. $\zeta \in (\tau, l)$. Другими словами, $\eta_l(\tau)$ – остаточный ресурс объекта сверх времени τ в течение длительности $l - \tau$, определяемой следующим образом:

$$\eta_l(\tau) = \begin{cases} l - \tau, & \text{если } (\zeta > l) / (\zeta > \tau); \\ \zeta - \tau, & \text{если } \zeta \in (\tau, l) / (\zeta > \tau), \end{cases} \quad (1)$$

где ζ – наработка до отказа.

Далее под средним остаточным ресурсом объекта сверх времени τ в течение длительности $l - \tau$ будем понимать значение математического ожидания величины (1), равное

$$R_l(\tau) = E[\eta_l(\tau)], \quad (2)$$

где $E[\cdot]$ – математическое ожидание величины, стоящей внутри скобок.

Используя формулу (1) и определение математического ожидания (2) [1], легко доказать следующую формулу расчета среднего остаточного ресурса объекта сверх времени τ в течение продолжительности $l - \tau$:

$$R_l(\tau) = \frac{1}{P(\tau)} \int_{\tau}^l P(u) du, \quad (3)$$

где $P(u)$ – функция вероятности безотказной работы объекта в течение времени u , $(\tau \leq u \leq l)$.

Формула (3) позволяет рассчитать не только средний остаточный ресурс, но и безостаточный средний ресурс [2–4]. В самом деле, полагая в (3) $\tau = 0$, получим следующую формулу расчета среднего (безостаточного) ресурса в течение продолжительности l :

$$R_l = R_l(0) = \int_0^l P(u) du. \quad (4)$$

Так, например, если ресурс объекта на интервале времени $(0, l)$ распределен равномерно, т.е.

$$P(u) = 1 - \frac{u}{l}, \quad \text{где } u \in (0, l),$$

то согласно (4) найдем

$$R_l = \int_0^l \left(1 - \frac{u}{l}\right) du = \frac{l}{2}.$$

Другими словами, средний (безостаточный) ресурс в течение продолжительности l равен половине этой длительности [5, 6].

Для сравнения, расчет среднего остаточного ресурса по формуле (3) для этого закона дает следующее значение:

$$R_l(\tau) = \frac{l}{l-\tau} \int_{\tau}^l \left(1 - \frac{u}{l}\right) du = \frac{l-\tau}{2},$$

т.е. средний остаточный ресурс сверх времени τ в течение продолжительности $l-\tau$ равен половине длительности времени, равной $\frac{l-\tau}{2}$, [7–10].

Точечная (статистическая) оценка показателя (3) позволяет рассчитать истинное значение среднего остаточного ресурса при заданной функции вероятности безотказной работы объекта. Однако в практических задачах возникает вопрос оценки среднего остаточного ресурса по результатам испытаний или подконтрольной эксплуатации однотипных объектов [11–15]. В связи с этим проведем точечную (статистическую) оценку среднего остаточного ресурса.

Пусть k объектов отказали в течение времени τ из общего числа n однотипных, а остальные в количестве $n-k$ после времени τ ; причем безотказные наработки цензурированы сверху величиной l . Тогда точечной (статистической) оценкой среднего остаточного ресурса объекта сверх времени τ в течение продолжительности $l-\tau$ будет служить величина $R_l^{(k)}(\tau)$, определенная по формуле

$$R_l^{(k)}(\tau) = \begin{cases} \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} (t_i - \tau), & \text{если } k < n; \\ 0, & \text{если } k = n, \end{cases} \quad (5)$$

где t_i – наработка до отказа i -го объекта после времени τ , ($i=1, 2, \dots, n-k$).

Покажем, что оценка (5) смещенная, а именно, докажем следующее соотношение:

$$E[R_l^{(k)}(\tau)] = Z_n[\hat{P}(\tau)] R_l(\tau), \quad (6)$$

где коэффициент смещения равен

$$Z_n[\hat{P}(\tau)] = 1 - \left(\frac{k}{n}\right)^n. \quad (7)$$

Так как

$$t_i = \tau + \eta_l^{(i)}(\tau),$$

где $\eta_l^{(i)}(\tau)$ – остаточный ресурс i -го объекта сверх времени τ в течение длительности $l-\tau$, то согласно (5) получим

$$R_l^{(k)}(\tau) = \begin{cases} \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} \eta_l^{(i)}(\tau), & \text{если } k < n; \\ 0, & \text{если } k = n. \end{cases} \quad (8)$$

Математическое ожидание при фиксированном значении k для однотипных объектов равно

$$E[R_l^{(k)}(\tau)/k] = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} E[\eta_l^{(i)}(\tau)] = R_l(\tau).$$

Учитывая это и вторую строку (8) в следующей формуле:

$$E[R_l^{(k)}(\tau)] = \sum_{k=0}^n E[R_l^{(k)}(\tau)/k] \cdot P_n(k),$$

где $P_n(k)$ – вероятность того, что в n независимых наблюдениях k объектов откажут, получим

$$E[R_l^{(k)}(\tau)] = R_l(\tau) \sum_{k=0}^{n-1} P_n(k). \quad (9)$$

Так как согласно формуле Бернулли [5]

$$P_n(k) = C_n^k [1 - \hat{P}(\tau)]^k [\hat{P}(\tau)]^{n-k},$$

где C_n^k – число сочетаний из n элементов по k , то

$$\sum_{k=0}^{n-1} P_n(k) = 1 - P(n) = 1 - [1 - \hat{P}(\tau)]^n. \quad (10)$$

Поскольку

$$\hat{P}(\tau) = \frac{n-k}{n},$$

то согласно (10) имеем

$$\sum_{k=0}^{n-1} P_n(k) = 1 - \left(1 - \frac{n-k}{n}\right)^n = 1 - \left(\frac{k}{n}\right)^n.$$

Учитывая это в уравнении (9), находим

$$E[R_l^{(k)}(\tau)] = \left[1 - \left(\frac{k}{n}\right)^n\right] R_l(\tau),$$

что доказывает уравнение (6).

Из уравнения (7) видно, что при $k=0$ коэффициент смещения равен 1, т.е.

$$Z_n[\hat{P}(\tau)] = 1. \quad (11)$$

Нижняя доверительная граница показателя (9). При малых объемах выборки n степень доверия к точечной (статистической) оценке показателя средний остаточный ресурс очень низка. Поэтому докажем следующее утверждение.

Теорема. Пусть P – заданная доверительная вероятность, ($0 < P < 1$). Тогда нижней доверительной границей показателя (3) сверх времени τ в течение продолжительности $l - \tau$ служит следующая величина:

$$\underline{R}_l(\tau) = \frac{1}{Z_n[\hat{P}(\tau)]} \left[R_l^{(k)}(\tau) - \sqrt{\frac{-\ln(1-P)}{2(n-k)}} \right], \quad (12)$$

где $R_l^{(k)}(\tau)$ – точечная оценка показателя (3), определенная формулой (8); $Z_n[\hat{P}(\tau)]$ – коэффициент смещения точечной оценки, определенной формулой (7).

Доказательство. Для доказательства (12) воспользуемся неравенством Хедвинга [7]:

$$P_r \left(\frac{1}{v} \sum_{i=1}^v X_i - \mu \geq \varepsilon \right) \leq \exp \left[- \frac{2v^2 \varepsilon^2}{\sum_{i=1}^v b_i - a_i} \right], \quad (13)$$

где $\varepsilon > 0$ – произвольное число; X_i – случайная величина, удовлетворяющая условиям $a_i < X_i < b_i$, ($i = 1, 2, \dots, n-k$);

$$\mu = E \left(\frac{1}{v} \sum_{i=1}^v X_i \right).$$

Полагая в неравенстве (13)

$$X_i = \frac{t_i - \tau}{l - \tau},$$

где t_i – наработка до отказа i -го объекта; $a_i = 0$, $b_i = 1$, получим с учетом (6), (8) и $\sum_{i=1}^v (b_i - a_i) = v$:

$$P_r \left[R_l^{(k)}(\tau) - Z_n \left[\hat{P}(\tau) \right] R_l(\tau) \geq \varepsilon \right] \leq \exp(-2v\varepsilon^2).$$

Откуда имеем

$$P_r \left[R_l^{(k)}(\tau) - Z_n \left[\hat{P}(\tau) \right] R_l(\tau) < \varepsilon \right] > 1 - \exp(-2v\varepsilon^2). \quad (14)$$

Поскольку $\varepsilon > 0$ – произвольное число, то выберем его из условия

$$1 - \exp(-2v\varepsilon^2) = P, \quad (15)$$

где P – заданная доверительная вероятность.

Решая уравнение (15) с учетом того, что $v = n - k$, получим

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{-\ln(1-P)}{2(n-k)}}. \quad (16)$$

Следовательно, согласно соотношениям (14) и (16) имеем

$$P_r \left[R_l(\tau) > \frac{1}{Z_n \left[\hat{P}(\tau) \right]} \left(R_l^{(k)}(\tau) - \sqrt{\frac{-\ln(1-P)}{2(n-k)}} \right) \right] > P,$$

что доказывает формулу (12).

Пример. Четыре однотипных объекта, безотказно проработавших $\tau = 1000$ ч, поставлены на ресурсные испытания в течение 4000 ч. В результате испытаний времена отказов сверх времени τ в течение продолжительности 4000 ч следующие: $t_1 - \tau = 2000$ ч; $t_2 - \tau = 2500$ ч; $t_3 - \tau = 3000$ ч; $t_4 - \tau = 4000$ ч. Найти нижнюю доверительную границу объекта сверх времени 1000 ч в течение продолжительности 4000 ч при доверительной вероятности $P = 0,865$.

Решение. Согласно условию примера имеем: $n = 4$, $k = 0$, $\tau = 1000$ ч, $l - \tau = 4000$ ч, $l = 5000$ ч, $t_1 - \tau = 2000$ ч, $t_2 - \tau = 2500$ ч, $t_3 - \tau = 3000$ ч, $t_4 - \tau = 4000$ ч. Тогда согласно формуле (12) с учетом (11) имеем

$$\underline{R}_l(\tau) = R_l^{(0)}(\tau) - \sqrt{\frac{-\ln(1-P)}{2 \cdot 4}}.$$

Так как

$$R_l^{(0)} = \frac{1}{4}(2000 \text{ ч} + 2500 \text{ ч} + 3000 \text{ ч} + 4000 \text{ ч}) = 2875 \text{ ч},$$

то

$$\underline{R}_l(\tau) = 2875 \text{ ч} - 0,5 \text{ ч} = 2874,5 \text{ ч}.$$

Итак, нижняя доверительная граница объекта сверх времени 1000 ч в течение 4000 ч при доверительной вероятности $P = 0,865$ равна 2874,5 ч.

Обсуждение. Оценка нижней доверительной границы (12) среднего остаточного ресурса справедлива для любого закона распределения случайной величины

$$X_i = \frac{t_i - \tau}{l - \tau}, \quad (i = 1, 2, \dots, v = n - k).$$

Другими словами, оценка (12) непараметрическая.

Если же считать значения X_i одинаково распределенными по нормальному (гауссовскому) закону и при известном среднеквадратическом отклонении, равным σ , то нижняя доверительная граница при доверительной вероятности P рассчитывается по формуле

$$\underline{R}_l(\tau) = R_l^{(k)}(\tau) - t_p \frac{\sigma}{\sqrt{n-k}}, \quad (17)$$

где t_p определяется из равенства

$$2\Phi(t) = P,$$

здесь $\Phi(t)$ – интеграл Лапласа:

$$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{u^2}{2}} du.$$

Сравнивая оценки (12) и (17), приходим к следующему выводу: оценка (12) не требует расчета среднеквадратического отклонения, что очень важно при малом объеме выборки объектов.

Заключение

В настоящей работе установлены нижние доверительные границы среднего остаточного ресурса невозстанавливаемых объектов при заданной доверительной вероятности для любого закона расходования ресурса. Приведен пример расчета нижней доверительной границы среднего остаточного ресурса для объектов малого объема выборки [16, 17].

Список литературы

1. Садыхов Г. С., Кудрявцева С. С. Расчет и оценка среднего остаточного ресурса невозстанавливаемых объектов в зависимости от заданного уровня безотказности // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2022. № 2. С. 13–22. doi:10.31857/S0235711922020134
2. Михайлов В. С., Юрков Н. К. Интегральные оценки в теории надежности. Введение и основные результаты. М. : Техносфера, 2020. 148 с.
3. Северцев Н. А., Юрков Н. К., Нгуен К. Т. Показатель «средний остаточный срок утилизации технических объектов» и его свойства // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2019. Т. 1. С. 202.
4. Петушков В. А. К прогнозированию остаточного ресурса конструкций с повреждениями, подвергаемых в эксплуатации ударным воздействиям // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2020. № 3. С. 91–105. doi:10.31857/S023571192002011X
5. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы в теории надежности и их статистический анализ. М. : URSS, 2013. 584 с.
6. Садыхов Г. С., Савченко В. П., Сидняев Н. И. Модели и методы оценки остаточного ресурса изделий радиоэлектроники. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. 382 с.
7. Hoeffding W. Probability inequalities for sums of bounded random variables // Journal of the American Statistical Association. 1963. № 58. P. 13–30.
8. Садыхов Г. С., Кузнецов В. И. Методы и модели оценок безопасности сверхназначенных сроков эксплуатации технических объектов. М. : URSS, 2007. 144 с.
9. Артюхов А. А. Оценки средней наработки до отказа при частых срабатываниях // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2015. № 18. С. 295–297.
10. Димитриенко Ю. И., Юрин Ю. В., Европин С. В. Прогнозирование долговечности и надежности элементов конструкций высокого давления. Ч. 1. Численное моделирование накопления повреждений // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2013. № 11. С. 3–11.
11. Pavlov I. V., Razgulyaev S. V. Calculation of the basic reliability parameters for the model of a system with dual redundancy in different subsystems // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2020. Vol. 49, № 10. P. 829–835. doi:10.3103/S1052618820100076
12. Pavlov I. V. Confidence limits for system reliability indices with increasing function of failure intensity // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2017. Vol. 46, № 2. P. 149–153. doi:10.3103/S1052618817020133
13. Sidnyaev N. I. Methods for calculating the influence of the electrodynamic field in the ionosphere on a spacecraft // Cosmic Research. 2022. Vol. 60, № 3. P. 165–173. doi:10.1134/S001095252202006X

14. Sidnyaev N. I., Butenko I. I., Bolotova E. E. Statistical and linguistic decision-making techniques based on fuzzy set theory // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Vol. 1127. doi:10.1007/978-3-030-39216-1-16
15. Belyaev Y. K., Hajiyev A. H. Mathematical models of systems with several lifts and various control rules // *Reliability: Theory and Applications*. 2020. Vol. 15, № 2. P. 21–35. doi:10.24411/1932-2321-2020-12002

References

1. Sadykhov G.S., Kudryavtseva S.S. Calculation and evaluation of the average residual resource of non-recoverable objects depending on a given level of reliability. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin = Problems of mechanical engineering and reliability of machines*. 2022;(2):13–22. (In Russ.). doi:10.31857/S0235711922020134
2. Mikhaylov V.S., Yurkov N.K. *Integral'nye otsenki v teorii nadezhnosti. Vvedenie i osnovnye rezul'taty = Integral estimates in the theory of reliability. Introduction and main results*. Moscow: Tekhnosfera, 2020:148. (In Russ.)
3. Severtsev N.A., Yurkov N.K., Nguen K.T. The indicator "average residual period of utilization of technical objects" and its properties. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2019;1:202. (In Russ.)
4. Petushkov V.A. To the prediction of the residual life of structures with damage subjected to shock impacts in operation. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin = Problems of mechanical engineering and machine reliability*. 2020;(3):91–105. (In Russ.). doi:10.31857/S023571192002011X
5. Gnedenko B.V., Belyaev Yu.K., Solov'ev A.D. *Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti i ikh statisticheskiy analiz = Mathematical methods in reliability theory and their statistical analysis*. Moscow: URSS, 2013:584. (In Russ.)
6. Sadykhov G.S., Savchenko V.P., Sidnyaev N.I. *Modeli i metody otsenki ostatochnogo resursa izdeliy radioelektroniki = Models and methods for estimating the residual life of radioelectronics products*. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2015:382. (In Russ.)
7. Hoeffding W. Probability inequalities for sums of bounded random variables. *Journal of the American Statistical Association*. 1963;(58):13–30.
8. Sadykhov G.S., Kuznetsov V.I. *Metody i modeli otsenok bezopasnosti sverkhnaznachennykh srokov ekspluatatsii tekhnicheskikh ob'ektov = Methods and models of safety assessments of over-designated service life of technical facilities*. Moscow: URSS, 2007:144. (In Russ.)
9. Artyukhov A.A. Estimates of the average operating time to failure with frequent triggers. *Novye informatsionnye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemakh = New information technologies in automated systems*. 2015;(18): 295–297. (In Russ.)
10. Dimitrienko Yu.I., Yurin Yu.V., Evropin S.V. Forecasting the durability and reliability of high-pressure structural elements. Part 1. Numerical modeling of damage accumulation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie = News of higher educational institutions. Mechanical engineering*. 2013;(11):3–11. (In Russ.)
11. Pavlov I.V., Razgulyaev S.V. Calculation of the basic reliability parameters for the model of a system with dual redundancy in different subsystems. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2020;49(10):829–835. doi:10.3103/S1052618820100076
12. Pavlov I.V. Confidence limits for system reliability indices with increasing function of failure intensity. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2017;46(2):149–153. doi:10.3103/S1052618817020133
13. Sidnyaev N.I. Methods for calculating the influence of the electrodynamic field in the ionosphere on a spacecraft. *Cosmic Research*. 2022;60(3):165–173. doi:10.1134/S001095252202006X
14. Sidnyaev N.I., Butenko I.I., Bolotova E.E. Statistical and linguistic decision-making techniques based on fuzzy set theory. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020;1127. doi:10.1007/978-3-030-39216-1_16
15. Belyaev Y.K., Hajiyev A.H. Mathematical models of systems with several lifts and various control rules. *Reliability: Theory and Applications*. 2020;15(2):21–35. doi:10.24411/1932-2321-2020-12002

Информация об авторах / Information about the authors

Гулам Садых оглы Садыхов

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
профессор кафедры вычислительной
математики и математической физики,
Московский государственный
технический университет имени Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1)
E-mail: gsadykhov@gmail.com

Gulam S. ogly Sadykhov

Doctor of technical sciences, professor, chief researcher,
professor of the sub-department of computational
mathematics and mathematical physics,
Bauman Moscow State Technical University
(building 1, 5 2nd Baumanskaya street,
Moscow, Russia)

Светлана Сергеевна Кудрявцева

старший преподаватель кафедры вычислительной
математики и математической физики,
Московский государственный
технический университет имени Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1)
E-mail: kudryavctva@bmstu.ru

Svetlana S. Kudryavtseva

Senior lecturer of the sub-department of computational
mathematics and mathematical physics,
Bauman Moscow State Technical University
(building 1, 5 2nd Baumanskaya street,
Moscow, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 20.01.2023

Поступила после рецензирования/Revised 28.02.2023

Принята к публикации/Accepted 01.03.2023

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ МИКРОВОЛНОВЫХ АНТЕНН К ВНЕШНИМ ДЕФОРМИРУЮЩИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

А. Н. Якимов

Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия
y_alder@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* При внешних тепловых и механических воздействиях конструкции микроволновых антенн деформируются, что приводит к невозможности строгого аналитического описания их излучения и оценки влияния этих воздействий на характеристики излучения. Перспективным направлением решения этой проблемы является построение конечно-элементных математических моделей микроволновых антенн с заданной степенью точности, обеспечивающей их чувствительность к внешним деформирующим воздействиям. *Материалы и методы.* Предложен подход к обеспечению чувствительности математической модели микроволновой зеркальной параболической антенны к внешним деформирующим воздействиям при конечно-элементном описании ее излучения. Дано электродинамическое обоснование требуемой точности построения геометрической модели микроволновой антенны. Показано, что при построении конечно-элементной геометрической модели параболической антенны с плоскими треугольными гранями в процессе дискретизации необходимо проводить разбиение излучающей поверхности зеркала с равномерным шагом. Полученные расчетные формулы позволяют контролировать погрешность конечно-элементной геометрической модели микроволновой зеркальной антенны и обеспечить ее чувствительность к внешним деформирующим воздействиям. *Результаты и выводы.* Приведены результаты модельного исследования влияния деформирующих вибрационных и тепловых воздействий на диаграмму направленности микроволновой параболической антенны, полученные с использованием построенной конечно-элементной модели. Они подтверждают приемлемую точность построенной модели и возможность ее использования при проектировании микроволновых антенн устойчивых к внешним деформирующим воздействиям.

Ключевые слова: микроволновая антенна, внешние воздействия, модель, конечный элемент, чувствительность, диаграмма направленности

Для цитирования: Якимов А. Н. Обеспечение чувствительности конечно-элементных моделей микроволновых антенн к внешним деформирующим воздействиям // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 46–54. doi:10.21685/2307-4205-2023-1-6

ENSURING THE SENSITIVITY OF FINITE ELEMENT MODELS OF MICROWAVE ANTENNAS TO EXTERNAL DEFORMING ACTIONS

A.N. Yakimov

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia
y_alder@mail.ru

Abstract. *Background.* Under external thermal and mechanical actions, the structure of microwave antennas is deformed, which leads to the impossibility of a strict analytical description of their radiation and an assessment of the impact of these actions on the radiation characteristics. A promising direction for solving this problem is the construction of finite element mathematical models of microwave antennas with a given degree of accuracy, ensuring their sensitivity to external deforming actions. *Materials and methods.* An approach is proposed to ensure the sensitivity of a mathematical model of a microwave mirror parabolic antenna to external deforming actions with a finite element description of its radiation. The electrodynamic justification of the required accuracy of constructing a geometric model of a microwave antenna is given. It is shown that when constructing a finite element geometric model of a parabolic antenna with flat triangular faces in the process of discretization, it is necessary to split the radiating surface of the mirror with a uniform pitch. The obtained calculation formulas allow controlling the error of the finite element geometric model of the microwave mirror antenna and ensuring its sensitivity to external deforming actions. *Results and conclusions.* The results of a model study of the influence of vibration and thermal actions on the radiation pattern of a

microwave parabolic antenna, obtained using the constructed finite element model, are presented. They confirm the acceptable accuracy of the constructed model and the possibility of its use in the design of microwave antennas resistant to external deforming actions.

Keywords: microwave antenna, external actions, model, finite element, sensitivity, radiation pattern

For citation: Yakimov A.N. Ensuring the sensitivity of finite element models of microwave antennas to external deforming actions. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(1):46–54. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-1-6

Введение

При внешних тепловых и механических воздействиях конструкции микроволновых антенн деформируются, причем величина возникающих деформаций оказывается соизмеримой с длиной используемых электромагнитных волн, а следствием этого является существенное изменение характеристик излучения таких антенн. Из-за сложности пространственной конфигурации излучающей поверхности деформированной антенны становятся невозможными строгое аналитического описание ее излучения и оценка влияния внешних деформирующих воздействий на характеристики излучения. Перспективным направлением решения этой проблемы является построение конечно-элементных математических моделей микроволновых антенн с заданной степенью точности, обеспечивающей ее чувствительность к внешним деформирующим воздействиям.

При проектировании микроволновых зеркальных антенн методом конечных элементов (КЭ) одной из основных проблем является построение геометрической модели ее излучающей поверхности с приемлемой степенью точности. Существует ограничение на размеры КЭ поверхности, вызванное необходимостью обеспечения синфазности электромагнитного поля в раскрытии такой антенны. Отклонение от идеальной формы излучающей поверхности зеркала при этом не должно превосходить $\lambda/32$, где λ – длина электромагнитной волны [1].

При построении чувствительной к внешним воздействиям КЭ модели микроволновой антенны допустимой погрешности необходимо уделить особое внимание. Получим решение задачи оценки допустимой погрешности геометрической модели на примере зеркальной параболической антенны. Пусть имеется точное математическое описание излучающей поверхности антенны выпуклой функцией $z = (x^2 + y^2)/4f$, где z, x, y – координаты точек этой поверхности в правой прямоугольной декартовой системе координат; f – фокусное расстояние параболоида. Требуется найти кусочно-линейную аппроксимацию заданной функции, оценить ее погрешность и найти условия дискретизации излучающей поверхности, обеспечивающие заданную точность геометрической модели.

Постановка задачи

При многогранной аппроксимации излучающей поверхности параболоида точность модели в значительной мере определяется шагами дискретизации, определяемыми количеством точек дискретизации поверхности вдоль осей координат Oy и Ox соответственно и формой граней многогранника. Выберем аппроксимацию излучающей поверхности параболической антенны многогранной поверхностью с плоскими треугольными гранями (рис. 1), широко используемую для моделирования рассеяния электромагнитных волн радиолокационными объектами сложной формы [2–4].

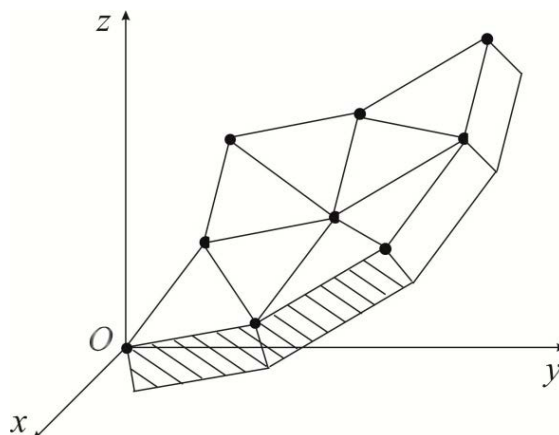


Рис. 1. Фрагмент многогранной излучающей поверхности микроволновой антенны

Традиционный подход к дискретизации поверхности с равномерным шагом разбиения вдоль осей координат здесь не подходит, так как данный способ разбиения излучающей поверхности параболоида вызывает резкий рост величины элементов разбиения в периферийной части и, соответственно, нарушение условий корректности дискретизации. Более перспективной оказывается дискретизация с равномерным шагом разбиения самой излучающей поверхности параболоида, что позволяет контролировать величину элементов ее разбиения и возникающую при этом фазовую ошибку, а также добиться большей точности аппроксимации при тех же вычислительных затратах и обеспечить при этом чувствительность математической модели к внешним деформирующим воздействиям.

Построение конечно-элементной модели антенны

Двумерная аппроксимация излучающей поверхности сводится при таком подходе к одномерной кусочно-линейной аппроксимации функций, описывающих эту излучающую поверхность. При этом узлы криволинейной сетки, принадлежащие излучающей поверхности, остаются неизменными, а криволинейные отрезки, соединяющие их, заменяются отрезками прямых. В результате гладкая излучающая поверхность заменяется многогранной поверхностью аппроксимации с плоскими треугольными гранями [5].

Выполнить эту процедуру поможет равномерное разбиение годографа векторной функции сечения параболической поверхности. Например, одномерное сечение поверхности зеркала с параболическим профилем в случае $y = 0$ (главное сечение) опишется одномерной функцией $z(x)$ в плоскости Ozx :

$$z = \frac{x^2}{4f}. \tag{1}$$

В векторной интерпретации параболическая кривая представляет собой годограф векторной функции \mathbf{r} скалярных аргументов x и z . Учитывая, что параболическое зеркало относится к осесимметричным излучателям, осуществлять равномерное разбиение относительно центра параболы, совмещенного с центром декартовой системы координат (рис. 2).

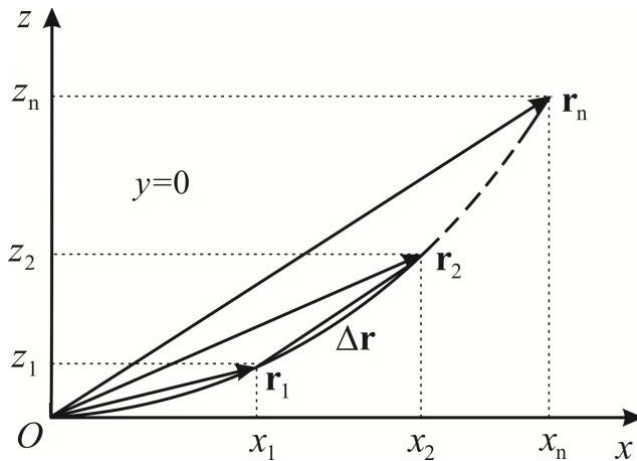


Рис. 2. Равномерное разбиение годографа векторной функции сечения параболической поверхности

Интервал равномерного разбиения сечения параболоида при этом определяется как разность $\Delta \mathbf{r}$ радиусов-векторов узловых точек

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_k - \mathbf{r}_{k-1}, \tag{2}$$

где $k = 1, 2, \dots, K$; K – максимальный порядковый номер индекса радиуса-вектора узловой точки сечения параболоида в плоскости Ozx с положительной координатой x . При этом индекс $k - 1 = 0$ соответствует координатам $x = 0, z = 0$ [5].

Шаг дискретизации параболического профиля ΔL при этом может быть определен по формуле

$$\Delta L = |\Delta \mathbf{r}| = \sqrt{(x_k - x_{k-1})^2 + (z_k - z_{k-1})^2}, \tag{3}$$

где $x_k, x_{k-1}, z_k, z_{k-1}$ – индексированные координаты узловых точек излучающей поверхности.

Задав координату начальной узловой точки $x_{k-1} = x_0 = 0$, будем с малым интервалом Δx увеличивать текущую координату x , что приведет к плавному приращению радиуса-вектора \mathbf{r} . Эта процедура позволяет с заданной точностью, определяемой интервалом Δx приращения x , добиться близости разности векторов $\mathbf{r} - \mathbf{r}_{k-1}$ к заданному интервалу ΔL разбиения годографа векторной функции сечения параболической поверхности и текущего значения аргумента x к значению координаты x_k следующей узловой точки дискретизации, определяемой радиусом-вектором \mathbf{r}_k .

Записав функционал вида

$$f(x) = \left| \Delta L - \sqrt{(x - x_{k-1})^2 + (z - z_{k-1})^2} \right|, \quad (4)$$

мы можем, определив его минимум, найти координату x_k и по формуле (2) определить соответствующую координату z_k .

Точность построения геометрической модели излучающей поверхности антенны оценим по максимальному отклонению многогранной модели от гладкой расчетной поверхности параболоида. При этом во взаимно перпендикулярных сечениях, образующих дискретную модель, отклонения многогранного профиля зеркала от расчетной поверхности хорошо иллюстрирует рис. 3.

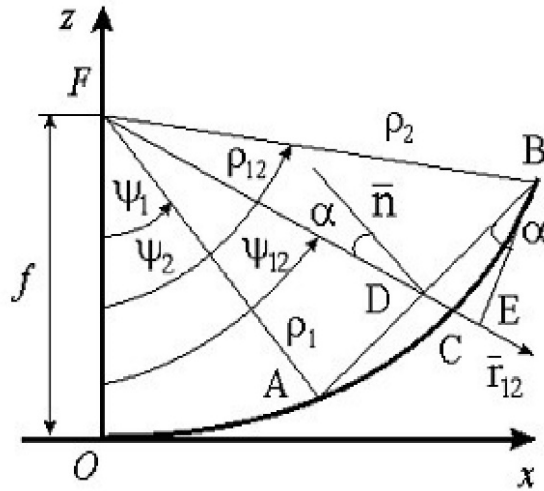


Рис. 3. Иллюстрация к оценке точности построения геометрической модели

Здесь Ozx – плоскость сечения параболоида в декартовой системе координат в горизонтальной плоскости; f – фокусное расстояние параболического профиля; F – точка фокуса; $\psi_1, \psi_2, \psi_{12}$ – полярные углы, отсчитываемые от отрицательного направления оси z ; $\rho_1 = FA, \rho_2 = FB, \rho_{12} = FC$ – расстояния от фокуса до точек сечения гладкого профиля зеркала; \bar{i}_{12} – единичный вектор, совпадающий с ρ_{12} ; $AB = L_0$ – линейный шаг дискретизации; \bar{n} – нормаль к отрезку AB в его центре D в плоскости сечения Ozx ; BE – отрезок, расположенный вдоль нормали к оси, совпадающей с \bar{i}_{12} .

В соответствии с этими обозначениями отклонение $\Delta \rho_x$ геометрической модели в направлении наблюдения из фокуса F опишется выражением

$$\Delta \rho_x = \rho_{12} - \rho_2 \cos(\Delta \psi) + (L_0 / 2) \sin \alpha, \quad (5)$$

где $\rho_{12} = f / \cos^2(\psi_{12} / 2)$; $\rho_2 = \sqrt{x_B^2 + y_B^2 + (f - z_B)^2}$; x_B, y_B, z_B – координаты точки B ; $\psi_{12} = \psi_2 - \Delta \psi$; $\psi_2 = 2 \arccos(\sqrt{f / \rho_2})$; $\Delta \psi = \arcsin[L_0 \cos \alpha / (2\rho_2)]$; $\alpha = \arccos(\bar{n}, -\bar{i}_{12})$ – угол между нормалью \bar{n} и отрицательным направлением \bar{i}_{12} . Так как погрешность модели в направлении ρ необходимо оценивать с учетом погрешности плоскости Ozy , то для параболоида вращения получим результирующую погрешность как $\Delta \rho = \sqrt{2} \Delta \rho_x$.

В соответствии с электродинамической постановкой задачи об излучении микроволновой антенны излучающую поверхность микроволновой антенны S в этом случае представляется как сово-

купность N независимых элементарных участков S_i , причем $S = \bigcup_{i=1}^N S_i$. При этом компоненты общего поля получаются простым суммированием сферических компонентов поля $E_{\varphi i}$ и $E_{\theta i}$ каждого конечного элемента, $E_{\varphi j}$ и $E_{\theta j}$ каждого краевого ребра кромки излучающей поверхности антенны относительно глобальной системы координат [6]:

$$E_{\varphi} = \sum_i E_{\varphi i} + \sum_j E_{\varphi j}, \quad E_{\theta} = \sum_i E_{\theta i} + \sum_j E_{\theta j}. \quad (6)$$

С учетом полученных выражений диаграмма направленности (ДН) антенны в горизонтальной плоскости $F(\varphi)$ может быть определена как

$$F(\varphi) = E_{\Sigma}(\varphi) / E_{\max}, \quad (7)$$

где $E_{\max} = E_{\Sigma}(0)$ – максимальный уровень напряженности электрического поля, равный для симметричных антенн его значению в направлении оси симметрии.

Результаты моделирования

Расчеты по приведенным формулам показали, что для зеркала с диаметром $D_m = 1$ м и фокусным расстоянием $f = 0,35$ м при дискретизации параболического профиля от его центра с равномерным шагом разбиения L_0 максимальная погрешность синтеза $\Delta\rho$ зависит от величины L_0 в соответствии к кривой, приведенной на рис. 4.

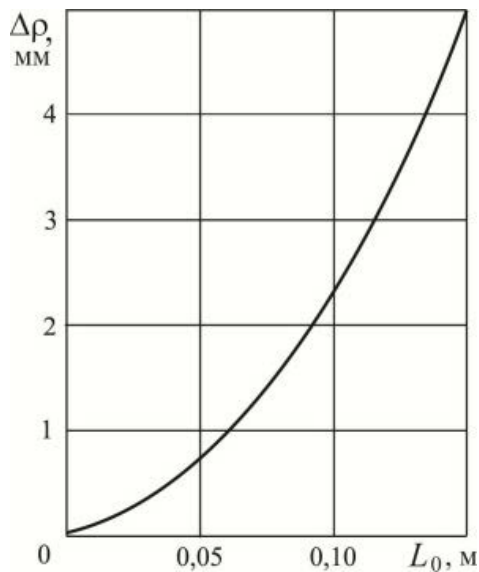


Рис. 4. Зависимость погрешности модели от шага дискретизации

По этой кривой видно, что при $L_0 = 0,03$ м максимальная погрешность составляет $\Delta\rho = 0,226$ мм, при $L_0 = 0,05$ м – $\Delta\rho = 0,625$ мм, при $L_0 = 0,1$ м – $\Delta\rho = 2,4$ мм. Для волн с $\lambda = 0,1$ м и $\lambda = 0,03$ м они составляют $\Delta\rho_{\max} = 3,12$ мм и $0,94$ мм соответственно. Эти погрешности меньше максимально допустимых $\Delta\rho_{\max} \leq \lambda/32$ и не нарушают синфазность поля в раскрыве зеркала антенны.

Расчет нормированных ДН зеркальной параболической антенны в горизонтальной плоскости с использованием предложенной геометрической модели антенны при $\lambda = 0,1$ м и различных шагах дискретизации: $L_0 = 1,5\lambda$ (рис. 5, кривая 1), $L_0 = \lambda$ (рис. 5, кривая 2) и $L_0 = 0,5\lambda$ (рис. 5, кривая 3) показал, что с уменьшением L_0 они приближаются к тестовой ДН (рис. 5, кривая 4), рассчитанной для той же антенны, но методом аппроксимации интерполяционным полиномом с использованием лямбда-функций и погрешностью, не превышающей 1–2 % [7].

Характеристики излучения КЭ оценивались по методу Гордона [8], а краевые эффекты моделировались в форме А. Михаэли [9]. Результаты расчета ДН антенны соответствуют облучению отражателя электромагнитной волной рупора с вертикальной поляризацией и уровню поля на краю зеркала –10 дБ относительно максимума.

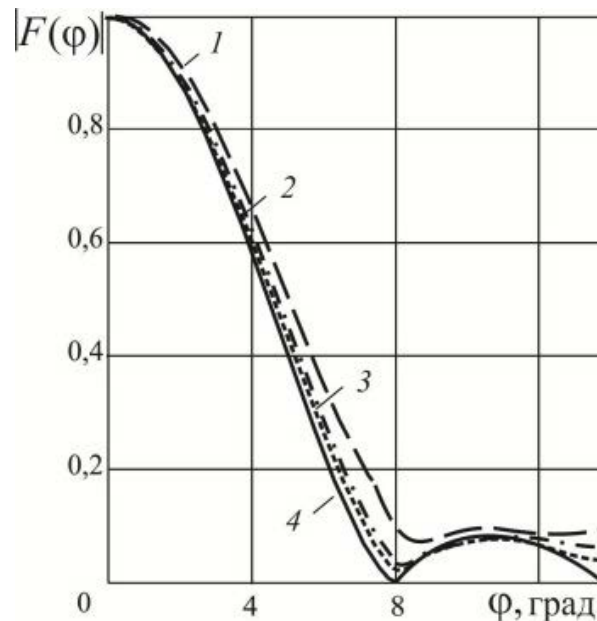


Рис. 5. Диаграммы направленности параболической антенны:
 1 – $L_0 = 1,5\lambda$; 2 – $L_0 = \lambda$; 3 – $L_0 = 0,5\lambda$; 4 – рассчитанная использованием лямбда-функций

Наибольшее отклонение от тестовой имеет ДН антенны при недопустимо большом $L_0 = 1,5\lambda$. Это приводит к погрешности $\Delta\rho = 5,1$ мм, превышающей максимально допустимую $\Delta\rho_{\max} = 3,12$ мм для заданной $\lambda = 0,1$ м. Таким образом, рекомендуемым шагом L_0 можно считать $0,5\lambda$, приемлемым – λ .

Математическая конечно-элементная модель микроволновой антенны чувствительна к внешним деформирующим воздействиям, когда величина деформаций излучающей поверхности антенны существенно превосходит погрешность модели.

К типичным внешним деформирующим воздействиям можно отнести, например, вибрационные воздействия на микроволновые антенны, возникающие при их расположении на летательных аппаратах (диапазон частот – $5 \dots 2000$ Гц). При полете самолета вследствие колебаний искажения поверхности зеркала величиной $1 \dots 3$ мм могут присутствовать постоянно. Результаты экспериментальных исследований влияния искажений зеркала вследствие вибраций в диапазоне $20 \dots 200$ Гц при вертикальном и горизонтальном положении зеркала на вибростенде при амплитудах колебаний $5 \dots 10$ мм и более ведут к недопустимым изменениям амплитудных ДН антенн в диапазоне волн $2 \dots 3$ см: расширению ДН, росту уровня боковых лепестков (УБЛ) и при вертикальном положении – к отклонению направления главного лепестка ДН. Статические искажения поверхности зеркала в сантиметровом диапазоне недопустимы уже на величину $0,5 \dots 0,8$ мм [10, 11].

Вычислительный эксперимент, проведенный для исследования влияния вибрационных воздействий на амплитудные ДН с использованием предложенной КЭ математической модели зеркальной параболической антенны, показал следующее. Конструкция параболического зеркала диаметром $0,71$ м, закрепленная в центре вертикально с помощью дискового «держателя», испытывала вибрационные воздействия с амплитудами $1 \dots 3$ мм на частоте 48 Гц. При длине электромагнитной волны $\lambda = 3$ см исходная ДН зеркальной параболической антенны в вертикальной плоскости, полученная с использованием КЭ электродинамической модели, до деформации зеркала имеет на уровне половинной мощности ширину $2\theta_{0,5} = 2,64^\circ$ и вид, показанный на рис. 6 (кривая 1). Эта ДН близка к результатам расчета с использованием лямбда-функций (рис. 6, кривая 2) [7, 12].

В результате деформации параболического зеркала максимум ДН антенны смещается на угол $\theta_1 = 0,67^\circ$ (рис. 6, кривая 3), а ее ширина немного увеличивается ($2\theta_{0,5} = 2,66^\circ$). Таким образом, вибрационные воздействия привели к росту ширины ДН и смещению ее максимума относительно расчетных значений в отсутствие вибраций, что хорошо согласуется с приведенными экспериментальными результатами с использованием вибростенда [11].

При использовании предложенного подхода к дискретизации параболического отражателя зеркальной антенны тепловая КЭ модель антенны, представляющая отражатель как совокупность ограниченных стержней и являющаяся частью ее обобщенной модели, демонстрирует чувствительность к внешним воздействиям [6].

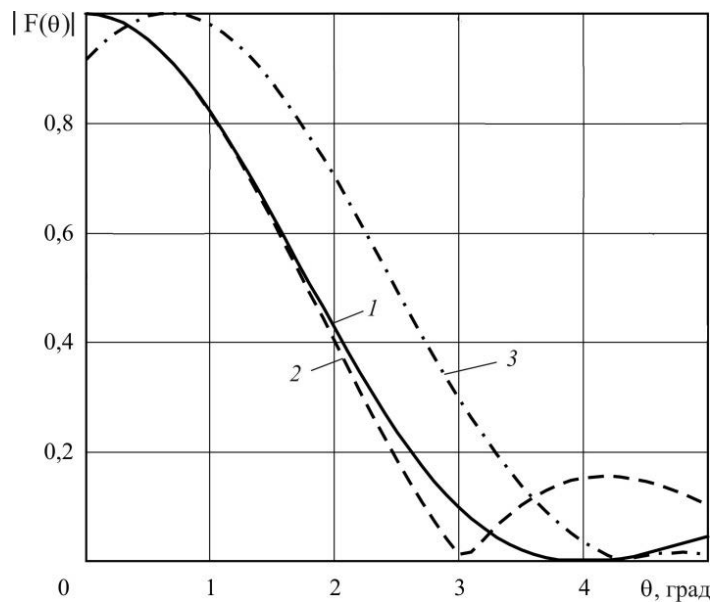


Рис. 6. Амплитудные ДН зеркальной параболической антенны

Вычислительный эксперимент был проведен для КЭ математической модели антенны с зеркалом в виде параболоида вращения диаметром $D = 2$ м толщиной 3 мм с фокусным расстоянием 0,7 м, выполненного из алюминия, при облучении зеркала электромагнитной волной длиной $\lambda = 3$ см и вертикальной поляризацией, создаваемой рупором с размерами излучающего раскрытия в горизонтальной и вертикальной плоскостях соответственно $0,65\lambda$ и $0,48\lambda$ без учета производственных погрешностей.

Результаты следующие: по сравнению с исходной ДН (рис. 7, кривая 1), у которой ширина ДН на уровне половинной мощности $2\varphi_{0,5} = 1,04$ град и УБЛ равен $-19,8$ дБ, при повышении температуры окружающей среды с 20 до 40 °С и нагреве солнечным излучением с интенсивностью $q_s = 950$ Вт/м² антенна сформирует ДН (рис. 7, кривая 2), у которой $2\varphi_{0,5} = 1,14$ град, причем УБЛ изменяется мало.

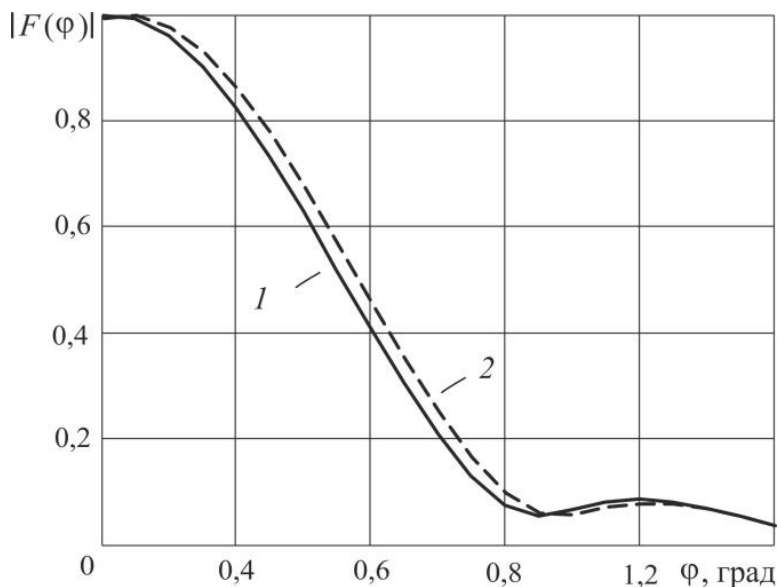


Рис. 7. Изменение ДН антенны при повышении температуры окружающей среды с 20 до 40 °С и $q_s = 950$ Вт/м²

Таким образом, результаты модельного исследования влияния деформирующих вибрационных и тепловых воздействий на диаграмму направленности микроволновой параболической антенны, полученные с использованием построенной конечно-элементной модели, подтверждают приемлемую точность построенной модели и возможность ее использования при проектировании микроволновых антенн устойчивых к внешним деформирующим воздействиям.

Заключение

Предложенный подход к построению конечно-элементных математических моделей микроволновых антенн с заданной степенью точности обеспечивает их чувствительность к внешним деформирующим воздействиям. Построенная математическая модель антенны позволяет оценивать результаты внешних воздействий на этапе проектирования и создавать оптимальные в заданных условиях эксплуатации конструкции микроволновых антенн.

Список литературы

1. Антенны УКВ / под ред. Г. З. Айзенберга : в 2 ч. Ч. 1. М. : Связь, 1977. 384 с.
2. Борзов А. Б., Соколов А. В., Сучков В. Б. Методы цифрового моделирования радиолокационных характеристик сложных объектов на фоне природных и антропогенных образований // Журнал радиоэлектроники. 2000. № 3. URL: <http://jre.cplire.ru/koi/mar00/3/text.html> (дата обращения: 03.11.2022).
3. Якимов А. Н. К проблеме дискретного представления излучения параболической антенны // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 3. С. 17–22.
4. Якимов А. Н. Оценка допустимой погрешности конечно-элементной геометрической модели микроволновой антенны // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2022. Т. 1. С. 69–71.
5. Якимов А. Н. Дискретизация излучающей поверхности параболической антенны в MATLAB // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2015. Т. 1. С. 168–170.
6. Якимов А. Н. Системный подход к построению обобщенной математической модели микроволновой антенны // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 3. С. 16–23.
7. Дрaбкин А. Л., Зузенко В. Л., Кислов А. Г. Антенно-фидерные устройства. М. : Сов. радио, 1974. 536 с.
8. Gordon W. B. Far-Field Approximations to the Kirchhoff-Helmholtz Representations of Scattered Fields // IEEE Trans. on Antennas and Propagat. 1975. Vol. AP-23, № 4. P. 590–592.
9. Michaeli A. Equivalent Edge Currents for Arbitrary Aspects of Observation // IEEE Trans. on Antennas and Propagat. 1984. Vol. AP-32, № 3. P. 252–258.
10. Муромцев Д. Ю., Белоусов О. А. Компьютерные технологии для расчета тепловых режимов и механических воздействий : учеб. пособие. Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2012. 88 с.
11. Абжирко Н. Н. Влияние вибраций на характеристики радиолокационных антенн. М. : Сов. радио, 1974. 168 с.
12. Шишулин Д. Н., Юрков Н. К., Якимов А. Н. Моделирование излучения зеркальной антенны с учетом вибрационных деформаций // Измерительная техника. 2013. № 11. С. 54–56.

References

1. Ayzenberg G.Z. (ed.). *Antenny UKV: v 2 ch. Ch. 1 = VHF antennas: in 2 parts. Part 1.* Moscow: Svyaz', 1977:384. (In Russ.)
2. Borzov A.B., Sokolov A.V., Suchkov V.B. Methods of digital modeling of radar characteristics of complex objects against the background of natural and anthropogenic formations. *Zhurnal radioelektroniki = Journal of Radioelectronics*. 2000;(3). (In Russ.). Available at: <http://jre.cplire.ru/koi/mar00/3/text.html> (accessed 03.11.2022).
3. Yakimov A.N. On the problem of discrete representation of parabolic antenna radiation. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2015;(3):17–22. (In Russ.)
4. Yakimov A.N. Estimation of the permissible error of a finite element geometric model of a microwave antenna. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2022;1:69–71. (In Russ.)
5. Yakimov A.N. Sampling of the radiating surface of a parabolic antenna in MATLAB. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2015;1:168–170. (In Russ.)
6. Yakimov A.N. A systematic approach to the construction of a generalized mathematical model of a microwave antenna. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(3):16–23. (In Russ.)
7. Drabkin A.L., Zuzenko V.L., Kislov A.G. *Antenno-fidernye ustroystva = Antenna-feeder devices*. Moscow: Sov. radio, 1974:536. (In Russ.)
8. Gordon W.B. Far-Field Approximations to the Kirchhoff-Helmholtz Representations of Scattered Fields. *IEEE Trans. on Antennas and Propagat.* 1975;AP-23(4):590–592.
9. Michaeli A. Equivalent Edge Currents for Arbitrary Aspects of Observation. *IEEE Trans. on Antennas and Propagat.* 1984;AP-32(3):252–258.
10. Muromtsev D.Yu., Belousov O.A. *Komp'yuternye tekhnologii dlya rascheta teplovykh rezhimov i mekhanicheskikh vozdeystviy: ucheb. posobie = Computer technologies for calculating thermal regimes and mechanical impacts : textbook*. Tambov: Izd-vo TGTU, 2012:88. (In Russ.)

11. Abzhirko N.N. *Vliyanie vibratsiy na kharakteristiki radiolokatsionnykh antenn = The effect of vibrations on the characteristics of radar antennas*. Moscow: Sov. radio, 1974:168. (In Russ.)
12. Shishulin D.N., Yurkov N.K., Yakimov A.N. Modeling of the radiation of a mirror antenna taking into account vibration deformations. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring technique*. 2013;(11):54–56. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Николаевич Якимов

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры конструирования и технологий
электронных и лазерных средств,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67)
E-mail: y_alder@mail.ru

Aleksandr N. Yakimov

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department of construction
and technology of electronic and laser equipment,
Saint Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation
(67 Bolshaya Morskaya street, Saint Petersburg, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 25.12.2022

Поступила после рецензирования/Revised 17.01.2023

Принята к публикации/Accepted 25.01.2023

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ СОЕДИНИТЕЛЬ С ФУНКЦИЕЙ ЗАЩИТЫ ОТ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

В. Н. Китаев¹, М. А. Дремков², А. А. Уралев³

^{1, 2, 3} Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия
^{1, 2, 3} kb2@vniitf.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Представлены результаты работ по разработке электрического соединителя с функцией защиты электрических цепей от статического электричества и наведенных токов. В промышленных зарядах горнорудной промышленности, содержащих электродетонаторы и электровоспламенители, для защиты от статического электричества и наведенных токов используются организационные меры, такие как заземление исполнителя работ, снятие статического электричества за счет прикосновения к заземленным токоведущим элементам перед началом работ, которые не всегда выполняются в полной мере из-за человеческого фактора. При возможном нарушении исполнителем правил проведения работ, особенно в момент начала сочленения соединителя, может произойти задействование пиротехнических средств инициирования с трагическими последствиями. Для исключения человеческого фактора в применяемых электрических соединителях решается техническая задача по шунтированию электрических цепей на корпус в расчлененном состоянии и снятию шунтирования при сочленении. Известные соединители аналогичного назначения имеют значительные габариты и обеспечивают формирование ограниченного количества электрических цепей с заземлением контактов в несочлененном состоянии, вследствие чего имеют очень ограниченную область применения. Техническим результатом, на достижение которого направлена разработка электрического соединителя, является обеспечение безопасности при использовании электрического соединителя в малогабаритных технических объектах с плотной компоновкой, критичных к статическому электричеству и наведенным токам. *Материалы и методы.* Разработанный электрический соединитель обеспечивает надежное автоматическое шунтирование всех электрических цепей, проходящих через электрический соединитель, на корпус при расчленении соединителя, исключая появления статического электричества и наведенных внешними электромагнитными полями токов. В расчлененном состоянии шунтирование электрических цепей сохраняется, также обеспечивая защиту электрических цепей. При сочленении соединителя шунтирование электрических цепей также автоматически отключается, обеспечивая надежную организацию электрических цепей через соединитель. Автоматическое подключение и отключение шунтирования исключает влияние возможных ошибок исполнителя при сочленении и расчленении соединителя на безопасность технического объекта в целом. Вилка разработанного соединителя обеспечивает сочленение с серийно выпускаемыми унифицированными розетками, что значительно расширяет ее эксплуатационные возможности, расширяя область применения. *Результаты и выводы.* Разработанный соединитель обеспечивает безопасность при его использовании в малогабаритных технических объектах с плотной компоновкой, критичных к статическому электричеству и наведенным токам, например, содержащих пиротехнические средства инициирования – электродетонаторы и электровоспламенители. На техническое решение соединителя получен патент на изобретение.

Ключевые слова: электрический соединитель, безопасность, шунтирование электрических цепей, контакты, надежность

Для цитирования: Китаев В. Н., Дремков М. А., Уралев А. А. Электрический соединитель с функцией защиты от статического электричества // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 55–61. doi:10.21685/2307-4205-2023-1-7

ES-PROTECTED ELECTRIC CONNECTOR

V.N. Kitaev¹, M.A. Dremkov², A.A. Uraleev³

^{1, 2, 3} Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia
^{1, 2, 3} kb2@vniitf.ru

Abstract. *Background.* The article presents the results of development of the electric connector providing protection of the electric circuits against the static electricity and the induced currents. Application of mining charges with embedded electric blasting caps and electric spark igniters implies precautions against the static electricity and the in-

duced currents such as a worker grounding, release of the worker from the static electricity by touching the earthed conducting element before starting the work, which are not consistently performed because of notorious human factor. Probable mishandling, especially at a moment of joining the connector, may initiate the pyrotechnic element, resulting in the tragic consequences. To eliminate the human factor in such application the engineering problem is solved on shunting the electric circuit to body in detached state and de-shunting it when joining. Available connectors of similar function are very large and they are restricted in application because of bounded number of electrical circuits with earthed contacts they form in detached state. Expected engineering result of developed electric conductor is to make safe the use of the electric connectors in small-scale engineering systems of tight integration, critical to both the static electricity and the induced currents. *Materials and methods.* Developed electric connector guarantees the reliable auto-shunting of all electrical circuits coming through the electric connector to body in unconnected state barring from occurrence of static electricity and currents induced by external magnetic fields. The circuits stay shunted when unconnected to keep safety. At joining the connector the electrical circuit shunting is tripped automatically, assuring the reliable connection. Automatic on/off shunting eliminates possible human mistakes when joining/detaching the connector for safety of the whole item. The plug of developed connector mates with commercially available sockets that widen its application area. *Results and conclusions.* The connector assures reliable functioning of the in small-scale engineering systems of tight integration, critical to both the static electricity and the induced currents, which may include, for example, pyrotechnic initiation elements – electrical blasting caps and electric spark igniters. Patent for invention is taken out for the connector.

Keywords: electric connector, safety, auto-shunting of electric circuits, contacts, reliability

For citation: Kitaev V.N., Dremkov M.A., Urlev A.A. ES-protected electric connector. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(1):55–61. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-1-7

Необходимость разработки

В технических объектах горно-рудной промышленности, содержащих электродетонаторы и электровоспламенители, для защиты от статического электричества и наведенных токов могут использоваться организационные меры, такие как заземление исполнителя работ, снятие статического электричества за счет прикосновения к заземленным токоведущим элементам перед началом работ, которые не всегда выполняются в полной мере из-за человеческого фактора. При возможном нарушении исполнителем правил проведения работ, особенно в момент начала сочленения соединителя, может произойти задействование пиротехнических средств инициирования с трагическими последствиями. Для исключения человеческого фактора в применяемых электрических соединителях решается техническая задача по шунтированию электрических цепей на корпус в расчлененном состоянии и снятию шунтирования при сочленении.

Критика известных электрических соединителей

Известен электрический разъем, состоящий из гнезда, помещенного в корпус с фланцем, и штыря, включающего в себя контакт с изолятором, корпус и держатель [1]. Штырь снабжен устройством для жесткой фиксации контакта и заземления его через корпус в нерабочем положении, выполненном в виде надетого на контакт металлического кольца и нескольких шариков, прижимаемых к нему с помощью другого кольца.

Известный разъем имеет значительные габариты и обеспечивает формирование только одной электрической цепи и заземление контакта в нерабочем (несочлененном) положении, вследствие чего имеет очень ограниченную область применения.

Известна многоштыревая вилка штепсельного разъема (электрического соединителя), содержащая корпус, в полости которого установлены изоляционная панель и контактные штыри [2]. Вилка снабжена заземляющим проводящим кольцевым электродом, установленным на изоляционной панели, при этом контактные штыри расположены по обе стороны электрода.

Известная вилка электрического соединителя обеспечивает организацию ограниченного количества электрических цепей, имеет значительные габариты. Необходимые для работы малые зазоры между контактными штырями и заземляющим электродом могут ухудшить электрические параметры вилки (электрическое сопротивление и электрическую прочность изоляции), особенно при эксплуатации в условиях повышенной влажности и запыленности, при пониженном давлении окружающей среды, что существенно сужает область применения известной вилки.

Известна многоштырьковая вилка электрического соединителя, используемая для защиты разъемных электрических цепей от воздействия зарядов статического электричества [3]. Вилка содержит корпус с фланцем, в полости корпуса установлены контактные элементы в виде штырей, изолятор и средство для заземления из нескольких механизмов заземления, каждый из которых содержит изогнутую пластину, провод и промежуточный элемент. Во фланце корпуса выполнены сквозные отверстия, причем число отверстий и механизмов заземления равно числу штырей.

Вилка обеспечивает заземление контактных штырей до сочленения ответной розетки, однако техническое решение механизмов заземления с их размещением вокруг зоны контактных штырей ограничивает количество цепей вилки и существенно увеличивает ее диаметр. Кроме того, известная вилка является негерметичной и не исключает повреждения изогнутых пластин механизмов заземления, к которым имеется доступ до сочленения с ответной розеткой. Указанные недостатки ограничивают область использования известной вилки.

Известен многоканальный разъем – электрический соединитель [4], состоящий из вилки и розетки, каждая из которых содержит изоляционный корпус и контактные элементы, который снабжен замыкателем в виде пластины с соосными контактными штырями фигурными отверстиями, образующими упругие лепестки, на торцевых поверхностях изоляционных корпусов в месте расположения контактных элементов выполнены соответственно выступ и гнездо конусной формы, при этом замыкатель установлен между торцевыми поверхностями изоляционных корпусов так, что лепестки расположены между конусным гнездом и выступом, а конусные выступы выполнены с отверстием, в котором расположен контактный элемент вилки.

Известный электрический соединитель обеспечивает защиту от статического электричества и электромагнитных наводок, однако для обеспечения поджатия упругих лепестков к контактным штырям и достаточного зазора между контактными штырями и упругими лепестками в сочлененном состоянии электрического соединителя последние должны иметь увеличенную длину, обеспечивающую ход свободных концов лепестков в пределах упругих деформаций. По этой причине его техническое решение не применимо в малогабаритных соединителях с малым шагом расположения контактных элементов (штырей и гнезд), что ограничивает его область применения.

Техническим результатом, на достижение которого направлена разработка, является обеспечение безопасности при использовании электрического соединителя в малогабаритных технических объектах с плотной компоновкой, критичных к статическому электричеству и наведенным токам.

Путь достижения требуемого результата разработки

Указанный технический результат достигается тем, что в электрическом соединителе, содержащем вилку с размещенными контактными штырями, изолированными от корпуса вилки, и розетку с контактными гнездами, установленными в изолятор корпуса розетки, замыкатель, согласно изобретению, выполнен в виде установленных на каждый контактный штырь втулок с фланцем, поджатых со стороны фланцев цилиндрическими пружинами к электропроводящему сепаратору с отверстиями по числу контактных штырей, установленному на контактные штыри и закрепленному на корпусе, при этом втулки выступают из отверстий сепаратора с возможностью перемещения на контактных штырях от взаимодействия с изолятором розетки, поверхности фланца втулок выполнены электропроводящими, а крайний удаленный от фланца втулки торцевой виток каждой пружины выполнен с уменьшенным внутренним диаметром, не превышающим диаметр контактного штыря.

Техническое решение заявляемого соединителя обеспечивает надежное автоматическое шунтирование всех электрических цепей, проходящих через него на корпус при расчленении соединителя, исключая появление статического электричества и наведенных внешними электромагнитными полями токов. В расчлененном состоянии шунтирование электрических цепей сохраняется, обеспечивая защиту электрических цепей. При сочленении соединителя шунтирование электрических цепей также автоматически отключается, обеспечивая требуемую организацию электрических цепей через соединитель. Автоматическое подключение и отключение шунтирования исключает влияние на безопасность технического объекта в целом человеческого фактора – возможности принятия человеком (исполнителем) ошибочных или алогичных решений в конкретных ситуациях при сочленении и расчленении соединителя. Организационные меры, такие как заземление исполнителя работ, снятие статического электричества за счет прикосновения к заземленным токоведущим элементам перед началом работ, которые не всегда выполняются в полной мере из-за человеческого фактора, полностью не исключают критические ситуации с эксплуатируемыми взрывоопасными техническими объектами. Техническое решение заявляемого электрического соединителя обеспечивает малые габариты с любым требуемым, в том числе и увеличенным количеством электрических цепей.

Электрический соединитель также характеризуется тем, что внешние торцевая и цилиндрическая поверхности части втулки меньшего диаметра, входящей в отверстия сепаратора, выполнены неэлектропроводящими.

Данное техническое решение позволяет размещать контактные элементы (штыри и гнезда) более плотно, уменьшая диаметр соединителя.

Конструкция электрического соединителя также обеспечивает шунтирование значительного требуемого количества электрических цепей без увеличения его диаметра, при этом незначительно увеличивается только его длина (по сравнению с унифицированными соединителями).

Техническое решение электрического соединителя универсально – при необходимости часть электрических цепей может не шунтироваться, для этого достаточно на соответствующие контактные штыри вилки не устанавливать цилиндрические пружины и втулки, что расширяет область применения заявляемого электрического соединителя.

Конструкция электрического соединителя

Конструкция электрического соединителя показана на рисунках:

- на рис. 1 представлен продольный разрез розетки и вилки в расчлененном состоянии;
- на рис. 2 – продольный разрез соединителя в сочлененном состоянии;
- на рис. 3 – поджатые пружинами втулки, установленные на контактные штыри вилки и удерживаемые электропроводящей корпусной деталью – сепаратором;
- на рис. 4 – взаимодействие поджатых пружинами втулок, установленных на контактные штыри вилки, с изолятором розетки в сочлененном состоянии соединителя.

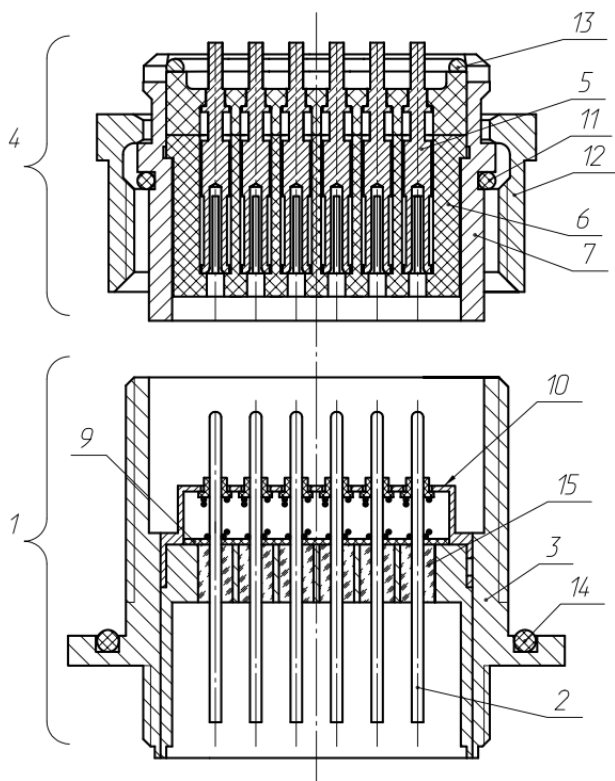


Рис. 1. Розетка и вилка в расчлененном состоянии

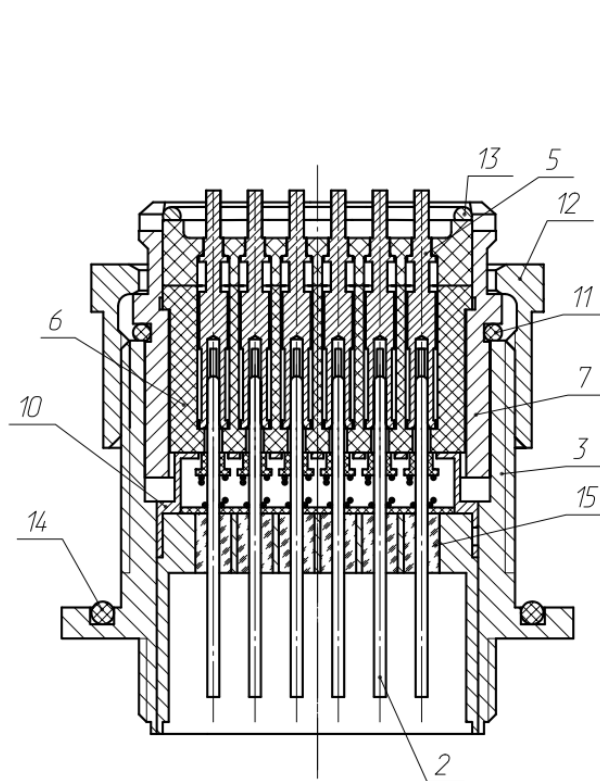


Рис. 2. Розетка и вилка в сочлененном состоянии

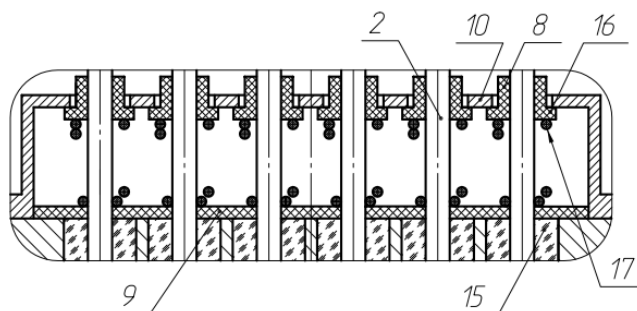


Рис. 3. Электрические цепи шунтированы

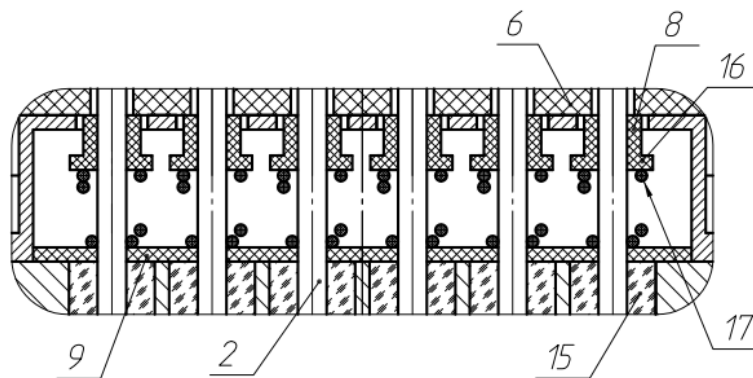


Рис. 4. Шунтирование электрических цепей отключено

Состав электрического соединителя

На указанных рис. 1–4 электрического соединителя принимаются следующие обозначения: 1 – вилка; 2 – контактный штырь; 3 – корпус вилки; 4 – розетка; 5 – контактные гнезда; 6 – изолятор розетки; 7 – корпус розетки; 8 – выступ втулки; 9 – изоляционная прокладка; 10 – сепаратор; 11 – уплотнительное кольцо розетки; 12 – гайка розетки; 13 – стопорное кольцо; 14 – уплотнительное кольцо вилки; 15 – стеклоизолятор; 16 – втулка; 17 – цилиндрическая пружина.

Устройство электрического соединителя

Герметизированный электрический соединитель состоит из герметичной вилки 1 и розетки 4. Вилка 1 состоит из составного корпуса 3 с контактными штырями 2, изолированными от корпуса 3 стеклоизоляторами 15. Внутренняя часть корпуса 3 выполнена из металла, обеспечивающего качественный стеклоспай с стеклоизолятором 15, внешняя часть корпуса 3 выполнена из металла, термообрабатываемого для получения требуемой твердости, обеспечивающей повышенный ресурс резьбовых соединений, и обладающего хорошей свариваемостью для обеспечения герметичности и прочности. На контактные штыри 2 установлена до упора в корпус 3 изоляционная прокладка 9. На каждый контактный штырь 2 вилки 1 установлены цилиндрическая пружина 17 и втулка 16, закрытые сепаратором 10. Пружина 17, поверхность фланца втулки 16 и сепаратор 10 имеют, например, золотое покрытие для уменьшения переходного сопротивления между ними. Также крайний удаленный от фланца втулки торцевой виток пружины 17, обращенный к стеклоизолятору 15, имеет уменьшенный внутренний диаметр для гарантированного обжатия контактного штыря 2. Внутренний диаметр уменьшенного витка не превышает диаметр контактного штыря 2.

Пружины 17 и втулка 16 выполняют функции электрического шунта контактных штырей 2 на сепаратор 10, а следовательно, и на корпус 3 вилки 1 в расчлененном состоянии соединителя.

Уплотнительное кольцо 14 обеспечивает герметизацию места установки соединителя в объекте использования. Гайка, обеспечивающая закрепление соединителя, на иллюстрациях не показана.

Розетка 4 состоит из корпуса 7, в который установлен изолятор 6 с контактными гнездами 5. Изолятор зафиксирован стопорным кольцом 13. На изоляторе 6 выполнены соосные контактными гнездами 5 выступы 8. Уплотнительное кольцо 11 герметизирует зону контактов (контактных штырей 2 и контактных гнезд 5) соединителя [6].

Шпоночный паз розетки 4 и шпоночный выступ вилки 1, определяющие их взаимное угловое расположение, на иллюстрациях не показаны.

Внешние торцевая и цилиндрическая поверхность части выступа 8 втулки 16 (части втулки меньшего диаметра), входящего в отверстия сепаратора 10, выполнены неэлектропроводящими, что позволяет размещать контактные штыри более плотно, уменьшая диаметр соединителя.

Работа электрического соединителя

Для сочленения соединителя розетка 4 в требуемом угловом положении устанавливается в корпус 3 вилки 1, далее гайкой 12 розетка 4 окончательно сочленяется с вилкой 1, обжимая уплотнительное кольцо 11. При этом изолятор 6 отжимается поджатыми пружинами 17 втулки 16, разрывая электрическую связь контактных штырей 2 с корпусом 3. Контактные штыри 2 заходят в контактные гнезда 5.

Для расчленения соединителя свинчивается гайка 12 и розетка 4 за гайку 12 извлекается из вилки 1. При этом втулки 16 поджимаются цилиндрическими пружинами 17 к сепаратору 10, восстанавливая электрическое шунтирование контактных штырей 2 через сепаратор 10 на корпус 3 вилки 1.

Наличие герметизации в виде уплотнительного кольца 11 изолирует зону сочленения контактных штырей 2 и контактных гнезд 5 в сочленном состоянии соединителя от воздействия внешней среды, обеспечивая эксплуатацию соединителя при повышенной влажности и выпадающих осадках [7].

Соединитель также может быть выполнен с любым требуемым количеством контактов.

Конструкция электрического соединителя также обеспечивает автоматическое шунтирование значительного требуемого количества электрических цепей без увеличения его диаметра, при этом незначительно увеличивается только его длина (по сравнению с унифицированными соединителями).

Техническое решение электрического соединителя универсально – при необходимости часть электрических цепей может не шунтироваться, для этого достаточно на соответствующие контактные штыри 2 вилки 1 не устанавливать цилиндрические пружины 17 и втулки 16, что расширяет область применения заявляемого электрического соединителя.

Заключение

Вилка разработанного соединителя обеспечивает сочленение с серийно выпускаемыми унифицированными розетками, что значительно расширяет ее эксплуатационные возможности, расширяя область применения.

Указанные преимущества обеспечивают взрывобезопасное исполнение электрического соединителя, не требующее при его применении организационных мер, такие как заземление исполнителя работ, снятие статического электричества за счет прикосновения к заземленным токоведущим элементам перед началом работ, которые не всегда выполняются в полной мере из-за человеческого фактора – возможности принятия человеком ошибочных или алогичных решений в конкретных ситуациях.

Разработанный электрический соединитель обеспечивает надежное автоматическое шунтирование всех электрических цепей, проходящих через электрический соединитель, на корпус при расчленении соединителя, исключая появления статического электричества и наведенных внешними электромагнитными полями токов. В расчленном состоянии шунтирование электрических цепей сохраняется, также обеспечивая защиту электрических цепей. При сочленении соединителя шунтирование электрических цепей также автоматически отключается, обеспечивая надежную организацию электрических цепей через соединитель. Автоматическое подключение и отключение шунтирования исключает влияние возможных ошибок исполнителя при сочленении и расчленении соединителя на безопасность технического объекта в целом.

Таким образом, разработанный соединитель создает условия, обеспечивающие безопасность при его использовании в малогабаритных технических объектах с плотной компоновкой, критичных к статическому электричеству и наведенным токам, например, содержащих пиротехнические средства инициирования – электродетонаторы и электровоспламенители.

На техническое решение соединителя подана заявка на изобретение [5].

Список литературы

1. А.с. 259219 Н01R. Электрический разъем / Матюшин А. Т., Матюшин В. Т., Рубцов В. Я. № 1258662/24-7 ; заявл. 30.07.1968, опубл. 12.12.1969, Бюл. № 8.
2. А.с. 1078515 Н01R23/12. Многоштырьковая вилка штепсельного разъема / Жарков Ю. В., Максимов Б. К., № 3528694/24-7 ; заявл. 27.12.1982, опубл. 07.03.1984, Бюл. № 9.
3. А.с. 1826096 Н01R23/28. Многоштырьковая вилка электрического соединителя / Михайлов А. И. № 4952529; заявл. 26.06.1991, опубл. 07.07.1993, Бюл. № 25.
4. А.с. 1410143 Н01R13/04 Многоканальный разъем / Сулима Ф. Н., Казенков Ф. П., Каленик А. И. № 4177572 ; заявл. 10.11.1984, опубл. 15.07.1988, Бюл. № 26.
5. Патент РФ 2789532 Н01R13/648. Электрический соединитель / Китаев В. Н., Дремков М. А., Уралев А. А. [и др.] № 2022128962 ; заявл. 08.11.2022 ; опубл. 06.02.2022, Бюл. № 4.
6. Китаев В. Н., Афанасьев Р. Л., Петров М. В. Математическая модель инерционного включателя // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 1. С. 30–40.

7. Ключников А. В. Особенности процедуры уравнивания длинномерного тела в единственной плоскости коррекции дисбалансов на вертикальном балансировочном стенде // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 1. С. 83–90.

References

1. A.s. Electrical connector. 259219 H01R. Matyushin A.T., Matyushin V.T., Rubtsov V.Ya. No. 1258662/24-7; appl. 30.07.1968, publ. 12.12.1969, bull. № 8. (In Russ.)
2. A.s. Multi-pin plug of the plug connector № 1078515 H01R23/12. Zharkov Yu.V., Maksimov B.K., No. 3528694/24-7; appl. 27.12.1982, publ. 07.03.1984, bull. № 9. (In Russ.)
3. A.s. Multi-pin plug of an electrical connector. 1826096 H01R23/28. Mikhaylov A.I. No. 4952529; appl. 26.06.1991, publ. 07.07.1993, bull. № 25. (In Russ.)
4. A.s. Multichannel connector. 1410143 H01R13/04. Sulima F.N., Kazenkov F.P., Kalenik A.I. No. 4177572; appl. 10.11.1984, publ. 15.07.1988, bull. № 26. (In Russ.)
5. Patent Russian Federation 2789532 N01R13/648. *Elektricheskiy soedinitel' = Electrical connector*. Kitaev V.N., Dremkov M.A., Uralev A.A. et al.; appl. 08.11.2022; publ. 06.02.2022, bull. № 4. (In Russ.)
6. Kitaev V.N., Afanas'ev R.L., Petrov M.V. Mathematical model of an inertial switch. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(1):30–40. (In Russ.)
7. Klyuchnikov A.V. Features of the procedure for balancing a long body in a single plane of correction of imbalances on a vertical balancing stand. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(1):83–90. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Николаевич Китаев

начальник конструкторского отдела,
Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт
технической физики имени академика Е. И. Забабахина
(Россия, Снежинск, ул. Васильева, 13)
E-mail: kb2@vniitf.ru

Vladimir N. Kitaev

Chief of the design department,
Russian Federal Nuclear Center –
Zababakhin All-Russian Research
Institute of Technical Physics
(13 Vassilyev street, Snezhinsk, Russia)

Михаил Анатольевич Дремков

руководитель конструкторской группы,
Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт
технической физики имени академика Е. И. Забабахина
(Россия, Снежинск, ул. Васильева, 13)
E-mail: kb2@vniitf.ru

Mikhail A. Dremkov

Leader of the design group,
Russian Federal Nuclear Center –
Zababakhin All-Russian Research
Institute of Technical Physics
(13 Vassilyev street, Snezhinsk, Russia)

Александр Александрович Уraleв

инженер-конструктор,
Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт
технической физики имени академика Е. И. Забабахина
(Россия, Снежинск, ул. Васильева, 13)
E-mail: kb2@vniitf.ru

Aleksandr A. Uralev

Design engineer,
Russian Federal Nuclear Center –
Zababakhin All-Russian Research
Institute of Technical Physics
(13 Vassilyev street, Snezhinsk, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 15.01.2023

Поступила после рецензирования/Revised 23.02.2023

Принята к публикации/Accepted 10.03.2023

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЛАЗЕРНЫХ УСТАНОВОК

М. В. Мостовской¹, В. В. Слепцов², Н. Н. Куликова³

^{1, 2, 3} МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия
^{1, 2, 3} mvmost@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматриваются актуальные направления развития регулируемого электропривода – повышение эффективности информационно-измерительных и управляющих систем. *Материалы и методы.* Показана необходимость в совершенствовании методов управления регулируемым электроприводом путем сравнительного анализа информационно-измерительных и управляющих систем электроприводов с целью повышения показателей надежности. Рассматривается принцип работы информационно-измерительной и управляющей системы электропривода с повышенными показателями надежности. *Результаты и выводы.* Проведен сравнительный расчет надежности электроприводов на основе векторного и предлагаемого способа управления.

Ключевые слова: информационно-измерительная и управляющая система, электропривод, лазерные установки, надежность, векторное управление, прямое управление, вентильный двигатель, вероятность безотказной работы

Для цитирования: Мостовской М. В., Слепцов В. В., Куликова Н. Н. Повышение надежности информационно-измерительной и управляющей системы электропривода лазерных установок // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 62–71. doi:10.21685/2307-4205-2023-1-8

INCREASING THE RELIABILITY OF THE INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEM OF THE ELECTRIC DRIVE OF LASER INSTALLATIONS

M.V. Mostovskoy¹, V.V. Sleptsov², N.N. Kulikova³

^{1, 2, 3} MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia
^{1, 2, 3} mvmost@yandex.ru

Abstract. *Background.* The actual directions of development of an adjustable electric drive are considered – increasing the efficiency of information-measuring and control systems. *Materials and methods.* The need to improve the methods of control of an adjustable electric drive is shown by a comparative analysis of information-measuring and control systems of electric drives in order to improve reliability indicators. The principle of operation of the information-measuring and control system of the electric drive with increased reliability indicators is considered. *Results and conclusions.* A comparative calculation of the reliability of electric drives based on the vector and proposed control methods.

Keywords: information-measuring and control system, electric drive, laser technological installations, reliability, vector control, direct control, brushless motor, probability of failure-free operation

For citation: Mostovskoy M.V., Sleptsov V.V., Kulikova N.N. Increasing the reliability of the information-measuring and control system of the electric drive of laser installations. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(1):62–71. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-1-8

Введение

Станкостроение – одна из ведущих отраслей промышленности, целью которой является разработка, производство и модернизация оборудования широкого спектра применения [1]. К номенклатуре выпускаемых станкостроением изделий относятся металлорежущие и деревообрабатывающие станки, кузнечно-прессовое оборудование, литейные машины, печи для термической обработки, промышленные роботы и т.д.

В последнее десятилетие в США, Европе и России можно выделить три основных направления развития станкостроительной отрасли: повышение уровня автоматизации и устранение участия чело-

века в производственном процессе, повышение производительности (как отдельных станков, так и производственных линий), а также повышение качества и эффективности выпускаемых машин.

На производствах среднего и точного машиностроения большое количество технологических операций, связанных со сваркой, упрочнением, резкой, гравировкой, маркировкой, сверлением и других различных материалов, выполняется с использованием лазерных технологических установок (далее – лазерных установок). Широкое применение лазерных установок обусловлено рядом преимуществ: отсутствие механического воздействия на обрабатываемый материал; возможность выполнения сложного контурного раскроя в материалах любой твердости; чистота среза обрабатываемой заготовки и отсутствие внутренних механических напряжений; высокая точность и производительность; безотходность операций.

Среди российских производителей оборудования для лазерной прецизионной обработки признанным лидером является ООО Научно-производственный центр «Лазеры и аппаратура ТМ». Примеры лазерных установок, предназначенных для сварки и прецизионной резки, производства ООО НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ» представлены на рис. 1

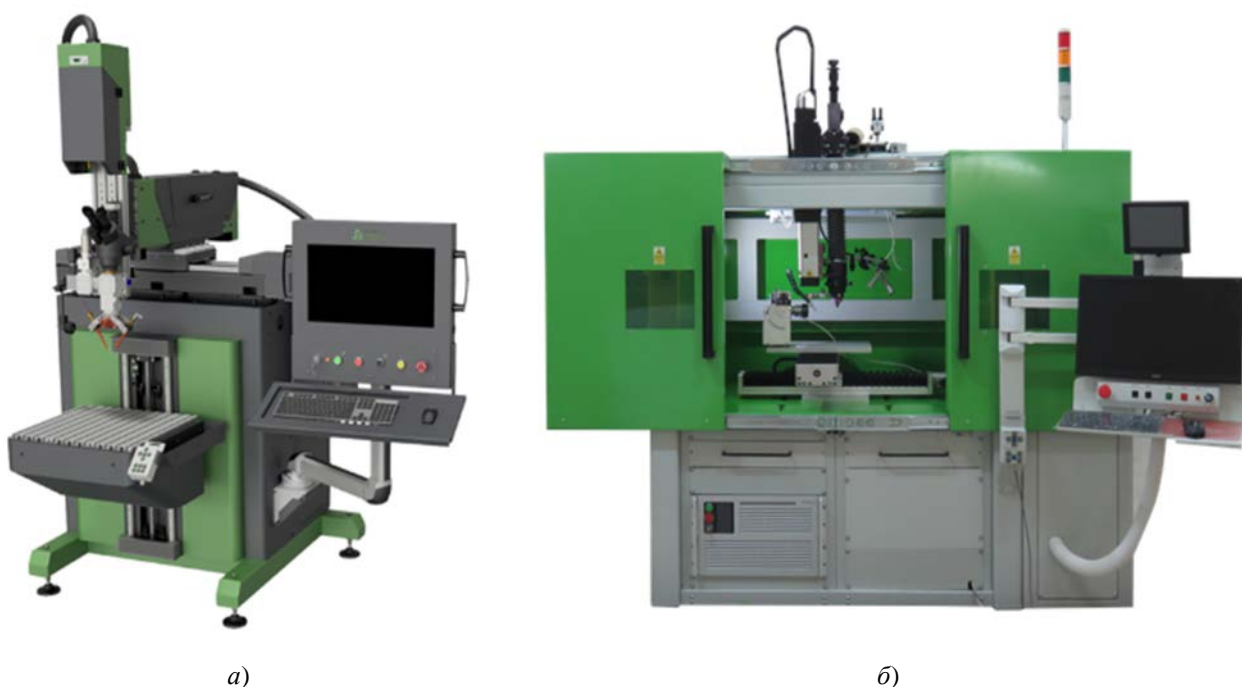


Рис. 1. Лазерные установки производства НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ»:
 а – станок лазерной сварки металлов МЛК4-QCW;
 б – универсальный станок размерной обработки МЛ4-QCW

В настоящее время ООО НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ» разрабатывает серию прецизионных и ультрапрецизионных лазерных станков (в том числе и пятикоординатных), отличающихся повышенной точностью и производительностью за счет применения оригинальных линейных и ротационных двигателей [2, 3], а также электроприводов на их основе.

Следует отметить, что в России не производятся линейные электроприводы подачи. Исключение составляет предприятие ООО «НПК Морсвязавтоматика», которое производит линейные электроприводы подачи в ограниченных количествах, с применением элементной базы фирмы «Hiwin».

Под влиянием зарубежных ограничительных мер на российскую экономику ставится задача импортозамещения элементной базы производимых станков, приборов и систем автоматики, расширение диапазона применения производимой продукции и снижение общей себестоимости изделия.

Разработка и производство собственных линейных и ротационных двигателей для лазерных установок ООО НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ» влечет за собой и создание ИИУС электропривода. Разрабатываемый электропривод должен отличаться повышенными динамическими, метрологическими и силовыми показателями, технологичностью, надежностью и низкой себестоимостью.

По данным ООО НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ» известно, что 30–40 % производственного брака при лазерной обработке возникает по вине отказов или сбоев технологического оборудования.

Наряду с работами по созданию наиболее эффективных конструкций лазерных установок требуется совершенствование технологий их изготовления, повышение надежности, а также улучшение эксплуатационных характеристик. Эти задачи должны решаться комплексно в процессе технологического проектирования и изготовления лазерных установок.

При проектировании и производстве лазерных установок наиболее трудоемким и затратным элементом является координатная система, состоящая из комплекта электроприводов, осуществляющих перемещение лазерного инструмента, кинематической схемы, датчиков и оптической системы [3].

Современное развитие лазерных установок характеризуется интенсификацией режимов работы, усложнением конструкции и элементов подсистемы автоматического управления процессами позиционирования и перемещения лазера. Снижение производственного брака достигается за счет изменения и совершенствования методов управления, а также дублирования отдельных элементов структуры.

Одним из наиболее перспективных и важных направлений общего повышения надежности лазерных установок является совершенствование электропривода. Современный электропривод состоит из электродвигателя (линейного или ротационного) и информационно-измерительной и управляющей системы (ИИУС).

Повышение надежности ИИУС электропривода координатных систем станков (лазерных установок) может дать большой экономический эффект в масштабах целой отрасли.

Для повышения надежности электроприводов, применимых в составе лазерных установок, следует руководствоваться следующими рекомендациями:

1. Для регулирования и настройки на оптимальный режим работы ИИУС электропривода должно быть предусмотрено минимальное количество настроечных элементов.

2. Конструкция ИИУС электропривода выполняется в виде модульной системы, установленной в общий шкаф управления лазерных установок. Подобное техническое решение обеспечивает удобство настройки во время эксплуатации, ремонта и технического осмотра.

3. Повышение надежности электропривода за счет введения различного рода избыточности, под которой подразумевается использование дополнительных технических средств, превышающих минимально необходимые для выполнения заданных функций [4].

4. Повышение надежности электропривода за счет совершенствования структурной схемы и изменения общей совокупности связей элементов (устранение некоторых элементов, упрощение схемы) электропривода.

Согласно приведенным рекомендациям ясно, что наиболее эффективным инструментом общего повышения надежности является применение подходов, изложенных в пунктах 3, 4. Оба подхода основаны на изменении совокупности связей элементов структурной схемы электропривода путем введения каналов резервирования или устранения некоторых элементов.

С точки зрения технической реализации резервирование может быть самым разнообразным и предусматривать резервирование ИИУС электропривода целиком или отдельных компонентов.

Введение в схему регулируемого электропривода дополнительных каналов резервирования приводит к увеличению массы, габаритных размеров и стоимости конечного изделия, поэтому наиболее привлекательным и экономически целесообразным способом повышения надежности электропривода является изменение совокупности связей управляющих элементов электропривода.

Под влиянием зарубежных ограничительных мер на российскую экономику поставлены задачи импортозамещения элементной базы приборов и систем автоматики, расширения диапазона применения производимой отечественной продукции и снижения общей себестоимости изделий и др.

В связи с вышесказанным встает вопрос о снижении затрат на производство разрабатываемых ИИУС электропривода промышленного назначения за счет упрощения конструкции, снижения времени настройки и регулировки, а также за счет применения отечественной элементной базы.

Сравнительный анализ ИИУС электропривода

Для увеличения надежности, точности, улучшения динамических и эксплуатационных характеристик ведущие мировые производители применяют в составе промышленных роботов и координатных систем станков синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ). СДПМ является наиболее перспективным в диапазоне малых и средних мощностей в режиме вентильного двигателя

(ВД), что приближает его характеристики к двигателю постоянного тока (ДПТ), который считается эталонным [5–7].

Для следующих электроприводов координатных систем на базе СДПМ применяют два основных способа управления: векторный и прямой. ИИУС электропривода на основе векторного управления позволяет существенно увеличить диапазон регулирования скорости, точность регулирования и быстродействие. Структурная схема ИИУС электропривода, основанная на методе векторного управления, представлена на рис. 2.

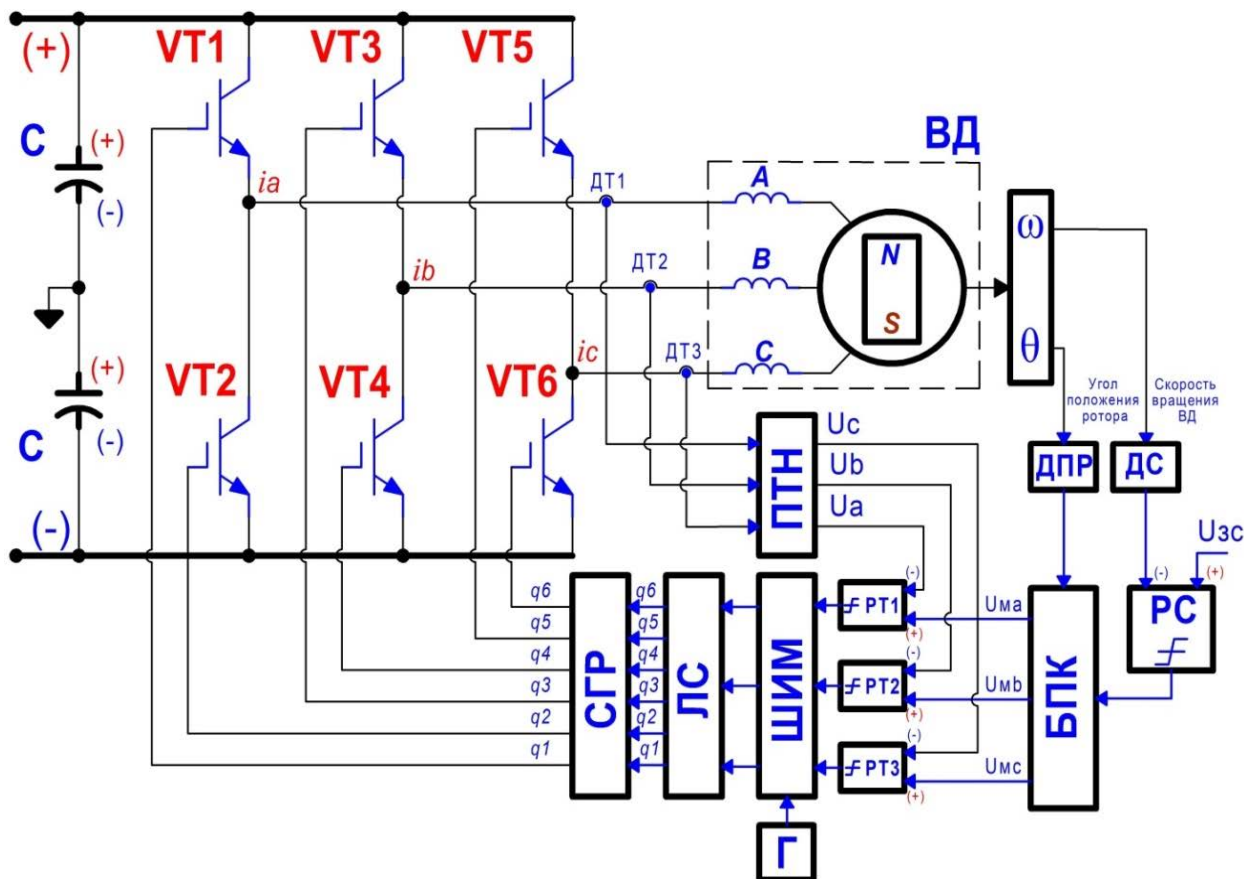


Рис. 2. ИИУС электропривода векторного управления: РС – регулятор скорости; БПК – блок преобразователя координат; РТ1–РТ3 – регуляторы тока; ШИМ – широтно-импульсный преобразователь; Г – генератор пилообразных сигналов; ЛС – логическая схема; СГР – схема гальванической развязки; ВД – вентиляльный двигатель; ДТ1–ДТ3 – датчики тока; ПТН – преобразователь ток/напряжение; ДПР – датчик положения ротора; ДС – датчик скорости; $U_{зс}$ – напряжение задания скорости; $U_{ма}$, $U_{мб}$, $U_{мс}$ – напряжение задания момента фаза А, В, С; U_a , U_b , U_c – напряжение пропорциональное току в фазах А, В, С

Отличительной особенностью ИИУС электропривода векторного управления является наличие БПК и трехконтурной системы коррекции момента (регулятор тока используется для каждой фазы). Задачей БПК является формирование управляющих сигналов задания момента для каждой фазы двигателя, представляющих собой напряжение синусоидальной формы, амплитуда которых определяется выходным сигналом РС. Принципиальная электрическая схема цифроаналогового БПК (без учета подтягивающих резисторов) представлена на рис. 3.

Схема БПК работает следующим образом. На выходе регулятора скорости формируется сигнал задания момента U_m , который суммируется с сигналом с датчика скорости (определяет требуемую скорость вращения) и поступает на вход преобразователя напряжение/частота (ПНЧ). Импульсы с ПНЧ поступают на вход 8-разрядного счетчика (на $d1$ или на $d2$ в зависимости от знака U_m).

Линейно нарастающий восьмиразрядный код со счетчиков на микросхемах DD1 и DD2 (K555IE7) преобразуется в код синуса (микросхема DD3) и сдвинутого на 120° синуса (микросхема DD4), а далее с помощью умножающих ЦАПов преобразуется в аналоговые сигналы с амплитудой, пропорциональной сигналу U_m . На выходе операционного усилителя А5 формируется синус, сдвинутый на 240° . Эти три синуса поступают на входы соответствующих регуляторов токов (А, В, С).

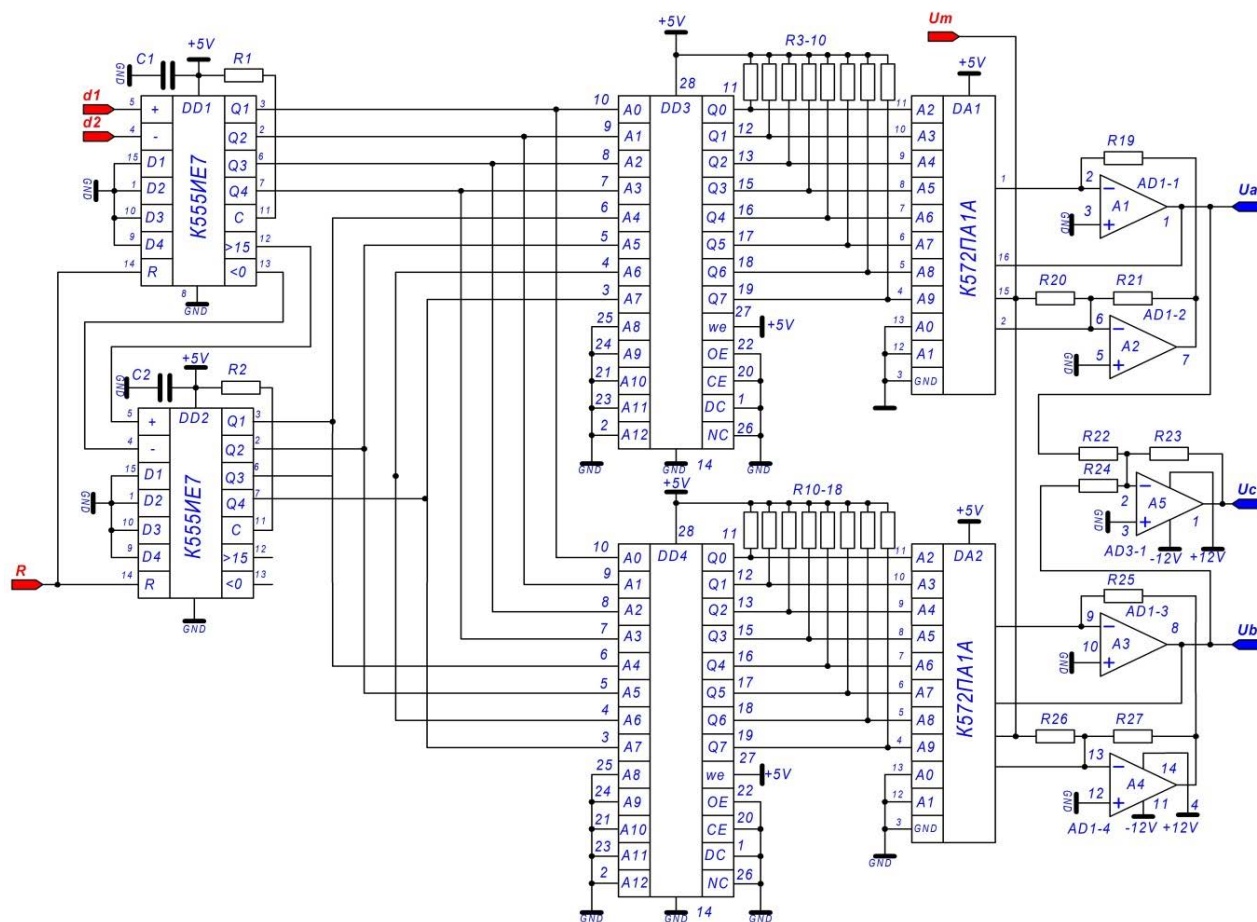


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема блока преобразования координат

К главным достоинствам ИИУС электропривода с векторным управлением относится широкий диапазон регулирования скоростей (более 10 000), низкий уровень колебания скоростей во всем диапазоне регулирования, высокое быстродействие системы, полоса пропускания частот до 200 Гц.

К недостаткам данных систем можно отнести сложность настройки (перенастройки) и ремонта, высокую стоимость, невысокую надежность.

В статьях [1, 8, 9], посвященных определению необходимых технических характеристик ИИУС электроприводов для лазерных установок, предлагается оригинальная структурная схема ИИУС электропривода на базе ВД, отличительной особенностью которой является использование лишь одного подчиненного контура тока. На основании практических и теоретических исследований, представленных в работах [1, 8, 9], установлено, что предлагаемая ИИУС электропривода соответствует ГОСТ 27803-91 «Электроприводы, регулируемые для металлообрабатывающего оборудования и промышленных роботов. Технические требования», имеет необходимые технические характеристики и может быть использована в составе координатных систем лазерных установок. В статье [1] приведены экспериментальные результаты исследования разработанной ИИУС электропривода. Полоса пропускания частот замкнутого контура скорости электропривода составила 123 Гц, диапазон регулирования скорости составил 9500. Получившиеся результаты полностью удовлетворяют требованиям, предъявляемым к ИИУС электропривода, приведенным в статье [8]. По техническим характеристикам предлагаемая ИИУС электропривода почти не уступает системам на основе векторного управления, но имеет более высокие показатели надежности, что обусловлено устранением необходимости в трехконтурной системе коррекции величины тока.

Устранение трехконтурной системы коррекции величины тока с получением необходимых технических характеристик (для лазерных установок) достигается за счет изменения совокупности связей структуры ИИУС электропривода. Отличительной особенностью разработанной ИИУС электропривода является введение блока перемножения выходных сигналов регулятора тока и регулятора скорости [1, 10]. Структурная схема предлагаемой ИИУС электропривода повышенной эффективности представлена на рис. 4.

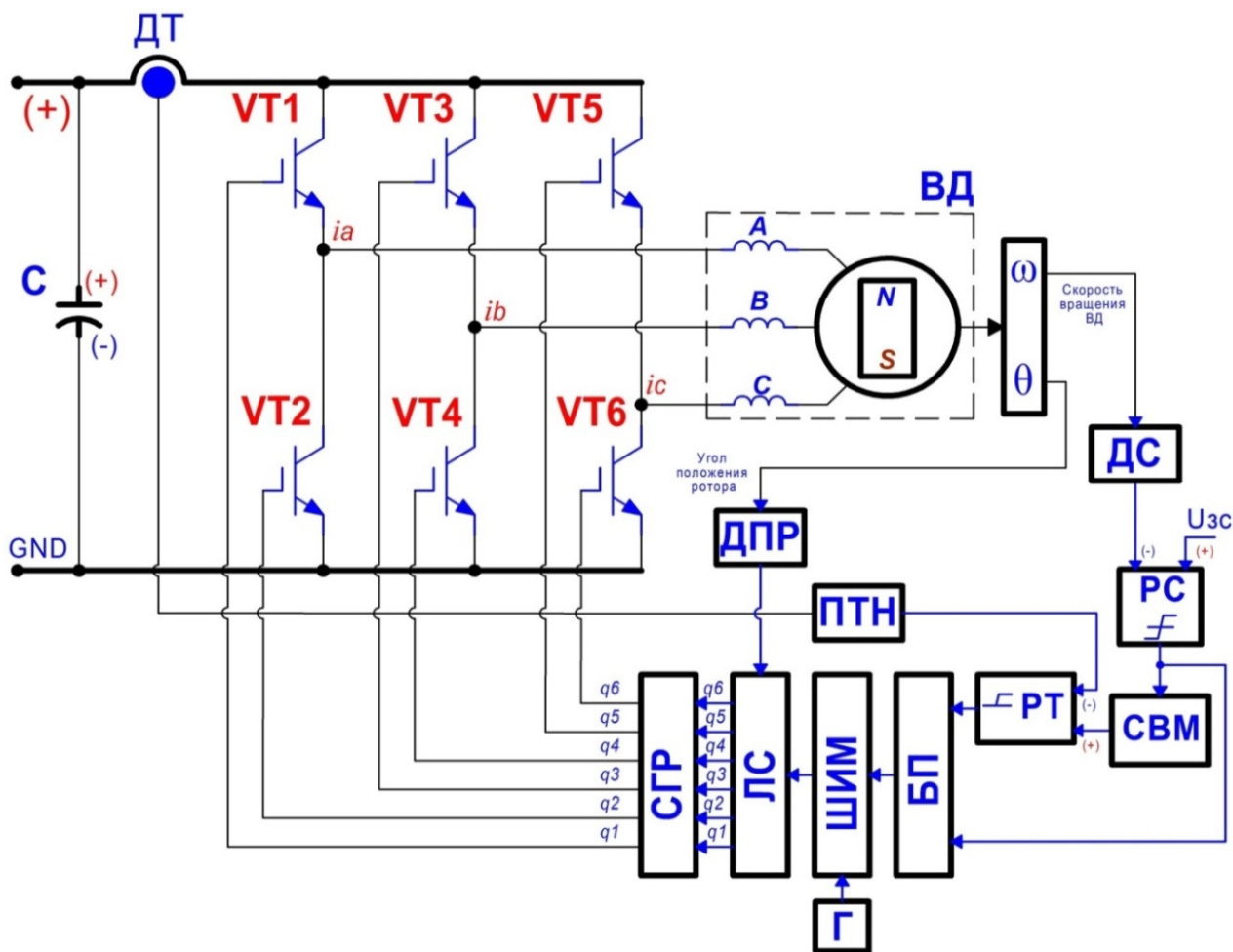


Рис. 4. ИИУС электропривода повышенной надежности:
 БП – блок перемножения; СВМ – схема выделения модуля

Подчиненный контур коррекции величины тока состоит из РТ, БП, ШИМ, Г и ДТ. РТ представляет собой П-регулятор, настроенный на технический оптимум, имеющий однополярный выходной сигнал коррекции величины тока, поступающий на парный вход схемы БП. Для определения направления вращения и увеличения быстродействия системы на второй вход БП подается выходной сигнал РС, варьирующийся в диапазоне $\pm 10\text{В}$. Измерение величины тока осуществляется при помощи ДТ (шунтирующий резистор), который устанавливается на положительном полюсе источника питания схемы силового преобразователя и схемы ПТН, представляющей собой дифференциальный усилитель с гальванической развязкой по входу. Задачей ПТН является преобразование, масштабирование и фильтрация сигнала ДТ. Для управления силовыми IGBT транзисторами используется ЛС, которая может быть выполнена на микроконтроллере или ПЗУ. Длительность управляющих импульсов ЛС определяется ШИМ, преобразующим выходной сигнал БП.

В обеих схемах ИИУС электропривода применяется двойной контроль величины тока. Измерение величины тока в подчиненном контуре обратной связи осуществляется с помощью компенсационного датчика Холла, а контроль величины тока для защиты системы от перенапряжения осуществляется шунтирующим резистором.

Представленное техническое решение приводит к упрощению схемы ИИУС электропривода, снижению инерционности системы, упрощению алгоритма настройки, уменьшению цены изделия и повышению надежности.

Сравнительный расчет надежности ИИУС электропривода

Согласно общей теории расчета надежности автоматизированных электроприводов промышленного назначения наиболее информативным показателем надежности является вероятность безотказной работы [11, 12].

Для определения функции вероятности безотказной работы $P(t)$ исследуемых электроприводов воспользуемся наглядным методом анализа блок-схем, который заключается в представлении принципиальной электрической схемы электропривода в виде блоков, соединенных между собой, в зависимости от влияния элементов на работу всей схемы в целом.

В простейшем случае (без каналов резервирования) электропривод можно представить в виде последовательного соединения блоков, характеризующих надежность того или иного элемента схемы, тогда

$$P_{ЭП}(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot P_3(t) \cdot \dots \cdot P_n(t) = \prod_{i=1}^k P_k(t), \tag{1}$$

где k – количество блоков структурной схемы электропривода; $P_k(t)$ – вероятность безотказной работы k -го элемента схемы.

В большинстве случаев, встречающихся на практике, в качестве модели распределения вероятности безотказной работы электропривода используется экспоненциальный закон распределения вероятности [13].

В случае использования экспоненциального закона распределения вероятность безотказной работы $P_k(t)$ элементов электропривода определяется по выражению

$$P_k(t) = e^{-N_i \lambda_{\Sigma} t \prod_{i=1}^n K_i}, \tag{2}$$

где t – текущее значение времени в масштабе заданного параметра; λ_{Σ} – суммарная интенсивность отказов; N_i – число элементов i -го типа; K_i – эксплуатационные коэффициенты; n – число учитываемых факторов.

Для расчета суммарной интенсивности отказов любого блока структурной схемы электропривода пользуются выражением

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_1(t) + \lambda_2(t) + \dots + \lambda_n(t) = \sum_{i=1}^j \lambda_i, \tag{3}$$

где λ_i – интенсивность отказов элементов i -го типа; j – количество элементов.

Расчет надежности будем проводить относительно структурной (см. рис. 1–3) и принципиальной электрической схем. Пользуясь справочной информацией [14–16], составим таблицу (табл. 1) интенсивности отказов основных элементов схемы и проведем сравнительный расчет вероятности безотказной работы рассмотренных ранее электроприводов (см. рис. 2, 4).

Таблица 1

Интенсивности отказов элементов электропривода

Элементы электронной аппаратуры	Электропривод с векторным управлением (рис. 1)	Электропривод повышенной надежности (рис. 3)	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-7}, \text{ч}^{-1}$
1. Регулятор скорости	1	1	3,9
2. Регулятор тока	3	1	3,4
3. Блок выделения модуля	–	1	1,9
4. Блок преобразования координат	1	–	64,1
5. Широтно-импульсный модулятор	3	1	2,5
6. Генератор пилообразных импульсов	1	1	2,45
7. Блок перемножения	–	1	1
8. Логическая схема и гальваническая развязка	1	1	45,1
9. Схема включения датчика тока	3	1	3,5
10. Схема включения датчика скорости	1	1	38,2
11. Преобразователь напряжение/частота	1	–	4,6
12. Схема силового преобразователя	1	1	50,2
13. Схема защиты	1	1	27,1
14. Датчик тока (датчик Холла)	3	1	1
15. Шунтирующий резистор	1	1	2,5
16. Разъемы	9	8	0,03

Рассчитаем интенсивность отказов некоторых элементов схемы ИИУС. Так, например, схема БПК (рис. 2) состоит из 27 резисторов ($\lambda = 0,01 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$), 2 конденсаторов ($\lambda = 0,015 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$), 6 цифровых ($\lambda = 1 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$) и 1 аналоговой микросхемы ($\lambda = 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$), тогда согласно выражению (3) рассчитаем интенсивность отказов БПК.

Аналогично рассчитаем интенсивность отказа каждого блока схемы электропривода (рис. 2, 4) и внесем данные в таблицу (см. табл. 1).

Далее проведем сравнительный расчет вероятности безотказной работы (для 10 000 ч) ИИУС электропривода на основе векторного управления $P_{ВУ}(t)$ и разработанной ИИУС электропривода повышенной надежности $P_{ПН}(t)$.

Сравнение результатов расчетов вероятности безотказной работы рассматриваемых ИИУС электропривода показало, что ликвидация необходимости в трехконтурной системе коррекции тока (применение новой схемы ИИУС) приводит к увеличению надежности, по предварительным расчетам, в 1,086 раза.

Помимо общего повышения надежности к положительным факторам разработанной ИИУС электропривода можно отнести:

- сохранение метрологических и динамических характеристик системы [1, 17];
- снижение общей себестоимости (по предварительной оценке на 18,3 %) и упрощение системы за счет устранения необходимости в изготовлении и наладке, трехконтурной схемы коррекции величины тока.

Заключение

Рассмотрены актуальные направления совершенствования координатных систем лазерных установок за счет повышения надежности ИИУС электропривода. Приведено описание принципа работы ИИУС электропривода на основе векторного управления, ее достоинства и недостатки.

Рассмотрена схема ИИУС электропривода (см. рис. 3), отличающегося повышенными показателями. Проведенный сравнительный расчет надежности показал, что применение новой схемы ИИУС электропривода приводит к увеличению надежности в 1,086 раза и снижению себестоимости на 17 %.

Список литературы

1. Мостовской М. В. Регулируемый электрический привод для лазерных технологических установок: оценка метрологических характеристик методом схемотехнического моделирования // Измерительная техника. 2022. № 2. С. 8–13. doi:10.32446/0368-1025it.2022-2-8-13
2. Патент РФ 2658301. Синхронный линейный электродвигатель / Рогачевский О. А. № 2016135983 ; заявл. 06.09.2016 ; опубл. 20.06.2018.
3. Патент РФ 2658296. Линейный электродвигатель / Рогачевский О. А. № 2016136754 ; заявл. 13.09.2016 ; опубл. 20.06.2018.
4. Вакс Е. Д., Миленский М. Н., Сапрыкин Л. Г. Практика прецизионной лазерной обработки. М. : Техносфера, 2013. 696 с.
5. Москаленко В. В. Системы автоматизированного управления электропривода : учебник. М. : ИНФРА-М, 2007. 208 с.
6. Герман-Галкин С. Г. Многовариантный анализ вентильного электропривода с бесконтактным двигателем постоянного тока // Силовая электроника. 2017. № 4. С. 72–79.
7. Герман-Галкин С. Г., Лебедев В. В., Бормотов А. В. Модульная синхронная индукторная машина в системе электропривода // Механика, автоматика, управление. 2015. Т. 16, № 11. С. 731–737.
8. Овчинников И. Е. Вентильные электрические приводы и двигатели на их основе (курс лекций). СПб. : КОРОНА-Век, 2016. 336 с.
9. Слепцов В. В., Мостовской М. В. Определение технических требований для систем управления электрическим приводом в станках лазерного раскроя металла // Законодательная и прикладная метрология. 2019. № 6. С. 27–29.
10. Патент РФ RU2789839C1. Система управления скоростью вращения вентильного электродвигателя / Слепцов В. В., Мостовской М. В. № 2021137739 ; заявл. 20.12.2021 ; опубл. 13.02.2023, Бюл. № 5.
11. Мостовской М. В., Слепцов В. В., Снедков А. Б. Теоретическая оценка работоспособности регулируемого электропривода координатной системы лазерных установок // Измерительная техника. 2022. № 5. С. 42–49. doi:10.32446/0368-1025it/2022-5-42-49
12. Оськин С. В. Автоматизированный электропривод : учеб. пособие для студентов вузов. Краснодар : КРОН, 2013. 489 с.

13. Кривель С. М. Анализ структурных схем надежности технических систем с использованием SIMULINK // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22, № 6. С. 85–95.
14. Елисеева В. А., Шинянский А. В. Справочник по автоматизированному электроприводу. М. : Энергоатомиздат, 1983. 616 с.
15. Боровиков С. М., Цырельчук И. Н., Троян Ф. Д. Расчет показателей надежности радиоэлектронных средств. Минск : БГУИР, 2010.
16. Анучин А. С. Системы управления электроприводов : учебник для вузов. М. : Изд-во дом МЭИ, 2015. 373 с.
17. Белянин Л. Н. Конструирование печатного узла и печатной платы. Расчет надежности : учеб.-метод. пособие. Томск : Изд-во ТПУ, 2008. 77 с.
18. Билибин К. И., Власов А. И., Журавлева Л. В. [и др.]. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры : учебник для вузов / под общ. ред. В. А. Шахнова. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 528 с.
19. Слепцов В. В., Мостовской М. В. Методика оценки метрологических характеристик регулируемого электропривода методом схемотехнического моделирования // Законодательная и прикладная метрология. 2021. № 1. С. 22–26.

References

1. Mostovskoy M.V. Adjustable electric drive for laser technological installations: assessment of metrological characteristics by the method of circuit modeling. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring equipment*. 2022;(2):8–13. (In Russ.). doi:10.32446/0368-1025it.2022-2-8-13
2. Patent RU 2658301. *Sinkhronnyy lineynyy elektrodvigatel' = Synchronous linear electric motor*. Rogachevskiy O.A.; No. 2016135983; appl. 06.09.2016; publ. 20.06.2018. (In Russ.)
3. Patent RU 2658296. *Lineynyy elektrodvigatel' = Linear electric motor*. Rogachevskiy O.A.; No. 2016136754; appl. 13.09.2016; publ. 20.06.2018. (In Russ.)
4. Vaks E.D., Milen'kiy M.N., Saprykin L.G. *Praktika pretsizionnoy lazernoy obrabotki = Practice of precision laser processing*. Moscow: Tekhnosfera, 2013:696. (In Russ.)
5. Moskalenko V.V. *Sistemy avtomatizirovannogo upravleniya elektroprivoda: uchebnyy = Automated control systems of electric drive : textbook*. Moscow: INFRA-M, 2007:208. (In Russ.)
6. German-Galkin S.G. Multivariate analysis of a valve electric drive with a contactless DC motor. *Silovaya elektronika = Power electronics*. 2017;(4):72–79. (In Russ.)
7. German-Galkin S.G., Lebedev V.V., Bormotov A.V. Modular synchronous inductor machine in an electric drive system. *Mekhanika, avtomatika, upravlenie = Mechanics, automation, control*. 2015;16(11):731–737. (In Russ.)
8. Ovchinnikov I.E. *Ventil'nye elektricheskie privody i dvigateli na ikh osnove (kurs lektsiy) = Valve electric drives and motors based on them (course of lectures)*. Saint Petersburg: KORONA-Vek, 2016:336. (In Russ.)
9. Sleptsov V.V., Mostovskoy M.V. Definition of technical requirements for electric drive control systems in laser metal cutting machines. *Zakonodatel'naya i prikladnaya metrologiya = Legislative and applied metrology*. 2019;(6):27–29. (In Russ.)
10. Patent Russian Federation. *Sistema upravleniya skorost'yu vrashcheniya ventil'nogo elektrodvigatelya RU2789839C1 = Control system for the rotation speed of a valve electric motor RU2789839C1*. Sleptsov V.V., Mostovskoy M.V. No. 2021137739; appl. 20.12.2021; publ. 13.02.2023, bull. № 5. (In Russ.)
11. Mostovskoy M.V., Sleptsov V.V., Snedkov A.B. Theoretical assessment of the operability of an adjustable electric drive of a coordinate system of laser installations. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring equipment*. 2022;(5):42–49. (In Russ.). doi:10.32446/0368-1025it/2022-5-42-49
12. Os'kin S.V. *Avtomatizirovannyy elektroprivod: ucheb. posobie dlya studentov vuzov = Automated electric drive : textbook for university students*. Krasnodar: KRON, 2013:489. (In Russ.)
13. Krivel' S.M. Analysis of structural schemes of reliability of technical systems using SIMULINK. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(6):85–95. (In Russ.)
14. Eliseeva V.A., Shinyanskiy A.V. *Spravochnik po avtomatizirovannomu elektroprivodu = Handbook of automated electric drive*. Moscow: Energoatomizdat, 1983:616. (In Russ.)
15. Borovikov S.M., Tsyrel'chuk I.N., Troyan F.D. *Raschet pokazateley nadezhnosti radioelektronnykh sredstv = Calculation of reliability indicators of electronic means*. Minsk: BGUIR, 2010. (In Russ.)
16. Anuchin A.S. *Sistemy upravleniya elektroprivodov: uchebnyy dlya vuzov = Control systems of electric drives : textbook for universities*. Moscow: Izd-vo dom MEI, 2015:373. (In Russ.)
17. Belyanin L.N. *Konstruirovaniye pechatnogo uzla i pechatnoy platy. Raschet nadezhnosti: ucheb.-metod. posobie = Design of a printed circuit unit and a printed circuit board. Reliability calculation : educational and methodical manual*. Tomsk: Izd-vo TPU, 2008:77. (In Russ.)
18. Bilibin K.I., Vlasov A.I., Zhuravleva L.V. et al. *Konstruktorsko-tekhnologicheskoe proektirovaniye elektronnoy apparatury: uchebnyy dlya vuzov = Design and technological design of electronic equipment : textbook for universities*. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2002:528. (In Russ.)

19. Sleptsov V.V., Mostovskoy M.V. Methodology for assessing the metrological characteristics of a regulated electric drive by the method of circuit modeling. *Zakonodatel'naya i prikladnaya metrologiya = Legislative and applied metrology*. 2021;(1):22–26. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Михаил Владимирович Мостовской

старший преподаватель кафедры приборов
и информационно-измерительных систем,
МИРЭА – Российский технологический университет
(Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78)
E-mail: mvmost@yandex.ru

Mikhail V. Mostovskoy

Senior lecturer of the sub-department of instruments
and information and measurement systems,
MIREA – Russian Technological University
(78 Vernadsky avenue, Moscow, Russia)

Владимир Владимирович Слепцов

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры приборов
и информационно-измерительных систем,
МИРЭА – Российский технологический университет
(Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78)
E-mail: vsleptsov@gmail.com

Vladimir V. Sleptsov

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department of instruments
and information and measurement systems,
MIREA – Russian Technological University
(78 Vernadsky avenue, Moscow, Russia)

Наталья Николаевна Куликова

доктор экономических наук, доцент,
профессор кафедры управления инновациями,
МИРЭА – Российский технологический университет
(Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78)
E-mail kulikova@mirea.ru

Natalia N. Kulikova

Doctor of economical sciences, associate professor,
professor of the sub-department
of innovation management,
MIREA – Russian Technological University
(78 Vernadsky avenue, Moscow, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 15.12.2022

Поступила после рецензирования/Revised 10.11.2023

Принята к публикации/Accepted 15.02.2023

КАЧЕСТВО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ИНТЕГРАЦИИ ГИБРИДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ТРАНСПОРТНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

В. П. Перевертов¹, Н. А. Кузин², Н. К. Юрков³

¹ Самарский государственный университет путей сообщения, Самара, Россия
² Московский автомобильный институт (технический университет), Москва, Россия
³ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
¹ vperevertov@yandex.ru, ² sputnik1985nk3y@mail.ru, ³ yurkov_NK@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* На основе системного анализа предложен подход формообразования деталей сложной конфигурации. Показано, что комплексное применение традиционных, аддитивных и нанотехнологий формообразования деталей существенно повышает качество формирования поверхностей. Обоснована актуальность развития умных производственных систем. *Материалы и методы.* Показано, что развитие цифровых гибких производственных систем неизбежно сталкивается с внедрением аддитивных технологий, робототехнических комплексов, частично традиционных средств формообразования, что раскрывает перспективы синтеза интеллектуальных систем управления комплексными производственными системами. *Результаты.* Применение порошковых и композиционных материалов, включая наноматериалы, контроль параметров и показателей качества необходимо обеспечивать с помощью интеллектуальных систем управления, основой которых являются современные бесконтактные, быстродействующие высокоточные лазерные и волоконно-оптические датчики. *Выводы.* Развитие интеллектуальных систем управления качеством продукции невозможно без совершенствования систем интеллектуальных датчиков, способных облегчить сбор данных. Подобные датчики должны обладать развитыми интерфейсами и стандартизированными форматами передачи данных.

Ключевые слова: качество, деталь, контроль, диагностика, датчики, технологии традиционные, аддитивные (3D-печать), нанотехнологии

Для цитирования: Перевертов В. П., Кузин Н. А., Юрков Н. К. Качество формообразования деталей при интеграции гибридных технологий транспортного машиностроения // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 72–80. doi:10.21685/2307-4205-2023-1-9

QUALITY OF FORMING PARTS IN THE INTEGRATION OF HYBRID TECHNOLOGIES OF TRANSPORT ENGINEERING

V.P. Perevertov¹, N.A. Kuzin², N.K. Yurkov³

¹ Samara State University of Railway Transport, Samara, Russia
² Moscow Road Institute (Technical University), Moscow, Russia
³ Penza State University, Penza, Russia
¹ vperevertov@yandex.ru, ² sputnik1985nk3y@mail.ru, ³ yurkov_NK@mail.ru

Abstract. *Background.* On the basis of system analysis, an approach is proposed for shaping parts of a complex configuration. It is shown that the complex application of traditional, additive and nanotechnologies for forming parts significantly improves the quality of surface formation. The relevance of the development of smart production systems is substantiated. *Materials and methods.* It is shown that the development of digital flexible production systems inevitably faces the introduction of additive technologies, robotic complexes, and partially traditional shaping tools, which opens up prospects for the synthesis of intelligent control systems for complex production systems. *Results.* The use of powder and composite materials, including nanomaterials, control of parameters and quality indicators must be ensured using intelligent control systems, which are based on modern non-contact, high-speed high-precision laser and fiber-optic sensors. *Conclusions.* The development of intelligent product quality management systems is impossible without the improvement of intelligent sensor systems that can facilitate data collection. Such sensors must have advanced interfaces and standardized data transmission formats.

Keywords: quality, detail, control, diagnostics, sensors, traditional technologies, additive (3D-printing), nanotechnology

For citation: Perevertov V.P., Kuzin N.A., Yurkov N.K. Quality of forming parts in the integration of hybrid technologies of transport engineering. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(1):72–80. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-1-9

Технологии «умных» производственных систем (УПС) эффективно применяются в машиностроении в виде гибких производственных систем (ГПС), которые состоят из трех подсистем: заготовительной обработки, включая обработку материалов давлением (ОМД), литейное, сварочное, переработка пластмасс, порошков и композитов, термическое производство и т.д., окончательной обработки – обработка материалов резанием (ОМР) и сборочной, объединенных единой транспортной и информационно-управляющей системами, интегрально связанной с конструированием и технологией изготовления изделий, что создает условия для взаимного проникновения подсистем и интеграции традиционных, аддитивных и нанотехнологий [1–13].

Аддитивные технологии (АТ) – формообразование детали основывается на послойном наращивании изделия струйным или лазерным способом (концентрированной энергией) по цифровой модели, а выпуск деталей с помощью АТ-объемной цифровой печати (3D-печать) позволяет снизить производственные расходы, так как не требует использования массивных заготовок из металла или пластика и последующего удаления излишков материала с помощью обработки материалов резанием (ОМР) для получения требуемой конфигурации; изготавливать детали любой сложности и применять их в диагностической системе ГПС; снизить массу детали и исключить отходы производства и т.д.

Нанотехнологии – совокупность методов обработки, изготовления, изменения состояния, свойств, формы сырья, материала, осуществляемых в процессе производства продукции в нанометровом диапазоне. «Сырьем» являются отдельные атомы, молекулярные системы, а не привычные в традиционной технологии микронные или макроскопические объемы материала. В отличие от традиционной технологии для нанотехнологии характерен «индивидуальный» подход, при котором внешнее управление достигает отдельных атомов и молекул, что позволяет создавать из них как «бездефектные» материалы с принципиально новыми физико-химическими и биологическими свойствами, так и новые классы устройств с нанометровыми размерами [10–13].

Особенности контроля качества в традиционном и аддитивном производствах – контролировать и диагностировать параметры (факторы), которые влияют на качество выходной продукции и надежность оборудования. При производстве деталей с помощью аддитивных технологий (АТ) мы не можем увидеть: качество 3D-печати внутри изделия (качество спекания порошка внутри), а контролируем только наружную поверхность детали и геометрию, потому что после процесса выращивания изделия, а также после различных процессов постобработки (термических, механических и др.) геометрия изделия может меняться, что необходимо учитывать и компенсировать при моделировании САД-модели; входной контроль и диагностика расходных материалов (порошковых композиций); контроль требований к сырью на соответствие реальным значениям.

Одним из основных элементов систем УПС и ГПС, определяющих их технические показатели и эффективность производства, являются быстродействующий исполнительный орган оборудования и датчики (сенсоры) – функциональные преобразователи (ФП) высокой точности и надежности, стабильности и быстродействия, унифицированные, с низкими массогабаритными показателями энергопотребления. Это заставляют искать возможности как конструктивно технологического совершенствования элементов и структурных схем известных ФП, так и создания новых методов их синтеза [4–14].

Применение порошковых, композиционных материалов и гибких технологий на их основе, включая наноматериалы [6–15], параметры которых необходимо контролировать и диагностировать с помощью современных датчиков и устройств, обеспечит качество формообразования деталей. В основе принципов выбора датчиков для технологий и оборудования для его осуществления лежит принцип максимального соответствия требований измерений и возможностей (характеристик) датчика. Адекватный выбор требует априорных знаний как об объекте измерений, так и о датчиках, из которых должен быть сделан выбор, включая интеллектуальные датчики (ИД). Если требуемого соответствия достичь не удастся, то необходимо убедиться, что требования к датчику являются принципиально реализуемыми, а для решения таких задач применять технологию промышленной компьютерной томографии (КТ) – метод восстановления внутренней структуры детали для отработки режимов синтеза технологий: каждое изделие уникально, как и все параметры для его изготовления и подобрать еще до формообразования (выращивания) изделия, чтобы сократить процент брака (негодной продукции) и сэкономить расходный материал.

Для управления сложными системами на основе контроля и диагностики параметров элементов с динамично изменяющимся техническим состоянием нужны распределенные компьютерные системы, способные решать задачи в режиме реального времени на основе применения интеллекту-

альных методов управления, распределенных вычислений и интеллектуальной (адаптивной) обработки информации. Интеллектуальными узлами систем управления являются компьютеры и контроллеры, датчики и исполнительные устройства. Системы сбора и обработки технологической информации требуют применения датчиков, способных выдавать сообщения об уровне сигналов, включении-выключении элементов технологического оборудования – исполнительных рабочих органов. Снижение стоимости микропроцессорных элементов и увеличение их функциональных возможностей, изменение элементной базы электронных устройств обработки сигналов первичных функциональных преобразователей (ФП) связано с появлением нового поколения ИД (рис. 1), которые за счет использования в них переработки информации приобретают новые функциональные возможности. Своим интеллектом датчики обязаны микропроцессорным технологиям, позволяющим устройству «изучать» условия, в которых оно работает. Являясь самообучающейся микропроцессорной системой, такой ИД способен обрабатывать большие объемы информации с высокой скоростью, удобен в установке, прост в настройке и в применении.

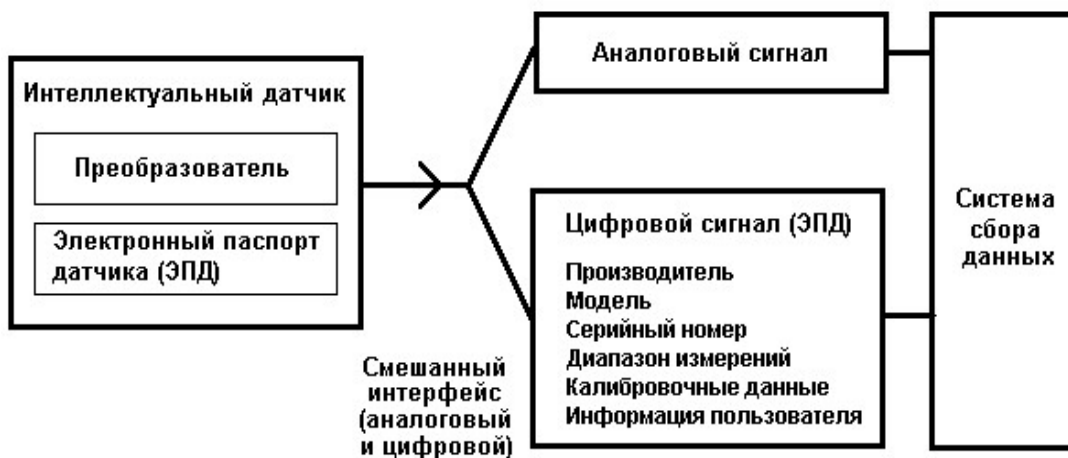


Рис. 1. Смешанный (аналоговый и цифровой) интерфейс интеллектуального датчика

Интеллектуальные датчики (ИД), получая сигнал от первичного ФП (сенсора), занимаются его обработкой и способны делиться информацией с другими интеллектуальными узлами системы автоматизации по цифровым каналам. Общим ИД с обычными датчиками являются небольшие размеры, так как они должны устанавливаться непосредственно на объекте. Место и число обслуживаемых датчиков и исполнительных механизмов в сложных системах управления динамичными объектами, информационно доступных центральной вычислительной системе управления, непрерывно увеличиваются. В информационно-управляющих системах динамичными объектами используются датчики измерения физических величин с различными цифровыми интерфейсами. К ним относятся датчики линейных и угловых перемещений, включая БВК на индуктивном, емкостном, магнитном и ультразвуковом принципах измерения, датчики усилий, давления и механического напряжения, расходомеры жидкости и газов, уровнемеры и датчики измерения объемов, угловых и линейных ускорений, инклинометры химических веществ, включая селективные и фотонные. С целью унификации многообразия датчиков и снижения стоимости регулировки сложными объектами к датчикам предъявляются требования по нормализации и линеаризации выходного сигнала, по унификации (метод кодирования). В результате унификации требований и особенностей эксплуатации систем управления (СУ) динамичными объектами (ДО) появилась необходимость разработки и изготовления специальной элементной базы для комплектации удаленных ИД и исполнительных механизмов (органов), которая позволит создавать «умные» периферийные устройства – всевозможные датчики физических величин со встроенной цифровой коррекцией и нормализацией выходного сигнала под стандартные интерфейсы, интеллектуальные силовые ключи с элементами защиты и самотестирования, интеллектуальные приводы на основе электронно-механических приводов и другие периферийные интеллектуальные исполнительные устройства, приводящие к децентрализации СУ и повышению надежности, а также уменьшению массогабаритных показателей СУ объектами.

Транспортное машиностроение является потребителем наноструктурированных материалов (стали и чугуны, титан и его сплавы, алюминиевые сплавы, керамика и пластмассы, порошковые

композиты, материалы с памятью и комплекующие наноизделия) [3–15]. Экономический эффект достигается от внедрения технологии нанесения износостойких нанопокровтий на режущие инструменты ОМР (сверла, фрезы и т.д.), штампы в технологиях обработки материалов давлением (ОМД), литейных технологиях формы, а также износостойких, коррозионностойких, жаростойких и водостойких покрытий деталей машин и механизмов для подвижного состава (ПС) и путевых машин (ПМ).

Наноструктурированная продукция (детали, узлы, агрегаты) триботехнического направления и технология нанесения нанопокровтий улучшит качественные показатели (прочность, твердость, пластичность, износ-, жаро- и коррозионная стойкость и т.д.) посредством введения того или иного элемента в альтернативный технологический процесс (литье, прессование, нанесение покрытий и т.д.), получения нанопорошков и нанопродуктов, в которых используются нанотехнологии, конструкционные композитные материалы на базе высокопрочных волокон для промышленного применения в авиастроении, железнодорожного транспорта, автомобильной и строительной-дорожной технике, для производства буровых и металлообрабатывающих инструментов. Наноструктурированная продукция инструментального и триботехнического назначения не уступает импортозамещающей продукции, обеспечивающей повышение качества и надежности машин и механизмов. Это стальные и керамические изделия конструкционного, инструментального и триботехнического назначения, нержавеющие оболочки, фитинги нового поколения и т.д.

Производство ультрадисперсных нанопорошков нашло применение в узлах трения всех видов оборудования: технологии восстановления изношенных узлов и механизмов промышленного оборудования до первоначальных параметров с помощью специальных ремонтно-восстановительных составов (РВС). Стоимость реновации (ремонта) по РВС технологии в 2–3 раза ниже, чем при использовании обычных технологий, что позволяет заменить плановые ремонты оборудования планово-предупредительной обработкой с увеличением межремонтного срока в 1,5–2 раза. Экономия электроэнергии и топлива после РВС составляет 10–15 %. Эта технология используется на предприятиях: Московской железной дороге и метрополитене, на «Салюте» и т.д. Эффект обеспечивается на металлической или керамической основе в результате образования в поверхностных слоях изделия нанофазных комплексов [10–13]. Наноструктуризация поверхностей деталей подшипников скольжения (качения) ПС и ПМ повышает их долговечность в 2–3 раза (с 150–200 до 500–600 млн циклов), долговечность инструмента возрастает в 5–6 раз. Порошки медных сплавов используются для производства противоизносных препаратов, включающие наночастицы, активные в зонах трения и покрытые специальной оболочкой, которые свободно циркулируют в масле, не взаимодействуя с ним, а используя его как средство доставки в зоны трения. Под действием высокой температуры и давления, которые необходимо контролировать и диагностировать, наночастицы активируются и начинают создавать на поверхности пар трения новый слой, который образуется при взаимодействии частиц препарата и продуктов износа металлической поверхности и принимает на себя всю нагрузку с поверхности пар трения. При этом наблюдаются процессы:

- 1) нормализация структуры кристаллической решетки материала;
- 2) снятие поверхностной усталости;
- 3) заполнение задиров.

На предприятиях РФ реализуются традиционные и аддитивные технологии на наноуровне:

- 1) электроэрозионная наноразмерная обработка рабочим инструментом;
- 2) электрохимическая отделочная и размерная обработка рабочих поверхностей нагруженных деталей машин и механизмов;
- 3) ионно-плазменное упрочнение инструмента, деталей машин с нанесением покрытия толщиной до 2 мкм, повышающие их работоспособность;
- 4) модификация поверхности за счет технологии скоростных химико-термических взаимодействий плазменных струй с поверхностью металла с целью повышения износ- и коррозионной стойкости, твердости легированных сталей;
- 5) закалка поверхности на глубину до 2 мм с возможностью регулирования параметров поверхностного слоя;
- б) ионно-плазменное осаждение с получением покрытия из спектра материалов любого состава с заданной структурой (нанокристаллической, аморфной, кристаллической, композитной);
- 7) применение полимерного нанокompозита и оборудования для синтеза нанокерамических покрытий;
- 8) создание технологии производства сверхвысокопрочных пружин и износостойких изделий из наноструктурных керамических и металлокерамических материалов;

9) создание монолитного твердосплавного металлорежущего инструмента с наноструктурированным покрытием и режущего инструмента из сверхтвердого материала и т.д.

Показатели качества (надежность, долговечность, ресурс и т.д.) деталей транспортного машиностроения, изготовленных по новой технологии, увеличиваются в 2–5 раз с нанометровой точностью при использовании оборудования электроискровой, электрохимической обработки, фрезерования и шлифования, полирования и др. [9–15].

Тренд – технология напыление наноматериалов на изделия с получением наноструктурированных покрытий, наносимых методами высокоскоростного газотермического напыления исходных материалов в виде растворов или суспензий, содержащих наноразмерные частицы позволяет получать покрытия с заданными характеристиками в условиях ОАО «РЖД». Нанотехнологии решают проблему трения и коррозии материалов путем применения наноразмерных частиц в ингибиторах коррозии нового материала, производства высокоэффективных антифрикционных, противоизносных и охлаждающих составов для ДВС, применение которых приводит к сокращению расхода топлива на 2–7 %, износу деталей в 1,5–2,5 раза, увеличению мощности двигателя на 2–4 %. Технология нанесения наноструктурированных покрытий увеличивает износостойкость инструмента в 2–2,5 раза и основывается на методе вакуумного осаждения из плазмы, получаемой в результате испарения материала, что повышает износостойкость инструмента, производить обработку металлов на более высоких скоростях и увеличивает срок службы инструмента. Улучшение технических характеристик (твердость, вязкость) инструмента с нанопокрытиями для технологий ОМР приводит к увеличению производительности труда и снижению себестоимости инструмента. По сравнению с инструментом без покрытия происходит увеличение объема снимаемого металла в 2–2,5 раза, стойкость между переточками и скорость резания возрастает в 1,5–2 раза [11–15].

Создание прецизионных, электрохимических станков и т.д. находит применение в двигателестроении, энергетике, инструментальном производстве для износостойких изделий из наноструктурированной керамики и металлокерамики, а к ним относятся изделия и узлы с уникальными свойствами: высокой прочностью, износостойкостью, устойчивостью к коррозии, теплостойкостью: подшипники скольжения и кольца торцовых уплотнений, инструмент, сменные пластины и т.д.

Для насосной техники (систем) выпускают из наноструктурных металлокерамик различные триботехнические изделия (узлы, подверженные трению и износу), работающие в сложных условиях эксплуатации и имеющие повышенную износостойкость; расширенный диапазон рабочих температур; химическую инертность, что позволяет повысить ресурс и надежность насосного оборудования на 20–30 %.

Выпуск керамического и металлокерамического режущего инструмента для ОМР металлов и композиционных материалов, характеризующихся высокой твердостью, прочностью и термостойкостью, позволит увеличить производительность обрабатывающего оборудования (основа ГПС), повысить точность геометрических параметров при обработке деталей. Режущий инструмент из нанопорошка кубического нитрида бора предназначен для использования в ОМР, обеспечивая повышение износостойкости и стойкости к абразивным материалам, а также увеличение производительности инструмента. Повышенные физические характеристики инструмента из нанопорошка кубического нитрида бора (микротвердость, износо- и теплостойкость) приводят к высокой производительности инструмента. При этом затраты на обработку деталей инструментом снижаются до 60 %, что важно при создании новых технологий ОМР ГПС [9–15]. Создание технологического оборудования для синтеза многофункциональных нанокерамических покрытий на алюминиевых и магниевых поверхностях, защищающих металлы от коррозии, что особенно важно в железнодорожном машиностроении. Покрытие наносится методом микродугового оксидирования (МДО), который позволяет формировать наноструктурированные керамикоподобные слои на поверхности алюминия, магния, титана, циркония и других металлов. В зависимости от условий обработки материала можно получать поверхности деталей различного назначения: износостойкие, коррозионно-защитные, электроизоляционные, теплостойкие или их сочетания [1–5, 10–15]. Технология производства сверхвысокопрочных пружин повышает их надежность, долговечность, релаксационную стойкость пружин путем операции горячей навивки пружины при оптимальном сочетании контролируемых параметров: температуры нагрева, степени деформации при навивке, схемы и режима охлаждения – закалки последовательно каждого витка навиваемой пружины для формирования наноразмерной структуры, обеспечивающей высокие прочностные характеристики пружин (рис. 2) с увеличенным сроком службы и уровнем допустимых напряжений, исключением их осадки и соударения витков, повышенной работоспособностью в условиях низких температур [11–15].

Сверхпрочные пружины: технология производства

Горячая навивка (используется при создании пружин для для ж/д подвижного состава, с/х техники и пр.)

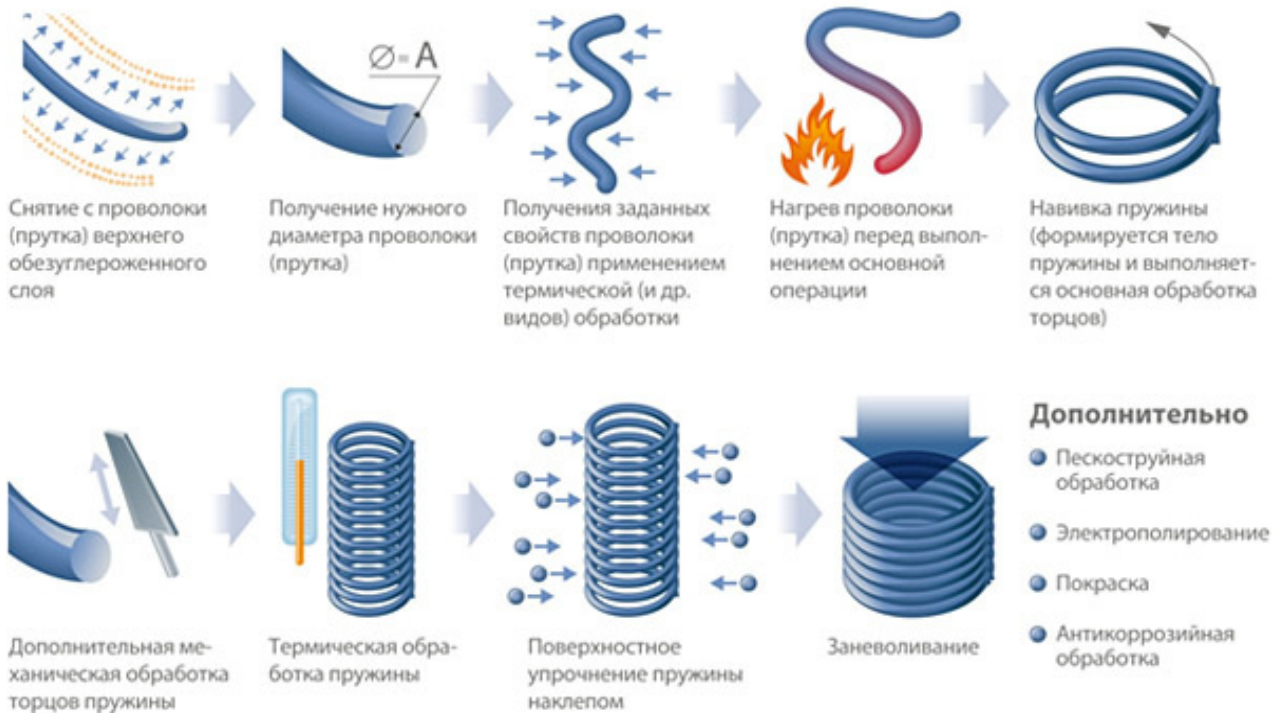


Рис. 2. Алгоритм технологии производства сверхпрочных пружин для подвижного состава и путевых машин

Для качественного измерения (контроля) массовой доли химических элементов в металлах и сплавах предназначен спектрометр лазерный портативный ЛИС-01, обеспечивающий высокую скорость при определении таких химических элементов, как С, Si, Mn, Cr, Ni, Fe, Mg, Al, V и т.д., применяющийся при сортировке сталей; стилоскопировании сварочных материалов; контроле качества химического состава и т.д. [11–15]. Для контроля температуры при обработке материалов разработаны новые бесконтактные, быстродействующие фотонно-селективные волоконно-оптические датчики- устройства типа ИРТ-1 [6–15].

Главное требование к элементной базе СУ динамичных объектов – качество, направленное на предотвращение аварий и уменьшение их последствий, требует увеличения количества автономных датчиков с развитой системой самодиагностики и диагностики при техническом обслуживании специалистами. В системах сбора и обработки информации число датчиков, поставляющих информацию о текущем состоянии объектов управления, повышается, увеличивается их точность и быстродействие, интенсивными становятся потоки информации.

Заключение

1. На железных дорогах РФ непрерывно растет объем грузовых и пассажирских перевозок, для выполнения которых требуется повышать скорости подвижного состава и их надежность для обеспечения качества услуг ОАО «РЖД» на основе применения порошковых и композиционных материалов и гибких технологий, включая наноматериалы, параметры показателей которых необходимо контролировать с помощью современных бесконтактных, быстродействующих, точных лазерных, волоконно-оптических датчиков и устройств. В основе выбора датчиков, включая интеллектуальные, для обеспечения контроля и диагностики лежит принцип максимального соответствия требований измерений и возможностей (характеристик) датчика.

2. В основе технологии производства сверхвысокопрочных пружин железнодорожного транспорта, повышающих надежность, долговечность и релаксационную стойкость пружин, лежит операция горячей навивки пружины при оптимальном сочетании контролируемых параметров: температуры нагрева, степени деформации при навивке, режима охлаждения – закалки последовательно

каждого витка навиваемой пружины. В результате формируются наноразмерные субструктуры, обеспечивающие высокие прочностные характеристики пружин с увеличенным сроком службы и уровнем допустимых напряжений, исключением их осадки и соударения витков, повышенной работоспособностью в условиях низких температур.

3. С ростом производительности микроконтроллеров и снижения их стоимости появляются замкнутые локальные СУ отдельными модулями технологических систем, роботизированные устройства, которые могут действовать автономно или под управлением внешней СУ. Развитие систем невозможно без совершенствования системы ИД, способных легко включиться в системы сбора данных, т.е. датчики должны обладать развитыми интерфейсами и стандартизированными форматами передачи данных.

Список литературы

1. Перевертов В. П., Андрончев И. К., Юрков Н. К. Система диагностирования и технического обслуживания НТТС и ПС в условиях РЖД // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2018. Т. 2. С. 93–95.
2. Перевертов В. П., Андрончев И. К., Абулкасимов М. М. Технология обработки материалов концентрированным потоком энергии // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 3. С. 69–79.
3. Перевертов В. П. Технологии конструкционных материалов. Ч. 2. Литейные и порошковые технологии. Лазерные технологии и обработки материалов резанием : учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. Самара : СамГУПС, 2018. 192 с.
4. Перевертов В. П. Технологии конструкционных материалов. Ч. 3. Технологии обработки материалов давлением : учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. Самара : СамГУПС, 2018. 154 с.
5. Перевертов В. П., Юрков Н. К., Пиганов М. Н. Методика расчета быстродействующего исполнительного органа КШМ с системой диагностического управления // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 3. С. 40–49.
6. Перевертов В. П., Андрончев И. К., Кузина Е. А. Компьютерное моделирование и аддитивные технологии в транспортном машиностроении // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 4. С. 48–57.
7. Перевертов В. П., Андрончев И. К. Технологические возможности концентрированных потоков энергии для формообразования деталей машиностроения // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 1. С. 71–83.
8. Перевертов В. П., Юрков Н. К., Андрончев И. К. Порошковые композиты и наноматериалы в гибких технологиях формообразования деталей машиностроения // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 2. С. 85–95.
9. Перевертов В. П., Бочаров Ю. А., Маркушин М. Е. Управление кузнечными машинами в ГПС : монография. Куйбышев : Кн. изд-во, 1987. 160 с.
10. Перевертов В. П. Качество управления гибкими технологиями : монография. Самара : СамГУПС, 2019. 270 с.
11. Перевертов В. П. Материаловедение и гибкие технологии : учебник. Самара : СамГУПС, 2020. 280 с.
12. Перевертов В. П. Диагностика и управление кузнечными машинами в гибких производственных системах : монография. Самара : СамГУПС, 2021. 291 с.
13. Перевертов В. П., Юрков Н. К., Романенко А. А. Нанотехнологии и качество деталей транспортного машиностроения // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2022. Т. 1. С. 39–42.
14. Перевертов В. П. Качество управления альтернативными технологиями формообразования деталей в «умных» производственных системах // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 4. С. 102–111.
15. Перевертов В. П., Андрончев И. К., Абулкасимов М. М. Качество продукции и услуг РЖД в сочетании с качеством управления // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2017. Т. 2. С. 116–120.

References

1. Perevertov V.P., Andronchev I.K., Yurkov N.K. System of diagnostics and maintenance of NTTS and PS in the conditions of Russian Railways. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2018;2:93–95. (In Russ.)
2. Perevertov V.P., Andronchev I.K., Abulkasimov M.M. Technology of processing materials with concentrated energy flow. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2015;(3): 69–79. (In Russ.)
3. Perevertov V.P. *Tekhnologii konstruksionnykh materialov. Ch. 2. Liteynye i poroshkovye tekhnologii. Lazernye tekhnologii i obrabotki materialov rezaniem: ucheb. posobie. 2-e izd., pererab. i dop. = Technologies of structural materials. Part 2. Foundry and powder technologies. Laser technologies and materials processing by cutting : textbook. 2nd ed., revised and supplemented*. Samara: SamGUPS, 2018:192. (In Russ.)

4. Perevertov V.P. *Tekhnologii konstruktivnykh materialov. Ch. 3. Tekhnologii obrabotki materialov davleniem: ucheb. posobie. 2-e izd., pererab. i dop. = Technologies of structural materials. Part 3. Technologies of materials processing by pressure : textbook. 2nd ed., revised and supplemented.* Samara: SamGUPS, 2018:154. (In Russ.)
5. Perevertov V.P., Yurkov N.K., Piganov M.N. Methodology for calculating a high-speed executive body of a KSM with a diagnostic control system. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2018;(3):40–49. (In Russ.)
6. Perevertov V.P., Andronchev I.K., Kuzina E.A. Computer modeling and additive technologies in transport engineering. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2019;(4):48–57. (In Russ.)
7. Perevertov V.P., Andronchev I.K. Technological capabilities of concentrated energy flows for shaping machine-building parts. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2020;(1):71–83. (In Russ.)
8. Perevertov V.P., Yurkov N.K., Andronchev I.K. Powder composites and nanomaterials in flexible technologies of forming machine-building parts. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2020;(2):85–95. (In Russ.)
9. Perevertov V.P., Bocharov Yu.A., Markushin M.E. *Upravlenie kuznechnymi mashinami v GPS: monografiya = Control of forging machines in GPS : monograph.* Kuybyshev: Kn. izd-vo, 1987:160. (In Russ.)
10. Perevertov V.P. *Kachestvo upravleniya gibkimi tekhnologiyami: monografiya = The quality of management of flexible technologies : monograph.* Samara: SamGUPS, 2019:270. (In Russ.)
11. Perevertov V.P. *Materialovedenie i gibkie tekhnologii: uchebnik = Materials science and flexible technologies : textbook.* Samara: SamGUPS, 2020:280. (In Russ.)
12. Perevertov V.P. *Diagnostika i upravlenie kuznechnymi mashinami v gibkikh proizvodstvennykh sistemakh: monografiya = Diagnostics and control of forging machines in flexible production systems : monograph.* Samara: SamGUPS, 2021:291. (In Russ.)
13. Perevertov V.P., Yurkov N.K., Romanenko A.A. Nanotechnology and quality of parts of transport engineering. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality.* 2022;1:39–42. (In Russ.)
14. Perevertov V.P. Quality of management of alternative technologies of forming parts in "smart" production systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2019;(4):102–111. (In Russ.)
15. Perevertov V.P., Andronchev I.K., Abulkasimov M.M. The quality of Russian Railways products and services in combination with the quality of management. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality.* 2017;2:116–120. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

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: vperevertov@yandex.ru

Николай Андреевич Кузин

студент,
Московский автодорожный институт
(технический университет)
(Россия, г. Москва, Ленинградский пр-т, 64)
E-mail: sputnik1985nk3y@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

Valeriy P. Perevertov

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

Nikolai A. Kuzin

Student,
Moscow Road Institute (Technical University)
(64 Leningradsky avenue, Moscow, 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 15.12.2022

Поступила после рецензирования/Revised 16.01.2023

Принята к публикации/Accepted 30.01.2023

АНАЛИЗ ОТКАЗОВ И ПОВРЕЖДЕНИЙ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЗА ПЕРИОД 2007–2020 гг.

С. А. Дмитриев¹, Е. С. Симонова²

^{1,2} Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия
¹DmitrievSA@mai.ru, ²simonkat12@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Выяснить основные причины отказов авиационных двигателей, приведших к авиационным происшествиям или катастрофам. Выявить наиболее часто встречающиеся неисправности и причины их возникновения, проанализировать полученные данные. *Материалы и методы.* По данным открытых источников проведена оценка основных причин неисправностей, выявленных в процессе эксплуатации, сделаны заключения и даны пояснения по конкретным группам повреждений. *Результаты и выводы.* К основным причинам отказов авиационных двигателей, наиболее часто встречающихся в эксплуатации, относятся человеческий фактор и функциональные отказы. Результаты работы могут быть использованы при анализе конкретной неисправности в совокупности отказов, при разработке новых изделий и при составлении программ обеспечения надежности.

Ключевые слова: авиационные двигатели, газотурбинные двигатели, надежность, отказы авиационных двигателей, причины отказов авиационных двигателей, авиационные происшествия, прочность

Благодарности: авторы выражают благодарность Имаеву Тахиру Фатеховичу – сотруднику ФАУ «ЦИАМ им. П. И. Баранова» и старшему преподавателю кафедры «Конструкция и проектирование двигателей» МАИ Берне Аркадию Львовичу за консультации и значимые замечания.

Для цитирования: Дмитриев С. А., Симонова Е. С. Анализ отказов и повреждений авиационных двигателей за период 2007–2020 годы // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 81–90. doi:10.21685/2307-4205-2023-1-10

FAILURES AND DAMAGES OF AERO ENGINES FROM 2007 TO 2020

S.A. Dmitriev¹, E.S. Simonova²

^{1,2} Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia
¹DmitrievSA@mai.ru, ²simonkat12@yandex.ru

Abstract. *Background.* The paper discloses sources of the aero engine failures that caused aero accidents or crashes. Also are highlighted the data on sources of the most frequent failures. *Materials and methods.* On the base of published materials the work disclosed the main sources of failure occurred in operation. The conclusions evaluate and explain specific groups of failures. *Results and conclusions.* The most usual aero engine failures in operation are human factor and malfunction. The work results may be applied to analysis of specific failures within a set of malfunctions, development of new products and creation of the reliability ensuring programs.

Keywords: aircraft engines, gas turbine engines, reliability, aircraft engine failures, causes of aircraft engine failures, aviation accidents, durability

Acknowledgements: the authors express their gratitude to Imaev Tahir Fatekhovich, an employee of the FAU "CIAM named after P. I. Baranov" and senior lecturer of the Department "Design and Engineering of Engines" MAI Berne Arkady Lvovich for consultations and significant comments.

For citation: Dmitriev S.A., Simonova E.S. Failures and damages of aero engines from 2007 to 2020. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(1):81–90. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-1-10

Введение

Надежность силовой установки в значительной степени определяет эксплуатационные качества летательного аппарата. Цель данной статьи – проанализировать основные причины отказов авиационных двигателей (АД), приведших к авиационному происшествию (АП) или катастрофе. Выявить наиболее часто встречающиеся неисправности и причины их возникновения, проанализировать полученные данные авиационных происшествий.

По данным Межгосударственного авиационного комитета (МАК), в гражданской авиации государств-участников межгосударственного Соглашения о гражданской авиации в период с 2007 по 2020 г. произошло 473 авиационных происшествия, из них 73 – из-за отказа или повреждения двигателя, в том числе 28 катастроф с гибелью 257 человек [1].

По данным NTSB (*National Transportation Safety Board* – Национальный совет по безопасности транспорта), в США за аналогичный период произошло 83 авиационных происшествия, из них 23 – из-за отказа или повреждения двигателя, в том числе 9 катастроф с гибелью 216 человек [2].

Следует отметить, что фирмы-изготовители зачастую не публикуют данные по отказам, в особенности связанным с конструктивно-технологическими несовершенствами. Поэтому приведенный в статье анализ, основанный на опубликованных данных, не должен считаться исчерпывающе полным. Кроме того, зачастую наблюдается цепь взаимосвязанных отказов и повреждений, поэтому при их анализе важно разделять первопричину и следствие данного отказа.

Распределение по причинам отказов и повреждений, выявленных при эксплуатации воздушных судов за период 2007–2020 гг., приведено на рис. 1.



Рис. 1. Распределение по причинам отказов и повреждений, выявленных при эксплуатации воздушных судов за период 2007–2020 гг.

Анализ причин АП по причине отказа двигателя

Рассмотрим и сопоставим причины отказов двигателей по данным Межгосударственного авиационного комитета (МАК) и Национального совета по безопасности транспорта (NTSB).

Анализируя основные группы причин авиационных происшествий, произошедших из-за неисправности в двигателе, можно увидеть, что по отчетам МАК преобладающей причиной АП в связи с отказом либо повреждением двигателя является человеческий фактор – 39 %. При этом на прочностные и функциональные отказы и повреждения приходится 40 %. Что касается происшествий, разобранных по данным NTSB, из-за ошибок людей произошло 17 % авиационных происшествий, а из-за отказов и повреждений систем – 59 %. Наглядно эти данные представлены на рис. 2.



Рис. 2. Распределение по основным группам отказов и повреждений по данным МАК (а) и NTSB (б)

Рассмотрим более детально каждую группу и входящие в них причины (рис. 3). Для наглядности для каждой группы причины и их количество сведены в таблицы. По данным таблиц построены диаграммы (табл. 1, 2).



Рис. 3. Прочностные отказы и повреждения

Таблица 1

Прочностные отказы и повреждения (МАК)

Наименование	Количество
1. Усталостные трещины и разрушения на лопатках компрессора (КНД, КВД), замках и дисках, приведшие к обрыву лопатки или диска	1
2. Усталостные трещины и разрушения на лопатках турбины, дисках турбины (обрыв лопатки, разрушение диска ТВД, ТНД, свободной турбины)	1
3. Прогар жаровой трубы (вследствие коррозии под напряжением в условиях нагрева материала, усталостные трещины на элементах камеры сгорания)	4
4. Повреждение лопастей винта	1
5. Полное или частичное разрушение воздушного фильтра	1
6. Повреждение редуктора (планетарных подшипников первой ступени)	1
7. Выход из строя цилиндра двигателя (усталостные трещины, плохое закрепление) или заклинивание клапанов цилиндра	4
8. Разрушение одной из деталей поршне-шатунной группы (усталостные трещины и разрушения)	5

Таблица 2

Прочностные отказы и повреждения (NTSB)

Наименование	Количество
1. Усталостные трещины и разрушения на лопатках компрессора (КНД, КВД), замках и дисках, приведшие к обрыву лопатки или диска	3
2. Усталостные трещины и разрушения на лопатках турбины, дисках турбины (обрыв лопатки, разрушение диска ТВД, ТНД, свободной турбины)	1
3. Разрушение винта (его крепления, одной из его деталей)	1
4. Выход из строя цилиндра двигателя (усталостные трещины, плохое закрепление) или заклинивание клапанов цилиндра	2
5. Разрушение одной из деталей поршне-шатунной группы (усталостные трещины и разрушения)	2

Одной из основных причин отказов по прочности являются: усталостные трещины на разных деталях двигателя, приводящие к разрушению этой детали.

Трещины и обрывы лопаток компрессора и турбин встречаются практически на всех типах газотурбинных двигателей (ГТД). Подавляющее большинство поломок компрессорных лопаток и очень многие поломки турбинных лопаток имеют усталостный характер. Трещины, а также поломки небольших частей пера лопаток обнаруживаются большей частью при осмотрах двигателей. Обрывы значительной части лопатки обнаруживаются сразу же в процессе работы, приводят к повышенным вибрациям двигателя, могут приводить к помпам компрессора и серьезным вторичным разрушениям. Этот отказ требует немедленного выключения двигателя. Трещины и обрывы лопаток приводят к необходимости досрочного снятия двигателя с эксплуатации, если невозможна замена поврежденной лопатки в эксплуатационных условиях.

Трещины и разрушения дисков турбин и компрессоров относятся к наиболее опасным видам отказов, так как при обрыве части диска разрушения во многих случаях обычно не локализируются в пределах корпуса двигателя. Часто в процессе развития трещины в диске происходит возрастание уровня общих вибраций двигателя (с роторной частотой), что может служить диагностическим признаком этого отказа и при своевременном выключении двигателя позволяет предотвратить разрушение диска. При обнаружении трещины в диске двигатель должен, как правило, сниматься с эксплуатации. Особенно опасны разрушения турбинных дисков, так как они значительно массивнее компрессорных.

Трещины и прогары жаровых труб камер сгорания чаще всего могут быть обнаружены при осмотре двигателя эндоскопами. При значительных разрушениях жаровых труб их отделившиеся элементы конструкции могут повредить лопатки турбины. Поврежденные жаровые трубы или заменяются или, если дефект не развивается, могут при наличии регулярного контроля использоваться и далее. Повреждения жаровых труб обычно происходят от термических напряжений, вызываемых высокими градиентами температуры, а также резкими ее изменениями при запусках, приемистостях, остановках [3].

Функциональные отказы и повреждения

Виды функциональных отказов и повреждений систем отражены на рис. 4 и в табл. 3 и 4.

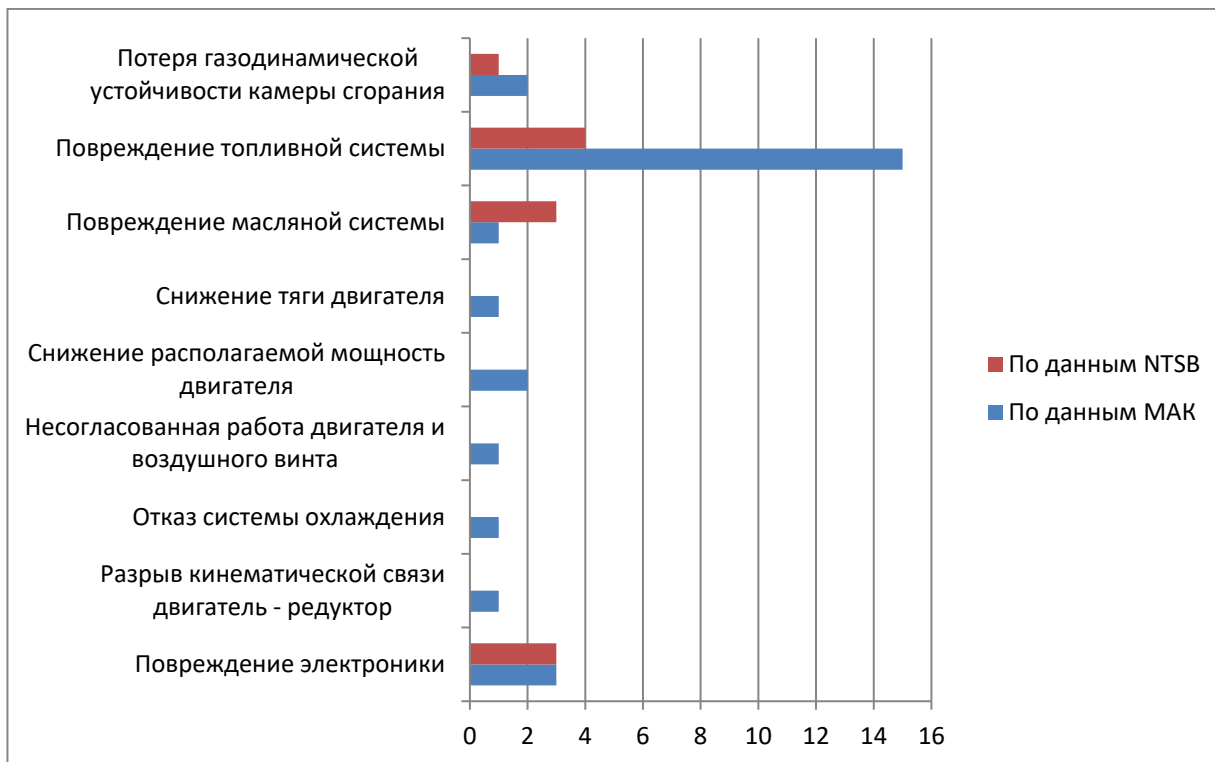


Рис. 4. Функциональные отказы и повреждения

Таблица 3

Функциональные отказы и повреждения (МАК)

Наименование	Количество
1. Потери газодинамической устойчивости и срыва пламени (погасания) в камерах сгорания при выполнении полета в условиях обледенения (в том числе обледенения карбюратора из-за неправильного управления теплом)	2
2. Повреждение топливной системе (переобогащение топливовоздушной смеси при включенных обогатителях карбюраторов, разрушение бензопровода при отделении двигателя от планера ВС, негерметичность ТС, отказ дополнительного электрического топливного насоса, повышенное сопротивление установленных бумажных топливных фильтров, образование воздушной пробки, оголение заборного устройства топливного бака, прекращение подачи топлива при отрицательных перегрузках, засорение фильтров, повреждение трубопровода)	15
3. Повреждение масляной системы (раздутие масляного бака)	1
4. Снижение тяги двигателя на взлетном режиме	1
5. Снижение мощности двигателя (несоответствие мощности на валу двигателя потребной для выполнения горизонтального полета)	2
6. Несогласованная работа двигателя, воздушного винта, регулятора постоянных оборотов и масла	1
7. Отказ системы охлаждения	1
8. Разрыв кинематической связи: главный редуктор – двигателя	1
9. Повреждение электроники (повреждения изоляции соединительного провода контактной группы магнето, ненормальная работа электронного блока управления двигателем, нарушения работоспособности электронного регулятора двигателя)	3

Таблица 4

Функциональные отказы и повреждения (NTSB)

Наименование	Количество
1. Повреждение электроники (трещины на микросхеме, выход из строя управляющего вала генератора переменного тока, отказ электронного блока управления двигателя (неисправность в батарейном отсеке ВСУ))	3
2. Повреждение масляной системы (масляное голодание из-за утечки или потери давления подачи масла в двигатель или загрязнения система подачи масла мусором или другой причины, выход из строя масляного насоса)	3
3. Отказ топливной системы (обледенение ТС)	4
4. Повреждение камеры сгорания	1

Очень важное значение в функционировании силовой установки имеют системы (масляная, топливная, охлаждения), обеспечивающие стабильную работу двигателя. Также работа двигателя непосредственно зависит от работы электронных систем, которые контролируют и регулируют параметры по тракту двигателя.

Во многих случаях отказы системы регулирования устраняются в эксплуатации заменой агрегатов или перерегулированием. Но возможны случаи, когда двигатель приходится досрочно снимать из-за отказов системы регулирования, например, при большом забросе температуры газа.

Человеческий фактор

Также к причинам отказов и повреждений систем относят человеческий фактор, более подробно раскрытый на рис. 5 и в табл. 5 и 6.



Рис. 5. Человеческий фактор

Таблица 5

Человеческий фактор (МАК)

Наименование	Количество
1. Ненадлежащее техническое обслуживание двигателя, ремонт или неправильная установка оборудования, которые привели к выходу из строя элементов двигателя	6
2. Нарушение правил эксплуатации	1
3. Осуществление сборки и обслуживания ВС не сертифицированными специалистами	6
4. Нарушение технологии и контроля качества при изготовлении двигателя и его элементов	2
5. Превышение сроков эксплуатации (в том числе за пределами межремонтного установленного срока)	1
6. Неправильные действия службы эксплуатации ЛА и двигателей	4
7. Неправильная подача топлива в двигатель (нехватка топлива во время полета, использование топлива низкого качества, обледенение топливной системы, загрязнение топливной системы, попадание воды в топливную систему)	7
8. Неправильные действия пилота, инструктора или экипажа	13

Таблица 6

Человеческий фактор (NTSB)

Наименование	Количество
1. Ненадлежащее техническое обслуживание двигателя, ремонт или неправильная установка оборудования, которые привели к выходу из строя элементов двигателя	1
2. Превышение сроков эксплуатации (в том числе за пределами межремонтного установленного срока)	1
3. Неправильная подача топлива в двигатель (нехватка топлива во время полета)	1
4. Неправильные действия пилота, инструктора или экипажа	2

Для обеспечения безопасности полетов наземная инженерно-техническая служба и экипажи должны выполнять эксплуатацию техники в соответствии с предписанной документацией (инструкциями, регламентами, НПП (наставление по производству полетов)).

Другие причины отказов

Также следует обратить внимание на другие причины отказов и повреждений систем (рис. 6, табл. 7, 8).



Рис. 6. Другие причины отказов

Таблица 7

Другие причины отказов (МАК)

Наименование	Количество
1. Попадание в воздухозаборник постороннего предмета, в том числе птицы	4
2. Производственный дефект	1
3. Дросселирование двигателя, вследствие отказа системы управления (СУ)	1
4. Несогласованная работа двигателей	1
5. Помпаж двигателя	1
6. Выключение двигателей системой защиты свободной турбины	1
7. Причину выяснить не удалось (причина не может быть определена, либо не указана)	7

Таблица 8

Другие причины отказов (NTSB)

Наименование	Количество
1. Попадание в воздухозаборник постороннего предмета, в том числе птицы.	2
2. Производственный дефект	1
3. Причину выяснить не удалось (причина не может быть определена либо не указана)	1

Повреждение лопаток компрессора посторонними предметами является частой причиной досрочного съема двигателей. С мощной струей воздуха, засасываемого газотурбинным двигателем, различные твердые частицы могут попадать на вход в компрессор и, встречаясь с лопатками, имеющими окружные скорости до 400...500 м/с и выше, наносить им серьезные повреждения; эти повреждения (забоины) наиболее опасны на кромках в корневых сечениях [4]. Забоины на лопатках при их обнаружении тщательно выводятся. Если это невозможно без заметного снижения усталостной прочности лопатки, двигатель снимается для замены поврежденных лопаток. Попадающие в двигатель посторонние предметы могут повреждать не только первые ступени компрессора, но и проходить весь тракт, вплоть до последних ступеней.

Недостаточно тонкая фильтрация топлива, заправляемого в расходные баки объекта, на котором используется газотурбинный двигатель, – одна из частых причин отказов систем регулирования. Наличие механических примесей и воды в топливе пагубно сказывается на надежности прецизионных элементов (рис. 7, 8) [6].

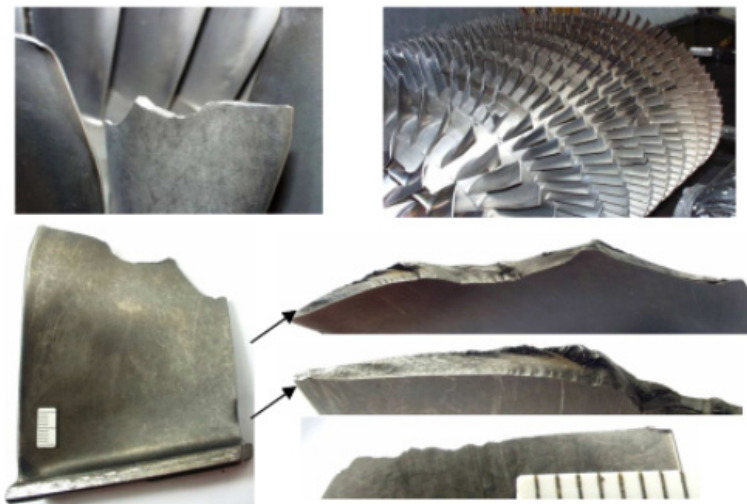


Рис. 7. Результаты повреждения газоздушного тракта двигателя по причине помпажа из-за обрыва пера лопатки 3-й ступени компрессора высокого давления в результате развития усталостного разрушения вследствие повреждения входной кромки лопатки посторонним предметом [3]

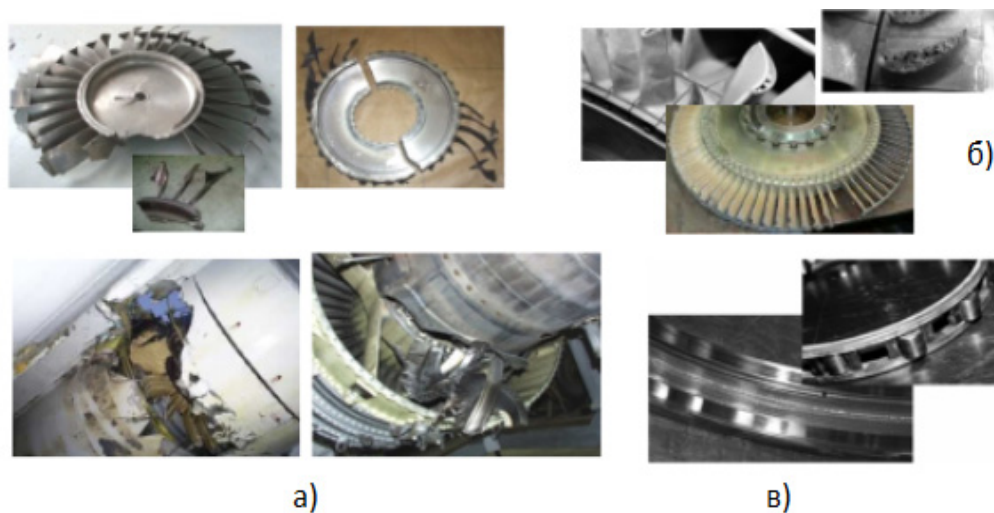


Рис. 8. Виды отказов авиационного газотурбинного двигателя 3-го поколения Д-30КУ-154, относящиеся к категориям: *а* – опасных или напрямую влияющих на безопасность полетов (разрыв дисков первой ступени компрессора низкого давления и первой ступени компрессора высокого давления); *б* – влияющих на выполнение задания и приводящих к досрочному съему двигателя с эксплуатации (обрыв рабочей лопатки 1-й ступени турбины высокого давления); *в* – износ (выкрашивание) беговых дорожек и роликов межвального подшипника турбины [3]

Заключение

В настоящее время анализ безопасности конструкции (*Safety Analysis*) или анализ рисков (*Risk Analysis*) разрабатываемой (модернизируемой) конструкции становится обязательным требованием процедуры сертификации типа газотурбинного двигателя (ГТД) коммерческой транспортной авиации и ГТД промышленного применения [3].

На основе представленных данных можно выделить ряд основных или наиболее часто повторяющихся причин отказов. К таковым относятся: усталостные трещины и разрушения дисков и лопаток компрессоров и турбин, трещины и прогары жаровых труб камер сгорания, повреждение и отказы элементов топливной системы, повреждение электросистем, повреждение лопаток компрессора посторонними предметами.

Так как при эксплуатации авиадвигателей в значительном числе случаев имеет место циклическое нестационарное нагружение, то для наиболее нагруженных их зон становится характерным наличие как статических, так и циклических упругих и упругопластических деформаций. При таких режимах деформирования анализ условий образования предельных состояний в материале по воз-

никновению трещин или по окончательному разрушению в процессе проектирования является необходимым этапом в процедурах обоснования безопасных параметров последующей эксплуатации.

В общем случае анализ повреждаемости узлов и агрегатов авиадвигателей в процессе эксплуатации и условий их перехода в критические предельные состояния в результате многофакторных иницирующих воздействий основывается на расчетно-экспериментальных методах определения прочности, ресурса, надежности, живучести и безопасности (рис. 9).



Рис. 9. Структура анализа условий достижения предельных состояний

Если при отработке двигателя преимущественно проявляется какой-то определенный отказ, то это обычно является основанием для перепроектирования соответствующего элемента с целью устранения причины, вызывающей этот отказ. Поэтому обычно трудно назвать несколько каких-то типичных причин отказов, которые можно было бы считать ведущими причинами отказов ГТД. Вследствие высокой напряженности элементов конструкции газотурбинного двигателя, интенсивности тепловых и газодинамических процессов, в нем происходящих, сложности системы автоматического управления двигателем при эксплуатации ГТД разных типов приходится сталкиваться с большим многообразием причин отказов. На практике приходится иметь дело с причинами отказов ГТД, связанными с прочностью (статической и динамической) нагруженных деталей, с рабочим процессом в основных узлах двигателя, с характером процессов его управления, со свойствами элементов, входящих в системы двигателя (такие как системы смазки, регулирования, топливопитания, зажигания и др.), с особенностями его производства, с характером его эксплуатации. Теоретически выделяют нескольких больших групп причин отказов – конструктивных, производственно-технологических и т.д. На практике в ряде случаев бывает трудно четко разделить эти причины. Например, поломка какой-либо детали может быть связана с тем, что к ее недостаточной конструкционной прочности добавилось какое-то производственное отклонение. Не всегда удается однозначно квалифицировать физическую причину отказа. Учитывая указанные обстоятельства, дать сколько-нибудь строгую и полную квалификацию физических причин отказов ГТД затруднительно [3].

В результате работы выявлены и проанализированы основные причины отказов авиационных двигателей, наиболее часто встречающиеся неисправности и причины их возникновения. Работу такого типа необходимо проводить периодически для получения полноценных и достоверных данных в текущий момент времени, использовать полученные материалы при анализе конкретной неисправности в совокупности отказов, при разработке новых изделий и при составлении программ обеспечения надежности.

Список литературы

1. Фролов М. А. Повышение надежности информационно-измерительной управляющей системы двигательной установки // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 2. С. 47–53.
2. Болознев В. В., Застела М. Ю., Мирсаитов Ф. Н. К проблеме функциональной диагностики гозотурбинного двигателя по спектрам 3D-вибраций // Надежность и качество сложных систем. 2016. № 1. С. 79–85.
3. Сарычев С. В. Методологические основы оценки технических рисков системы управления безопасностью полетов при проектировании, производстве и серийной эксплуатации ГТД : дис. ... д-ра техн. наук. М., 2002.
4. Лаврик В., Рубцов И., Шершер Э. Летчик, внимание – птицы! М. : Воениздат, 1970.
5. Махутов Н. А., Гаденин М. М., Романов А. Н. Фундаментальные основы определения прочности, ресурса, живучести и безопасности авиадвигателей // Авиадвигатели XXI века : Всерос. науч.-техн. конф. (Москва, ЦИАМ имени П. И. Баранова, 24–27 ноября 2015 г.). М., 2015. С. 467–469.
6. Махутов Н. А. Прочность и безопасность: фундаментальные и прикладные исследования. Новосибирск : Наука, 2008. 528 с.

References

1. Frolov M.A. Improving the reliability of the information and measurement control system of the propulsion system. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2015;(2):47–53. (In Russ.)
2. Boloznev V.V., Zastela M.Yu., Mirsaitov F.N. On the problem of functional diagnostics of a gas turbine engine by 3D vibration spectra. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2016;(1):79–85. (In Russ.)
3. Sarychev S.V. Methodological foundations of the assessment of technical risks of the flight safety management system in the design, production and serial operation of the gas turbine engine. DSc dissertation. Moscow, 2002. (In Russ.)
4. Lavrik V., Rubtsov I., Shersher E. *Letchik, vnimanie – pitsy! = Pilot, attention – birds!* Moscow: Voenizdat, 1970. (In Russ.)
5. Makhutov N.A., Gadenin M.M., Romanov A.N. Fundamental principles of determining the strength, resource, survivability and safety of aircraft engines. *Aviadvigateli XXI veka: Vseros. nauch.-tekhn. conf. (Moskva, TsIAM imeni P.I. Baranova, 24–27 noyabrya 2015 g.) = Aircraft engines of the XXI century : All-Russian scientific-technical. conf. (Moscow, CIAM named after P. I. Baranov, November 24–27, 2015)*. Moscow, 2015:467–469. (In Russ.)
6. Makhutov N.A. *Prochnost' i bezopasnost': fundamental'nye i prikladnye issledovaniya = Strength and safety: fundamental and applied research*. Novosibirsk: Nauka, 2008:528. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Сергей Александрович Дмитриев

старший преподаватель, заведующий лабораторией
кафедры конструкции и проектирования двигателей,
Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)
(Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4)
E-mail: DmitrievSA@mai.ru

Sergey A. Dmitriev

Senior lecturer, head of the laboratory
of the sub-department of engine design and engineering,
Moscow Aviation Institute
(National Research University)
(4 Volokolamskoe highway, Moscow, Russia)

Екатерина Сергеевна Симонова

студентка,
Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)
(Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4)
E-mail: simonkat12@yandex.ru

Ekaterina S. Simonova

Student,
Moscow Aviation Institute
(National Research University)
(4 Volokolamskoe highway, Moscow, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 15.12.2022

Поступила после рецензирования/Revised 20.01.2023

Принята к публикации/Accepted 10.03.2023

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

DIAGNOSTIC METHODS FOR ENSURING RELIABILITY AND QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

УДК 519.24; 53; 57.017

doi:10.21685/2307-4205-2023-1-11

НЕЙРОСЕТЕВОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ БИОМЕТРИИ В КОД АУТЕНТИФИКАЦИИ: ДОПОЛНЕНИЕ ЭНТРОПИИ ХЭММИНГА ЭНТРОПИЕЙ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ РАЗРЯДАМИ

А. И. Иванов¹, А. П. Иванов², К. А. Горбунов³

¹ Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт, Пенза, Россия

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

¹ivan@pniei.penza.ru, ²ap_ivanov@pnzgu.ru, ³kirill.gobunov@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматривается проблема вычисления энтропии кодов длиной в 256 бит с зависимыми разрядами на малых тестовых выборках, состоящих из 20 примеров. *Материалы и методы.* Предложено оценивать энтропию выходных кодов нейросетевого преобразователя через вычисление взаимных коэффициентов корреляции кодовых последовательностей длиной в 256 бит, полученных для примеров одного образа «Чужой». *Результаты.* Показано, что предложенный метод существенно точнее использовавшегося ранее метода оценки через вычисление математического ожидания и стандартного отклонения расстояний Хэмминга для одного и того же образа «Чужой». *Выводы.* Полученные результаты позволяют ставить вопрос о корректировке в ближайшем будущем национального стандарта ГОСТ Р 52633.3 через введение в него дополнительного раздела, касающегося вычисления корреляционной энтропии.

Ключевые слова: тестирование на малых выборках, искусственные нейроны, преобразование биометрии в код

Для цитирования: Иванов А. И., Иванов А. П., Горбунов К. А. Нейросетевое преобразование биометрии в код аутентификации: дополнение энтропии хэмминга энтропией корреляционных связей между разрядами // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 91–98. doi:10.21685/2307-4205-2023-1-11

NEURAL NETWORK CONVERSION OF BIOMETRY INTO AUTHENTICATION CODE: ADDITION OF HAMMING ENTROPY WITH ENTROPY OF CORRELATION RELATIONS BETWEEN DISCHARGES

A.I. Ivanov¹, A.P. Ivanov², K.A. Gorbunov³

¹ Penza Research Institute of Electrical Engineering, Penza, Russia

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

¹ivan@pniei.penza.ru, ²ap_ivanov@pnzgu.ru, ³kirill.gobunov@mail.ru

Abstract. *Background.* The problem of calculating the entropy of 256-bit codes with dependent bits on small test samples consisting of 20 examples is considered. *Materials and methods.* It is proposed to estimate the entropy of the output codes of the neural network transformer by calculating the mutual correlation coefficients of the code se-

quences 256 bits long, obtained for examples of one “Alien” image. *Results*. It is shown that the proposed method is much more accurate than the previously used estimation method by calculating the mathematical expectation and standard deviation of Hamming distances for the same “Alien” image. *Conclusions*. The results obtained make it possible to raise the question of adjusting the national standard GOST R 52633.3 in the near future through the introduction of an additional section into it concerning the calculation of the correlation entropy.

Keywords: small sample testing, artificial neurons, biometrics-to-code conversion

For citation: Ivanov A.I., Ivanov A.P., Gorbunov K.A. Neural network conversion of biometry into authentication code: addition of hamming entropy with entropy of correlation relations between discharges. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(1):91–98. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-1-11

Введение

При классическом тестировании стойкости биометрической защиты к атакам подбора международный стандарт [1] рекомендует использовать правило 30-кратной избыточности тестовой базы¹. Наиболее стойким к атакам подбора сегодня считается рисунок радужной оболочки глаза [1, 2]. Будем исходить из того, что тестируемый рисунок радужной оболочки глаза дает вероятность ошибок второго рода $P_2 \approx 10^{-14}$. Тогда 30-кратное увеличение приводит к необходимости использовать тестовую базу размерами $10^{15.5}$ биометрических образов. Создать такую тестовую базу технически невозможно, так как все население Земли составляет не более 8 миллиардов, т.е. сбор радужных оболочек всех людей даст базу в 16 миллиардов, тогда как необходима тестовая база примерно в миллион раз больше.

Выход из создавшегося положения только один, необходимо скрещивать между собой реальные биометрические образы и получать от них синтетические образы-потомки². В этом случае мы можем получить реальный объем в $10^{15.5}$ тестовых образов «Чужой».

Наряду с проблемами синтеза дополнительных биометрических образов возникает еще одна проблема их последующего хранения. Если предположить, что на хранение одного биометрического шаблона рисунка радужной оболочки глаза требуется 32 Кбайт, то общий объем долговременной памяти может составить 10^{17} Кбайт или 10^{11} Гбайт. Хранение тестовой информации столь значительного объема само по себе является сложной технической задачей.

Еще одной дополнительной проблемой являются законодательные ограничения, введенные большинством стран. Так, в России для сбора и хранения персональных биометрических данных требуется письменное согласие их владельцев, что делает юридически ущербным даже выполнение лабораторных работ по биометрии.

Обойти эту юридическую проблему можно воспользовавшись средой моделирования «БиоНейроАвтограф» [3, 4]. Эта среда моделирования позволяет преобразовывать динамику рукописных образов человека в 416 биометрических параметров. Далее эти данные используются для обучения нейросети алгоритмом ГОСТ Р 52633.5 в код ключа аутентификации длиной 256 бит³. Примеры экранных форм среды моделирования приведены на рис. 1.

Законодательные ограничения снимаются тем, что студент работает только со своими биометрическими данными. После выполнения лабораторных работ он может удалить свои персональные биометрические параметры. Нет необходимости при тестировании формировать и хранить большие тестовые базы биометрических образов «Чужой».

Заметим также, что алгоритм обучения ГОСТ Р 52633.5 обеспечивает равновероятные значения состояний «0» и состояний «1» в каждом из 256 разрядов выходного кода, если на входы обученной нейросети подавать примеры случайных образов «Чужой»³. Если мы попытаемся оценить полную энтропию кодов в первом приближении, вычислив энтропию каждого разряда и сложив частные энтропии разрядов, то получим предельное значение оценки энтропии в 256 бит. Такая предельная энтропия соответствует вероятности угадывания ключа с первой попытки на уровне

¹ ГОСТ Р ИСО/МЭК 19795-1–2007. Автоматическая идентификация. Идентификация биометрическая. Эксплуатационные испытания и протоколы испытаний в биометрии. Часть 1. Принципы и структура.

² ГОСТ Р 52633.2–2010. Защита информации. Техника защиты информации. Требования к формированию синтетических биометрических образов, предназначенных для тестирования средств высоконадежной биометрической аутентификации.

³ ГОСТ Р 52633.5–2011. Защита информации. Техника защиты информации. Автоматическое обучение нейросетевых преобразователей биометрия-код доступа.

$P_2 \approx 10^{-85.3} \approx 2^{-256}$. Столь малые величины не сопоставимо меньше реальных оценок и являются следствием пренебрежения значительными корреляционными связями между разрядами исследуемых кодов.

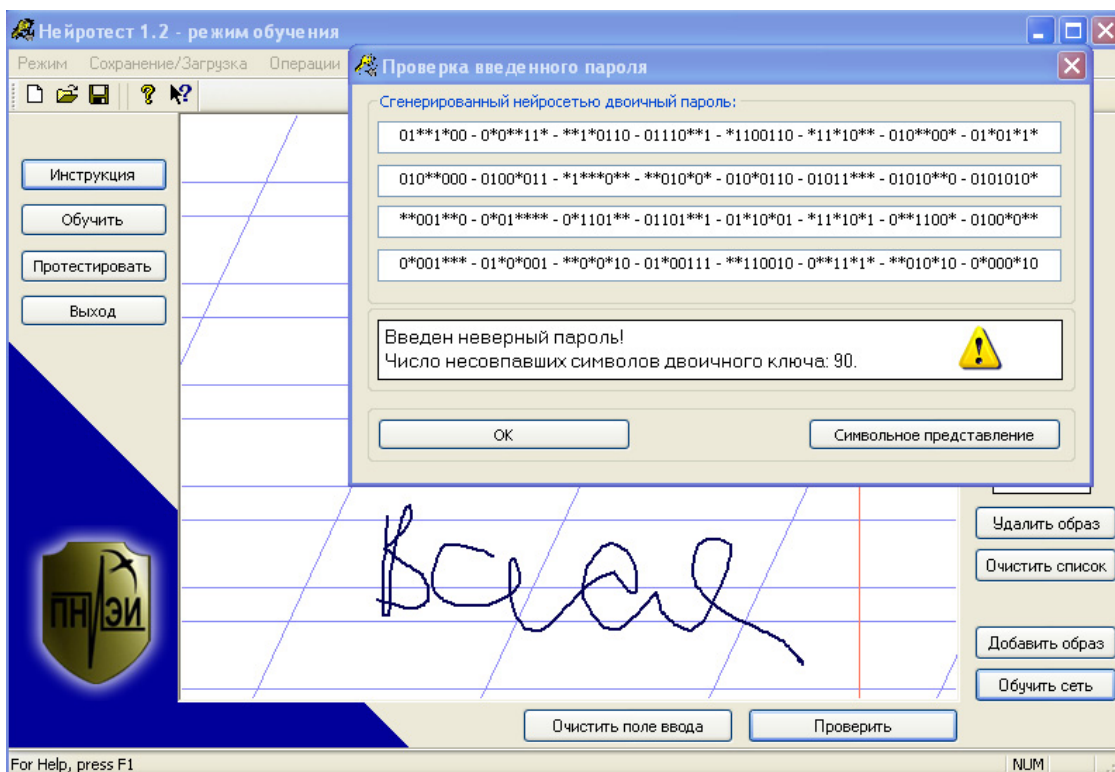


Рис. 1. Режим «Проверить» рукописное слово «Вася» нейросетью, обученной распознавать слово «Ленза» (неправильные биты ключа помечены звездочками)

Экономия памяти и сокращение времени при тестировании обученной нейросети на малых выборках в пространстве расстояний Хэмминга

Для того, чтобы оценить реальное число выходных классов нашей нейросетевой конструкции, следует воспользоваться рекомендациями ГОСТ Р 52633.3 и перейти от анализа статистик появления обычных кодов к анализу статистик расстояний Хэмминга между кодами¹:

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

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

В случае, если мы используем достаточно большое число случайных рукописных образов «Чужой», то мы получим дискретное распределение расстояний Хэмминга с практически нормальным распределением. Распределение расстояний Хэмминга стремится к нормальному из-за того, что 256-кратное суммирование случайных состояний (1) является хорошим нормализатором по «центральной предельной теореме статистики».

Пользуясь гипотезой нормальности, мы можем по математическому ожиданию и стандартному отклонению оценить вероятность, когда код «Чужой» даст полное совпадение с кодом «Свой». В рассматриваемом приложении есть специальный режим «Операции» → «Тестирование на тестовых образах» → «Открыть». В этом случае появляется форма отчета о вычислениях, приведенная на рис. 2.

¹ ГОСТ Р 52633.3–2011. Защита информации. Техника защиты информации. Тестирование стойкости средств высоконадежной биометрической защиты к атакам подбора.

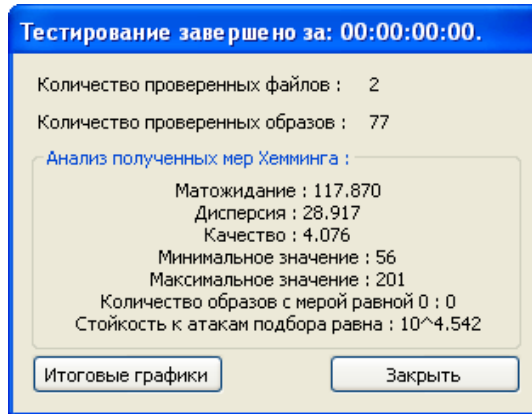


Рис. 2. Экранная форма статистик нейросетевого классификатора, отображающая результат вычислений по 77 тестовым образам «Чужой», $10^{4.542}$ – попытка атаки случайной подстановки может привести к удаче

Последнее означает, что исследуемая нейросеть «Пенза» способна различать между собой примерно $10^{4.54} \approx 2^{15}$ классов рукописных образов. Для этого числа классов достаточно коротких кодов длиной в 15 бит. Реально наблюдаемый 256-битный выходной код нейросети избыточен. Его 17-кратная избыточность может быть использована для корректировки случайно возникающих редких ошибок в коде в «Свой» [5].

В первом приближении можно считать, что энтропия выходных кодов нейросети должна составлять примерно 15 бит вместо 256 «видимых» бит. Еще одним важным моментом является то, что энтропия каждого образа «Чужой» будет разной. Эта ситуация отображена на рис. 3.

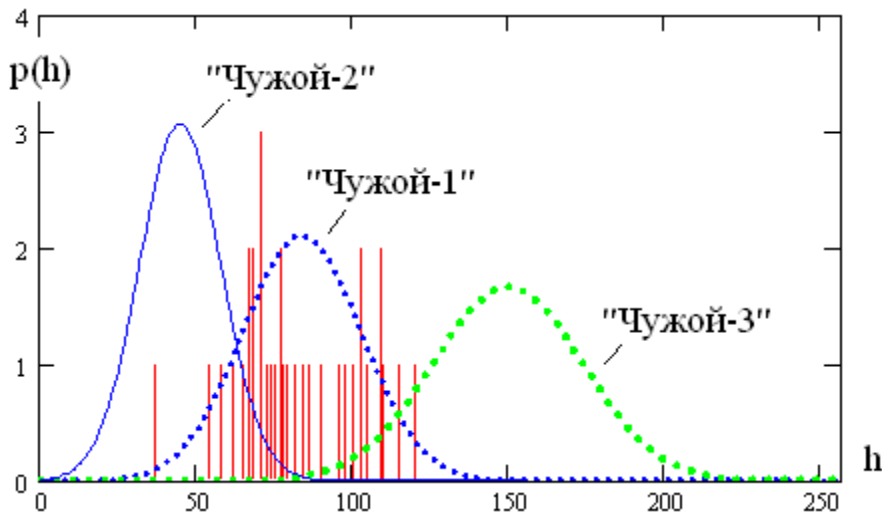


Рис. 3. Эффект взаимной сортировки биометрических образов в пространстве расстояний Хэмминга

Чем дальше математическое ожидание расстояний Хэмминга от точки $h = 0.0$ и чем меньше стандартное отклонение $\sigma(h)$, тем выше энтропия кодов исследуемого биометрического образа «Чужой». В связи с этим, рассчитав энтропию для группы образов «Чужой», мы легко можем их взаимно упорядочить.

В рамках гипотезы нормального распределения расстояний Хэмминга энтропия образов «Чужой» вычисляется по следующей формуле:

$$\begin{cases} P_2(h) = \frac{1}{\sigma(h)\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left\{-\frac{(u - E(h))^2}{2(\sigma(h))^2}\right\} du; \\ H("x_1, x_2, \dots, x_{256}") \approx -\log_2(P_2(h)). \end{cases} \quad (2)$$

Для нас принципиально важным является то, что вычисление энтропии длинных кодов по Шеннону является задачей экспоненциальной вычислительной сложности [6]. Энтропия, оценивае-

мая в пространстве расстояний Хэмминга (2) является задачей с линейной вычислительной сложностью. При переходе от обычного наблюдения длинных кодов в пространство расстояний Хэмминга наблюдается гигантское ускорение вычислений энтропии.

Если бы мы решили оставаться в рамках классической статистики, то для корректного вычисления вероятности ошибок второго рода P_2 (ошибочного признания образа «Чужой» как образ «Свой») нам пришлось бы использовать примерно 100 000 примеров образов «Чужой». Если же мы перейдем в пространство расстояний Хэмминга (1), то для вычисления математического ожидания $E(h)$ и стандартного отклонения $\sigma(h)$ достаточно 20 случайно выбранных примеров образов «Чужой». Мы наблюдаем эффект сокращения требуемого объема памяти примерно в 5000 раз и во столько же раз ускорение вычислений.

Экономия памяти и сокращение времени при тестировании обученной нейросети на малых выборках в пространстве корреляционной сцепленности разрядов длинных кодов

В среде моделирования «БиоНейроАвтограф» предусмотрен файл «testKeys.txt», где записываются двоичные ключи, полученные на 256 выходах нейросети при ее тестировании. На рис. 4 приведены два ключа-отклика нейросети «Пенза», полученные при предъявлении двух примеров одного образа «Хонер».

Двоичный ключ:

```
010110000111101001100111110100110101101001101011001000100101110001110111101011100
11100100001010011101001110000100101001101000110101100101100100111111000000011001
010010010101100100101001110010010110010101001001100110010000110110100101000111010
0110101001010
```

Двоичный ключ:

```
10011000111101100100010111010101110100101110100100101000110011101010111100111110
010111100010011110010001010010111111101100010101100101101011110110110000011001
00001000100110100010110111101001011000011111101000100010000111101101101000011001
1110111000101
```

Рис. 4. Два ключа длиной 256 бит, полученные как отклики нейросети на два примера одного образа «Хонер»

Из рис. 4 видно, что первая и вторая битовые последовательности содержат много общего, но они же имеют и существенные расхождения [7, 8]. Это означает, что корреляционная сцепленность этих выходных последовательностей может быть оценена прямым вычислением коэффициентов корреляции между ними, т.е. если обозначить бинарные последовательности файла «testKeys.txt» как $\{x_1, x_2, \dots, x_{21}\}$, то мы можем вычислить нужные нам коэффициенты корреляции и корреляционную матрицу в целом:

$$\begin{bmatrix} 1 & r(x_1, x_2) & \dots & r(x_1, x_{21}) \\ r(x_1, x_2) & 1 & r(x_2, x_3) & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r(x_1, x_{21}) & r(x_2, x_{21}) & \dots & 1 \end{bmatrix}, \tag{3}$$

где

$$r("x_k", "x_j") = \frac{1}{256} \sum_{i=1}^{256} \frac{(E("x_{k_i}") - "x_{k_i}")(E("x_{j_i}") - "x_{j_i}"))}{\sigma("x_{k_i}") \cdot \sigma("x_{j_i}"))}. \tag{4}$$

Для того, чтобы далее вычислить коэффициент эквивалентной симметричной матрицы \tilde{r} , следует усреднить модули всех коэффициентов корреляции матрицы (3), находящихся вне ее диагонали, и оценить их стандартное отклонение [9].

Если мы имеем дело с 20 примерами образа «Хонер» и образа «Сура», то сможем получить матрицы коэффициентов корреляции 20×20, которые будут иметь 180 разных коэффициентов корреляции. На рис. 5 даны распределения значений коэффициентов корреляции, рассматриваемых образов, построенные в рамках гипотезы нормальности их распределений.

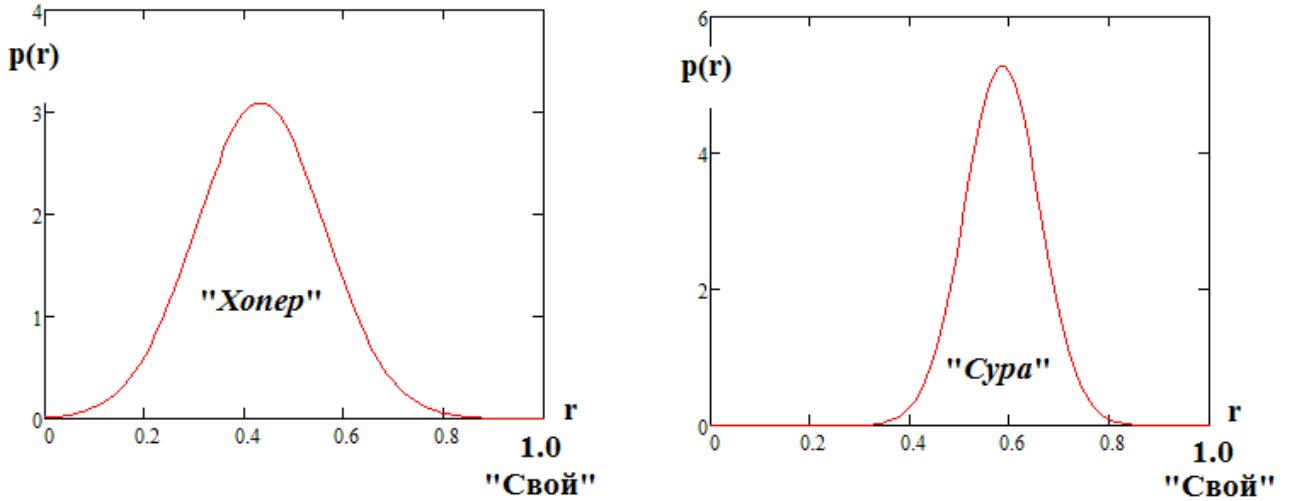


Рис. 5. Распределение расстояний корреляционной сцепленности между ключами от примеров образа Хонер и ключами от образа Сура (предельное значение корреляции «Свой» в правой части рисунка $r = 1,0$)

Как итог, мы можем в дополнение к энтропии Хэмминга (2) построить аналогичную по содержанию энтропию корреляционной сцепленности разрядов длинного кода:

$$\begin{cases} P_2(r) = \frac{1}{\sigma(r)\sqrt{2\pi}} \int_{0,99}^{\infty} \exp\left\{-\frac{(u - E(r))^2}{2(\sigma(r))^2}\right\} du; \\ H("x_1, x_2, \dots, x_{256} ") \approx -\log_2(P_2(r)). \end{cases} \quad (5)$$

Отметим, что и в случае вычисления энтропии корреляционной сцепленности по сравнению с вычислением энтропии Шеннона мы получаем выигрыш по экономии памяти, что составляет примерно 5000 раз, а выигрыш по ускорению вычисления оказывается примерно 300 раз. Это примерно такой же показатель, что и для вычислений энтропии в пространстве расстояний Хэмминга, однако выражения (1) и (2) существенно отличаются от выражения (5) по вычислительным затратам. Главное же состоит в том, что для вычисления энтропии корреляционной сцепленности (5) не нужна информация о значении разрядов кода «Свой», как этого требует ГОСТ Р 52633.3¹. Это открывает возможность вычисления энтропии любой, неизвестно чему обученной нейросети.

Повышение точности вычислений энтропии за счет учета большего числа моментов на малых выборках

Еще одной важной особенностью нового алгоритма вычисления энтропии (5) является снижение ошибок оценки энтропии, обусловленных малым объемом тестовых выборок. В частности, при вычислении математического ожидания и стандартного отклонения для энтропии Хэмминга должны использоваться следующие выражения:

$$\begin{cases} E(h) \approx \sum_{i=1}^{20} \frac{h_i}{20}; \\ \sigma(h) \approx \sqrt{\sum_{i=1}^{20} \frac{(E(h) - h_i)^2}{20}}. \end{cases} \quad (6)$$

Очевидно, что усреднение по 20 примерам будет давать значительные ошибки ΔE и $\Delta \sigma$. Ситуация меняется, когда мы переходим к реализации второго вычислительного алгоритма. В этом случае мы должны вычислять среднее и стандартное отклонение по значительно большему числу примеров коэффициентов корреляции:

¹ ГОСТ Р 52633.3–2011. Защита информации. Техника защиты информации. Тестирование стойкости средств высоконадежной биометрической защиты к атакам подбора.

$$\left\{ \begin{array}{l} E(|r|) \approx \sum_{i=1}^{180} \frac{|r_i|}{180}; \\ \sigma(r) \approx \sqrt{\sum_{i=1}^{180} \frac{(E(|r|) - |r_i|)^2}{180}}. \end{array} \right. \quad (7)$$

При прочих равных условиях ошибка вычисления математического ожидания в выражении (6) должна быть выше, чем в выражении (7). То же самое относится и к стандартным отклонениям. Все это является прямым следствием роста выборки с 20 до 180 примеров.

Даже в том случае, если ошибки вычисления оказываются сопоставимыми $\Delta E(h) \approx \Delta E(r)$ и $\Delta \sigma(h) \approx \Delta \sigma(r)$, итоговый результат вычислений по формулам (2) и (5) оказывается слабо коррелированным. Это означает, что их усреднение должно приводить к снижению итоговой ошибки оценки энтропии в корень из двух раз (примерно на 41,4 %).

Заключение

Передовой национальный стандарт по тестированию ГОСТ Р 52633.3-2011 нейросетевых преобразователей биометрия-код на малых выборках коренным образом изменил ситуацию по росту доверия к процедурам биометрико-криптографической аутентификации. Появилась возможность быстро тестировать нейросетевую преобразователь после каждого его обучения. При этом тестирование оказывается технически реализуемо, даже при использовании в качестве доверенной вычислительной среды мало потребляющих процессоров SIM-карт и микро-SD-карт [14, 15].

Приведенные в данной статье данные позволяют утверждать, что точность оценок энтропии выходных кодов нейросетей может быть существенно увеличена, если вычисление энтропии Хэмминга дополнить вычислением еще и корреляционной энтропии. Это ставит в повестку дня вопрос о разработке новой версии национального стандарта ГОСТ Р 52633.3 взамен действующей. В новую версию наряду с вычислением энтропии Хэмминга должен войти раздел, касающийся вычисления корреляционной энтропии.

Список литературы

1. Болл Р. М., Коннел Дж. Х., Панканти Ш. [и др.]. Руководство по биометрии. М. : Техносфера, 2007. 367 с.
2. Hao F., Anderson R., Daugman J. Crypto with Biometrics Effectively // IEEE Transactions on Computers. 2006. Vol. 55, № 9.
3. Иванов А. И., Захаров О. С. Среда моделирования «БиоНейроАвтограф». 2009. URL: <http://пниэи.рф/activity/science/noc/bioneuroautograph.zip> (дата обращения: 10.12.2022).
4. Иванов А. И. Автоматическое обучение больших искусственных нейронных сетей в биометрических приложениях : учеб. пособие. Пенза, 2013. 30 с. URL: http://пниэи.рф/activity/science/noc/tm_IvanovAI.pdf (дата обращения: 10.12.2022).
5. Безяев А. В. Биометрико-нейросетевая аутентификация: обнаружение и исправление ошибок в длинных кодах без накладных расходов на избыточность : препринт. Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. 40 с.
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. Иванов А. И., Иванов А. П., Ратников К. А. Статистико-нейросетевой анализ биометрических образов в пространствах спектров кроссверток и автосверток Хэмминга : препринт. Пенза : Изд-во ПГУ, 2021. 56 с.
8. Горбунов К. А., Никитин В. В. Нейросетевая биометрия: подтверждение гипотезы обратных шкал для метрики корреляционной сцепленности и метрики расстояний Хэмминга при их применении к ключам-откликам на примеры одного образа «Чужой» // Безопасность информационных технологий : сб. науч. ст. по материалам III Всерос. науч.-техн. конф. : в 2 т. Пенза : Изд-во ПГУ, 2021. Т. 1. С. 83–85.
9. Иванов А. И., Банных А. Г., Серикова Ю. И. Учет влияния корреляционных связей через их усреднение по модулю при нейросетевом обобщении статистических критериев для малых выборок // Надежность. 2020. № 20. С. 28–34. doi:10.21683/1729-2646-2020-20-2-28-34

References

1. Boll R.M., Konnel Dzh.Kh., Pankanti Sh. et al. *Rukovodstvo po biometrii = Guide to biometrics*. Moscow: Tekhnosfera, 2007:367. (In Russ.)
2. Hao F., Anderson R., Daugman J. Crypto with Biometrics Effectively. *IEEE Transactions on Computers*. 2006;55(9).

3. Ivanov A.I., Zakharov O.S. *Sreda modelirovaniya «BioNeyroAvtograf» = Modeling environment "Bioneiroautograph"*. 2009. (In Russ.). Available at: <http://pniei.rf/activity/science/noc/bioneuroautograph.zip> (accessed 10.12.2022).
4. Ivanov A.I. *Avtomaticheskoe obuchenie bol'shikh iskusstvennykh neyronnykh setey v biometricheskikh prilozheniyakh: ucheb. posobie = Automatic training of large artificial neural networks in biometric applications : textbook*. Penza, 2013:30. (In Russ.). Available at: http://pniei.rf/activity/science/noc/tm_IvanovAI.pdf (accessed 10.12.2022).
5. Bezyaev A.V. *Biometriko-neyrosetevaya autentifikatsiya: obnaruzhenie i ispravlenie oshibok v dlinnykh kodakh bez nakladnykh raskhodov na izbytochnost': preprint = Biometric-neural network authentication: detection and correction of errors in long codes without redundancy overhead : preprint*. Penza: Izd-vo PGU, 2020:40. (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. Ivanov A.I., Ivanov A.P., Ratnikov K.A. *Statistiko-neyrosetevoy analiz biometricheskikh obrazov v prostanstvakh spektrov krossvertok i avtosvertok Khemminga: preprint = Statistical and neural network analysis of biometric images in the spaces of the spectra of Hamming cross-convolutions and auto-convolutions : preprint*. Penza: Izd-vo PGU, 2021:56. (In Russ.)
8. Gorbunov K.A., Nikitin V.V. Neural network biometrics: confirmation of the hypothesis of inverse scales for the metric of correlation coupling and the metric of Hamming distances when they are applied to key responses to examples of one image of a "Stranger". *Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologiy: sb. nauch. st. po materialam III Vseros. nauch.-tekhn. konf.: v 2 t. = Information technology security: collection of scientific articles based on the materials of the III All-Russian scientific-technical. conf.: in 2 vol.* Penza: Izd-vo PGU, 2021;1:83–85. (In Russ.)
9. Ivanov A.I., Bannykh A.G., Serikova Yu.I. Accounting for the influence of correlations through their modulus averaging in neural network generalization of statistical criteria for small samples. *Nadezhnost' = Reliability*. 2020;(20):28–34. (In Russ.). doi:10.21683/1729-2646-2020-20-2-28-34

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

Кирилл Александрович Горбунов

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

Aleksandr I. Ivanov

Doctor of technical sciences, associate professor,
leading 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)

Kirill A. Gorbunov

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 15.12.2022

Поступила после рецензирования/Revised 15.01.2023

Принята к публикации/Accepted 10.13.2023

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И КАЧЕСТВА СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА ЗАГЛУБЛЕННОГО СООРУЖЕНИЯ

И. И. Звенигородский¹, Ю. Т. Зырянов², Д. И. Ульшин³

^{1,3} Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Воронеж, Россия

² Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия

¹ zvendocent@mail.ru, ² zut-tmb@mail.ru, ³ wm_d@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность работы обусловлена возможностью повышения энергоэффективности при помощи нейросетевых систем автоматического управления, так как существующие модели систем вентиляции и кондиционирования воздуха и системы автоматического управления ими рассматривают отдельные процессы, протекающие в системе вентиляции и не учитывают всех каналов управления и возмущения, взаимосвязь регулируемых параметров, пространственную распределенность точек приложения воздействий и переменность структуры объекта управления. Целью работы является снижение затрат электроэнергии за счет повышения эффективности использования энергоносителей, а также повышения качества управления. *Материалы и методы.* Для достижения поставленных целей использованы методы компьютерного нейросетевого моделирования. *Результаты и выводы.* Построена нейросетевая модель системы автоматического управления процессом кондиционирования воздуха заглубленного сооружения, функционирующая в условиях влияния ступенчатых возмущающих воздействий с применением нейросетевых регуляторов, осуществляющих управление по методу «обнаружения разладки». Предварительные расчеты энергоэффективности предлагаемого нейросетевого регулирования в реальных системах показывают, что экономия электрической энергии в сравнении с традиционным ПИД-регулированием достигает 7–10 % в зависимости от режима функционирования системы, что в большеобменных системах является целесообразным и востребованным с экономической точки зрения.

Ключевые слова: системы автоматического управления, нейросетевые регуляторы, заглубленное сооружение

Для цитирования: Звенигородский И. И., Зырянов Ю. Т., Ульшин Д. И. Использование нейросетевых регуляторов для повышения энергоэффективности и качества системы вентиляции и кондиционирования воздуха заглубленного сооружения // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 99–105. doi:10.21685/2307-4205-2023-1-12

THE USE OF NEURAL NETWORK REGULATORS TO IMPROVE THE ENERGY EFFICIENCY AND QUALITY OF THE VENTILATION AND AIR CONDITIONING SYSTEM OF A BURIED STRUCTURE

I.I. Zvenigorodsky¹, Yu.T. Zyryanov², D.I. Ulshin³

^{1,3} Military Training and Research Center of the Air Force "Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin", Voronezh, Russia

² Tambov State Technical University, Tambov, Russia

¹ zvendocent@mail.ru, ² zut-tmb@mail.ru, ³ wm_d@mail.ru

Abstract. *Background.* The relevance of the work is due to the possibility of increasing energy efficiency with the help of neural network automatic control systems, since the existing models of ventilation and air conditioning systems and their automatic control systems consider individual processes occurring in the ventilation system and do not take into account all control channels and disturbances, the relationship of adjustable parameters, spatial distribution points of application of influences and variability of the structure of the control object. The aim of the work is to reduce the cost of electricity by improving the efficiency of energy use, as well as improving the quality of management. *Materials and methods.* To achieve the goals set, the methods of computer neural network modeling were used. *Results and conclusions.* A neural network model of an automatic control system for the process of air conditioning of a buried structure was built, which operates under the influence of stepwise disturbing influences using neural network

controllers that control by the method of "detection of discord". Preliminary calculations of the energy efficiency of the proposed neural network control in real systems show that the saving of electrical energy in comparison with traditional PID control reaches 7–10 % depending on the mode of operation of the system, which in large-scale systems is expedient and in demand from an economic point of view.

Keywords: automatic control systems, neural network controllers, buried structures

For citation: Zvenigorodsky I.I., Zyryanov Yu.T., Ulshin D.I. The use of neural network regulators to improve the energy efficiency and quality of the ventilation and air conditioning system of a buried structure. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(1):99–105. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-1-12

Введение

В подавляющем большинстве случаев системы автоматического управления (САУ) проектируются исходя из допущения, что в процессе эксплуатации их параметры всегда остаются постоянными и неизменными. В реальности это является практически невозможным вследствие того, что элементы САУ и объекта управления со временем изнашиваются, а условия внешней среды меняются. Кроме того, в процессе эксплуатации возможны случайные деструктивные воздействия, меняющие характеристики различных элементов системы, например, аварии.

В отдельных случаях представляется возможным описать некоторые из протекающих процессов, однако из-за их вероятностного характера точное описание сильно затруднено. К примеру, фактор износа элементов системы можно учесть, рассчитав срок их эксплуатации и проводя превентивную замену даже исправно работающих элементов на новые (планово-предупредительное обслуживание и планово-предупредительный ремонт). Изменения или воздействия внешней среды можно заложить в исходную модель в виде различных возмущающих воздействий или же непосредственно на модели убедиться в сохранении устойчивости и качества функционирования САУ на всем диапазоне допустимых внешних условий.

Безусловно, перечисленные выше решения могут дать положительный результат, однако их отличает то, что они не являются оптимальными, а значит, на объектах военной инфраструктуры приводят к серьезным экономическим потерям, которые выражаются:

- в необходимости обязательного резервирования всех ключевых и жизненно необходимых элементов системы;
- замене по регламенту исправно функционирующих элементов;
- неоптимальной работе контура управления в течение периодов, когда внешние условия отличаются от расчетных, и что в совокупности влечет за собой значительный перерасход энергии и энергоносителей.

Случайные воздействия на элементы САУ совершенно непредсказуемы как по вероятности их возникновения, так и по производимому на систему эффекту. Резкие (аварийные) изменения в режиме функционирования объекта управления вследствие своей заметности легко отслеживаются и оперативно устраняются либо ремонтом, либо заменой вышедших из строя элементов. Однако небольшие, малозаметные, но длительные изменения способны вызвать такие отклонения в штатном режиме функционирования системы, которые могут привести к серьезным последствиям через некоторое время: повышенному износу, сбоям в других связанных САУ и даже полному выходу объекта управления из строя.

Все сказанное выше однозначно свидетельствует о важности развития методов автоматического управления, адаптированных к нестационарному поведению объекта [1–3]. Наиболее «радикальным» и наиболее сложным для автоматического управления представляется случай спонтанного скачкообразного изменения свойств системы в случае выхода параметров за нормируемый диапазон (или аварии).

Материалы и методы. Результаты исследования

Рассмотрим САУ процессом кондиционирования воздуха и поддержания заданных температурно-влажностных параметров в заглубленном сооружении.

Одним из возможных и перспективных путей развития САУ является применение теории нейронных сетей и нейросетевых регуляторов (НР). Такая нейросетевая САУ должна решать задачу создания и поддержания (стабилизации) заданных значений температуры и влагосодержания воздуха в рабочей зоне обслуживаемого помещения. Кроме того, требуется решить задачу автоматического изменения настроечных параметров регулирующих устройств в переходных процессах с целью по-

вышения качества управления, нахождения входного вектора нейрорегуляторов для снижения энергозатрат при повседневной эксплуатации и реализации управления по методу «оптимальных режимов».

На рис. 1 представлен общий вид двумерной связной САУ объектом с обратной связью, состояние которого измеряется непосредственно на выходе, а в канале наблюдения присутствуют возмущения $n_{\text{возм}}^{\text{БЫД}}(t)$ с некоторыми постоянными свойствами, ε_{θ} и ε_d – ошибки управления по каналам управления температурой и влагосодержанием воздуха соответственно. Параметры объекта управления постоянны во времени. В системе имеются линейные регуляторы, поддерживающие состояние объекта близким к заданной траектории.

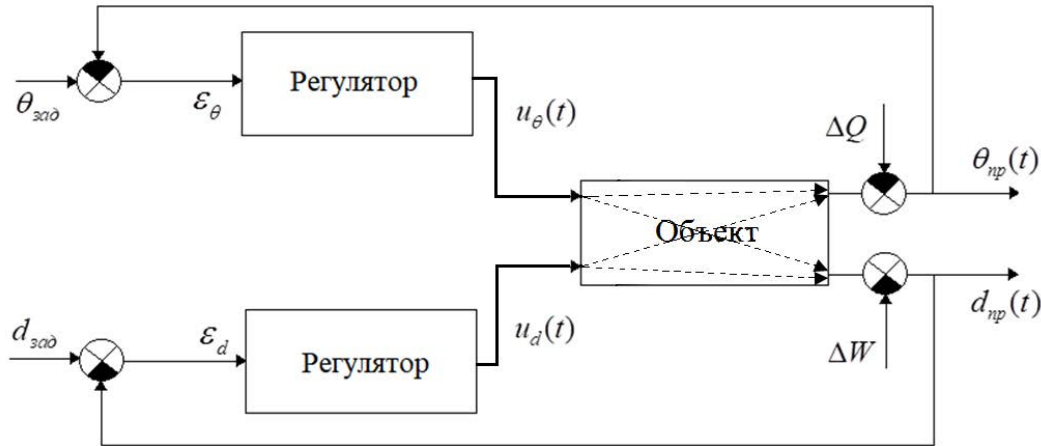


Рис. 1. Общий вид системы управления (ε_{θ} и ε_d – ошибки управления по каналам управления температурой)

Исходя из того, что ПИД-регулятор обеспечивает устойчивость и некоторое требуемое качество управления (перерегулирование, время регулирования, статическая ошибка и т.д.), можно предполагать, что НР, достаточно точно имитирующий исходный ПИД-регулятор, будет управлять системой с соответствующим качеством. Качество обучения искусственной нейронной сети определяется выбором архитектуры, обучающих данных и параметров алгоритма обучения. Для исследования влияния указанных факторов применительно к задаче имитации ПИД-регулятора система управления и ее составные части рассматриваются в дискретном времени с постоянным и достаточно малым шагом дискретизации.

Управляющее воздействие исходного ПИД-регулятора на объект управления (рис. 1) представляется как функция:

$$\begin{aligned} u_{\theta}(t) &= f(\varepsilon_{\theta}, p_{\text{сост}}); \\ u_d(t) &= f(\varepsilon_d, p_{\text{сост}}), \end{aligned} \quad (1)$$

где $p_{\text{сост}}$ – внутреннее состояние регулятора («память»), изменяющееся каждый такт времени по некоторому правилу; ε_{θ} и ε_d – ошибки управления по каналам управления температурой и влагосодержанием приточного воздуха.

Используя квадратичный критерий, задача синтеза НР представляется в виде

$$\varepsilon_{\text{скв}} = \sum_t \sqrt{(f(\varepsilon_{\theta}, p) - N^x(\mathbf{i}_t))^2 + (f(\varepsilon_d, p) - N^x(\mathbf{i}_t))^2} \rightarrow \min_{\forall \mathbf{i}_t \in I}, \quad (2)$$

где $\varepsilon_{\text{скв}}$ – средняя квадратическая ошибка управления объектом; N^x – определенная архитектура нейросетевого регулятора; \mathbf{i}_t – некоторая информация, доступная о системе управления к моменту времени t ; I – это область возможных значений \mathbf{i}_t для регулятора.

Значение выходного управляющего воздействия исходного ПИД-регулятора вычисляется по формуле

$$u_i(t) = k_p \varepsilon_i + k_i \int_0^{t_p} \varepsilon_i dt + k_d \frac{\varepsilon_i(t)}{dt}, \quad (3)$$

где k_p – коэффициент усиления; k_i – коэффициент издррома; k_d – коэффициент предварения; ϵ_i – ошибка управления.

Для формирования входного вектора НР использована динамическая модель с типовыми ПИД-регуляторами, настройка которых произведена по интегрально-квадратичному критерию (ИКК). Настраочные параметры линейных ПИД-регуляторов приведены в табл. 1

Таблица 1

Настраочные параметры линейных ПИД-регуляторов

Регулятор	Коэффициент усиления, k_{p11}	Коэффициент интегрирования, k_{i11}	Коэффициент дифференцирования, k_{d11}
PID1	0,06	0,0013	0,2
PID2	0,22	0,0006	0,35

Произведенные компьютерные вычислительные эксперименты с различными типами архитектур нейронных сетей регуляторов позволили остановиться на наиболее эффективной, применительно к данной задаче: один скрытый слой, состоящий из четырех нейронов, на вход подается входной вектор различной структуры, обучение нейросетевых регуляторов осуществлено поочередно для НР1 и НР2, на выборке длиной 270 значений, на протяжении 400 эпох, размер контрольной выборки составил 135 значений. В случае возрастания $E_{\text{СКВ}}$ на контрольной выборке обучение прекращалось досрочно. За критерий обучения принята минимизация среднеквадратической ошибки имитации $E_{\text{СКВ}}^{\text{НР1}}$.

Схема подключения нейронной сети регулятора, построенного в среде Matlab Simulink, приведена на рис. 2.

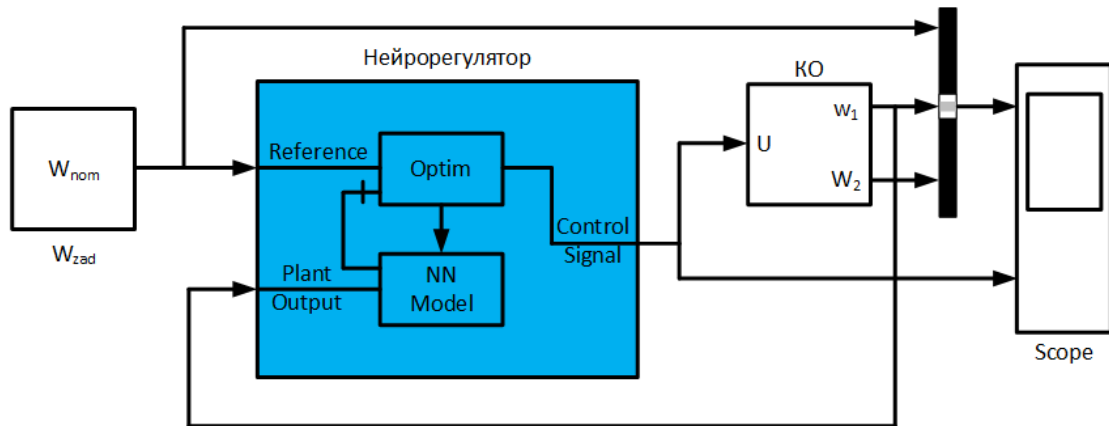


Рис. 2. Схема подключения нейрорегулятора

Результаты вычислительных экспериментов свидетельствуют о том, что при увеличении значения возмущений $n_{\text{возм}}^{\text{выд}}(t)$ преимущество НР с входным вектором $r_t, \epsilon_{\text{СКВ}(t)}$ уменьшается. Таким образом, в отдельных случаях применение $\epsilon_{\text{СКВ}(t)}, \Delta\epsilon_{\text{СКВ}(t)}$ может оказаться оправданным.

При исследовании вариантов предварительного обучения НР сделан вывод, что для формирования входного вектора наилучшим оказался принцип совмещенного управления по возмущению и отклонению: $r_t, \epsilon_{\text{СКВ}(t)}$.

Следует понимать, что копирование свойств исходного ПИД-регулятора позволяет произвести его замену и сопоставить полученный НР с исходным, однако не имеет смысла формировать архитектуру нейросетевого регулятора, базируясь на свойствах исходного ПИД-регулятора, так как НР, изначально обученный в соответствии с исходным ПИД-регулятором, впоследствии должен менять свои свойства для минимизации $\epsilon_{\text{СКВ}}$.

На рис. 3 представлена нейросетевая модель САУ процесса вентиляции и кондиционирования воздуха. Модель имеет в своем составе два предварительно обученных на инверсной модели объек-

та управления нейросетевых регулятора HP1 и HP2. В качестве входных векторов регуляторов принята выборка значений уставки и ошибки управления объектом в текущий момент времени $r_t, \epsilon_{\text{СКВ}}(t)$.

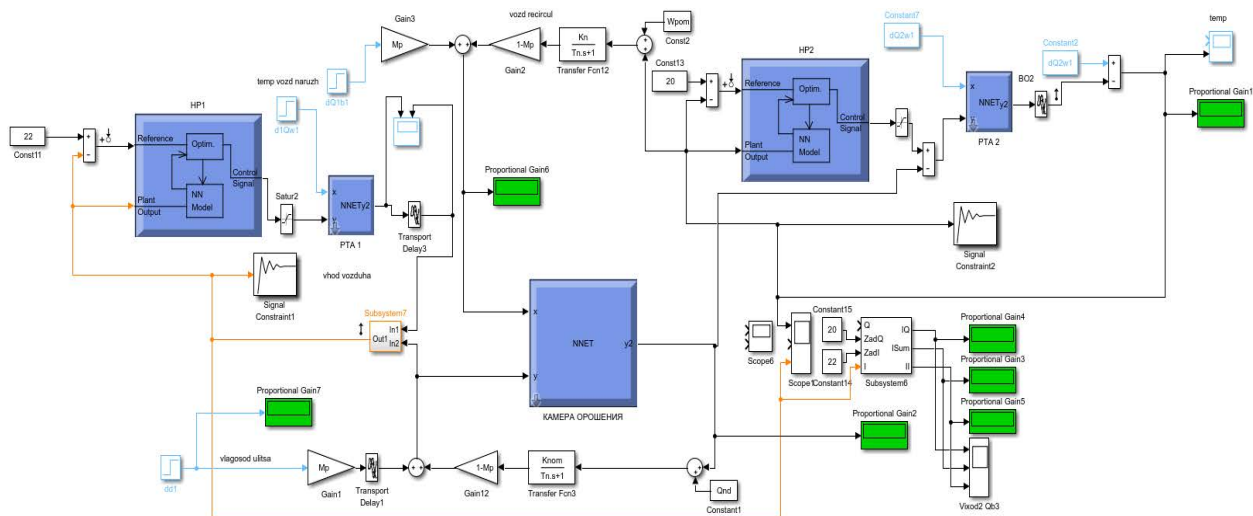


Рис. 3. Модель нейросетевой САУ системы вентиляции и кондиционирования воздуха

Сеть нейрорегуляторов имеет наиболее простую структуру, имеющую один скрытый слой, состоящий из четырех нейронов (в 2 раза больше числа входов). Параллельно с нейронной сетью регулятора включена нейронная сеть модели объекта управления. Обучение нейросетевых регуляторов осуществлено поочередно для HP1 и HP2, на выборке длиной 270 значений $\epsilon_{\text{СКВ}}$, на протяжении 400 эпох, размер контрольной выборки составил 135 значений. Такая нейросетевая модель, обученная на выборке реальных данных, позволяет изменять весовые коэффициенты нейронов сети на каждом шаге обучения, учитывать нелинейные свойства процессов теплообмена, протекающих в элементах системы (РТА1 и РТА2 на рис. 3), а следовательно, более точно описывать объект управления и тем самым повышать качество управления и энергоэффективность [4, 5].

Заключение

Предварительные расчеты энергоэффективности подобного нейросетевого регулирования в реальных САУ показывают, что экономия, например, электрической энергии в сравнении с традиционным ПИД-регулированием достигает 7–10 % в зависимости от режима функционирования системы, что в большеобменных системах является целесообразным и востребованным с экономической точки зрения. Исходя из этого можно полагать, что применение теории нейронных сетей к задачам повышения качества управления различными техническими системами, замены ПИД-регуляторов на нейросетевые и использование нейросетевого регулирования в целом, является актуальным и эффективным путем дальнейшего развития систем автоматического управления [6–8].

Список литературы

1. Креслин А. Я. Оптимизация энергопотребления системами кондиционирования воздуха. Рига, 1982. 155 с.
2. Елисеев В. Л., Филаретов Г. Ф. Моделирование ПИД-контроллера с помощью искусственной нейронной сети // Перспективные технологии автоматизации. Вологда, 1999. 108 с.
3. Рымкевич А. А., Халамейзер М. Б. Управление системами кондиционирования воздуха. М.: Машиностроение, 1987. 279 с.
4. Звенигородский И. И., Жуков А. С., Кулеш Д. Ю. Исследование процессов управления системой кондиционирования воздуха сооружения: отчет о НИР. Воронеж: ВАИУ, 2010. 95 с.
5. Карпис Е. Е. Повышение эффективности систем кондиционирования воздуха. М.: Стройиздат, 1987. 314 с.
6. Гришко А. К., Лукин В. С., Юрков Н. К. Синтез тестовых образов для оценки стойкости нейросетевых преобразователей в системах биометрической идентификации // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 2. С. 32–40.
7. Кубасов И. А., Иванов А. И. Энтропийно-нейросетевой метод устранения противоречивости оценок экспертов // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 4. С. 56–63.

8. Иванов А. И., Иванов А. П., Куприяно 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.

References

1. Kreslin' A.Ya. *Optimizatsiya energopotrebleniya sistemami konditsionirovaniya vozdukha = Optimization of energy consumption by air conditioning systems*. Riga, 1982:155. (In Russ.)
2. Eliseev V.L., Filaretov G.F. Modeling of a PID controller using an artificial neural network. *Perspektivnye tekhnologii avtomatizatsii = Promising automation technologies*. Vologda, 1999:108. (In Russ.)
3. Rymkevich A.A., Khalameyzer M.B. *Upravlenie sistemami konditsionirovaniya vozdukha = Control of air conditioning systems*. Moscow: Mashinostroyeniye, 1987:279. (In Russ.)
4. Zvenigorodskiy I.I., Zhukov A.S., Kulesh D.Yu. *Issledovanie protsessov upravleniya sistemoy konditsionirovaniya vozdukha sooruzheniya: otchet o NIR = Research of processes of control of the air conditioning system of a building: research report*. Voronezh: VAIU, 2010:95. (In Russ.)
5. Karpis E.E. *Povyshenie effektivnosti sistem konditsionirovaniya vozdukha = Improving the efficiency of air conditioning systems*. Moscow: Stroyizdat, 1987:314. (In Russ.)
6. Grishko A.K., Lukin V.S., Yurkov N.K. Synthesis of test images for assessing the durability of neural network converters in biometric identification systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2017;(2):32–40. (In Russ.)
7. Kubasov I.A., Ivanov A.I. Entropy-neural network method of eliminating inconsistency of expert assessments. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(4):56–63. (In Russ.)
8. Ivanov A.I., Ivanov A.P., Kupriyano E.N. Multiplicative neural network association of statistical criteria of Hurst and Murota – Takeuchi when testing the hypothesis of normality of small samples. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(4):27–33. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Игорь Иванович Звенигородский

кандидат технических наук,
доцент, начальник кафедры защитных сооружений,
Военный учебно-научный центр
Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия
имени профессора Н. Е. Жуковского
и Ю. А. Гагарина»
(Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а)
E-mail: zvendocent@mail.ru

Юрий Трифонович Зырянов

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры конструирования
радиоэлектронных и микропроцессорных систем,
Тамбовский государственный
технический университет
(Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106)
E-mail: zut-tmb@mail.ru

Дмитрий Игоревич Ульшин

кандидат технических наук, научный сотрудник,
Военный учебно-научный центр
Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия
имени профессора Н. Е. Жуковского
и Ю. А. Гагарина»
(Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а)
E-mail: wm_d@mail.ru

Igor I. Zvenigorodsky

Candidate of technical sciences, associate professor,
head of the sub-department of protective structures,
Military Educational and Scientific Center
of the Air Force" Air Force Academy
named after Professor N.E. Zhukovsky
and Yu.A. Gagarin"
(54a Sarykh Bolshevikov street, Voronezh, Russia)

Yury T. Zyryanov

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department of design
of radioelectronic and microprocessor systems,
Tambov State Technical University
(106 Sovetskaya street, Tambov, Russia)

Dmitry I. Ulshin

Candidate of technical sciences, researcher,
Military Educational and Scientific Center
of the Air Force" Air Force Academy
named after Professor N.E. Zhukovsky
and Yu.A. Gagarin"
(54a Sarykh Bolshevikov street, Voronezh, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 08.12.2022

Поступила после рецензирования/Revised 19.01.2023

Принята к публикации/Accepted 15.02.2023

КОНСТРУКТИВНЫЙ ОБЛИК СТЕНДА ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАССОИНЕРЦИОННОЙ АСИММЕТРИИ ДЛИННОМЕРНЫХ ТЕЛ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОЙ БАЛАНСИРОВКИ

А. В. Ключников

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия
a.klyuchnicov@bk.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Одной из задач, решаемых разработчиком и изготовителем сложного ротора, например, представляющего собой длинномерное тело вращения, внутри которого имеются рамы, отсеки, размещена в амортизации аппаратура, является приведение параметров массо-инерционной асимметрии тела к нормативам, заданным в его эксплуатационной документации. *Материалы и методы.* Определение и обеспечение указанных параметров выполняются на завершающем этапе общей сборки ротора с использованием контрольно-измерительных стендов. Применение динамических балансировочных стендов и методов динамической балансировки позволяет значительно повысить точность контроля указанных параметров по сравнению со стендами статической балансировки. В статье приведено описание конструктивно-технологических особенностей и особенностей функционирования вертикального динамического балансировочного стенда с коническими газостатическими подшипниками, предназначенного для прецизионной балансировки длинномерного тела конической формы, имеющего единственную плоскость коррекции. При проведении измерений контролируемое тело размещается внутри специализированной технологической оснастки, обеспечивающей физическую защиту наружной поверхности тела и материализацию второй плоскости коррекции. Алгоритм обработки измерительных сигналов обеспечивает выделение полезных сигналов из аддитивной смеси с мощными помехами промышленного характера. *Результаты и выводы.* Методика балансировки позволяет исключить промежуточные шаги балансировки, сократив число шагов балансировки, как правило, до одного шага, а также сократив время проведения балансировочного эксперимента. За один шаг балансировки методика позволяет при использовании единственной плоскости для коррекции дисбалансов либо привести параметры массоинерционной асимметрии контролируемого тела к заданным нормативам, либо диагностировать невозможность для конкретной конструкции тела обеспечить достижение заданных нормативов. Точность определения параметров массоинерционной асимметрии длинномерного тела с использованием рассмотренного динамического стенда с коническими газостатическими подшипниками более чем в пять раз превысила точность определения тех же параметров на стендах, реализующих весовой и маятниковый методы измерений.

Ключевые слова: сложный ротор, геометрическая ось, масса, центр масс, ось инерции, вибрация, динамическая балансировка, балансировочный стенд, рабочий эталон

Для цитирования: Ключников А. В. Конструктивный облик стенда для прецизионного определения параметров массоинерционной асимметрии длинномерных тел методом динамической балансировки // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 106–117. doi:10.21685/2307-4205-2023-1-13

DESIGN OF A MEASUREMENT STAND FOR PRECISION DETERMINATION OF THE MASS-INERTIA ASSYMETRY OF LONG ITEMS BY DYNAMIC BALANCING

A.V. Klyuchnikov

Russian Federal Nuclear Centre – All-Russia Research Institute
of Technical Physics named after Academician E.I. Zababakhin, Snezhinsk, Russia
a.klyuchnicov@bk.ru

Abstract. *Background.* One of the major tasks challenges designer and manufacturer of a composite rotor, which as an example, presents itself a long gyration item with frames, compartments, instruments in it composition, is matching parameters of mass-inertia asymmetry with values, specified in operational documentation for the item. *Materials and methods.* Both characterization and ensuring these mass-inertia asymmetry parameters are made at a fi-

nal assembly stage, with special check-out gauging stands. Using of dynamic balancing stands and dynamic balancing methods allows to a great extent improve an accuracy of measurement of mass-inertia asymmetry parameters compared with stands, which realized static methods of balancing. In the article both design-and-technological features and functioning features of vertical dynamic balancing stand with cone gas bearings, which is intended for high accurate balancing of long item, which equips by only correction plane, are given. When measuring the item under control is placed inside some special technological equipment, providing physical protection of the external surface of the item, and then generating the second correction plane. The algorithm of sensor signals processing, enabling selection of the useful signals from the additive mixture of power industrial noise. *Results and conclusions.* The methods of balancing of the item enables omitting intermediate steps of balancing, reducing them to one step (as a rule), and shortening the balancing time, as well. In one step of balancing the methods permits either bringing parameters of mass-inertia asymmetry of the item to specified standards, or diagnosing impossibility of attaining the specified standards with available design of item, if uses only plane for correction of nonbalances. An accuracy of determination of long item's mass-inertia asymmetry parameters with the use of the offered dynamic balancing stand with cone gas bearings has been overfulfilled more than five times an accuracy of determination of the same parameters with using stands, which realized weight and pendulum methods.

Keywords: rotor structure, geometric axis, mass, center of mass, axis of inertia, vibration, dynamic balancing, balancing stand, working standard

For citation: Klyuchnikov A.V. Design of a measurement stand for precision determination of the mass-inertia assymetry of long items by dynamic balancing. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(1): 106–117. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-1-13

Введение

Обеспечение высокого качества функционирования сложных изделий машиностроения, в частности, конструкция которых представляет собой длинномерное твердое тело вращения (роторный модуль), в состав которого входят, например, рамы, отсеки, измерительная аппаратура, исполнительные механизмы и другое, зачастую требует высокой точности определения величины смещения центра масс ρ с геометрической оси ротора X (совпадающей с осью симметрии наружной поверхности ротора) и угла отклонения продольной главной центральной оси инерции (ГЦОИ) α_x от той же оси. Указанное твердое тело вращения характеризует асимметричность в распределении масс изделия относительно геометрической оси, а также последующего уравнивания тела путем коррекции его массы [1, 2]. К подобным изделиям относятся, например, тонкостенные спутниковые узлы, нежесткие сборки типа разворачивающихся в невесомости антенн, роторы, внутри которых не жестко размещена геофизическая аппаратура или сейсмические датчики. В настоящее время определение указанных параметров массоинерционной асимметрии, представленных соответственно на рис. 1, 2, как правило, выполняют с использованием специализированных контрольно-измерительных стендов.

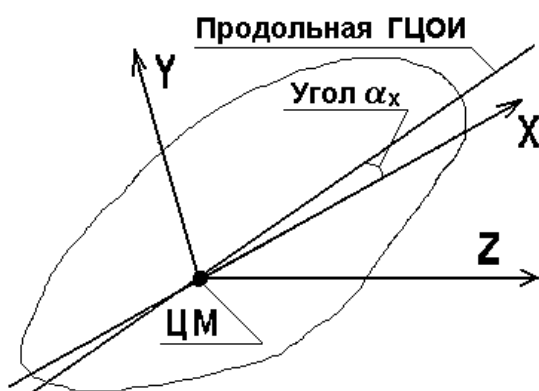


Рис. 1. Перекос продольной ГЦОИ

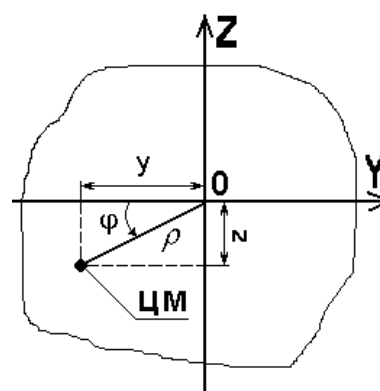


Рис. 2. Смещение центра масс

Близость к нулю номинальных значений параметров массо-инерционной асимметрии определяет трудности процесса измерения этих параметров. Использование контрольно-измерительных стендов, реализующих весовой метод и метод маятника (физического или крутильного), широко применяемых в настоящее время для определения соответственно координат центра масс и моментов инерции с последующим расчетом параметров массоинерционной асимметрии, проводимым по

специальным методикам, не позволяет достигать высоких показателей точности балансировки ввиду низких характеристик инструментальной точности и низкой производительности стендов обоих типов. Как правило, точность определения координат центра масс на весовых стендах не превышает 0,05–0,1 мм, а точность определения угла перекоса продольной ГЦОИ относительно геометрической оси роторного модуля по результатам определения моментов инерции на маятниковых стендах не превышает 5–10 угловых минут [2]. Однако современные требования к точности определения параметров массоинерционной асимметрии кратно жестче и зачастую составляют ~0,01 мм по точности определения величины поперечного смещения центра масс и ~1 угловую минуту по точности определения перекоса продольной ГЦОИ [3]. Поэтому высокая инструментальная точность динамических балансировочных стендов и их высокая производительность делает привлекательным их применение для обеспечения высоких требований к точности измерений указанных параметров массоинерционной асимметрии [2–4].

Как известно из теории балансировки, жесткий ротор можно полностью сбалансировать в двух произвольных плоскостях коррекции на любой частоте вращения, устранив с требуемой точностью как смещение центра масс, так и перекося продольной ГЦОИ относительно геометрической оси. Однако для длиномерных роторов, обладающих единственной плоскостью коррекции, расположенной на значительном расстоянии от центра масс, например, для роторов, выполненных в форме кругового конуса с малым полууглом раствора, возможно устранение лишь одного из двух контролируемых параметров массоинерционной асимметрии. Это обстоятельство не позволяет обеспечить полное статическое и моментное уравнивание и делает возможным для балансировщиков лишь приведение параметров массоинерционной асимметрии к неким значениям, не превышающим задаваемых в эксплуатационной документации для таких роторов предельно-допустимых значений [1, 4, 5]. Дополнительными сложностями могут являться значительные габаритные размеры контролируемого ротора по длине и диаметру, тонкие стенки корпуса, отсутствие собственных опорных поверхностей, удобных для установки на измерительное устройство, наличие нежестких элементов конструкции, выступающих за пределы корпуса и др. К тому же в случаях, когда деформации от вращения с высокими скоростями и прогибы, вызванные действием сил тяжести при горизонтальном положении тела, вносят существенные погрешности или если внутренне элементы могут сместиться по тем же причинам, для проведения процедуры уравнивания требуется применение балансировочного оборудования с вертикальной осью вращения, чтобы устранить действие нагрузок от массы тела, а также оборудования, способного работать при низких частотах вращения, когда ротор еще можно рассматривать как жесткий.

Зачастую использование серийных балансировочных станков, например, выпускаемых такими известными производителями, как «Шенк» (Германия), «ДИАМЕХ» (Россия) и других, для балансировки изделий, выпускаемых малыми партиями, малоэффективно, поскольку они обычно предназначены для балансировки конкретных конструкций в массовом производстве. Адаптация серийных балансировочных станков под задачу балансировки конических роторов требует применения дополнительной технологической оснастки, как правило, громоздкой, сложной в изготовлении, существенно снижающей точность измерений. К тому же диапазон рабочих частот вращения балансировочных станков, используемых в крупносерийном и массовом производстве, зачастую начинается от 6–10 Гц и выше. Поэтому вполне оправданным решением задачи балансировки в мелкосерийном производстве, с экономической точки зрения, является применение специализированных балансировочных станков (стендов), учитывающих конструктивные и технологические особенности балансируемых объектов [6].

В статье представлены схема и конструктивно-технологические характеристики низкочастотного вертикального динамического балансировочного стенда с газовыми опорами. Стенд обеспечивает прецизионное определение параметров массоинерционной асимметрии длиномерных тел вращения, представляющих собой сложный тонкостенный модуль конической формы, имеющий единственную действительную (штатную) плоскость коррекции, конструктивно расположенную на торце конуса, и возможность последующего приведения этих параметров (при необходимости) к значениям, не превышающим заданных предельно-допустимых значений.

Конструкция стенда

Балансировочный стенд, в соответствии с рис. 3, содержит фундамент 1 с вертикальной стойкой 2, на которой консольно закреплены нижняя и верхняя колебательные подвески 3 и 4, выполненные конструктивно идентичными, удерживающие соответственно нижнюю и верхнюю опоры 5 и 6, реализованные в виде конических газостатических подшипников с щелевыми ограничителями

расхода воздуха (достоинством таких газостатических подшипников является то, что ограничители щелевого типа практически не засоряются). Соосность подшипников обеспечивается конструкцией стенда [7, 8]. Также на вертикальной стойке закреплен свободный конец оптоволоконного световодного жгута 7, являющегося составной частью фотоэлектронного датчика (ФД). ФД выполнен в виде дискретной оптоэлектронной схемы и включает также в свой состав светодиодный излучатель и фотоприемник. Световодный жгут обеспечивает вывод генерируемого излучателем светового пучка в направлении, перпендикулярном цилиндрической части боковой поверхности технологического переходника 8, на которой закреплен зеркальный отражатель 9, а также передачу отраженного светового пучка к фотоприемнику. ФД используется как в качестве датчика угловой скорости, так и в качестве отметчика фазы дисбалансов. Срабатывание ФД происходит на каждом обороте ротора при появлении зеркального отражателя перед торцом свободного конца световодного жгута. В качестве ФД используется оригинальный датчик, обеспечивающий реализацию сформулированного выше принципа действия [9, 10].

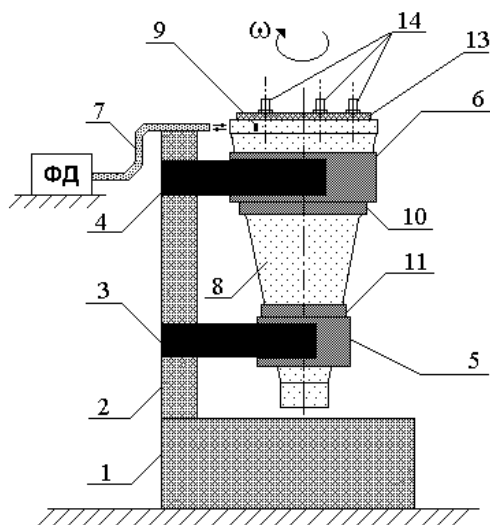


Рис. 3. Стенд для балансировки конических роторов в динамическом режиме:
13 – профилированная крышка; 14 – резьбовые фиксирующие шпильки

Верхний газостатический подшипник совмещен с пневматическим приводом 10, выполненным в виде пневматического механизма разгона загруженного на опоры объекта контроля, а нижний подшипник – с пневматическим механизмом торможения 11. Пневматические механизмы разгона (пневмопривод вращения) и торможения (пневмотормоз) выполнены с тангенциально расположенными пазами. На рис. 4, где приведено сечение по пневмоприводу, показаны тангенциальные пазы 12, служащие для изменения направления подаваемого в них сжатого воздуха при разгоне ротора. Пневмотормоз отличается обратной ориентацией пазов для подачи воздуха. Алгоритм работы измерительно-управляющей системы стенда исключает возможность одновременной подачи сжатого воздуха в пневмопривод и пневмотормоз. Подача сжатого воздуха через тангенциальные пазы производится по касательной к поверхности контролируемого объекта, чем обеспечивается минимизация времени его раскрутки или торможения.

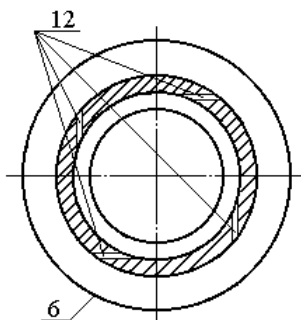


Рис. 4. Сечение по пневмоприводу разгона ротора:
6 – верхний газостатический подшипник

Конструктивная схема колебательной подвески приведена на рис. 5. Каждая подвеска представляет собой единую деталь, образованную двумя параллельными упругими пластинами 15 и общим массивным основанием 16. Между пластинами консольно закреплен газостатический подшипник. На массивных основаниях каждой колебательной подвески выполнены жесткие базовые выступы на расстоянии, равном примерно 1/5 длины пластин, от массивного основания. На одном из базовых выступов размещен пьезоэлектрический датчик силы генераторного типа 17, а на втором – соосно с датчиком силы – металлическая втулка 18, контактирующая с упругими консольными пластинами [6, 11]. Выбор пьезоэлектрических датчиков обусловлен их высокими метрологическими характеристиками и надежностью в работе, а также отсутствием необходимости в обеспечении электрического питания датчиков.

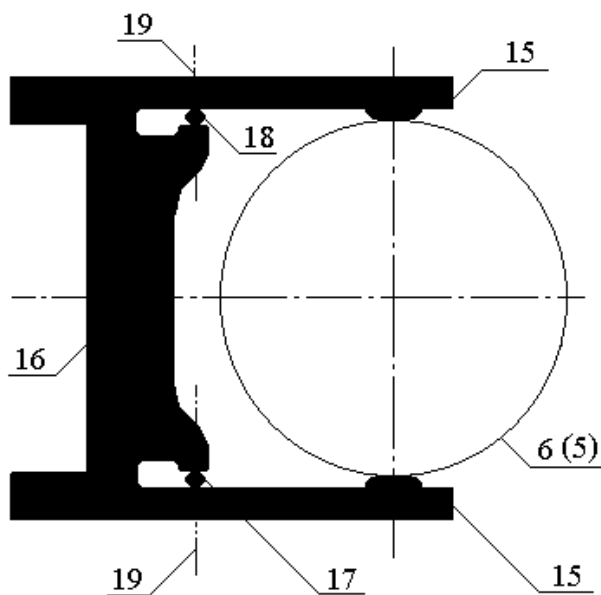


Рис. 5. Колебательная подвеска:
6 (5) – условное обозначение верхнего (нижнего) газостатического подшипника

Конструкцией подвески обеспечивается расположение оси чувствительности 19 датчика силы и металлической втулки, параллельное по отношению к направлению вибрации газостатического подшипника, вызванной вращением в подшипнике неуравновешенного ротора. Втулки по своим массовым и геометрическим характеристикам, а также по характеристикам жесткости соответствуют аналогичным характеристикам датчиков силы и используются для придания симметричности конструкции подвесок. Датчики и втулки поджимают винтами (не показаны) с идентичным усилием затяжки. Выполнение упругих пластин заодно с собственным основанием (из цельного куска металла) обеспечивает повышение точности измерений параметров ответной реакции упругой подвески на возникающий дисбаланс, а также повышает стабильность этих измерений при колебаниях температуры. Размещение датчиков силы на жестких базовых выступах оснований, а также плечо установки, равное 1/5 длины пластины, увеличивают чувствительность измерительной схемы, по которой включены силоизмерительные датчики, что, в свою очередь, также повышает точность измерений вибраций опор.

Технологический переходник в соответствии с рис. 6 представляет собой жесткий тонкостенный полый кожух конической формы, внутри которого установлен торцом кверху и зафиксирован балансируемый ротор 20. Наружная поверхность переходника взаимодействует с газостатическими подшипниками через воздушные зазоры. Внутренняя поверхность переходника снабжена базовыми опорами, предназначенными для установки балансируемого ротора на его опорные поверхности 25. Верхняя базовая опора 21 переходника выполнена неподвижной, а нижняя базовая опора 22 выполнена подвижной вдоль продольной оси для обеспечения осевого базирования роторов, имеющих разброс геометрических параметров. Посредством винтов (не показаны) к верхнему торцу переходника прикрепляется профилированная крышка 13. Профилированная крышка с помощью трех резьбовых фиксирующих шпилек 14, расположенных равномерно по окружности крышки, обеспечивает

осевую фиксацию балансируемого ротора, устанавливаемого внутри переходника. На верхнем и нижнем торцах переходника равномерно по окружности выполнены резьбовые отверстия (не показаны) для крепления пробных грузов [8, 11].

Применение технологического переходника позволяет балансировать роторы различной геометрии без смены подшипников, исключить возможность механического контакта контролируемого изделия с балансировочным оборудованием, а также материализует вторую плоскость коррекции, что необходимо для настройки измерительной системы стенда, выполняемой в ходе каждого балансировочного эксперимента. В качестве указанной второй (нижней) плоскости коррекции используется нижний торец 23 переходника (при этом в качестве первой – верхней – используется штатная плоскость коррекции 24 испытуемого ротора).

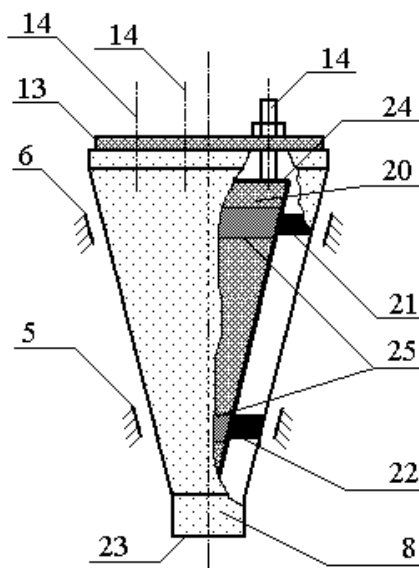


Рис. 6. Сборный ротор: 5, 6 – условное обозначение газостатических подшипников; 8 – технологический переходник; 14 – резьбовые фиксирующие шпильки

В качестве рабочего тела используется сжатый воздух, поступающий из заводской пневмосети низкого давления (0,6 МПа) в зазор между сопрягаемыми поверхностями подшипников опор и переходника через щелевые ограничители расхода, а также в пневмопривод и пневмотормоз. Использование газовой смазки исключает сухое трение между сопрягаемыми поверхностями и износ рабочих поверхностей подшипников. Перед проведением балансировочного эксперимента должны быть определены (с применением другого оборудования и других средств измерений) масса, продольное положение центра масс, а также значения аксиального и экваториального моментов инерции контролируемого ротора, необходимые для использования при проведении последующего балансировочного расчета.

При подготовке балансировочного эксперимента, после подачи сжатого воздуха в газостатические подшипники и установки на подшипники технологического переходника, на внутренние опоры переходника устанавливают ротор и фиксируют его с помощью крышки и резьбовых шпилек. Образованный таким путем сборный ротор испытывает минимальное трение и прецизионно центрируется в газостатических подшипниках по наружной поверхности переходника (зазоры не менее 0,05 мм). Также наличие слоя газовой смазки исключает механический контакт наружных поверхностей переходника с рабочими поверхностями газостатических подшипников.

Контролируемое изделие на стенде балансируется как отдельная деталь в составе сборного ротора [12]. В процессе балансировочного эксперимента выполняют серию пусков – в исходном состоянии сборного ротора и с пробными грузами известной массы, поочередно прикрепляемыми в известных угловых положениях к верхней и нижней плоскостям коррекции. Результаты измерений с пробными грузами используют для определения балансировочных коэффициентов – коэффициентов балансировочной чувствительности измерительной системы, коэффициентов взаимовлияния плоскостей коррекции и фазовых сдвигов сигналов дисбалансов [13, 14]. Для исключения паразитных дисбалансов, обусловленных использованием технологического переходника в составе сборного ро-

тора, измерения вибраций опор в исходном состоянии ротора проводят в двух фиксированных угловых положениях контролируемого ротора относительно переходника, отличающихся друг от друга на 180° . При этом полученные результаты измерений усредняют, выделяя дисбалансы контролируемого ротора, действующие в плоскостях коррекции [14, 15].

Регистрация и обработка измерительных сигналов

В каждом пуске балансировочный стенд работает следующим образом. Сжатый воздух подает в пневмопривод вращения, который за небольшое время (примерно 2–3 мин) плавно раскручивает сборку до скорости вращения, превышающей рабочую на ~15–20 %, после чего подачу воздуха в пневмопривод прекращают. При этом исчезают вибрации, вызванные работой пневмопривода, и сборка, свободно вращаясь в газовых опорах, начинает медленно затормаживаться под действием сил тяжести и сил трения. Началом регистрации является сигнал от ФД, поступивший в измерительную систему при достижении заданной рабочей частоты вращения (неизменной для всех пусков в течение всего балансировочного эксперимента) на выбеге сборного ротора. Сигнал от ФД однозначно определяет ориентацию системы координат технологического переходника относительно системы координат балансировочного стенда. По окончании регистрации вибросигналов, подачей сжатого воздуха в пневмотормоз, за время от 3 до 4 мин осуществляют плавное торможение сборки до полного останова. В каждом пуске измерения вибраций опор проводятся на выбеге сборного ротора, при достижении заданной рабочей частоты вращения.

Повышенная точность измерений параметров сигналов дисбалансов обеспечивается ограничением времени регистрации вибросигналов и использованием преобразования Фурье для выделения сигналов из аддитивной смеси с помехой. В частности, вибросигналы, поступающие в измерительную систему стенда, регистрируют параллельно, одновременно от обоих силоизмерительных датчиков, в течение времени, равного 4–5 полным оборотам сборного ротора. При этом изменение частоты вращения, происходящее за время регистрации, составляет пренебрежимо малую величину, не превышая 0,4–0,5 % от значения рабочей частоты. Также следует отметить, что при вращении в опорах несбалансированного тела, кроме его дисбалансов, на опоры действуют вибрации, вызванные силами, изменяющимися в широком частотном диапазоне. Причинами возникновения таких паразитных вибраций могут быть неидеальность сопрягаемых поверхностей технологического переходника и газостатических подшипников, неравномерность воздушных зазоров между сопрягаемыми поверхностями, акустические резонансы, возникающие в результате многократных отражений воздуха подводимого сжатого воздуха при прохождении воздушных потоков через колена пространственно-изогнутых напорных трубопроводов, собственные резонансы колебательной системы, определяемые колеблющимися массами, жесткостью воздушной пленки в зазорах, разделяющих сопрягаемые поверхности, трибоэлектрические эффекты в измерительных кабелях и др. В результате хорошо известная особенность используемых пьезоэлектрических датчиков, связанная с их высокой чувствительностью к помехам промышленного характера, приводит к тому, что на входе приемника вибросигналов присутствует сложная смесь сигналов с очень большим разбросом по амплитуде, что требует принятия специальных мер для борьбы с помехами и выделения полезного сигнала [16].

Для выделения полезных сигналов, пропорциональных действующим в плоскостях коррекции дисбалансам, в составе измерительной системы разработан и функционирует аппаратно-программный алгоритм регистрации и обработки вибросигналов, обеспечивающий значительное расширение динамического диапазона измерений сигналов и повышение добротности фильтра (до 160–200 единиц добротности). Структурная схема измерительного канала, а также временные диаграммы и частотные спектры сигналов, иллюстрирующие алгоритм обработки входного вибросигнала и выделения полезного сигнала, несущего информацию о параметрах дисбаланса, приведены на рис. 7. Алгоритм заключается в том, что первоначальный вибросигнал, поступающий от пьезоэлектрического датчика силы, установленного в верхней или нижней опоре, и содержащий сигналы помех, подвергается предварительной аналоговой обработке, обеспечивающей импедансное согласование с входом приемника (через посредство предварительного усилителя напряжения, обладающего высоким входным сопротивлением), аналоговую низкочастотную фильтрацию и усиление. Затем сигнал оцифровывается и в течение непродолжительного (2–3 с) промежутка времени регистрируется в дискретно-временной форме в оперативной памяти компьютера, входящего в состав измерительной системы стенда. Регистрация вибросигналов, поступающих от обоих датчиков силы, иницииру-

ется сигналом от ФД и выполняется параллельно, по двум независимым измерительным каналам. Для проведения аналоговой обработки сигналов по описанному выше алгоритму в системе используется оригинальный прибор [10].

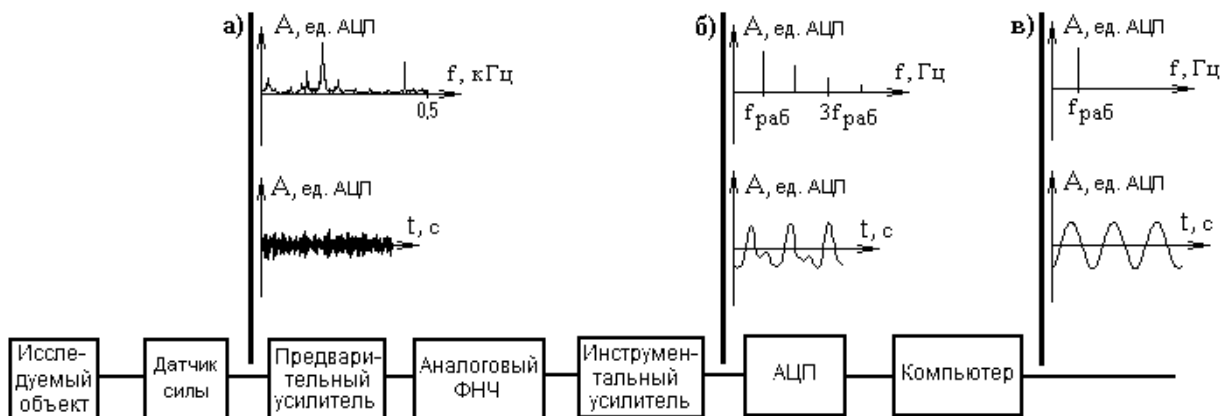


Рис. 7. Алгоритм регистрации и обработки вибросигналов: ФНЧ – фильтр низких частот; АЦП – аналого-цифровой преобразователь

Дальнейшая обработка зарегистрированных сигналов с целью выделения дискретных составляющих с частотой, равной рабочей частоте вращения, производится в постреальном режиме, после проведения всей серии пусков сборного ротора и регистрации всех цифровых реализаций вибросигналов. В процессе обработки исходный сигнал сначала раскладывается в ряд Фурье, затем генерируется частотная характеристика полосового фильтра с частотой пропускания, равной частоте вращения сборного ротора, и частотное представление ряда Фурье перемножается на характеристику фильтра, после чего к результату перемножения применяется процедура обратного преобразования Фурье, получая на выходе синусоидальный сигнал с частотой, равной частоте вращения ротора, не содержащий пульсаций и налагающейся частоты, который принимается за основной (полезный) измерительный сигнал. Далее определяются амплитуды и фазы выделенных полезных сигналов, после чего с использованием балансировочных коэффициентов рассчитываются значения и угловые положения дисбалансов \vec{D}_B и \vec{D}_H , действующих, соответственно, в верхней и нижней плоскостях коррекции [16, 17].

Балансировка

Балансировочный расчет проводят по результатам определения параметров дисбалансов \vec{D}_B и \vec{D}_H . В процессе расчета определяют параметры, характеризующие асимметричность распределения масс контролируемого тела (как и любой вектор, параметры определяются значением и угловым положением), по формулам [4, 11, 18]:

$$\vec{\rho} = \frac{\vec{D}_B + \vec{D}_H}{M}; \quad \vec{\alpha}_x = \frac{1}{2} \arcsin \frac{2(\vec{D}_B x_B - \vec{D}_H x_H)}{\Delta I},$$

где M – масса тела; $\Delta I = I_3 - I_a$ – разность между экваториальным I_3 и аксиальным I_a моментами инерции тела; x_B и x_H – расстояния от центра масс тела до верхней и нижней плоскости коррекции соответственно. Затем при необходимости корректировки массы контролируемого тела с целью приведения параметров массо-инерционной асимметрии к заданным нормативам дальнейший расчет массы и углового положения балансировочного груза (грузов) в штатной плоскости коррекции может быть выполнен с использованием алгоритма, обеспечивающего оптимизацию по критерию достижения минимального значения одним из контролируемых параметров асимметрии, описанного в работе [19]. После корректировки массы тела выполняют пуски для контроля значений остаточных параметров массо-инерционной асимметрии. А в случае если по результатам проведенного балансировочного расчета выявлена невозможность достижения заданных нормативов статической и

моментной балансировки, процесс уравнивания прекращается, а объект контроля направляется изготовителю на перекомпоновку.

Метрологическое обеспечение

Для проведения работ по тестированию нормируемых метрологических характеристик балансировочного станда, которые должны выполняться с определенной периодичностью, станд оснащается рабочим эталоном для каждого типа контролируемых изделий и набором контрольных грузов. Рабочий эталон представляет собой металлическое тело вращения конической формы и является массогабаритным макетом контролируемого изделия, массоцентровочные и инерционные характеристики, а также базовые посадочные поверхности которого соответствуют указанным характеристикам и поверхностям изделия. Контрольные грузы представляют собой резьбовые втулки известной массы, предназначенные для установки в резьбовые отверстия, имеющиеся на плоскостях коррекции. Прикрепление контрольных грузов к плоскостям коррекции, расположенным на противоположных торцах эталонного ротора, позволяет смоделировать различные эталонные значения массо-инерционных параметров в заданных диапазонах их измерений. Измерения эталонных значений выполняют по методике выполнения штатных измерений при проведении балансировочного эксперимента. Оценку точности измерений проводят по результатам сравнения измеренных и смоделированных значений параметров массо-инерционной асимметрии [20, 21].

Заключение

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования подтвердили возможность балансировки тонкостенных длинномерных тел конической формы при небольших рабочих частотах вращения (до 2 Гц) и определения величины поперечного смещения центра масс и угла отклонения продольной ГЦОИ относительно геометрической оси с погрешностями, не превышающими соответственно 0,01 мм и 1 угловой минуты [21, 22]. Это в пять и более раз превышает точность измерений тех же параметров на стандах, реализующих весовой и маятниковый методы измерений. Высокая точность измерений определяется конструкцией балансировочного станда, вертикальным расположением оси вращения, использованием газовой смазки, экспериментальной настройки станда на контролируемое изделие, применением комбинированного фильтра вибросигналов с применением процедуры Фурье-фильтрации. Созданная на основе станда автоматизированная система контроля прошла испытания и имеет сертификат об утверждении типа средств измерений № 32831. Простота и функциональность, относительно высокая производительность станда позволяют сбалансировать тело или произвести его отбраковку (в случае доказательства невозможности достижения заданных нормативов балансировки, полученного в ходе проведения балансировочного расчета) за время, не превышающее 1,5–2 ч, что позволяет применять станд в серийном производстве.

Список литературы

1. Левит М. Е., Рыженков В. М. Балансировка деталей и узлов. М. : Машиностроение, 1986. 248 с.
2. Ключников А. В. Перспективы использования балансировочного оборудования в задаче контроля характеристик массоинерционной асимметрии БПЛА // Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н. Е. Жуковского : тр. XIII Всерос. науч.-техн. конф. (г. Москва, 14–15 апреля 2016 г.). М. : Изд. дом Академии имени Н. Е. Жуковского, 2016. С. 67–71.
3. Ключников А. В., Васильев М. А., Патокина Н. Е. [и др.]. Конструкции и пути совершенствования систем контроля характеристик геометрии масс летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 3. С. 105–114.
4. Основы балансировочной техники. Т. 1. Уравнивание жестких роторов и механизмов / под ред. В. А. Щепетильникова. М. : Машиностроение, 1975. 527 с.
5. Современные методы балансировки машин и приборов / под ред. В. А. Щепетильникова. М. : Машиностроение, 1985. 232 с.
6. Абышев Н. А., Ключников А. В. К вопросу оптимизации выбора стандового оборудования, используемого для уравнивания летательных аппаратов // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2020. № 3. С. 77–85.
7. Патент 2292533 РФ МПК G 01M 1/02. Балансировочный станд с вертикальной осью вращения / Глазырина Л. М., Карповицкий М. С., Ключников А. В., Мальгин А. И., Смирнов Г. Г., Фомин Ю. П. № 2004112999/28А ; заявл. 27.04.2004 ; опубл. 27.01.2007, Бюл. № 3.

8. Абышев Н. А., Ключников А. В., Михайлов Е. Ф., Чертков М. С. Стенд для прецизионной бесконтактной балансировки конических роторов в динамическом режиме // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2014. Т. 2. С. 234–236.
9. Ключников А. В., Кузнецов А. В., Лысых А. В. [и др.]. Особенности контроля частоты вращения в процессе балансировки летательных аппаратов на динамическом стенде // Радиовысотометрия : труды IV Всерос. науч.-техн. конф. (г. Каменск-Уральский, 22–24 октября 2013 г.). Екатеринбург : Форт Диалог-Исеть, 2013. С. 195–198.
10. Ключников А. В. Обработка измерительных сигналов в процессе динамической балансировки летательного аппарата // Вестник воздушно-космической обороны. 2019. № 1. С. 86–92.
11. Абышев Н. А., Андреев С. В., Ключников А. В. Конструктивные особенности стенда для диагностики характеристик асимметрии масс летательных аппаратов // Авиакосмическое приборостроение. 2015. № 1. С. 39–45.
12. Патент 2292534 РФ МПК G 01 М 1/04. Способ балансировки ротора / Глазырина Л. М., Карповицкий М. С., Ключников А. В., Мальгин А. И., Смирнов Г. Г., Фомин Ю. П. № 2004112998/28А ; заявл. 27.04.2004 ; опубл. 27.01.2007, Бюл. № 3.
13. Патент 2453818 РФ МПК G 01 М 01/22. Способ настройки балансировочного стенда для определения параметров массо-инерционной асимметрии роторов / Ключников А. В. № 2011100182/28А ; заявл. 11.01.2011; опубл. 20.06.2012, Бюл. №17.
14. Ключников А. В. Методическое обеспечение процесса индивидуальной настройки динамического балансировочного стенда на объект контроля // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии : тр. XIV Междунар. науч.-практ. конф. (г. Сочи, 1–10 октября 2017 г.). М. : Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. проф. Жуковского, 2017. С. 382–386.
15. Ключников А. В. Способ устранения влияния технологической оснастки на результаты измерений в процессе динамической балансировки летательного аппарата // Решетневские чтения : материалы XIX Междунар. науч. конф. (г. Красноярск, 10–13 ноября 2015 г.) : в 2 ч. Красноярск : СибГАУ, 2015. Ч. 1. С. 21–23.
16. Puyikh V. V., Klyuchnikov A. V., Chertkov M. S., Shagimuratov M. D. To the issue about slowing down of sensitivity to the industrial hindrances of a measuring system of counterbalancing stand, created with use of gas supports // Innovative Information Technologies : materials of the IV International scientific-practical conference (Prague, Cech Republic, April 24–28, 2017). Moscow : Association of graduates and employees of AFEA named after prof. Zhukovsky, 2017. P. 614–617.
17. Абышев Н. А., Ключников А. В., Шагимуратов М. Д. Компенсация погрешностей дисбалансов, вызванных фазовыми сдвигами измерительных сигналов балансировочного стенда // Научно-технический вестник Поволжья. 2019. № 7. С. 15–18.
18. Ключников А. В. Уточненная математическая модель оценки и обеспечения параметров массо-инерционной асимметрии длинномерного роторного модуля // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2012. Т. 1. С. 224–227.
19. Ключников А. В. Особенности процедуры уравнивания длинномерного тела в единственной плоскости коррекции дисбалансов на вертикальном балансировочном стенде // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 1. С. 83–90.
20. Патент 2434212 РФ МПК G 01 М 1/04. Способ проверки качества функционирования низкочастотного динамического балансировочного стенда / Ключников А. В., Фомин Ю. П. № 2010106845/28А ; заявл. 24.02.2010; опубл. 20.11.2011; Бюл. № 32.
21. Ключников А. В., Лысых А. В., Чертков М. С. Метрологические аспекты модели уравнивания летательного аппарата на динамическом балансировочном стенде // Вестник Концерна ПВО «Алмаз-Антей». 2015. № 1. С. 43–48.
22. Klyuchnikov A. V. Verification of dynamic balancing stand accuracy parameters // Innovative Information Technologies : Materials of the V International scientific-practical conference (Prague, Cech Republic, April 23–27, 2018). Moscow : Association of graduates and employees of AFEA named after prof. Zhukovsky, 2018. P. 454–459.

References

1. Levit M.E., Ryzhenkov V.M. *Balansirovka detaley i uzlov = Balancing of parts and assemblies*. Moscow: Mashinostroenie, 1986:248. (In Russ.)
2. Klyuchnikov A.V. Prospects for the use of balancing equipment in the task of controlling the characteristics of mass-inertia asymmetry of UAVs. *Nauchnye chteniya po aviatsii, posvyashchennye pamyati N.E. Zhukovskogo: tr. XIII Vseros. nauch.-tekhn. conf. (g. Moskva, 14–15 aprelya 2016 g.) = Scientific readings on aviation dedicated to the memory of N. E. Zhukovsky : proceedings of the XIII All-Russian Scientific and Technical conf. (Moscow, April 14–15, 2016)*. Moscow: Izd. dom Akademii imeni N.E. Zhukovskogo, 2016:67–71. (In Russ.)
3. Klyuchnikov A.V., Vasil'ev M.A., Patokina N.E. et al. Designs and ways of improving control systems for the characteristics of the geometry of the masses of aircraft. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2018;(3):105–114. (In Russ.)

4. Shchepetil'nikov V.A. (ed.). *Osnovy balansirovochnoy tekhniki. T. 1. Uravnoveshivanie zhestkikh rotorov i mekhanizmov = Fundamentals of balancing technology. Vol. 1. Balancing rigid rotors and mechanisms*. Moscow: Mashinostroenie, 1975:527. (In Russ.)
5. Shchepetil'nikov V.A. (ed.). *Sovremennye metody balansirovki mashin i priborov = Modern methods of balancing machines and devices*. Moscow: Mashinostroenie, 1985:232. (In Russ.)
6. Abyshev N.A., Klyuchnikov A.V. On the issue of optimizing the choice of bench equipment used for balancing aircraft. *Vestnik Kontserna VKO «Almaz-Antey» = Bulletin of the Concern of East Kazakhstan Region "Almaz-Antey"*. 2020;(3):77–85. (In Russ.)
7. Patent 2292533 Russian Federation, MPK G 01M 1/02. *Balansirovochnyy stend s vertikal'noy os'yu vrashcheniya = Balancing stand with vertical axis of rotation*. Glazyrina L.M., Karpovitskiy M.S., Klyuchnikov A.V., Mal'gin A.I., Smirnov G.G., Fomin Yu.P. No. 2004112999/28A; appl. 27.04.2004; publ. 27.01.2007, bull. № 3. (In Russ.)
8. Abyshev N.A., Klyuchnikov A.V., Mikhaylov E.F., Chertkov M.S. Stand for precision contactless balancing of conical rotors in dynamic mode. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2014;2:234–236. (In Russ.)
9. Klyuchnikov A.V., Kuznetsov A.V., Lysykh A.V. et al. Features of speed control in the process of balancing aircraft on a dynamic stand. *Radiovysotometriya: trudy IV Vseros. nauch.-tekhn. konf. (g. Kamensk-Ural'skiy, 22–24 oktyabrya 2013 g.) = Radio altimetry : proceedings of the IV All-Russian scientific-technical. conf. (Kamensk-Uralskiy, October 22–24, 2013)*. Ekaterinburg: Fort Dialog-Iset', 2013:195–198. (In Russ.)
10. Klyuchnikov A.V. Processing of measuring signals in the process of dynamic balancing of an aircraft. *Vestnik vozdušno-kosmicheskoy oborony = Bulletin of Aerospace Defense*. 2019;(1):86–92. (In Russ.)
11. Abyshev N.A., Andreev S.V., Klyuchnikov A.V. Design features of the stand for diagnostics of mass asymmetry characteristics of aircraft. *Aviakosmicheskoe priborostroenie = Aerospace instrumentation*. 2015;(1):39–45. (In Russ.)
12. Patent 2292534 Russian Federation, MPK G 01 M 1/04. *Sposob balansirovki rotora = Rotor balancing method*. Glazyrina L.M., Karpovitskiy M.S., Klyuchnikov A.V., Mal'gin A.I., Smirnov G.G., Fomin Yu.P. No. 2004112998/28A; appl. 27.04.2004; publ. 27.01.2007, bull. № 3. (In Russ.)
13. Patent 2453818 Russian Federation, MPK G 01 M 01/22. *Sposob nastroyki balansirovochnogo stenda dlya opredeleniya parametrov masso-inertsionnoy asimmetrii rotorov = A method for setting up a balancing stand to determine the parameters of the mass-inertial asymmetry of rotors*. Klyuchnikov A.V. No. 2011100182/28A; appl. 11.01.2011; publ. 20.06.2012, bull. № 17. (In Russ.)
14. Klyuchnikov A. V. Methodological support for the process of individual adjustment of the dynamic balancing stand to the object of control. *Innovatsionnye, informatsionnye i kommunikatsionnye tekhnologii: tr. XIV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Sochi, 1–10 oktyabrya 2017 g.) = Innovative, information and communication technologies : Proceedings of the XIV International scientific and practical conference (Sochi, October 1–10, 2017)*. Moscow: Assotsiatsiya vypusnikov i sotrudnikov VVIA im. prof. Zhukovskogo, 2017:382–386. (In Russ.)
15. Klyuchnikov A.V. A way to eliminate the influence of technological equipment on measurement results in the process of dynamic balancing of an aircraft. *Reshetnevskie chteniya: materialy XIX Mezhdunar. nauch. konf. (Krasnoyarsk, 10–13 noyabrya 2015 g.): v 2 ch. = Reshetnev readings : materials of the XIX International Scientific Conference (Krasnoyarsk, November 10–13, 2015) : in 2 parts*. Krasnoyarsk: SibGAU, 2015:(part 1):21–23. (In Russ.)
16. Ilyiykh V.V., Klyuchnikov A.V., Chertkov M.S., Shagimuratov M.D. To the issue about slowing down of sensitivity to the industrial hindrances of a measuring system of counterbalancing stand, created with use of gas supports. *Innovative Information Technologies: materials of the IV International scientific-practical conference (Prague, Czech Republic, April 24–28, 2017)*. Moscow: Association of graduates and employees of AFEA named after prof. Zhukovsky, 2017:614–617.
17. Abyshev N.A., Klyuchnikov A.V., Shagimuratov M.D. Compensation of errors of imbalances caused by phase shifts of measuring signals of the balancing stand. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Povolzh'ya = Scientific and Technical Bulletin of the Volga region*. 2019;(7):15–18. (In Russ.)
18. Klyuchnikov A.V. A refined mathematical model for estimating and providing parameters of mass-inertial asymmetry of a long-dimensional rotary module". *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2012;1:224–227. (In Russ.)
19. Klyuchnikov A.V. Features of the procedure for balancing a long body in a single plane of correction of imbalances on a vertical balancing stand. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(1):83–90. (In Russ.)
20. Patent 2434212 Russian Federation, MPK G 01 M 1/04. *Sposob proverki kachestva funktsionirovaniya nizkочастотного динамического балансирующего стента = Method for checking the quality of functioning of a low-frequency dynamic balancing stand*. Klyuchnikov A.V., Fomin Yu.P. No. 2010106845/28A; appl. 24.02.2010; publ. 20.11.2011; bull. № 32. (In Russ.)

21. Klyuchnikov A.V., Lysykh A.V., Chertkov M.S. Metrological aspects of the aircraft balancing model on a dynamic balancing stand. *Vestnik Kontserna PVO «Almaz-Antey» = Bulletin of the Air Defense Concern Almaz-Antey*. 2015;(1):43–48. (In Russ.)
22. Klyuchnikov A.V. Verification of dynamic balancing stand accuracy parameters. *Innovative Information Technologies: Materials of the V International scientific-practical conference (Prague, Czech Republic, April 23–27, 2018)*. Moscow: Association of graduates and employees of AFEA named after prof. Zhukovsky, 2018:454–459.

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Васильевич Ключников

кандидат технических наук, главный специалист,
Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт
технической физики имени академика Е. И. Забабахина
(Россия, г. Снежинск, ул. Васильева, 13)
E-mail: a.klyuchnikov@bk.ru

Aleksandr V. Klyuchnikov

Candidate of technical sciences, chief specialist,
Russian Federal Nuclear Centre – All-Russia Research
Institute of Technical Physics named after Academician
E.I. Zababakhin
(13 Vasilyeva street, Snezhinsk, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 07.12.2022

Поступила после рецензирования/Revised 19.01.2023

Принята к публикации/Accepted 16.02.2023

КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВНУТРИЗОННОГО ДЕТЕКТОРА НЕЙТРОНОВ В СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

А. М. Панкин¹, А. А. Калютик², В. С. Костарев³

^{1, 2, 3} Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия
¹alpank@niti.ru, ²Kalyutik@yandex.ru, ³slavakostarev@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Надежная работа внутризонных детекторов нейтронов позволяет повысить качество обработки измерительной информации в целях построения полей распределения нейтронов и энерговыделения по объему активной зоны ядерного реактора. *Материалы и методы.* Рассмотрен новый метод контроля технического состояния датчика прямого заряда (ДПЗ), используемого для измерения нейтронного потока в активной зоне ядерного реактора. Метод основан на измерении токовых величин в статических и динамических режимах работы измерительной цепи датчика. Для контроля состояния данного детектора нейтронов предлагается определять не только сопротивление изоляции измерительного кабеля, как это выполняется в традиционных методах, но и генерирующую способность эмиттера датчика. В дополнение к указанным диагностическим параметрам в данной работе введен новый диагностический признак контролируемого объекта в виде емкости измерительной цепи. *Результаты и выводы.* Определение генерирующей способности эмиттера ДПЗ позволяет существенно (на 3–4 порядка) расширить рабочий диапазон датчика по допустимой величине сопротивления изоляции (менее 10^6 Ом). При этом мы получаем новый способ оценки степени выгорания эмиттера электронов под воздействием нейтронного потока и контролируем техническое состояние датчика по величине его чувствительности к этому потоку, что повышает надежность используемого ДПЗ. Определение величины емкости измерительного кабеля электрической цепи датчика позволяет корректно учитывать эту величину при измерениях токового сигнала активационного датчика в целях нахождения нейтронного потока ядерного реактора в переходных режимах его работы.

Ключевые слова: датчик, контроль, ядерный реактор, нейтронный поток, система диагностирования, диагностический признак, электрическая цепь

Для цитирования: Панкин А. М., Калютик А. А., Костарев В. С. Контроль технического состояния внутризонного детектора нейтронов в статических и динамических режимах работы ядерного реактора // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 118–125. doi:10.21685/2307-4205-2023-1-14

IN-CORE NEUTRON DETECTOR MONITORING UNDER STEADY AND DYNAMIC REACTOR CONDITIONS

A.M. Pankin¹, A.A. Kalyutik², V.S. Kostarev³

^{1, 2, 3} Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia
¹alpank@niti.ru, ²Kalyutik@yandex.ru, ³slavakostarev@yandex.ru

Abstract. *Background.* Reliable operation of in-core neutron detectors improves the quality of measurement data processing and make fields of the neutron and power distributions in the nuclear reactor core more efficient. *Materials and methods.* The article discusses a new method for monitoring the technical condition of self-powered neutron detector (SPND) that is used to measure neutron flux in the nuclear reactor core. The method is based on the measurement of current values of the detector measuring circuit under steady and dynamic conditions. To monitor the state of this neutron detector, it is proposed to determine not only the insulation resistance of the measuring cable, as it is done in traditional methods, but also the generating capacity of the detector emitter. In addition to the given diagnostic parameters, a new diagnostic feature of the controlled object – capacitance of the measuring circuit of the reactor – has been introduced in this article. *Results and conclusions.* Determination of the generating capacity of SPND emitter significantly (by 3–4 orders of magnitude) extends the operating range of the detector by the permissible insulation resistance value (less than 10^6 Ohms). At the same time, we obtain a new method to estimate the degree of electron emitter burnup caused by neutron flux and to monitor the technical condition of detector by the magnitude of its sensitivity to this flux, which increases the reliability of SPND. Determining the capacitance of the measuring cable of the electrical circuit allows you to properly consider this value when measuring the current signal of the activation detector in order to find the reactor neutron flux under the transient modes of operation.

Keywords: detector, monitoring, nuclear reactor, neutron flux, diagnostic system, diagnostic feature, electrical circuit

For citation: Pankin A.M., Kalyutik A.A., Kostarev V.S. In-core neutron detector monitoring under steady and dynamic reactor conditions. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(1):118–125. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-1-14

Введение

Датчик прямого заряда (ДПЗ) представляет детектор нейтронов, находящийся внутри активной зоны ядерного реактора.

Контроль технического состояния ДПЗ традиционным способом выполняется на основе измерения сопротивления изоляции измерительного кабеля. При уменьшении величины этого сопротивления происходит возрастание тока утечки, как следствие – уменьшение измеряемого тока на выходе измерительной цепи датчика, по величине которого и находится нейтронный поток в месте расположения ДПЗ в активной зоне ядерного реактора, для чего датчик и предназначен.

Сопротивление изоляции измерительного кабеля может определяться разными способами. Одним из них является метод, когда сопротивление тока утечки устанавливается с помощью измерительной схемы с дополнительным источником напряжения с величиной ЭДС ~ 100 мВ. Напомним, что принцип работы самого ДПЗ позволяет рассматривать его в качестве источника электрического тока короткого замыкания [1].

Для определения сопротивления, через которое проходит ток утечки, в известном методе рассматриваются два режима работы измерительной цепи [2].

В качестве недостатка такого способа следует считать отсутствие информации о техническом состоянии основного элемента ДПЗ – эмиттера датчика, который теряет свою генерирующую способность по мере выгорания входящих в него ядер элементов – источников β – частиц (электронов). Это происходит при облучении ядер эмиттера нейтронным потоком в активной зоне ядерного реактора. Следствием этого является уменьшение выходного сигнала детектора в условиях одинакового нейтронного потока. Отметим, что для определения величины этого нейтронного потока и создавался данный детектор. Однако при измерении выходного тока датчика на основе рассматриваемого метода [2] непонятно, за счет изменения каких параметров измерительной цепи датчика происходит уменьшение выходного сигнала: либо за счет уменьшения генерирующей способности эмиттера (уменьшения его чувствительности), либо за счет уменьшения сопротивления изоляции измерительного кабеля, вследствие чего происходит возрастание тока утечки.

Статические режимы контроля работоспособности ДПЗ

Для определения генерирующей способности эмиттера ДПЗ в работе [3] был представлен один из возможных способов. В этом способе в двух статических режимах работы измерительной цепи датчика получается измерительная информация, на основе которой выполняется идентификация двух диагностических признаков электрической цепи ДПЗ: мощности источника электрического тока и проводимости изоляции измерительного кабеля датчика, формирующей ток утечки.

Для этого используется измерительная схема, представленная на рис. 1.

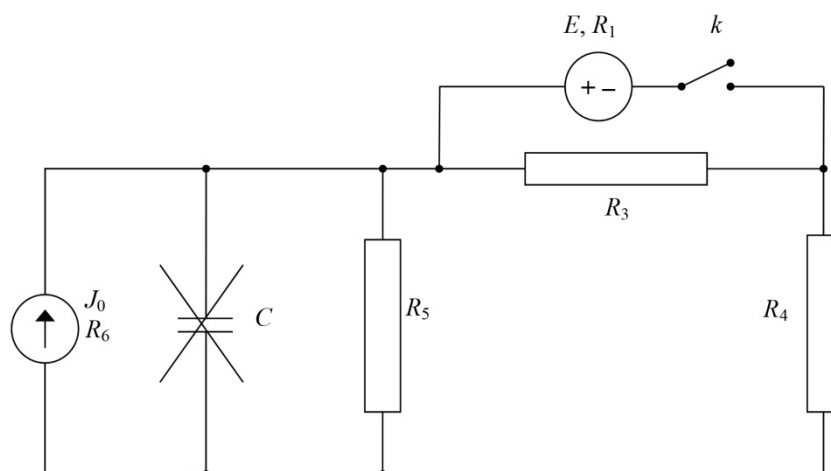


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения измерительной цепи ДПЗ

В рабочем режиме работы ДПЗ не используется дополнительно включаемый источник напряжения. Он нужен только для выполнения диагностирования состояния датчика. В этом случае рассматриваются следующие элементы измерительной цепи: ДПЗ в виде источника тока с параметрами $J_0, R_6; C$ – емкость кабеля измерительной цепи; R_3 – резистор, необходимый для обеспечения диагностического режима работы; R_4 – нагрузочное сопротивление, через которое протекает измеряемый ток датчика; R_5 – сопротивление изоляции кабеля измерительного канала; R_6 – внутреннее сопротивление датчика; J_0 – ток датчика на внутреннем участке цепи, обусловленный основными носителями заряда (β -частицы).

Нумерация ветвей схемы измерительной цепи представлена в соответствии с принятым в теоретической электротехнике [4] подходом в предположении, что в дальнейшем в схеме будет введен еще один элемент в виде емкости кабеля измерительной цепи C (динамический режим), который в статических режимах не рассматривается. В статических режимах эта величина представляется как разрыв электрической цепи, что и показано на рис. 1.

На основе законов Кирхгофа и уравнений элементов цепи для 1-го статического режима (рабочего) может быть записана система алгебраических уравнений (1). Эта система используется для определения расчетным путем тока i_4 , который протекает через нагрузочное сопротивление R_4 и может быть измерен в процессе диагностирования:

$$\begin{cases} i_3 + i_5 - i_6 = 0; \\ i_4 + i_5 - i_6 = 0; \\ -u_3 - u_4 + u_5 = 0; \\ u_3 + u_4 + u_6 = 0; \end{cases} \begin{cases} u_3 = R_3 i_3; \\ u_4 = R_4 i_4; \\ u_5 = R_5 i_5; \\ u_6 = i_6 R_6 - J_0 R_6. \end{cases} \quad (1)$$

Используются обозначения:

$$G_3 = 1/R_3; G_4 = 1/R_4; G_5 = 1/R_5; G_6 = 1/R_6; G = G_5 + G_6.$$

После решения системы (1) выражение для измеряемого тока может быть представлено в виде

$$i_4 = G_4 u_4 = \frac{G_3 G_4 J_0}{G_3 G_4 + (G_3 + G_4) G}. \quad (2)$$

Обозначим измеряемый в этом статическом режиме ток как I_1 , т.е. $I_1 = i_4$.

Для создания еще одного статического режима (диагностического) в цепь включается дополнительный источник напряжения.

В соответствии со схемой в цепь датчика в какой-то момент времени путем замыкания ключа k включается источник напряжения, имеющий ЭДС, равную E и внутреннее сопротивление $r_0 = R_1$.

После завершения переходного процесса, обусловленного наличием в цепи датчика реактивных элементов (паразитные емкости кабеля и, возможно, других дополнительных элементов цепи), в электрической цепи диагностического режима установится стационарный (статический) режим. При этом через нагрузочное сопротивление R_4 потечет электрический ток i_4 , имеющий значение, отличное от того, которое было получено для случая схемы основного режима датчика. Это значение так же, как и в основном режиме, должно быть измерено.

Для новой цепи системы алгебраических уравнений, аналогичные ранее представленным в виде (1), запишутся в виде

$$\begin{cases} i_1 - i_3 - i_5 + i_6 = 0; \\ i_4 + i_5 - i_6 = 0; \\ u_1 + u_3 = 0; \\ u_1 - u_4 + u_5 = 0; \\ -u_1 + u_4 + u_6 = 0; \end{cases} \begin{cases} u_1 = i_1 R_1 - E; \\ u_3 = R_3 i_3; \\ u_4 = R_4 i_4; \\ u_5 = R_5 i_5; \\ u_6 = i_6 R_6 - J_0 R_6. \end{cases} \quad (3)$$

Так же, как и в случае системы (1), используем систему (3) для расчетного определения тока i_4 , который протекает через нагрузочное сопротивление R_4 и может быть измерен. Расчетное значение определяется по формуле

$$i_4 = G_4 u_4 = \frac{(G_1 + G_3)G_4 J_0 - G_1 G_4 G E}{(G_1 + G_3)G_4 + (G_1 + G_3 + G_4)G}. \quad (4)$$

При этом: $G_1 = 1/R_1$; $G_3 = 1/R_3$; $G_4 = 1/R_4$; $G_5 = 1/R_5$; $G_6 = 1/R_6$; $G = G_5 + G_6$.

Обозначим измеряемый во втором статическом режиме ток как I_2 , т.е. $I_2 = i_4$.

Решение системы двух совместных уравнений (2) и (4) относительно неизвестных величин J_0 и G , как это выполнено в работе [3], позволяет определить эти диагностические признаки на основе измерений, выполненных в рассмотренных статических режимах.

Контроль параметров измерительной цепи датчика в динамических режимах

Дополнительная диагностическая информация может быть получена в динамических режимах работы измерительной цепи контролируемого ДПЗ. В качестве динамического режима предлагается использовать переходный процесс в измерительной цепи датчика по схеме, представленной на рис. 2, который создается при включении источника ЭДС путем замыкания ключа k .

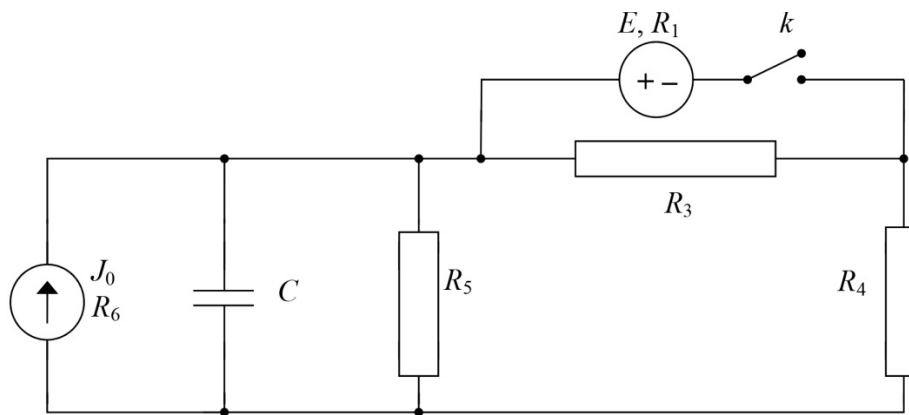


Рис. 2. Эквивалентная схема замещения измерительной цепи датчика при использовании переходного процесса (динамический режим)

По измерительной информации, снимаемой с нагрузочного сопротивления R_4 в динамическом режиме, предлагается определять емкость кабеля измерительной цепи C . При недопустимом изменении этой величины в процессе работы ядерного реактора может иметь место пробой изоляции измерительного кабеля и потеря работоспособности данного детектора нейтронов.

Для определения величины C может быть записана система алгебраических и дифференциальных уравнений, полученная по аналогии с системами (1) и (3):

$$\begin{cases} i_1 - i_3 + i_4 = 0; \\ i_2 + i_4 + i_5 - i_6 = 0; \\ u_1 + u_3 = 0; \\ -u_1 - u_2 + u_4 = 0; \\ -u_2 + u_5 = 0; \\ u_2 + u_6 = 0; \end{cases} \begin{cases} u_1 = i_1 R_1 - E; \\ i_2 = C \frac{du_2}{dt}; \\ u_3 = R_3 i_3; \\ u_4 = R_4 i_4; \\ u_5 = R_5 i_5; \\ u_6 = i_6 R_6 - J_0 R_6. \end{cases} \quad (5)$$

В эту систему входит измеряемая как функция от времени в переходном процессе величина тока $i_4 = i_4(t)$. Для нахождения величины C необходимо на основе системы (6) найти величины $u_2 = u_2(t)$ и $i_2 = i_2(t)$:

$$\begin{cases} I_1 = \frac{G_3 G_4 J_0}{G_3 G_4 + (G_3 + G_4)G}; \\ I_2 = \frac{(G_1 + G_3)G_4 J_0 - G_1 G_4 G E}{(G_1 + G_3)G_4 + (G_1 + G_3 + G_4)G}. \end{cases} \quad (6)$$

Для этих величин были получены формулы:

$$\begin{aligned} u_2(t) &= i_4(t)(RR * R_1 + R_4) + E(1 - RR); \\ i_2(t) &= J_0 - i_4(t)(1 + (RR * R_1 + R_4)G) - E(1 - RR)G, \end{aligned} \quad (7)$$

где G – величина проводимости, равная $G = G_5 + G_6$, а величина RR находится по формуле $RR = R_1 / (R_1 + R_3)$. Остальные величины были определены выше. После этого величина емкости C находится по формуле $C = \frac{i_2}{du_2/dt}$, которая в случае проведения численных расчетов по результатам измерения тока i_4 в моменты времени $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n, t_{n+1}$, т.е. получения зависимости $i_4 = i_4(t_i)$, записывается в виде выражения

$$C(t_i) = \frac{i_2(i+1) + i_2(i)}{2} \bigg/ \frac{u_2(i+1) - u_2(i)}{t(i+1) - t(i)}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (8)$$

Таким образом, на основе знания измеренных значений токовых величин и некоторых параметров измерительной цепи датчика в статическом и динамическом режимах могут быть идентифицированы структурные параметры электрической цепи, отнесенные к разряду диагностических признаков ДПЗ.

Постановка диагноза о техническом состоянии датчика

После того, как получены численные значения диагностических признаков ДПЗ, задача диагностирования решается на основе допускового контроля. При этом полученные значения сравниваются с предельно допустимыми значениями, определенными конструктором данного изделия для области работоспособных состояний. Так, например, для случая источника тока величина тока, проходящего по цепи нагрузки, должна быть заметной на фоне токов, обусловленных источниками помех.

Для определения допустимых значений параметров измерительной цепи ДПЗ предлагается использование расчетов по совместной системе уравнений (1), (3), (5). При этом может быть снят ряд ограничений, введенных ранее в традиционных методах контроля ДПЗ [2].

В качестве примера можно рассматривать изменение допустимых ограничений по параметру G сопротивления изоляции измерительной цепи. Проведенные расчеты по указанным системам уравнений показывают, что прежнее ограничение по параметру G ($\sim 10^6$ Ом) можно существенно изменить в сторону допустимого уменьшения этой величины, что значительно расширяет область работоспособности датчика (\sim на 3–4 порядка).

Оставшееся ограничение для этого параметра будет связано лишь с требуемой точностью измерения величины полезного тока i_4 через нагрузочное сопротивление R_4 . Объясняется это тем, что основным контролируемым параметром является величина тока J_0 , генерируемого эмиттером ДПЗ, которая не зависит (в отличие от тока i_4) от параметров схемы линии связи.

На рис. 3 представлено отношение измеряемого тока i_4 к величине тока J_0 в зависимости от сопротивления для тока утечки $R = 1/G$. Две представленные на графике кривые относятся к двум статическим режимам измерительной цепи датчика: рабочему и диагностическому.

Определение нейтронного потока в активной зоне ядерного реактора

В данной статье предлагается метод, позволяющий расширить круг диагностических признаков технического объекта в виде измерительной цепи детектора, включающей, помимо отдельных элементов схемы, и его основную часть – эмиттер β -частиц. Основным диагностическим параметром детектора следует считать чувствительность датчика к потоку нейтронов в месте расположения датчика. Эту характеристику предлагается определять на основе вычисления генерирующей способности эмиттера J_0 по экспериментальным данным.

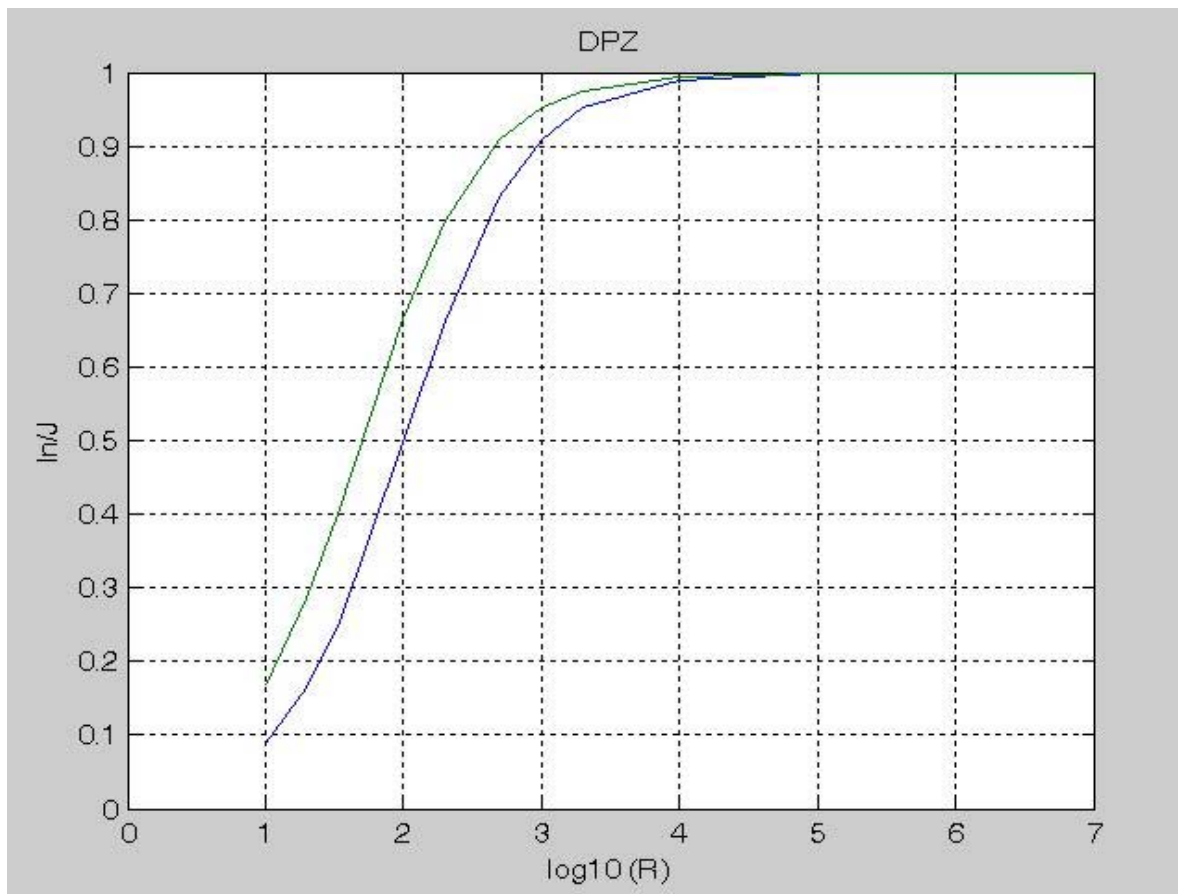


Рис. 3. Отношение измеряемого тока i_4 к величине тока J_0 в зависимости от сопротивления для тока утечки R

Для нахождения чувствительности детектора к нейтронному потоку необходимо после нахождения токового сигнала определить величину нейтронного потока, при котором этот сигнал был получен. Для этого в активной зоне ядерного реактора проводятся измерения с использованием активационных индикаторов, после обработки которых определяется абсолютное значение нейтронного потока вблизи датчика. При этом чувствительность датчика определяется по формуле $S = J_0 / \Phi$, где J_0 – ток эмиттера датчика; Φ – поток нейтронов в месте расположения датчика.

Известно, что измерения абсолютных значений физических величин представляют достаточно трудоемкие процедуры, поэтому в данном способе предполагается расчетно-экспериментальное определение относительных значений нейтронного потока в предположении, что для начала кампании реактора известно абсолютное значение нейтронного потока в месте расположения датчика, которое может быть определено по известной (номинальной) чувствительности датчика с невыгоревшим эмиттером в начале кампании активной зоны ядерного реактора [5].

При проведении повторных диагностических измерений в процессе кампании ядерного реактора с использованием расчетных программ находится относительное изменение величины потока нейтронов по сравнению с первоначальным значением. Таким образом, в процессе эксплуатации датчика контролируется изменение его чувствительности, а также выполняется оценка запаса работоспособности датчика при его приближении к предельному состоянию, после которого эксплуатация ДПЗ должна быть прекращена [6].

Заключение

Представленный алгоритм позволяет при диагностировании использовать более расширенный список диагностических параметров по сравнению с ранее представленными в работе [3].

Определение генерирующей способности эмиттера ДПЗ не только существенно расширяет область работоспособности датчика (на 3–4 порядка по допустимой величине сопротивления изоляции), но также позволяет перейти на принципиально иной метод определения степени выгорания эмиттера электронов под воздействием нейтронного потока. В результате этого контролируется

техническое состояние датчика по величине его чувствительности к этому потоку, что повышает надежность используемого ДПЗ [7].

Созданная в программной среде MATLAB расчетная программа может быть использована при контроле технического состояния нейтронных детекторов указанного типа в статических и динамических режимах работы ядерного реактора. На данный метод в 2022 г. был получен патент на изобретение РФ.

Список литературы

1. Мительман М. Г. [и др]. Детекторы для внутриреакторных измерений энерговыделения. М. : Атомиздат, 1997.
2. Патент 13281 РФ. Система контроля для обнаружения состояний датчика / Грибов А. А., Кирьянов А. А. № 99122231/20 ; заявл. 13.10.1999 ; опубл. 27.03.00.
3. Панкин А. М., Коровкин Н. В. Диагностические признаки при контроле технического состояния ДПЗ ядерного реактора // Атомная энергия. 2017. Т. 122, вып. 4. С. 235–238.
4. Башарин С. А., Федоров В. В. Теоретические основы электротехники. Теория электрических цепей и электромагнитного поля : учеб. пособие. М. : Академия, 2004. 304 с.
5. Михеев А. М., Семочкина И. Ю. Интеллектуальная геоинформационная система мониторинга и контроля состояний пространственно распределенных технически сложных объектов // Надежность и качество сложных систем. 2013. № 3. С. 48–51.
6. Абрамов О. В. Контроль и прогнозирование технического состояния систем ответственного назначения // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 4. С. 51.
7. Маркелов В. В., Власов А. И., Зотьева Д. Е. Автоматизация методов входного статистического контроля при управлении качеством изделий электронной техники в среде MATLAB // Надежность и качество сложных систем. 2014. № 3. С. 38–43.

References

1. Mitel'man M.G. et al. *Detektory dlya vnutrireaktornykh izmereniy energovydeleniya = Detectors for in-reactor measurements of energy release*. Moscow: Atomizdat, 1997. (In Russ.)
2. Patent 13281 Russian Federation. *Sistema kontrolya dlya obnaruzheniya sostoyaniy datchika = Control system for detecting sensor states*. Gribov A.A., Kir'yanov A.A. No. 99122231/20; appl. 13.10.1999; publ. 27.03.00. (In Russ.)
3. Pankin A.M., Korovkin N.V. Diagnostic signs when monitoring the technical condition of the DPZ of a nuclear reactor. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*. 2017;122(4):235–238. (In Russ.)
4. Basharin S.A., Fedorov V.V. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Teoriya elektricheskikh tsepey i elektromagnitnogo polya: ucheb. posobie = Theoretical foundations of electrical engineering. Theory of electric circuits and electromagnetic field : textbook*. Moscow: Akademiya, 2004:304. (In Russ.)
5. Mikheev A.M., Semochkina I.Yu. Intelligent geoinformation system for monitoring and controlling the states of spatially distributed technically complex objects. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2013;(3):48–51. (In Russ.)
6. Abramov O.V. Control and forecasting of the technical condition of systems of responsible purpose. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2018;(4):51. (In Russ.)
7. Markelov V.V., Vlasov A.I., Zot'eva D.E. Automation of input statistical control methods for quality management of electronic equipment products in the MATLAB environment. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2014;(3):38–43. (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

Aleksandr 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, Saint Petersburg, Russia)

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

Вячеслав Сергеевич Костарев

аспирант,
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29)
E-mail: slavakostarev@yandex.ru

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, Saint Petersburg, Russia)

Vyacheslav S. Kostarev

Postgraduate student,
Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University
(29 Polytechnicheskaya street, Saint Petersburg, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 17.12.2022

Поступила после рецензирования/Revised 21.02.2023

Принята к публикации/Accepted 17.02.2023

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА РЕЖИМЫ РАБОТЫ РЕЗОНАТОРА ВОЛНОВОГО ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ГИРОСКОПА

Н. В. Недопекин

Научно-исследовательский институт физических измерений, Пенза, Россия
inercial@niifi.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Изменение температуры окружающей среды оказывает значительное влияние на выходной сигнал волнового твердотельного гироскопа – датчика угловой скорости (ВТГ-ДУС), поэтому обязательным является контроль и компенсация этого влияния. *Материалы и методы.* Описаны экспериментальные результаты определения зависимости частоты собственных колебаний резонатора ВТГ-ДУС с пьезоэлектрическим управлением от значений температуры окружающей среды. *Результаты и выводы.* Показано, что каждой температуре соответствует только одно значение частоты собственных колебаний. Это позволяет осуществлять компенсацию температурного влияния с помощью отслеживания значений собственной частоты и использования их для формирования поправочных коэффициентов функции преобразования. При этом исключается необходимость использования дополнительного датчика температуры для компенсации систематической погрешности ВТГ-ДУС.

Ключевые слова: волновой твердотельный гироскоп, частота колебаний резонатора, температурная компенсация, металлический резонатор, датчик температуры

Для цитирования: Недопекин Н. В. Оценка влияния температуры окружающей среды на режимы работы резонатора волнового твердотельного гироскопа // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 126–132. doi:10.21685/2307-4205-2023-1-15

EVALUATION OF THE EFFECT OF AMBIENT TEMPERATURE ON THE OPERATION MODES OF THE CAVITY OF A WAVE SOLID-STATE GYROSCOPE

N.V. Nedopekin

Scientific Research Institute of Physical Measurements, Penza, Russia
inercial@niifi.ru

Abstract. *Background.* A change in ambient temperature has a significant impact on the output signal of a wave solid-state gyroscope – an angular velocity sensor (WSSG-AVS), so it is mandatory to control and compensate for this effect. *Materials and methods.* The experimental results of determining the dependence of the frequency of natural oscillations of the WSSG-AVS resonator with piezoelectric control on the values of the ambient temperature are described. *Results and conclusions.* The experimental results show that each temperature corresponds to only one value of the frequency of natural oscillations. This allows compensation for temperature effects by tracking natural frequency values and using them to form conversion function correction factors. This eliminates the need to use an additional temperature sensor to compensate for the systematic error of the WSSG-AVS.

Keywords: wave solid-state gyroscope, resonator oscillation frequency, temperature compensation, metal resonator, temperature sensor

For citation: Nedopekin N.V. Evaluation of the effect of ambient temperature on the operation modes of the cavity of a wave solid-state gyroscope. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(1):126–132. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-1-15

Введение

Гироскоп с цилиндрическим резонатором представляет собой волновой твердотельный гироскоп, работа которого основана на использовании вместо вращающихся масс условно вращающейся стоячей волны. Работа ВТГ-ДУС основана на взаимодействии эффектов Брайана и Кориолиса, в ре-

зультате которого в кромке осесимметричного резонатора ВТГ формируется стоячая волна, пространственное положение которой относительно заданной системы координат пропорционально измеряемым параметрам.

Чувствительный элемент (ЧЭ) ВТГ-ДУС состоит из трех основных компонентов: металлического резонатора, закрепленных на нем пьезоэлементов, выполняющих функции измерения перемещений и приводов возбуждения колебаний. Корпус обеспечивает вакуумирование внутренней полости с высокой степенью ($\sim 10^{-6}$ мм рт. ст.) [1].

Изменение температуры резонатора в общем случае вызывается: колебаниями температуры окружающей среды, нагревом электронных узлов, выполняющих функции возбуждения резонатора, измерения и обработки выходного сигнала, и нагревом за счет выделяемого посредством вибрации резонатора тепла. Кроме того, из-за неравномерной теплопроводности в вакуумированном корпусе ЧЭ будет существовать температурный градиент. Поскольку такие факторы, как изменения температуры резонатора и температурный градиент, оказывают существенное влияние на дрейфовые характеристики и статические погрешности измерения ВТГ, выполнение требований к которым является первостепенным при использовании ВТГ-ДУС в коммерческих, военных и космических областях, крайне важно устранить или компенсировать влияние этих факторов.

Методы уменьшения влияния температуры на метрологические характеристики

В настоящее время основными методами подавления влияния температуры на колебательный процесс ЧЭ ВТГ являются [2]:

1. Метод стабилизации температуры окружающей среды: ВТГ в составе платформенной инерциальной навигационной системы (ИНС) устанавливается в камере с регулируемой температурой, что позволяет поддерживать постоянную температуру окружающей среды и обеспечивать наилучшие условия для работы гироскопа, обеспечивая уменьшение дрейфа выходного сигнала, возникающего в результате колебаний температуры.

2. Метод температурной компенсации, основанный на математической модели дрейфа ВТГ: определяется кривая зависимости между выходным сигналом ВТГ и температурой, а в программное обеспечение ИНС вводятся поправочные температурные коэффициенты.

Недостатком первого метода является то, что резонатор гироскопа заключен в вакуум, поэтому теплообмен между окружающей средой и самим резонатором может осуществляться только посредством теплового излучения и теплопроводности через установочную плоскость резонатора на основание, что приводит к медленному изменению температуры самого резонатора и пьезопроводов. В результате системе термостатирования потребуется большой промежуток времени для того, чтобы сравнять температуру ЧЭ ВТГ с температурой окружающей среды, что не удовлетворяет требованиям по быстродействию системы. Кроме того, система контроля температуры значительно увеличит габариты, массу и стоимость ИНС, что существенно ограничивает сферу применения навигационной системы.

По сравнению с первым методом, метод температурной компенсации с использованием программного обеспечения гораздо проще внедрить, поскольку это не приведет к увеличению массы, габаритов и стоимости ИНС. Однако установка датчика температуры на резонатор невозможна, поскольку это приведет к критическому нарушению режима колебаний и сделает ВТГ неработоспособным. При установке датчика температуры внутри корпуса ЧЭ на его корпус стоит учитывать фактор, справедливый и для первого метода, а именно, малая скорость теплопередачи через среду с высоким вакуумом. Таким образом, датчик температуры не сможет отображать фактическую температуру резонатора в режиме реального времени. Одним словом, непосредственно измерить температуру резонатора весьма затруднительно.

Согласно работам [3–5], частота колебаний резонатора ВТГ зависит от его температуры из-за температурного коэффициента модуля Юнга гироскопического сплава. Поскольку резонатор ВТГ непосредственно включен в основной контур возбуждения, построенный на основе генератора с ФАПЧ, выдаваемая им частота обеспечивает прямое измерение температуры резонатора и может быть использована для проведения температурной компенсации. В связи с чем резонатор может служить высокоточным датчиком температуры и может быть использован для температурной компенсации ВТГ.

В работе [6] отмечено, что изменение частоты колебаний резонатора является прекрасной мерой изменения его температуры с зависимостью, близкой к линейной, но не представлен подробный анализ взаимосвязи между температурой и частотой колебаний ВТГ.

В работе [7] интеллектуальный датчик температуры, использующий изменение собственной частоты колебаний кварца, осуществляет измерение температуры с точностью до 0,01 °С. Таким образом, можно использовать изменение частоты колебаний резонатора ВТГ для измерения его собственной температуры. Этот метод позволит не только улучшить дрейфовые и другие метрологические характеристики ВТГ во всем диапазоне температур, но также является недорогим и простым в применении, поскольку не требует дополнительного оборудования.

Результаты экспериментального подтверждения возможности использования частоты колебаний резонатора в качестве датчика температуры

Для определения влияния изменения температуры окружающей среды в качестве испытуемых образцов использовались два ЧЭ ВТГ-ДУС с цилиндрическим резонатором из гироскопического сплава с пьезоэлектрическими измерением и управлением.

ЧЭ устанавливались на изоляционное основание в камеру тепла и холода. При этом их подключение к измерительному оборудованию осуществлялось по схеме, представленной на рис. 1.

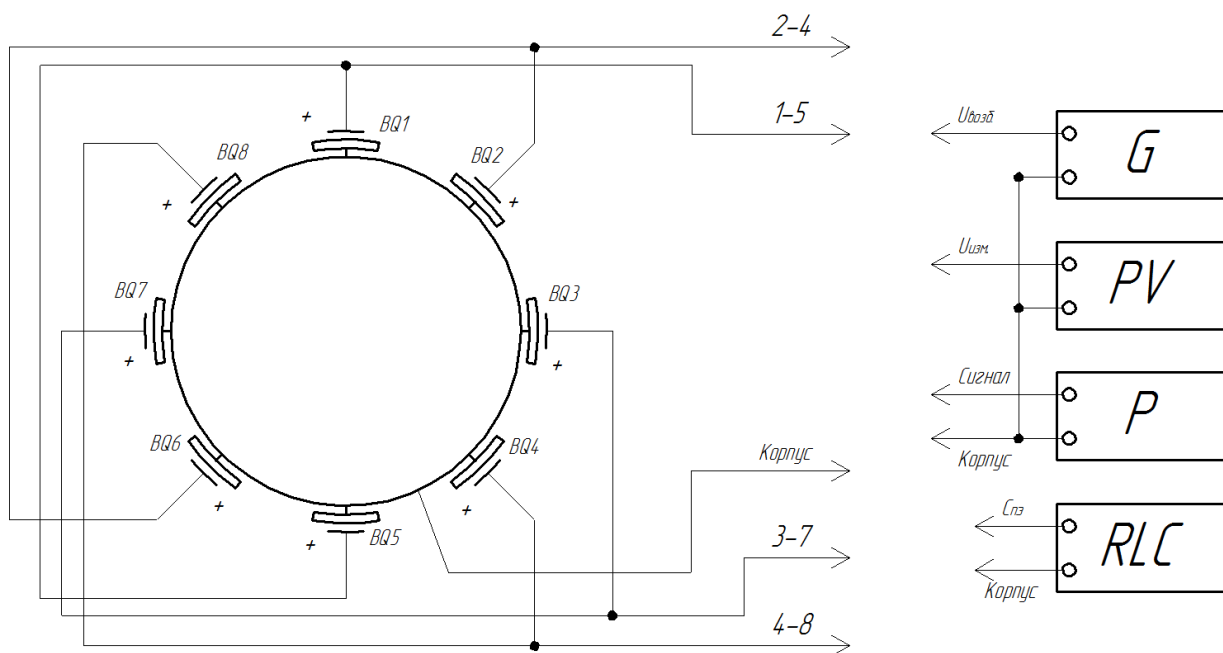


Рис. 1. Схема подключения ЧЭ ВТГ

Для увеличения чувствительности ЧЭ к напряжению возбуждения $U_{возб}$, подаваемого на ЧЭ с генератора G , пьезоэлементы $BQ1-BQ8$ объединены попарно по направлениям осей симметрии. Для измерения эффективного значения напряжения, генерируемого пьезоэлементами, $U_{изм}$ и определения формы выходного сигнала используются цифровой мультиметр P и цифровой осциллограф PV соответственно.

Дополнительно при проведении эксперимента определяются значения электрической емкости пар пьезоэлементов с помощью измерителя иммитанса RLC . При этом определена паразитная емкость соединительных проводов, не превышающая 50 пФ.

Для формирования стоячей волны в резонаторе на генераторе G подбирается такая частота выходного сигнала, при которой измеряемое мультиметром P напряжение максимально. Из-за явления разночастотности эта частота несколько различна на разных направлениях. Поэтому в дальнейшем представлены усредненные результаты определения частоты колебаний резонатора при различных температурах.

Эксперимент проводился в камере тепла и холода, обеспечивающей точность установки и поддержания температуры окружающей среды не более ± 2 °С. Были выбраны следующие температурные точки: минус 60 °С, минус 30 °С, 0 °С, 30 °С, 60 °С, 90 °С. Для обеспечения равенства температур резонатора и окружающей среды после достижения камерой требуемой температуры ЧЭ выдерживался не менее 1 ч.

Ниже, в табл. 1, 2, представлены результаты определения частоты колебаний резонатора при различной температуре окружающей среды.

Таблица 1

Параметры ЧЭ ВТГ № 1

Температура, T , °C	Частота колебаний, f , Гц
-60	6160,95
-30	6156,47
0	6148,37
30	6139,45
60	6129,08
90	6116,37

Таблица 2

Параметры ЧЭ ВТГ № 2

Температура, T , °C	Частота колебаний, f , Гц
-60	6238,56
-30	6231,13
0	6221,70
30	6212,31
60	6201,23
90	6188,30

Для удобства оценки характера влияния температуры на параметры ЧЭ ВТГ представим полученные данные в графическом исполнении (рис. 2, 3).

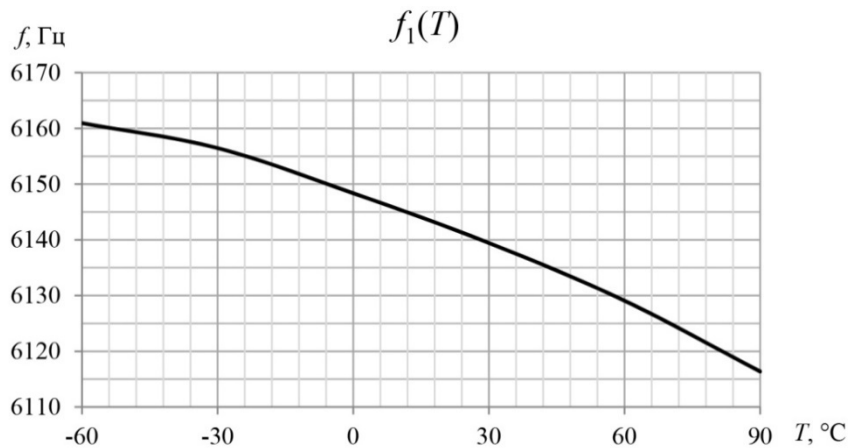


Рис. 2. Зависимость частоты колебаний резонатора ЧЭ № 1 от температуры

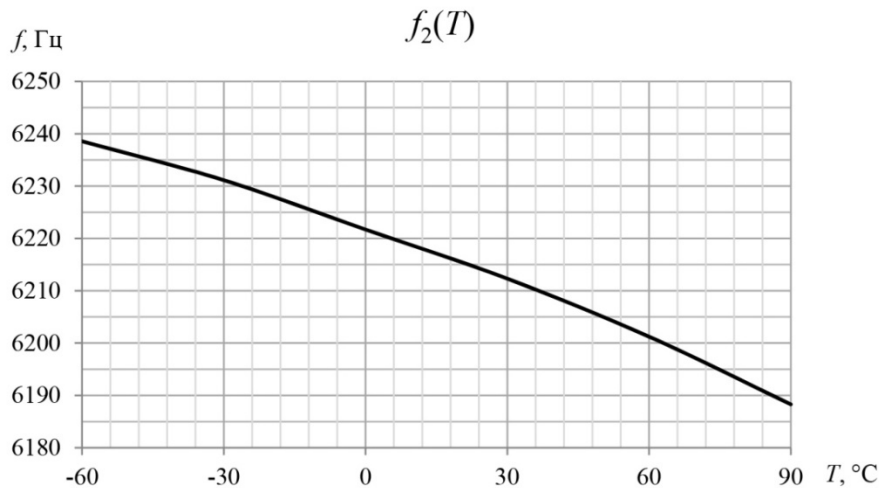


Рис. 3. Зависимость частоты колебаний резонатора ЧЭ № 2 от температуры

Изменение температуры окружающей среды оказывает влияние как на механические параметры резонатора – модуль Юнга, плотность материала, коэффициент Пуассона, так и на его геометрические размеры – толщина стенки, радиус, высота. При этом изменяются и параметры пьезоэлементов – пьезомодуль и электрическая емкость.

С учетом всех этих параметров крайне сложно получить однозначную зависимость между температурой и частотой колебаний резонатора. Поэтому для простоты анализа температурного коэффициента используется метод разложения Тейлора. Функция зависимости частоты $f(T)$ от температуры при эталонной температуре может быть описана в виде ряда Тейлора:

$$f(T) = f(T_0) + \left. \frac{\partial f}{\partial T} \right|_{T=T_0} (T - T_0) + \frac{\partial^2 f}{2! \partial T^2} \Big|_{T=T_0} (T - T_0)^2 + \dots + \frac{\partial^n f}{n! \partial T^n} \Big|_{T=T_0} (T - T_0)^n + \dots \quad (1)$$

В соответствии с теорией термодинамики материалов собственная частота колебаний металлического резонатора и емкость пьезоэлементов может быть выражена полиномом третьего порядка, поэтому членами более высокого порядка можно пренебречь:

$$f(T) = f(T_0) + \left. \frac{\partial f}{\partial T} \right|_{T=T_0} (T - T_0) + \frac{\partial^2 f}{2! \partial T^2} \Big|_{T=T_0} (T - T_0)^2 + \frac{\partial^3 f}{3! \partial T^3} \Big|_{T=T_0} (T - T_0)^3. \quad (2)$$

Коэффициенты уравнения (2) могут быть получены с помощью аппроксимации по методу наименьших квадратов на основе данных табл. 1, 2:

$$f_1 = 1,55 \cdot 10^{-6} T^3 - 10^{-4} T^2 - 0,269T + 6148,76; \quad (3)$$

$$f_2 = 1,52 \cdot 10^{-6} T^3 - 6 \cdot 10^{-4} T^2 - 0,308T + 6222,07. \quad (4)$$

Как видно, коэффициенты третьего порядка не превышают 10^{-5} , а коэффициенты второго порядка не превышают 10^{-3} , из чего можно сделать вывод о крайне малом их влиянии на частоту колебаний резонатора. При этом ошибка аппроксимации не превышает 0,04 %.

Используя уравнения (3) и (4), можно определить температуру резонатора обратно пропорциональную частоте его колебаний. Ниже, на рис. 4, 5, представлены результаты расчета ошибки определения температуры указанным методом.

Как видно из графиков, максимальное отклонение расчетного значения температуры от температуры, поддерживаемой в камере, не превышает 2 °С, что соответствует точности установки и поддержания температуры окружающей среды в используемой камере [8].

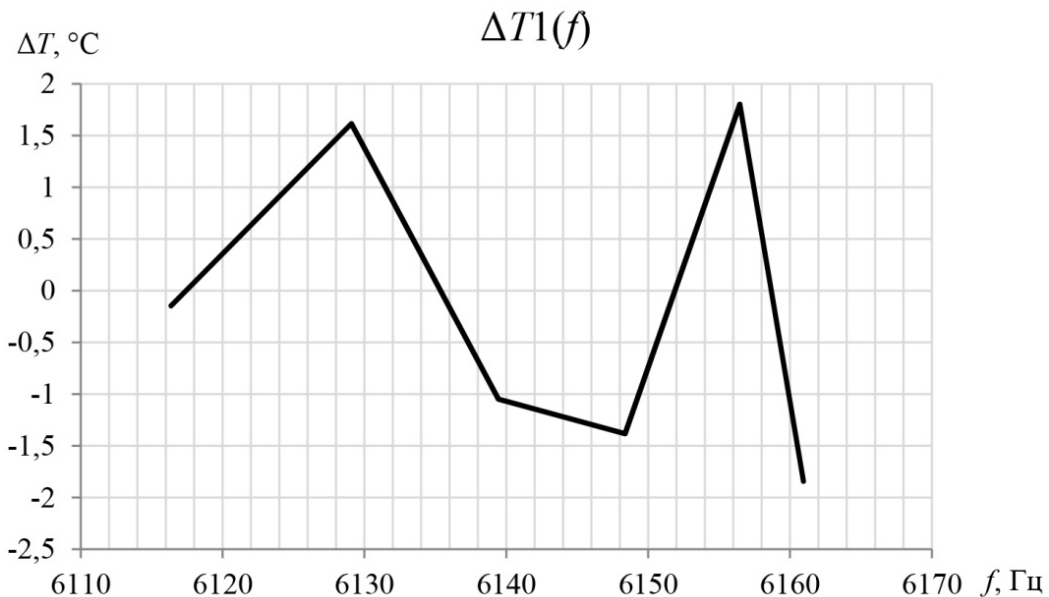


Рис. 4. Ошибка расчета температуры резонатора ЧЭ № 1

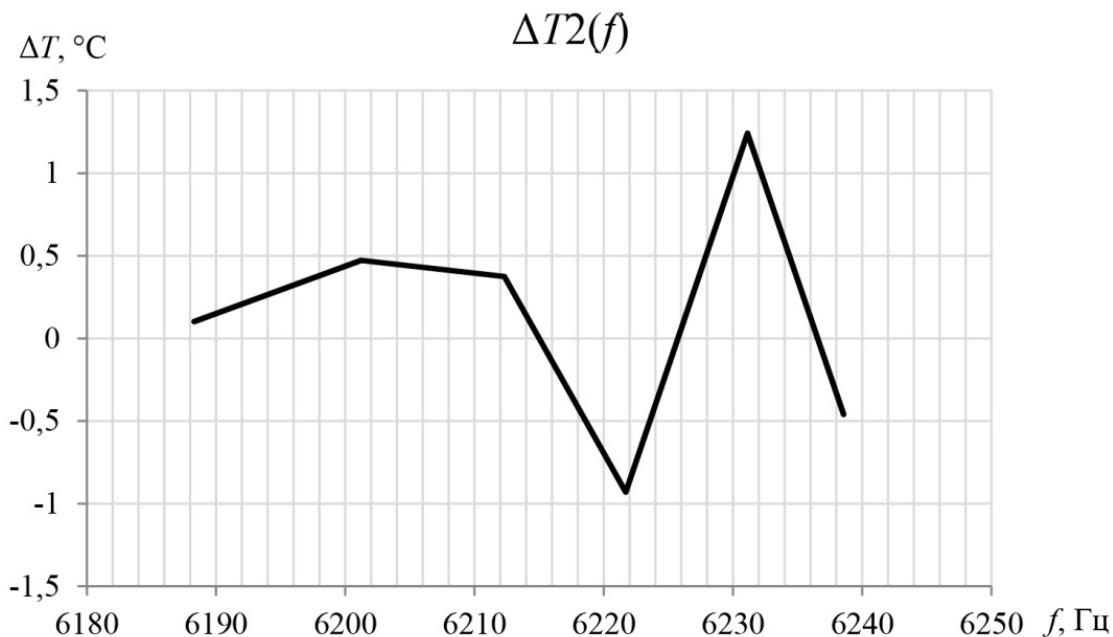


Рис. 5. Ошибка расчета температуры резонатора ЧЭ № 2

Основываясь на результатах эксперимента и их анализе, можно сделать вывод о том, что собственная частота колебаний резонатора ВТГ зависит от температуры, и каждому значению температуры соответствует только одна частота колебаний. Следовательно, собственную частоту ВТГ, находящуюся в процессе эксплуатации под постоянным мониторингом и контролем, можно рассматривать как высокоточный показатель температуры резонатора. В результате частота, контролируемая цифровой системой управления режимами работы ВТГ, может быть использована для температурной компенсации в режиме реального времени.

При этом с целью увеличения быстродействия контура ФАПЧ и, как следствие, уменьшения времени вхождения ВТГ в режим при эксплуатации в условиях предельных значений температуры окружающей среды возможно использование полученных температурно-частотных коэффициентов совместно с интегрированным в ВТГ датчиком температуры для определения начальной зоны захвата частоты в момент включения ВТГ. Таким образом, можно сократить полосу захвата частоты генератором ФАПЧ, что оптимизирует его работу и позволит улучшить конечную линейность градуировочной характеристики ВТГ-ДУС [9].

Заключение

Колебания температуры окружающей среды оказывают значительное воздействие на функционирование ВТГ-ДУС с металлическим резонатором. Изменяются такие параметры, как модуль Юнга, геометрические размеры резонатора, пьезомодуль приводов и т.д., что приводит к дрейфу нулевого сигнала, снижающему конечную точность ВТГ. В связи с этим крайне необходимо определить степень и характер влияния температуры на выходной сигнал ВТГ и скомпенсировать его. Представлены результаты экспериментального подтверждения возможности использования частоты колебаний резонатора в качестве датчика температуры. С помощью аппроксимации полученных данных рассчитаны температурно-частотные коэффициенты, позволяющие однозначно определить температуру резонатора по его собственной частоте в режиме реального времени. Использование полученных зависимостей обеспечит проведение температурной компенсации выходного сигнала ВТГ в режиме реального времени, а также уменьшит время вхождения ВТГ в режим.

Список литературы

1. Яценко Ю. А., Петренко С. Ф., Чиковани В. В. Принцип построения датчика угловой скорости на основе твердотельного волнового гироскопа с использованием цилиндрического резонатора и возбуждения положения // III Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам : сб. тр. СПб. : Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 1996. Ч. I. С. 172–176.

2. Яценко А. Ю., Чиковани В. В., Янчук А. Н. Исследование модели теплового дрейфа металлического цилиндрического кориолисова вибрационного гироскопа // X Санкт-Петербургская конференция по интегрированным навигационным системам : сб. тр. СПб. : Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2003. С. 92–94.
3. Patent 5712427 US. Vibratory Rotation Sensor with Scanning-Tunneling-Transducer Readout / Matthews A. 1998.
4. Patent 4951508 US. Vibratory Rotation Sensor / Loper E. J., Lynch D. D. 1990.
5. Lynch D. D. Projected system performance based on recent HRG test results // IEEE/AIAA 5th Digital Avionics Systems Conference (Seattle, WA, October 31 – November 3, 1983). 1983. P. 18.1.1–18.1.6.
6. Loper E. J., Lynch D. D. Hemispherical Resonator Gyro: Status Report and Test Results. San Diego, CA, 1984. P. 105–107.
7. Jun Xu, Bo You, Xin Li et al. Fully digital smart temperature sensor with quartz tuning fork resonator // 9th International Conference on Solid-State and Integrated-Circuit Technology. 2008.
8. Бастрыгин К. И. К вопросу исследования и проектирования высокотемпературного датчика динамического давления // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 2. С. 85–91.
9. Батищева О. М., Папшев В. А., Родимов Г. А. Теоретическое исследование температуры в зоне изнашивания при ультразвуковой сборке // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 1. С. 30–41.

References

1. Yatsenko Yu.A., Petrenko S.F., Chikovani V.V. The principle of constructing an angular velocity sensor based on a solid-state wave gyroscope using a cylindrical resonator and position excitation. *III Sankt-Peterburgskaya mezhunarodnaya konferentsiya po integrirovannym navigatsionnym sistemam: sb. tr. = III St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems : proceedings*. Saint Petersburg: Izd-vo TsNII «Elektropryor», 1996;(part I.):172–176. (In Russ.)
2. Yatsenko A.Yu., Chikovani V.V., Yanchuk A.N. Investigation of the thermal drift model of a metallic cylindrical coriolis vibrating gyroscope. *X Sankt-Peterburgskaya konferentsiya po integrirovannym navigatsionnym sistemam: sb. tr. = X St. Petersburg Conference on Integrated Navigation Systems : proceedings*. Saint Petersburg: Izd-vo TsNII «Elektropryor», 2003:92–94. (In Russ.)
3. Patent 5712427 US. *Vibratory Rotation Sensor with Scanning-Tunneling-Transducer Readout*. Matthews A. 1998.
4. Patent 4951508 US. *Vibratory Rotation Sensor*. Loper E.J., Lynch D.D. 1990.
5. Lynch D.D. Projected system performance based on recent HRG test results. *IEEE/AIAA 5th Digital Avionics Systems Conference (Seattle, WA, October 31 – November 3, 1983)*. 1983:18.1.1–18.1.6.
6. Loper E.J., Lynch D.D. *Hemispherical Resonator Gyro: Status Report and Test Results*. San Diego, CA, 1984:105–107.
7. Jun Xu, Bo You, Xin Li et al. Fully digital smart temperature sensor with quartz tuning fork resonator. *9th International Conference on Solid-State and Integrated-Circuit Technology*. 2008.
8. Bastrygin K.I. On the issue of research and design of a high-temperature dynamic pressure sensor. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2015;(2):85–91. (In Russ.)
9. Batischeva O.M., Papshev V.A., Rodimov G.A. Theoretical study of temperature in the wear zone during ultrasonic assembly. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2017;(1):30–41. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Никита Вячеславович Недопекин
 начальник отделения № 14 центра 1,
 Научно-исследовательский
 институт физических измерений
 (Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
 E-mail: inercial@niifi.ru

Nikita V. Nedopekin
 Head of department no. 14 of center 1,
 Research Institute of Physical Measurements
 (8/10, Volodarskogo street, Penza, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 17.12.2022
Поступила после рецензирования/Revised 22.01.2023
Принята к публикации/Accepted 18.02.2023

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ЗАХОЛАЖИВАНИЯ АЗОТНО-ГЕЛИЕВОГО КРИОСТАТА

Н. О. Борщев

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

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассмотрены режимы работы созданной виртуальной двумерной конечно-элементной модели двухступенчатого азотно-гелиевого криостата, в обеспечении теоретической оценки теплового режима изделий, функционирующих в условиях воздействия факторов космического пространства, т.е. в условиях высокого вакуума и температурного уровня жидкого гелия в 4 К. *Материалы и методы.* По разработанной теплофизической модели проведена серия тестовых тепло-вакуумных расчетов для режима охлаждения при задании граничных условий в виде температур на медных тепловых мостах, а также для условий естественного охлаждения при выключенной криогенной машине. *Результаты и выводы.* Произведена валидация разработанной модели с экспериментальными данными в обеспечении оценки адекватности построенной модели.

Ключевые слова: тепловакуумная отработка, азотно-гелиевый криостат, орбитальный участок полета

Для цитирования: Борщев Н. О. Теоретическая оценка времени захлаживания азотно-гелиевого криостата // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 133–141. doi:10.21685/2307-4205-2023-1-16

THEORETICAL ESTIMATION OF THE COOLING TIME OF A NITROGEN-HELIUM CRYOSTAT

N.O. Borshchev

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

Abstract. *Background.* The modes of operation of the created virtual two-dimensional finite element model of a two-stage nitrogen-helium cryostat are considered in order to provide a theoretical assessment of the thermal regime of products operating under the influence of space factors, that is, in conditions of high vacuum and a temperature level of liquid helium in 4 K. *Materials and methods.* According to the developed thermophysical model, a series of test heat-vacuum calculations were carried out for the cooling mode when boundary conditions were set in the form of temperatures on copper thermal bridges, as well as for natural cooling conditions with the cryogenic machine turned off. *Results and conclusions.* The validation of the developed model with experimental data was carried out to ensure the assessment of the adequacy of the constructed model.

Keywords: thermal vacuum testing, nitrogen-helium cryostat, orbital flight section

For citation: Borshchev N.O. Theoretical estimation of the cooling time of a nitrogen-helium cryostat. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(1):133–141. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-1-16

Введение

При проектировании теплового режима изделий ракетно-космической техники идет параллельная их теоретическая и экспериментальная отработка. Изделия, функционирующие на орбитальном участке полета, подвергаются низкотемпературному воздействию в районе 4 К. Для экспериментальной тепловой отработки таких конструкций обычно применяются тепловакуумные камеры или криостаты, работающие на адиабатических циклах сжатия-расширения [1–4]. Таким образом, цель данной работы – составление виртуальной конечно-элементной модели двухступенчатого прироста для оценки его времени выхода на стационарный режим.

Модель двухступенчатого криостата состоит из двумерных конечно-элементных прямоугольных примитивов, описывающих его искомый вид. На рис. 1 приведена в сечении построенная конечно-элементная модель двухступенчатого криостата. Тепловая физико-математическая модель НСК состоит из двумерных конечно-элементных примитивов, описывающих искомую геометрию конструкции.

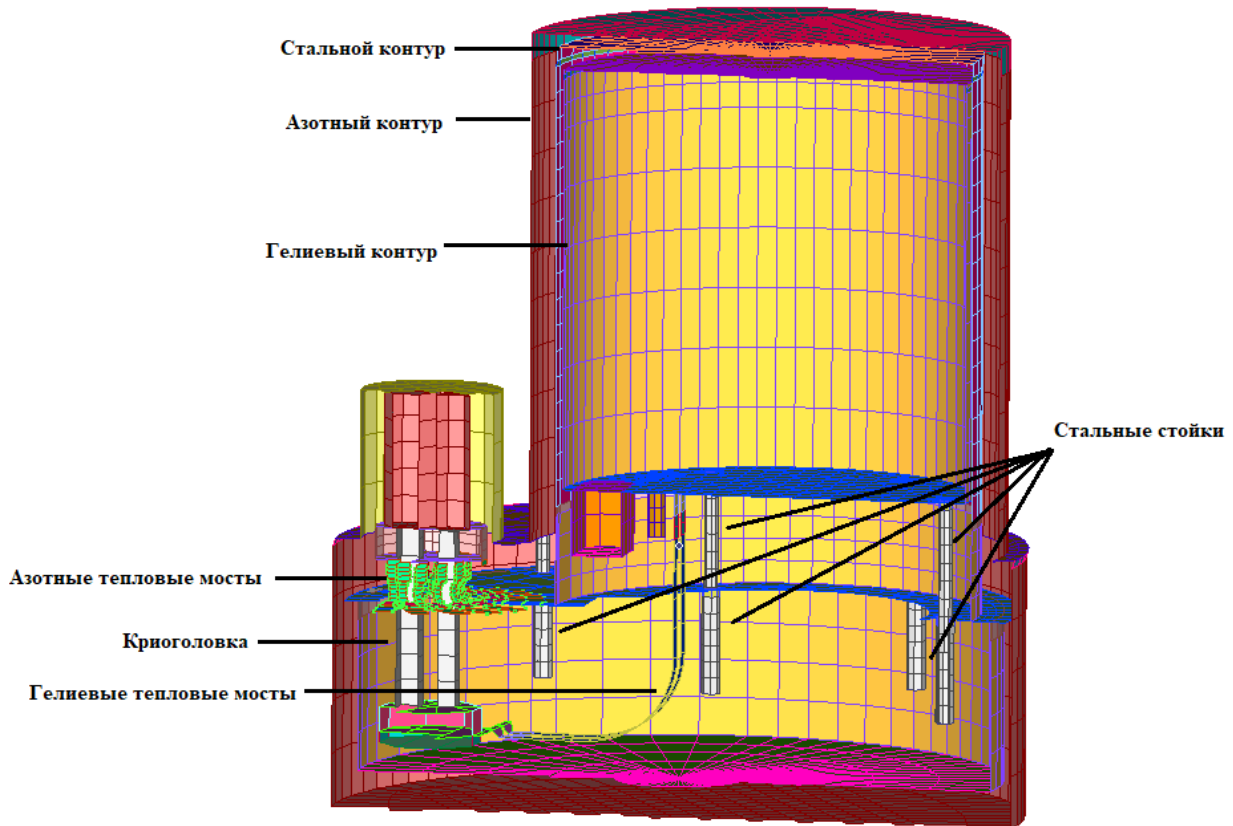


Рис. 1. Тепловая физико-математическая модель НСК

Нестационарный режим захлаживания двухступенчатого криостата

Постановка задачи по захлаживанию криостата заключается в определении времени выхода на стационарный режим, при задании начальных условий в виде 300 К, граничных условий, взятых из эксперимента и задаваемых в виде температур в тех же местах, что и в стационарном расчете. Математическая постановка задачи для расчета времени выхода на стационарный режим двухступенчатого криостата без учета одномерных конечных элементов имеет вид

$$C_{\text{эф}}(T_i) \rho V_i \frac{\partial T_i(\tau)}{\partial \tau} = - \frac{\lambda \left(\frac{T_i(\tau) + T_{i+1}(\tau)}{2} \right)}{\delta} (T_i(\tau) - T_{i+1}(\tau)) F_i^{\text{cond}} + Q_i^{\text{pec}}(\tau), T_i(0) = 300 \text{ K},$$

где $C_{\text{эф}}(T_i)$ – эффективная удельная теплоемкость материала, Дж/кгК; ρ – плотность материала, кг/м³; V_i – объем изотерического узла, м³; $T_i(\tau)$ – температура, К; λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/мК; δ – расстояние между двумя изотерическими узлами, м; Q_i^{pec} – результирующий тепловой поток, Вт.

На рис. 2, 3 показаны места задания граничных условий в виде температур на азотных и гелиевых криомостах.

Одновременно с той постановкой задачи произведена оценка влияния неучтенных элементов конструкции в конечно-элементной модели. Решено учитывать эти элементы в виде прироста массы. Для этого идет их учет с помощью задания одномерных конечных элементов, для которых необходимо определить площадь поперечного сечения в обеспечении соответствия инерционности конструкции и модели.



Рис. 2. Азотные криомосты, где задавалась постоянная температура в виде 81 К

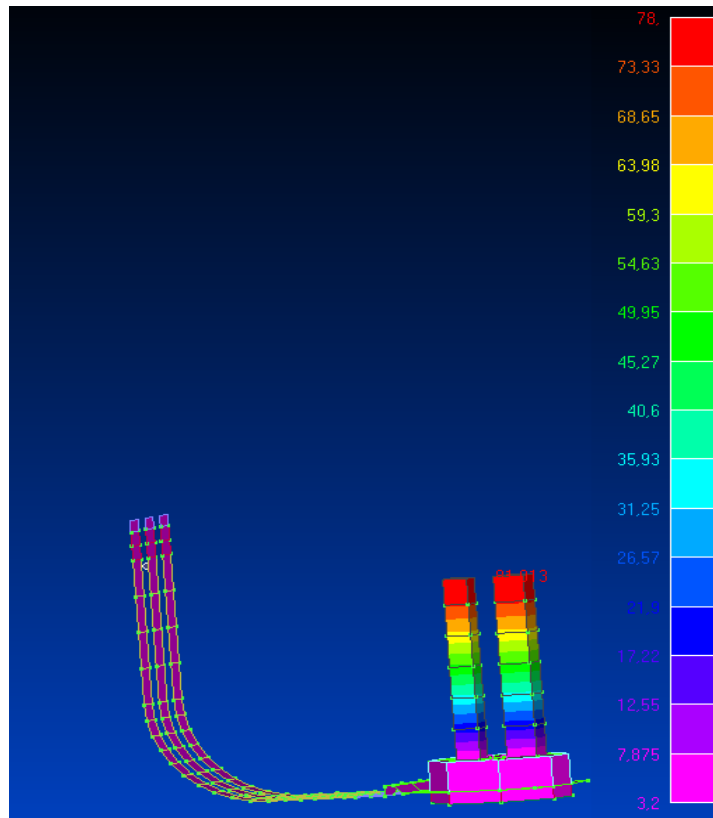


Рис. 3. Гелиевые криомосты, где задавалась постоянная температура захлаживания гелиевого контура в виде 3,2 К

Расчет производился по зависимости:

$$F_{area} = \frac{m_{el}}{\rho_{el} L_{el}},$$

где m_{el} – масса всех однородных элементов (с одинаковой плотностью), кг; ρ_{el} – плотность элементов, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; L_{el} – длина 1-d элемента, задаваемая в конечно-элементной модели, м.

Результаты расчета площадей поперечных сечений для 1-d элементов представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Группа элементов в Femap	Прирост массы, кг	F_{area}, M^2
1. He_golovka	0,2	$4,24e^{-4}$
2. He_base_plate	1,03	$5,3e^{-4}$
3. top_shaiba	0,06	$1,15e^{-4}$
4. N2_thermal_bridges	0,73	$1,83e^{-5}$
5. He_thermal_bridges	0,22	$2,5e^{-4}$
6. N2_bottom	1	$8e^{-5}$

Таблица 2

Группа элементов в Femap	Прирост массы, кг	F_{area}, M^2
1. He_kolpak	0,22	$1e^{-4}$
2. N2_bottom	0,41	$1,64e^{-4}$

В табл. 3 представлены процентные соотношения двумерных и одномерных конечных элементов в модели.

Таблица 3

Группа конструкции	CAD	Femap model	
	M,кг	structural	non-structural(rod)
He-level	31,00	Plate-92,74 %	Steel-7,25 %
			Cuprum-0,007 %
N2-level	69,19	Plate-99,96 %	Steel-0,025 %
			Cuprum-0,006 %

Математическая постановка задачи для расчета времени выхода на стационарный режим двухступенчатого криостата с учетом одномерных конечных элементов имеет соответственно вид [4–7]:

$$C_{\text{эф}}(T_i)[\rho V_i + m_{el}] \frac{\partial T_i(\tau)}{\partial \tau} = \frac{\lambda \left(\frac{T_i(\tau) + T_{i+1}(\tau)}{2} \right)}{\delta} (T_i(\tau) - T_{i+1}(\tau)) F_i^{cond} + Q_i^{pec}(\tau) - Q_i^{изл}(\tau), T_i(0) = T_0.$$

Эффективная теплоемкость высчитывается из соотношения масс рассматриваемых изотермических узлов:

$$C_{\text{эф}}(T_i) = \frac{C_i(T_i)\rho V_i + C_{el}(T_i)m_{el}}{\rho V_i + m_{el}}.$$

Выражение для излучаемого теплового потока с i -го элемента имеет вид

$$Q_i^{изл} = \varepsilon_i(T_i(\tau)) \sigma T_i(\tau)^4 F_i^{rad}.$$

Выражение для результирующего теплового потока имеет вид

$$Q_i^{pec}(\tau) = \sum_j^N \varphi_{ij} \varepsilon_j(T_j(\tau)) \sigma T_j(\tau)^4 F_i^{rad} + \varphi_{ji} (1 - \varepsilon_j(T_j(\tau))) Q_i^{изл},$$

λ – коэффициент теплопроводности материала, $\frac{Вт}{мК}$; φ_{ij} – угловой коэффициент переотражения между конечно-элементными поверхностями; ε_j – степень черноты материала; $\sigma = 5,68 \cdot 10^{-8}$ – по-

стоянная Стефана – Больцмана; $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}^4}$; F_i^{rad} – площадь радиационного теплообмена конечно-элементной поверхности, м^2 ; F_i^{cond} – площадь контакта двух конечно-элементных примитивов, м^2 [8].

В расчете были использованы среднеинтегральные значения теплофизических характеристик, взятыми из работы [4] по формуле

$$p = \frac{1}{|T_2 - T_1|} \int_{T_1}^{T_2} p(T) dT,$$

p – в данной зависимости это поочередно подставляемые графические зависимости для коэффициента теплопроводности, степени черноты, удельной теплоемкости.

Результаты полученных среднеинтегральных характеристик материалов представлены в табл. 4.

Таблица 4

Свойства	Материал		
	Сталь марки «12Х18НТ10»	Алюминий марки «АМГ-6»	Медь марки «М-1»
Теплопроводность, $\frac{\text{Вт}}{\text{МК}}$	11	40	800
Степень черноты	0,07	0,015	0,022
Удельная теплоемкость, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	400	200	200
Плотность, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	7850	2700	8800

На рис. 4, 5 показаны температурные перепады по поверхностям азотной плиты и гелиевого колпака, где установлены датчики температур.

На рис. 6 показаны теоретические температуры в местах установки датчиков температур с одномерными конечными элементами и без них при задании теплофизических свойств, представленных в табл. 1. Шаг интегрирования при решении системы уравнений тепловых балансов равен 10 с.

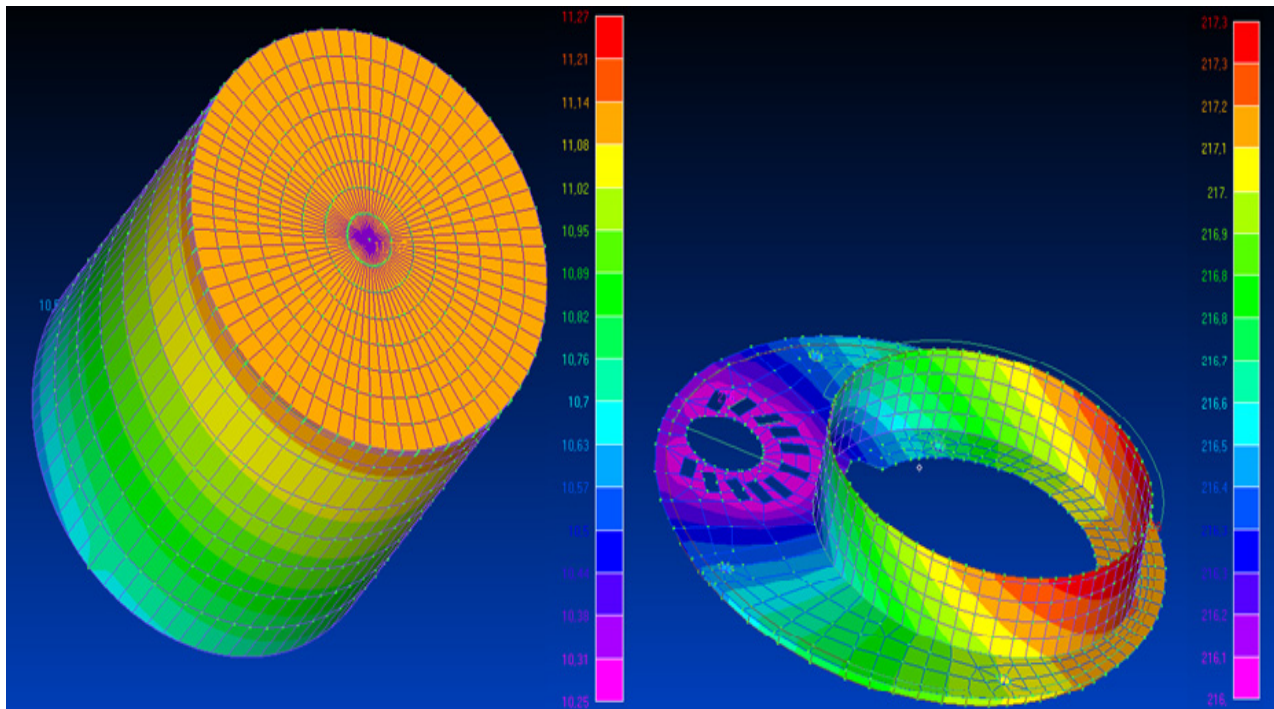


Рис. 4. Температурный перепад по азотной плите и гелиевому колпаку в момент времени 15 ч (места установки датчика температур показаны звездочкой)

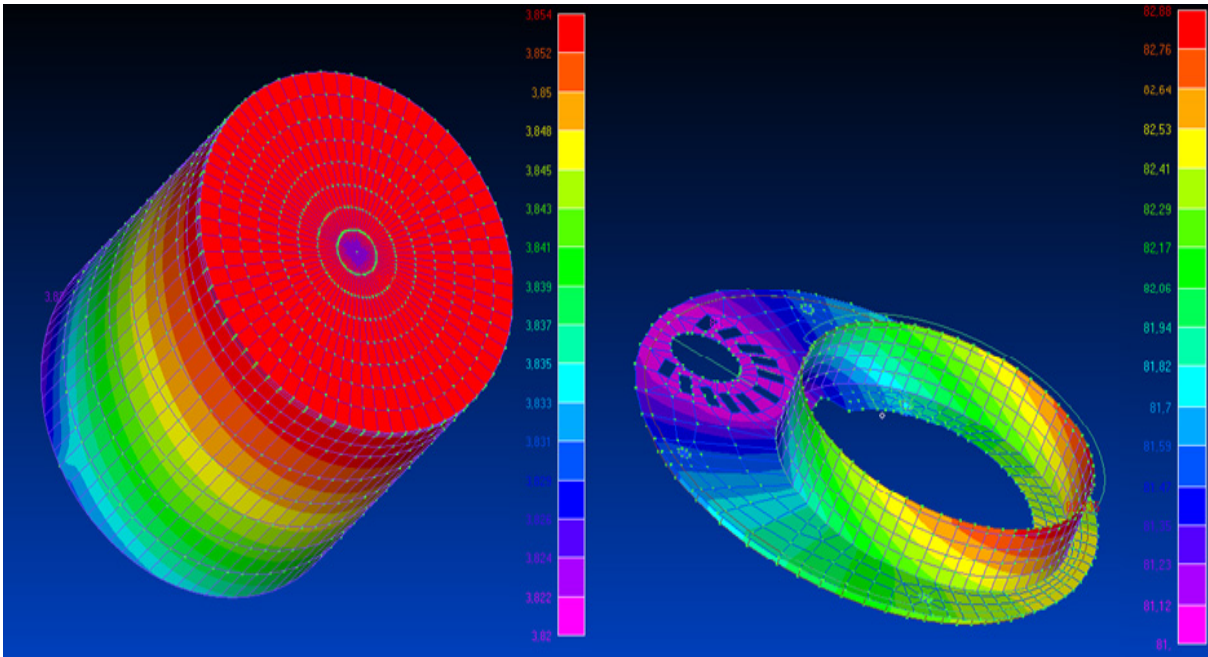


Рис. 5. Температурный перепад по азотной плите и гелиевому колпаку в момент времени 30 ч (места установки датчика температур показаны звездочкой)

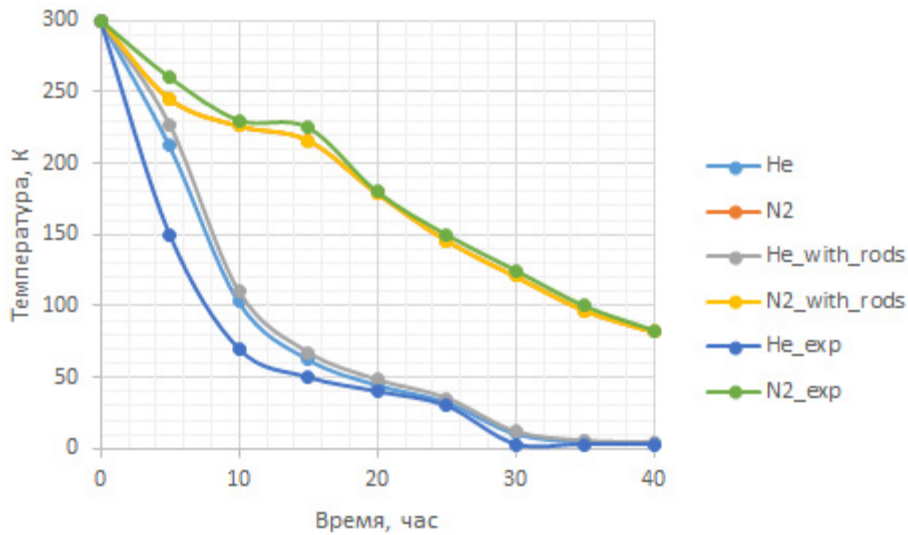


Рис. 6. Теоретические и экспериментальные кривые захлаживания азотно-гелиевого криостата в местах установки датчиков температур

Результаты по оценке выхода на стационарный режим показали, что выход на режим ожидается к 35 ч и совпадает с экспериментальными кривыми в месте установки датчиков температур [9].

Нестационарный режим нагревания двухступенчатого криостата

В качестве поверочного расчета решено было также оценить динамику естественного нагрева конструкции для последующего сравнения с экспериментом. Постановка задачи по естественному нагреву модели криостата заключается в определении времени выхода температур ступеней криостата на температуру окружающей среды. Математическая постановка задачи теплообмена выглядит следующим образом:

– для первой ступени:

$$\frac{\partial T_{Al}(\tau)}{\partial \tau} = \frac{[\epsilon_{st}(T_{st})T_{st}^4 - \epsilon_{Al}(T_{Al})T_{Al}^4]}{C(T_{Cu})\rho}; T_{Al}(0) = 84 \text{ К};$$

– для второй ступени:

$$\frac{\partial T_{Cu}(\tau)}{\partial \tau} = \frac{\left[\epsilon_{Al}(T_{Al})T_{Al}^4 - \frac{\lambda_{Cu}}{l}(T_{Cu} - T_{load})\frac{F_l}{F_{He}} - \epsilon_{Cu}(T_{Cu})T_{Cu}^4 \right]}{C(T_{Cu})\rho_{Cu}}; T_{Cu}(0) = 3,4 \text{ К.}$$

На рис. 7, 8 представлено распределение температур по поверхностям выбранных элементов конструкции в местах, где расположены датчики температур.

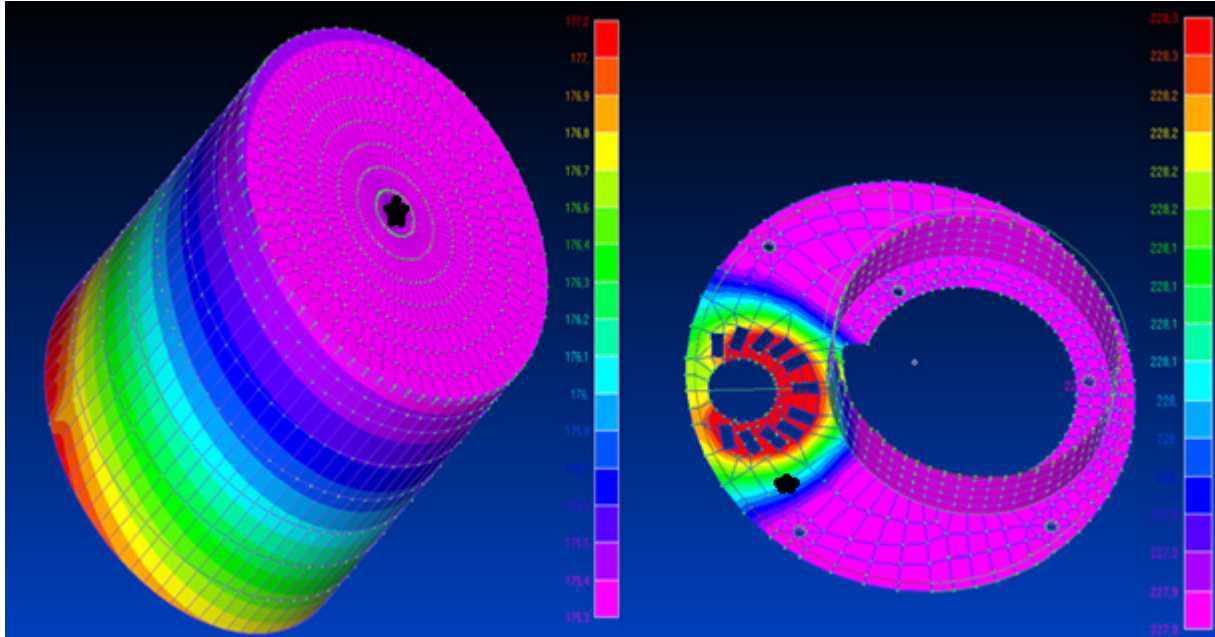


Рис. 7. Температурный перепад по азотной плите и гелиевому колпаку в момент времени 10 ч (места установки датчика температур показаны звездочкой)

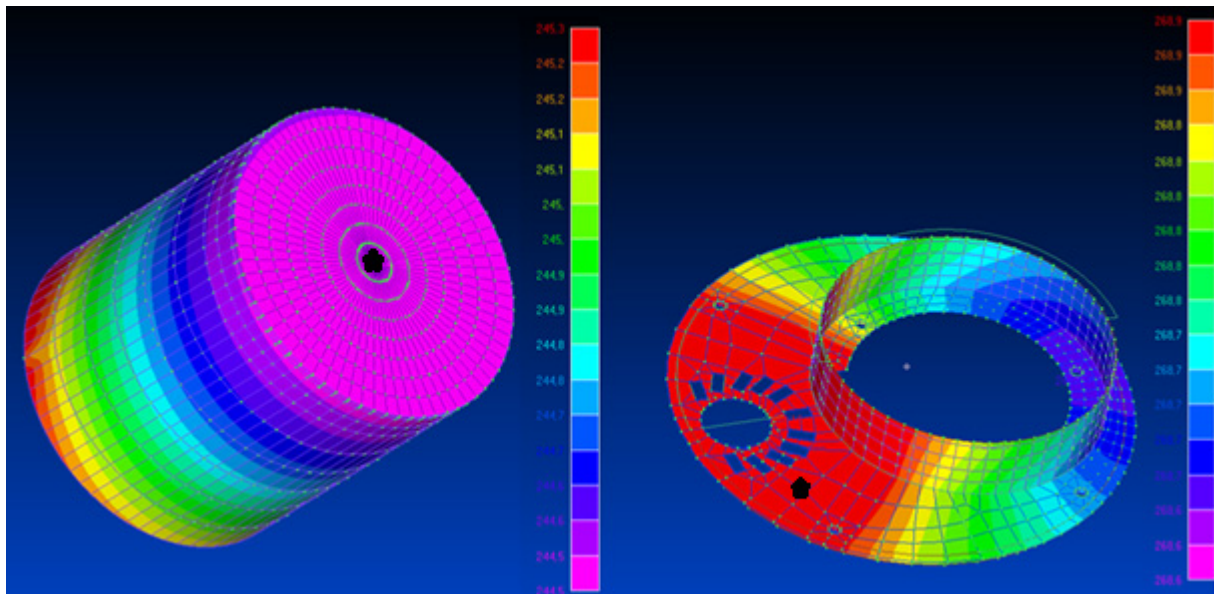


Рис. 8. Температурный перепад по азотной плите и гелиевому колпаку в момент времени 18 ч (места установки датчика температур показаны звездочкой)

Сравнительный анализ экспериментальных и теоретических кривых захлаживания криостата для 1-й и 2-й ступеней представлен на рис. 9.

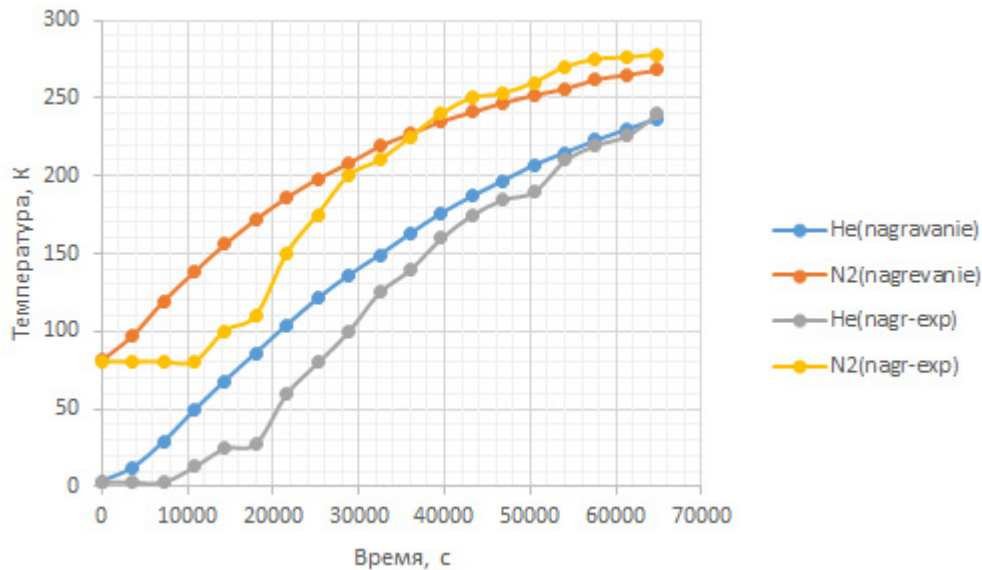


Рис. 9. Сравнительный анализ экспериментальных и теоретических кривых захлаживания криостата для 1-й и 2-й ступеней

Заключение

1. Результаты по оценке времени захлаживания двухступенчатого криостата показали, что выход на стационарный режим ожидается к 35 ч.
2. Результаты по оценке времени естественного нагрева двухступенчатого криостата показали, что динамика нагрева сходится с экспериментальными значениями.
3. Данная виртуальная модель двухступенчатого криостата может быть использована для предварительной оценки теплового режима моделей испытываемых изделий при их импорте в программный пакет.

Список литературы

1. Залетаев В. М., Капинос Ю. В., Сургучев О. В. Расчет теплообмена космического аппарата. М. : Машиностроение, 1979.
2. Крейн С. Г., Прозоровская О. И. Аналитические полугруппы и некорректные задачи для эволюционных уравнений // Доклады Академии наук СССР. 1960. Т. 133, № 2. С. 277–280.
3. Басистов Ю. А., Яновский Ю. Г. Некорректные задачи в механике (реологии) вязкоупругих сред и их регуляризация // Механика композиционных материалов и конструкций. 2010. Т. 16, № 1. С. 117–143.
4. Бакушинский А. Б., Кокурин М. Ю., Кокурин М. М. Прямые и обратные теоремы для итерационных методов решения нерегулярных операторных уравнений и разностных методов решения некорректных задач Коши // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2020. Т. 60, № 6. С. 939–962.
5. Фанов В. В., Мартынов М. Б., Карчаев Х. Ж. Летательные аппараты НПО им. С. А. Лавочкина (к 80-летию предприятия) // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. 2017. № 2. С. 5–16.
6. Блох А. Г., Журавлев Ю. А., Рыжков Л. Н. Теплообмен излучением. М. : Энергоатомиздат, 1991.
7. Тулин Д. В., Финченко В. С. Теоретико-экспериментальные методы проектирования систем обеспечения теплового режима космических аппаратов. М. : МАИ-ПРИНТ, 2014. Т. 3. С. 1320–1437.
8. Борщев Н. О. Параметрическая идентификация падающего теплового потока как функция от времени и координаты методом итерационной регуляризации // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 4. С. 15–23.
9. Демидов Д. Е., Будылдина Н. В. Повышение времени жизни беспроводных сенсорных сетей с использованием нечеткой логики // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 3. С. 50–58.

References

1. Zaletaev V.M., Kapinos Yu.V., Surguchev O.V. *Raschet teploobmena kosmicheskogo apparata = Calculation of spacecraft heat transfer*. Moscow: Mashinostroenie, 1979. (In Russ.)
2. Kreyn S.G., Prozorovskaya O.I. Analytical semigroups and ill-posed problems for evolutionary equations. *Doklady Akademii nauk SSSR = Reports of the Academy of Sciences of the USSR*. 1960;133(2):277–280. (In Russ.)

3. Basistov Yu.A., Yanovskiy Yu.G. Incorrect problems in mechanics (rheology) of viscoelastic media and their regularization. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksiy = Mechanics of composite materials and structures*. 2010;16(1):117–143. (In Russ.)
4. Bakushinskiy A.B., Kokurin M.Yu., Kokurin M.M. Direct and inverse theorems for iterative methods for solving irregular operator equations and difference methods for solving ill-posed Cauchy problems. *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki = Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2020;60(6):939–962. (In Russ.)
5. Fanov V.V., Martynov M.B., Karchaev Kh.Zh. Aircraft of S. A. Lavochkin NPO (to the 80th anniversary of the enterprise). *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina = Bulletin of S. A. Lavochkin NGO*. 2017;(2):5–16. (In Russ.)
6. Blokh A.G., Zhuravlev Yu.A., Ryzhkov L.N. *Teploobmen izlucheniem = Heat exchange by radiation*. Moscow: Energoatomizdat, 1991. (In Russ.)
7. Tulin D.V., Finchenko V.S. *Teoretiko-eksperimental'nye metody proektirovaniya sistem obespecheniya teplovogo rezhima kosmicheskikh apparatov = Theoretical and experimental methods of designing systems to ensure the thermal regime of spacecraft*. Moscow: MAI-PRINT, 2014;3:1320–1437. (In Russ.)
8. Borshchev N.O. Parametric identification of incident heat flow as a function of time and coordinates by iterative regularization method. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality complex systems*. 2022;(4):15–23. (In Russ.)
9. Demidov D.E., Budyldina N.V. Increasing the lifetime of wireless sensor networks using fuzzy logic. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2018;(3):50–58. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Никита Олегович Борщев

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

Nikita O. Borshchev

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

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

Поступила в редакцию / Received 17.12.2022

Поступила после рецензирования / Revised 20.01.2023

Принята к публикации / Accepted 10.02.2023

УДК 004.9, 504.05, 332.02

doi:10.21685/2307-4205-2023-1-17

SYSTEMATIC APPROACH FOR ENSURING THE RESILIENCE OF ECOLOGICAL-ECONOMIC SYSTEMS OF THE RUSSIAN ARCTIC (PART 1. RESILIENCE MANAGEMENT PRINCIPLES)

A.V. Masloboev

Putilov Institute for Informatics and Mathematical Modeling of the Federal Research Centre
"Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences", Apatity, Russia
Institute of North Industrial Ecology Problems of the Federal Research Centre
"Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences", Apatity, Russia
masloboev@iimm.ru

Abstract. *Background.* The study is aimed at design and development of methods and approaches to ensuring, assessment and regulation of the ecological robustness of Arctic regions in order to resilience and management efficiency enhancement of the ecological-economic systems performance of the Arctic. To date, this problem is of particular importance under conditions of intensive industrial development of the resource base of Arctic territories, which reduces the stability of Arctic ecosystems and negatively affects the health and life quality of the population. *Materials and methods.* The research work consists of two parts. In the first part the proposed principles of resilience management and criteria for ensuring the environmental safety of the Arctic region, based on the postulates of the theory of sustainable development and the concept of acceptable risk, are considered. In the second part the environmental safety metrics and systematic approach to assessing the level of ecological robustness of the Arctic ecosystems, based on expert methods for resilience analysis of organizational and technical systems, are discussed. *Results and conclusions.* The fundamental principles and a set of criteria for ensuring environmental safety for various types of economical activity in the Arctic region have been developed. A general systematic approach to the ecological robustness analysis of the Arctic region according to selected principles and criteria, based on the joint application of a hierarchical multi-level decomposition scheme "principle – criterion – indicator – index" and models for quantitative and qualitative assessment of the complex system resilience, is proposed. The use of developments provides the formation and advance of the legal regulatory framework (national public standard) for governing various types of economical activity in the Arctic region, as well as improving the quality of managerial decisions made by state, regional and enterprise authorities in the field of environmental safety and environmentally friendly, responsible nature management.

Keywords: ecological-economic system, resilience management, safety principles and criteria, estimation procedure, environmental quality control, sustainable development, acceptable risk concept, Arctic region

Financing: the work was carried out within the framework of the State Research Programs of the Putilov Institute for Informatics and Mathematical Modeling KSC RAS (project No. FMEZ-2022-0023) and Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS (project No. FMEZ-2022-0010).

For citation: Masloboev A.V. Systematic approach for ensuring the resilience of ecological-economic systems of the Russian Arctic (Part 1. Resilience management principles). *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(1):142–156. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-1-17

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЖИЗНЕСПОСОБНОСТИ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ (ЧАСТЬ 1. ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТЬЮ)

А. В. Маслобоев

Институт информатики и математического моделирования имени В. А. Путилова Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», Апатиты, Россия
Институт проблем промышленной экологии Севера Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», Апатиты, Россия
masloboev@iimm.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Работа направлена на создание и развитие методов и подходов обеспечения, оценки и регулирования экологической устойчивости арктических регионов для повышения жизнеспособности и эффективности управления функционированием эколого-экономических систем Арктики. Особую значимость эта задача приобретает сегодня в условиях интенсивного промышленного освоения ресурсной базы арктических территорий, что снижает устойчивость арктических экосистем и негативно влияет на здоровье и качество жизни населения. *Материалы и методы.* Работа состоит из двух частей. В первой части рассматриваются предложенные принципы управления устойчивостью и критерии обеспечения экологической безопасности Арктики, основанные на постулатах теории устойчивого развития и концепции приемлемого риска. Во второй части обсуждаются система показателей безопасности и методический подход к оценке уровня экологической устойчивости арктических экосистем, базирующийся на экспертных методах анализа жизнеспособности организационных и технических систем. *Результаты и выводы.* Разработаны основополагающие принципы и система критериев обеспечения экологической безопасности для различных видов хозяйственной деятельности в Арктике. Предложен общий методический подход к анализу экологической устойчивости Арктики по выбранным принципам и критериям, основанный на совместном применении иерархической многоуровневой схемы декомпозиции «принцип – критерий – индикатор – показатель» и моделей количественной и качественной оценки жизнеспособности сложных систем. Использование разработок обеспечивает формирование и развитие нормативно-правовой базы (национального общественного стандарта) для регулирования различных видов хозяйственной деятельности на территории арктических регионов, а также повышение качества принимаемых управленческих решений органами государственного, регионального и корпоративного управления в области экологической безопасности и экологически ответственного природопользования.

Ключевые слова: эколого-экономическая система, управление жизнеспособностью, принципы и критерии экологической безопасности, методика оценки, контроль качества окружающей среды, устойчивое развитие, концепция приемлемого риска, Арктика

Финансирование: работа выполнена в рамках государственных заданий ИИММ КНЦ РАН (НИР № FMEZ-2022-0023) и ИППЭС КНЦ РАН (НИР № FMEZ-2022-0010).

Для цитирования: Маслобоев А. В. Методический подход к обеспечению жизнеспособности эколого-экономических систем Российской Арктики (Часть 1. Принципы управления устойчивостью) // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 142–156. doi:10.21685/2307-4205-2023-1-17

Introduction

The problem of ensuring environmental safety and ecological resilience (robustness) does not lose its relevance at the present stage of human development. First of all, this is due to the high social significance of friendly interaction issues between individuals and the environment and balanced nature management in terms of risks for the viability of society. An important place in studying this objective is occupied by the information and analytical support problems of environmental protection activities at different levels of situational management of ecological safety and resilience. Such support implies the timely allocation, on-line processing and analysis of the required information for making reasoned managerial decisions in the field of environmental protection. Decision support tools implemented in the form of intelligent information systems and based on mathematical and computer modeling methods are increasingly being used to solve the above problems. When evaluating and analyzing the consequences (failures) of decisions made, this allows, on the one hand, taking into account the multicriteria of choosing alternative security management programs for different scenarios of the situation development, and, on the other hand, to find a compromise between the reachability and sufficiency of target indicators optimized at different decision-making levels.

Over time, the information structure of decision-making in the field of environmental protection and sustainable development maintaining is continuously becoming more complex. The regulatory base is changing and the legal framework is improving. In addition, the new forms and mechanisms of organizational management of the ecological security and resilience are emerging. The tightening of legislation and requirements for the greening of industrial production in order to reduce the ecological damage caused to the environment does not always lead to the desired result, and in some cases is even ineffectively. In real practice, this forces most enterprises to engage in so-called "greenwashing" [1], that is, creating the appearance of greening production and the transition to green technologies for the consumer, supervisory and regulatory authorities, and not the introduction of the best available technologies [2], high-end ecological security and resilience standards.

De facto, not a single economic activity that ensures the progressive sustainable development of the country can be carried out without ecological security and resilience. This is especially true for the Russian Arctic, which is characterized by the extreme vulnerability of its eco- and social systems. Intensive industrial development of the resource base of the Russian Arctic reduces the stability of the Arctic ecosystems and negatively affects the health and quality of life of the population living in these territories.

One of the ways to ensure a balance of economic and ecological interests, as well as "soft" control (motivation and stimulation) of the business entities behavior is the voluntary adoption of an agreement between society and enterprises located in the Arctic regions of Russia, specifying the rules for their activities, taking into account the requirement to ensure environmental safety and ecological robustness. The draft of such an agreement is a prototype of a certain set of rules for the economic entities behavior operating in a certain territory and represents a National Public Standard for ensuring environmental safety and ecological resilience [3]. The voluntary nature of such a form of behavior and interaction lies in the fact that although the provisions of this standard are not mandatory, however, the economic entities that adopt it guarantee the implementation of these provisions, realizing the importance of maintaining the integrity of the environment, compliance with safety standards and responsibility for the quality of life in front of future generations.

The objective of this study is to improve the methods and approaches to ensuring, assessing and regulating the ecological security and resilience of the Arctic regions in order to enhance the robustness, protectability and management efficiency of the ecological-economic system performance of the Russian Arctic.

The study consists of two main parts. In the first part we propose principles of resilience management and criteria for ensuring the environmental safety of the Arctic region, based on the postulates of the theory of sustainable development and the concept of acceptable risk, are considered. This part traditionally includes three sections. In the first section, the problem statement is given. The related work and methodological foundations of the study are discussed in the second section. The third section provides a general description of the proposed principles for ensuring the environmental safety of the Russian Arctic, as well as the characteristics of the developed set of criteria for assessing ecological security and resilience for various types of economic activity in this region. In conclusion, the results and resume based on the research materials are expressed.

Problem statement

The Russian Arctic is a critically important and strategically significant macro-region for the economy and national security of our country, which has its own specificity and is characterized by a sensitive environment and harsh climate. In turn, this significantly affects the quality of life of the population, the development of infrastructure and industrial production, especially in remote northern communities and regions. To maintain the sustainable development of the Russian Arctic and reduce the vulnerability of the objects localized on its territories in the conditions of intensive development of the Arctic natural resources, it is quite necessary to holistically ensure the resilience (robustness) and security of regional critical infrastructures (ecology, energy, transport, etc.) [4, 5] by means of engineering and implementation of systems capable to withstand the emergency and crisis situations of a natural, man-made and socio-economic nature. At present, such a class of systems include decision support systems that allow risk managers and security experts to obtain a realistic assessment of the resilience level of regional critical infrastructures in order to develop effective action plans in critical situations, as well as minimize economic, reputational and other risks associated with the adoption of managerial decisions made in the field of ensuring various types of security, including ecological, which is the subject of inquiry of this study. The resilience (robustness) is de-

defined here as the ability of an ecological-economic system to self-recovery of its normal state and system functions after the destructive impact of multiple threats on the elements of the system.

Taking into account the interdependence of critical infrastructures, the decisions made at different levels of management should be coordinated and beared on generally accepted standards and requirements for ensuring regional security [6], and an integral assessment of the ecological-economic system resilience should be formed based on the intersectoral interaction of the control elements of these infrastructures. This is necessary to develop a systematic understanding of what ecological robustness (security plus resilience) is and how to manage it in certain conditions. In the general case, in the field of environmental protection, management is understood as the control and quantitative change of some parameters of an object based on the analysis of its state in order to reduce the negative impact on the environment. At the same time, the current trend of both domestic and foreign studies is the simultaneous accounting of both quantitative and qualitative information in decision support systems for managing ecological security. Practice shows that in this area today most of the control problems are solved at a qualitative level, that is, through organizational management [7]. A joint analysis of the qualitative attributes and quantitative characteristics of critical infrastructures within the risk assessment of ecological security/resilience and generation of guidelines to decision makers at the verbal level requires the application of the state-of-the-art modeling methods, expert analysis and fuzzy logic procedures. However, there are practically no methodological approaches to obtaining such a comprehensive assessment based on interpretable analytical information on the state (level) of ecosystem resilience and expert knowledge. This is reflected in the system effectiveness used for ensuring ecological security and the quality of making managerial decisions in terms of the relevance of measures implemented in practice to the real environmental situation. According to expert judgements, preventive control and audit of ecological security threats is more economically beneficial than mitigation or elimination of the threat implementation consequences in the face of uncertainty on the impact of these threats on facilities of regional critical infrastructures. At the same time, the operability of generating guidelines to decision makers in an automated or automatic mode and their correct interpretation by control actors play a significant role in maintaining ecological security and resilience, both in terms of the completeness of information (situational awareness) on the state of ecosystems and influencing factors, and the consistency (concordance) of decisions made at different levels of management.

Thus, the development of new models and methods for formal analysis and assessment of the critical infrastructures resilience of ecological-economic systems and their implementation in decision support systems to justify measures to ensure the ecological security of the region is an urgent and challenging research problem. To solve this problem, a holistic methodology for the synthesis of risk management programs and preventive analysis of ecological security is needed, which supports the possibility of flexible adaptation of the organizational management system to the dynamics in the socio-economic and legislative sphere while maintaining a balance of interests of stakeholders represented by the state (regulatory authorities), business entities and civil society. The methodology should be applicable to all types of critical infrastructures and take into account the sectoral (industry) specificity of critical facilities of the regional economy, their risk level and probable scenarios of environmental impact, based on uniform standards for ensuring ecological security. To form a general picture of the ecological situation in the region with a certain set of critical infrastructures involved in the review, the methodology tools must operate with a unified metric based on the levels of maturity of management processes and obtained by aggregating qualitative and quantitative assessments of resilience indicators into one measurable value on a selected scale characterizing the achieved level of ecological security under given conditions.

Conceptual framework and Background

The basic principles of the National Public Standard “Ecological security of the Arctic” [3] are essentially the rules for ensuring ecological security and environmentally responsible resilient nature management when conducting all types of economical activity in the Arctic regions. The foundations for the development of these rules are the concept of sustainable development [8] and the concept of acceptable risk [9]. The paradigm of economic growth [10], stimulated by ever-increasing consumption led humanity to a global environmental crisis, clearly marking the limits beyond which humanity cannot go. These limits are due to physical characteristics of the planet Earth, finiteness of resources traditionally used by mankind to meet the ever-increasing needs. The consumer society artificially creating new needs inevitably will lead humanity to disaster [8, 11, 12]. The paradigms of sustainable development and acceptable risk may eventually become an alternative to the paradigm of economic growth.

The concept of sustainable development arose as an attempt to avoid a global environmental disaster, to develop a new paradigm of the existence of mankind. From the philosophical point of view, the new paradigm is based on the concept of conscious activity [13, 14] and systemic contextual thinking [15]. Systemic thinking does not focus on the “bricks” basic, it is interested in the basic principles of organization. Systemic thinking is contextual, which is the opposite of analytical thinking. The meaning of the term “systemic thinking” is related to the concept of “Deep ecology” [16]. Deep ecology does not separate neither people nor anything else from the natural environment. It sees the world not as a collection of isolated objects, but as a network of phenomena which are fundamentally interrelated and interdependent. The deep ecology recognizes the original value of all living beings and sees people only as a special tiny web in the web of life.

Native and small peoples of the Arctic still demonstrate an approach to life developed by centuries of existence in severe Arctic conditions described by Arne Ness in the concept of deep ecology. In modern conditions, it is necessary to return to the formation of life patterns on the basis of this principle, but using all the experience of civilization. The Arctic, due to the special vulnerability of its natural and social systems, the natural instability of the economic system, should be the first region of the world for introduction of life patterns developed on the basis of systemic contextual thinking. In this regard, the generally accepted principles of sustainable development should be adjusted to the Arctic conditions.

According to study [17] the main principles of sustainable development and management of critical infrastructure resilience in the Arctic region are the following:

1) The principle of "destruction of barriers" (the equivalence of environmental, economic and social approaches is recognized when choosing a development strategy). Implementation of this principle in the organization plan of measures to ensure ecological security and resilience should be reflected in the management strategy and taken into account the following aspects:

- When planning any new economic activity, the principle of preservation of existing ecosystems must be respected;
- Any economic activity should bring an improvement of living conditions of the local population;
- Environmental impact assessment and assessment of the impact on local communities should be carried out not only at the project planning stage, but periodically (one time in 2 years) by independent researchers and experts with the development of plans for improvement the ecological and social situation.

2) The principle of "pragmatism", which determines that sustainable development at the regional level as a social and political process in which the detection of effective mechanisms for control and ensuring ecological security and resilience is an ongoing process. Implementation of this principle in the organization plan of measures to ensure ecological security and resilience should be reflected in the management strategy also and taken into account the following aspects::

- Preference of technological solutions with low energy and resource costs;
- Materials and energy must be taken from renewable or recycled sources;
- When planning any new economic activity, the principle of "cost of renewable resources" must be respected. State-of-the-art nature management is based on misconceptions on inexhaustibility and low cost of renewable resources (natural waters, atmospheric air, soil, bioresources, etc.) or lack thereof. Some features of the natural conditions of the Arctic are the attribution of these natural resources to the category of "exhaustible" and providing them for use on loan, including for waste disposal;
- Wastes from production and consumption should be minimal, and recycling of secondary resources should be as complete as possible;
- Inadmissibility of secondary pollution of the environment when placing waste;
- Inadmissibility of using the principles of “dilution” to reduce the technogenic burden on the environment;
- The principle of compensation for inflicted and incurred damage to the environment must be respected also;
- The stable system tends to restrain maximally the process of excrescence, to minimize its impact on the environment, to restrict energy and resource consumption;
- Integration of progressive environmental principles, participation of influential public and democratic control are implied in the process of preparation and making decisions on the development or manufacturing of new productions;
- The complex problem-solving requires the cooperation of various parties: representatives of business, local authorities, representatives of national governments, non-governmental organizations, universities, research centers, etc.

The principle of morality (the question of how to "build in" moral principles in management and decision-making processes is an important element of the development concept). The principle of morality in the Arctic should be interpreted as "nothing can be more important than another", no one can benefit at the expense of others. Therefore, any projects in the Russian Arctic should be implemented primarily to improve the living conditions and for the development of infrastructure, local communities, native peoples. Thereto, it is necessary to find mutually beneficial conditions for the implementation of economic projects.

The main development goal is the improvement of creative potential of human, search for ways to organize the harmonious existence of local societies including harmonious in relation to nature, organization of the process of searching for new knowledge and its application for comprehensive improvement and harmonization of life in the Arctic regions. Implementation of the principle of morality in the organization plan of measures to ensure environmental safety should be reflected in the mechanisms for holding public hearings and discussions of any new technological and social projects.

In addition to the concept of sustainable development, for establishing the general resilience management principles of the Arctic ecological-economic systems, there were used materials of the Marine Stewardship Council Fisheries International Standards for fishery and processing of fish products, international and domestic standards for forest management, the Maritime Doctrine of the Russian Federation [18], the Environmental Doctrine of the Russian Federation [19], the National Security Strategy of the Russian Federation (approved by the President of the Russian Federation Decree No. 400, July 02, 2021) [20], the Foundations of the public policy of Russian Federation in the Arctic until 2035 [21], the Strategy of the Arctic region development and national security ensuring of Russian Federation until 2035 [22].

Since the National Public Standard [3] is the source document for the formation of environmental requirements for organizations and enterprises engaged in economical activity in the Arctic regions of Russia, the objectives of the standard include the provision in the internal documents of the enterprise dedicated to ensuring ecological security and resilience:

- general requirements for technologies and production that take into account the natural features of the Arctic regions and that ensure the maintaining the robustness of industrial-natural complexes;
- formulation of economic and non-economic measures to promote the introduction of state-of-the-art "Arctic" eco-technologies;
- requirements and measures of enterprise responsibility for carrying out measures for elimination and mitigation of accumulated environmental damage;
- the content of the measures for stimulating the introduction of ecological culture and new models of the environment friendly behavior;
- the content of the measures for stimulating the introduction of corporate ecological responsibility mechanisms.

The central principle of the sustainable development concept is achievement of the balance of economic efficiency, social justice, natural environment preservation for life demands and satisfaction of the needs of present and future generations. However, this principle cannot be used to formalize the global goal in studying and modeling of Arctic socio-economic systems and regional critical infrastructures, because it is exclusively valid only for world ecological-economic system that is considerably closed.

Additionally, the sustainable development concept based on the principle of "do no harm" could not be implemented in current circumstances, because of security risks and threats to development remain elusive. The absolute safety is unachievable and minimally acceptable one is inefficient. Therefore, it seems expedient and reasonable to use an acceptable risk principle well-known in security theory of complex systems. This principle operates with risks which are reachable and justified (tolerated) in terms of socio-economic and ecological issues of security and resilience ensuring. The acceptable risks are the enough risks that the society is willing to put up with in order to obtain certain positive results of its activities. The acceptable risk rate is defined by the level of knowledge achieved, the socio-economic capabilities of the state, public opinion, as well as regional peculiarities. Justification of the acceptable risk of regional ecological-economic systems is an independent scientific research problem. Unacceptable risk is the maximum risk when it is necessary to implement special measures to mitigate or eliminate it. For example, the maximum acceptable risk for ecosystems is one in which only 5 % of biogeocenosis species may suffer.

The acceptable risk concept is based on the following fundamental principles [23–25]:

1. There is always a level of risk that can be considered as acceptable in the given circumstances.
2. The level of risks can be reduced to an acceptable value by spending a certain amount of assets on anti-crisis measures implementation.

3. The level of acceptable risk is a subjective estimation characteristic.
4. The level of acceptable risk can be measured.
5. The level of acceptable risk is never zero.
6. There is always a level of risk that will remain uncompensated after mitigation measures have been implemented.
7. The acceptable risks are 2–3 orders of magnitude stricter than the actual ones, i.e. an introduction of such a class of risks is directly aimed at personal security ensuring.

The methodology of acceptable risk management is focused on following practical policies [26, 27]:

1. The principle of forming the novel security goal-setting and switching the focus from the absolute security policy, which is oriented only on enhancing technical systems for security reasons, to a ecological-economic system resilience policy, which is focused on improving the public health, personal and societal security and the quality of the environment as a whole.
2. The principle of joint qualitative and quantitative analysis of the natural and man-caused hazard factors based on the human health quality indicators and ecological security indices, as well as the risk management and resilience assessment methodologies.
3. The principle of determining an acceptable balance between threats and benefits from a particular economical activities which is based on an estimation and impact accounting of the social preferences, economic opportunities and environmental constraints of the latter, i.e. the principle of acceptable risk evaluation.
4. The principle of reorientation of the security control systems and switching the focus from classical risk management and auditing concentrated mainly on threat monitoring, adverse event prediction and prevention to resilience management oriented both on analysis and control of vulnerabilities and hazards, and absorption, adoption, mitigation and elimination of negative factors impact on ecological-economic systems performance, personal security and environmental conditions.

The proposed strategic approach is based on the attitude towards the Arctic regions not only as the most important source of raw materials for the further country's development, but also as a unique mega-region, whose population generates a significant share of the gross national product in extreme conditions, outpacing most regions of the country in its per capita production rates, ensuring Russia's strategic presence in the North and the Arctic. A new approach to the development of the Russian Arctic involves overcoming the tendencies of using the labor of workers with the psychology of "casual workers" and shifting the focus to "inhabiting" the North, creating comfortable conditions for the permanent life of people, active safe development and systemic reproduction of human potential.

The main problem of implementation of the sustainable development provisions into the practice is declarative nature of principles and a variety of options of perusal. Since the existence of standard for ensuring ecological security and resilience implies the subsequent practice of its application to real activity of enterprises in the Arctic, then it is more reasonable to apply the hierarchical multi-level decomposition scheme "Principle – Criterion – Indicator – Index" adopted in the world practice. At the same time, the principles are universal for any type of economic activity. At the level of criteria, sectoral differences can be indicated which are determined by the specificities of the regional industry. Indicators and indices are based on criteria and can be represented both in quantitative and qualitative form. Indicators determine the reading of the criterion, its consideration from various points of view and applying it in practice. Indices, on the one hand, indicate in which documents the indicator should be reflected, on the other hand, they implement the principle of binary code – "yes/no". In addition, the index always gives an unambiguous answer whether the information on the indicator is contained in the document or not.

To compare and matching the qualitative and quantitative values of particular indices in the calculation procedures of the integral indicator of ecological security and resilience, the theory of fuzzy sets, relations and measures, the methods for verbal analysis of decisions and coordination methods based on the theory of multi-level hierarchical systems, can be used [28]. The study [28] results that in order to maintain systemic concordance of the main elements of ecological security the resilience metrics must satisfy the SMART principle:

- Simple (indices should be simple and understandable);
- Measurable (indices must be measurable – quantitatively or qualitatively);
- Agreed-upon (indices must be coordinated, consistent and harmonized);
- Realistic (indices must be up-to-date and meet the constraints on available resources);
- Time-bound (indices must be limited in time).

Besides, all indices should be relevant and ranked according to the measure of significance for specific conditions.

The absence of one or more indicators/indices, or non-compliance with any of the criteria may be due to the fact that the enterprise does not conduct the activity described by these criteria. This fact is not an obstacle to joining and using the rules and mechanisms of the standard. If the business model of the enterprise economical activity contains inconsistencies with the principles and criteria of the standard, then to join and use the standard the enterprise should independently make alterations in their production management strategy and documentation and consequently in their economical activity to eliminate these inconsistencies. List of organizations that adopted the rules of standard should be published in the open access materials and regular updated. In addition, the list can be drawn up according to the regional principle for its transfer to the regional authorities of the Russian Arctic. The presence of such list will enable at the entity level of business entity to make more deliberated managerial decisions when bidding on public procurement and selecting flexible ways of environment friendly and responsible corporate policy pursuing.

Principles and the Set of Criteria

The Arctic ecological security and resilience management principles (P) and criteria (C) are given below. The backbone materials used as a background for the set of criteria forming are adopted from the standard [3].

The first principle (P1) considers the compliance with Russian legislation and international legal enactments signed by the Russian Federation and contains 6 criteria which are decomposed in 14 indicators including 47 indexes.

C1. In the course of any economical activity in the Russian Arctic, the certified business entities shall respect all national and regional legislations as well as administrative standards.

C2. The certified business entities shall conduct all types of charges, deductions, taxes and other payments provided by the current legislation.

C3. A certified business entities must comply with the terms and conditions stipulated by international agreements signed and adopted by the Russian Federation such as the Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora (CITES), the Convention on Biological Diversity, etc.

C4. The certified business entities must comply with regional regulations; the contradictions between local laws and federal regulations shall be considered by the certification authority in each specific case in terms of achieving certification objectives, and with the participation of all interested or affected parties.

C5. The certified business entities must ensure security and resilience of the Arctic territories used in its economical activities from any prohibited and illegal actions.

C6. Managers and owners of certified business entities must demonstrate commitment to the rules of the national ecological security standards and requirements.

The second principle (P2) lies in the implementation of rights and obligations of owners and users upon natural objects in the Russian Arctic. This principle contains 2 criteria which are decomposed in 5 indicators including 20 indexes.

The long-term rights to own and use land, forest, water, biological resources, as well as the right to explore, develop, extract and process minerals must be clearly defined, documented and formalized in accordance with the law.

C1. The certified business entities shall clearly define the long-term rights to use natural resources at a certain territory (e.g., property right to land, customary law or leasehold, rights to use inland water bodies, quotas for biological resources, etc.).

C2. The certified business entities shall not interfere in the control of their economical activities conducted by the local community that has the legal or customary rights to own or use the resources and the right to exercise control over activities to protect their rights and resources, as well as other organizations to which this right is legally transferred.

The third principle (P3) consists in the consideration of right and interest of the native people and contains 4 criteria which are decomposed in 17 indicators including 85 indexes.

The legal and traditional rights of native people to own, use and manage their lands, territories and resources must be recognized and respected.

C1. The certified business entities shall not raise difficulties for authorized organizations of local people to monitor the economical activities on their lands and territories.

C2. The economical activity of the certificated business entities shall not directly or indirectly threaten the existence or deplete resources, and threaten or restrict the rights of native people of possession the resources.

C3. The certified business entities should accept and ensure the safety of places of the unique cultural, environmental, economic and religious value precious to native people living at the territory belonging to the economical activity of the business entity.

C4. Within the provided regulations, the certified business entities shall compensate the damage to native people for exploitation of their territories used for traditional industry and farming program. Methods for compensation sum calculation shall be officially agreed with native people in their free and informed participation prior to economical activity.

The fourth principle (P4) expects the reasonable nature management in the Russian Arctic and contains 5 criteria which are decomposed in 36 indicators including 161 indexes.

Organization economical activity should facilitate the effective complex and wasteless (if possible) use of nature resources in order to increase the economic effectiveness and get a wide range of environmental and social benefits.

C1. The economical activity of the certified business entities shall be directed to maintain the economic effectiveness, and yet, shall be founded with the account to possible environmental and social consequences. It has to provide investments to support environmental security.

C2. Economical activities conducted by the certified business entities shall provide decrease in consumption of energy and natural resources (air, natural waters, soils, and other landscape elements), waste reduction; and they should not damage other natural resources.

C3. Economical activities of the certified business entities shall be aimed at strengthening and diversifying the local economy in order to avoid its dependence on one type of product. As the organization of practical nature protection measures depends on the conditions of local economy.

C4. A single economical activity maintained by the certified business entities shall consider, support and encourage (if possible) the increase of other natural resources.

C5. The quantity of renewable resources exploited by the certified business entities shall not exceed the amount guaranteeing the resource restoration.

The fifth principle (P5) assumes the minimization of negative impact on the Arctic environment and consists of 8 criteria which are decomposed in 138 indicators including 616 indexes.

Economical activity maintained by the certified business entities shall guarantee preservation of biological diversity and related values, water resources, soils, and unique and fragile ecosystems and landscapes; by this means environmental functions and ecosystem integrity of Arctic will be preserved.

C1. The certified business entities shall conduct an environmental impact assessment taking into account the volume and intensity of their activities, as well as the uniqueness of resources involved in economical activities. Such assessment shall be fixed into the production management system, and it shall consider the situation at the territorial level, as well as the impact of machines and other equipment at the local level. Environmental impact assessment shall be conducted prior to the start of any economical activities.

C2. The certified business entities shall take into account and use in their activity existing rules for the protection of rare and endangered species and their habitats (e.g., breeding and feeding grounds). Protected areas and areas with restrictions on use shall be created depending on the scale and intensity of the activity, as well as the uniqueness of the resources involved in the sphere of business activity. Hunting, fishing, trapping and gathering are to be under control.

C3. Ecological functions and values of the exploited resource shall be maintained in its original form, improved or restored. This includes the following components:

- participation in the financing of programs for the study, conservation and restoration of the natural-industrial systems of Arctic regions;
- measures for recultivation or restoration of ecosystems;
- measures to preserve natural diversity at the genetic, species and ecosystem levels;
- measures to accounting natural cycles that affect the productivity of resources involved in the sphere of economical activity;
- branch specificity of measures for recultivation or restoration of ecosystems.

C4. The certified business entities shall take into account the presence of representative (reference) sections of ecosystems on the territory of its economical activity that must be allocated and protected in their natural state and mapped with regard to scale and intensity of economical activities, as well as uniqueness of the resources involved in the sphere of economical activity.

C5. The certified business entities shall develop and implement written guidelines for: monitoring and minimizing the impact on the environment during the extraction of resources, logging, road construction and other mechanical disturbances; protection of water and biological resources.

C6. Management system in the certified business entities shall promote the development and implementation of environmentally friendly non-chemical methods for ensuring the ecological security of production (e.g.: in forestry – the refusal to use pesticides, in marine technologies to prevent the consequences of oil spills – refusal to use dispersants, etc.). In case of the use of chemicals, appropriate equipment shall be used and personnel must undergo appropriate training to minimize human health and environment risks.

C7. In the certifiable business entities, chemicals, containers, liquid and solid inorganic wastes, including POL, shall be removed from a territory of carrying out of economical activities to specially equipped places in an environmentally acceptable way.

C8. Use of invasive species the certified business entities shall be thoroughly controlled and actively monitored to avoid adverse environmental consequences. Use of genetically modified organisms is prohibited.

The sixth principle (P6) is a principle of the planned development of Arctic territories. This principle contains 7 criteria which are decomposed in 30 indicators including 97 indexes.

In its economical activity, the certified business entities shall be guided by long-term development plans, which shall be drawn up in writing, taking into account the development strategy of the Arctic regions, as well as taking into account the scale and intensity of works carried out. These plans shall be performed and clarified in a timely manner. It shall have clearly determined the long-term objectives and goals of carrying out economical activities, as well as means of their achievement.

C1. When planning the productions development in the Russian Arctic, the certified business entities shall be guided by the eco-efficiency of developing productions. Eco-efficiency shall be achieved through the provision of competitively priced goods and services that meet the needs of consumers and improve the quality of life, with a constant reduction of environmental impact and reduction in energy and material consumption throughout the whole life cycle up to the level corresponding to the carrying capacity of Earth.

C2. When conducting work in the Russian Arctic, the enterprises shall have a continuously updated plan of action to use all opportunities to reduce the company's environmental impact. There is a number of practical tools and approaches that are developed and being developed with a purpose to help the enterprises to improve the environmental performance of its work.

C3. When conducting work in the Russian Arctic, the enterprises shall have a continuously updated plan for management of waste as of technogenic resources.

C4. The development plan, i.e. the document of internal long-term planning of economical activities, and supporting documents shall contain:

- 1) the management objectives and problems;
- 2) a description of the resources to be used, environmental constraints, pattern of the environmental management, land use and land ownership, socio-economic conditions, as well as the pattern of use of adjacent territories;
- 3) a description of the applying management system for the utilized natural resources, based on environmental researches and information obtained as a result of the inventory of resources;
- 4) the rationale for the level of the annual quota of resources used and selection of types of biological resources to be harvested;
- 5) the conditions for monitoring the dynamics of changes in the state of the resource (increment or depletion);
- 6) the ecological security measures based on the results of environmental impact assessment;
- 7) a plan for identification and protection of rare and endangered species;
- 8) the maps describing the location of the used resources, including the boundaries of specially protected areas, planned economic activities;
- 9) the description and rationale for the technologies used and methods of development, extraction, preparation, processing and usage of resources and appropriate technics and equipment.

C5. The development plan of the business entities shall be regularly revised, based on the monitoring results or obtained new scientific and technical data, considering change of environmental and socio-economic conditions.

C6. The certified business entities must have employee advanced training and new employee training.

C7. The certified business entities must have a system of public informing on their economical activity plans and results of their implementation, including summary of the ecological security ensuring countermeasures and consequences.

The seventh principle (P7) claims the need of transparent monitoring and environment impact assessment. This principle contains 7 criteria which are decomposed in 18 indicators including 77 indexes.

The certified business entities shall perform ecological security threat prevention by monitoring of the used resource and environment conditions, production process, supply chain, economical activity and its social and ecological consequences, according to the scale and intensity of economic indices.

C1. Frequency and nature of monitoring in the certified business entities shall depend on the volume and intensity of economical activity, as well as on relative complexity and vulnerability of the environment. The monitoring procedure shall be reasonable and reproducible in time to get comparable results and evaluate the changes.

C2. Economic measures shall provide scientific researches and data collection required for monitoring in any certified business entity, in accordance with the scale and intensity of production.

C3. The certified business entities shall provide certifying and supervisory authorities with documents that allow tracking the movement of its products from the point of origin – a process known as the supply chain.

C4. The certified business entities shall use the monitoring results when implementing the economic measures plan, and in case of its revision.

C5. The certified business entities shall make publicly available the monitoring results summary, respecting the data confidentiality.

C6. The business entities shall understand the need for autonomous participation or in cooperation with other regional organizations, enterprises and administration structures to design a complex risk management system of environmental monitoring of defined areas of water and coastal territories, allowing to prevent emergency situations related to spills of oil and oil products, as well as promoting elimination of emergency situations at early stages of development.

C7. The business entities shall understand the need for engineering and development of the Arctic geophysical monitoring system, independently or in cooperation with other administrative organizations and structures in the region, to minimize the impact of extreme geophysical processes (natural and man-made) on human environment, including communication and navigation systems, transport and energy infrastructure, as well as ensuring functioning of the Northern Sea Route and security of transit and transpolar air routes in the Russian Arctic.

Since environment pollution in the Russian Arctic is caused not only by enterprises that perform their economical activity in the Arctic regions, but a considerable part is formed by a number of Arctic environment components (sea ice, bottom sediments, mosses and lichens, some animals) that accumulate pollution for many years, there is a need to perform monitoring by independent environmental organizations. In such a case, organizations ready to join the National Public Standard “Ecological security of the Arctic”, shall provide assistance in the following issues:

- development of the of state environmental monitoring system in the Russian Arctic, i.e. expansion of the monitoring sites network to cover remote territories, system monitoring and evaluation of atmospheric air toxic substance concentration change dynamics, integration with the global monitoring network;

- enhancement of the system of state environmental monitoring in the Russian Arctic based on use of objective and measurable environment situation evaluation indicators, design of environment pollution monitoring and control system, that uses modern monitoring tools of terrestrial, air and space deployment, integrated with existing and creating international environment monitoring systems, and providing detection and forecast of dangerous and extreme natural phenomena in the Arctic regions of Russia, including negative climate changes, as well as detection and prediction of natural and man-made disasters in proper time;

- development of a unified national system of monitoring and pollution of the environment of the Russian Arctic synchronized with analogous international systems;

- introduction of new and improvement of existing methods for atmospheric air quality study, i.e. widening the list of pollutants to be controlled with monitoring stations;

- implementation of practice of the environment pollution complex study, i.e. simultaneous monitoring of atmospheric air background pollution and soil cover or snow pollution monitoring.

The eighth principle (P8) declares the need of creation and maintaining of special nature conservation areas. This principle contains 4 criteria which are decomposed in 13 indicators including 53 indexes.

Performing economical activity in the areas of high nature preserving value shall result to keeping or increasing of characteristics determining the value of these areas. Adoption of resolution related to areas of high nature preserving value shall be planned with a special precaution, carefully considering any possible negative consequences.

C1. Studies detecting territory feature availabilities of high nature preserving value shall be performed in accordance with the scale and intensity of economical activity, taking into account the perspective development plans of the business entity being certified.

C2. A special attention shall be focused on ecological-economic values of used areas and determination of ways to safe and preserve them, in the framework of consultative part of certification.

C3. The certified business entities shall have a safety management plan for natural preserving territories within the boundaries of its economical activity. The safety management plan shall include and apply such environment protection activity methods that will contribute to keeping or raising the characteristics of the areas of high nature preserving value. These measures shall be planned with great caution, carefully considering potential negative consequences. All of these measures shall be purposely included in a brief summary of the management plan available for the community.

C4. Efficiency of the measures taken by the business entity being certified to maintain and enhance the characteristics of areas of high nature preserving value shall be evaluated based on annual monitoring.

Conclusion

At present, the justification of measures and the generations of guidelines for ensuring ecological security and resilience is an urgent scientific problem affecting all areas of national economical activity. The fundamentals of state-of-the-art ecological security management systems are regulatory documents and standards that regulate the behavior of business entities, supervisory authorities and the population in a certain area. The practice shows that the results of interaction between these actors largely determine the managerial decisions made that affect both the state of the environment and the development of industrial production. At the same time, the problem of ensuring ecological security and engineering an appropriate management system, due to its multi-aspect nature, is difficult to formalize and has an insufficiently well-defined structure. In the sequel, this affects both the risk assessment methods of the ecological-economic system performance and the automation facilities of these risk management, and can lead to adverse consequences for ecosystems due to the adoption of erroneous or unreasonable managerial decisions, which, in turn, will require considerable costs for elimination and mitigation of these consequences. Thereby, it is quite necessary to conduct scientific research aimed at developing methodological and algorithmic support tools for ecological security and resilience management in order to preparation and making effective managerial decisions in this control system.

In this vein, the present study was carried out. Consequently, the following findings were obtained. The fundamental principles and a set of criteria for managing and ensuring ecological security and resilience for various types of economical activity in the regions of the Russian Arctic have been developed. The proposed principles and criteria are based on the postulates of the theory of sustainable development and the concept of acceptable risk. The set of key indicators of ecological security and resilience can be expanded and deepen subject to the changing legislation, preferences of experts and the current state of affairs in the socio-economic sphere.

Further research in the problem area under consideration will be continued in the direction of developing a general methodological approach to assessing the overall level of ecological robustness (security and resilience integral index) of Arctic ecosystems according to selected principles and criteria is proposed. The approach is based on the joint application of a hierarchical multi-level decomposition scheme "principle – criterion – indicator – index", methods of expert analysis and models [29] for resilience quantitative and qualitative assessment of the organizational and technical systems. Follow the next Part 2 (Assessment procedure and criteria) of this paper.

The use of research contributions maintains the enhancement of the regulatory and legal framework, as well as the development of the new forms of organizational management in the field of environmental protection in terms of engineering tools and mechanisms for the implementation of the National Public Standard for ensuring ecological security and resilience in the Arctic regions of Russia as a streamline of the Arctic sustainable development. The introduction of such tool outfit in practice will promote to the flexible regulation of various types of economical activities in the Arctic regions, as well as improving the quality of managerial decisions made by state, regional and corporate governance in the field of environmentally responsible nature management.

References

1. Smirnova E.V. Grinvoshing. *Bezopasnost' v tekhnosfere = Safety in the technosphere*. 2011;(5):31–35. (In Russ.)
2. Hjort M., Skobelev D., Almgren R. et al. Best Available Techniques and Sustainable Development Goals. *Proceedings of the 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference (SGEM GREEN 2019)*. 2019;19(6.1):185–192.
3. Kashulin N.A., Masloboev V.A. (eds.) *Natsional'nyy obshchestvennyy standart «Ekologicheskaya bezopasnost' Arktiki» = National Public standard "Environmental safety of the Arctic"*. Moscow: Libri Plyus, 2016:88. (In Russ.)
4. Rød B., Barabadi A., Gudmestad O.T. Characteristics of Arctic infrastructure resilience: Application of expert judgement. *Proceedings of the 26th International Ocean and Polar Engineering Conference (Rhodes, Greece, June 26 – July 1 2016)*. Rhodes, Greece, 2016:1226–1233.
5. Tsygichko V.N., Chereshekin D.S., Smolyan G.L. *Bezopasnost' kriticheskikh infrastruktur = Safety of critical infrastructures*. Moscow: URSS, 2019:200. (In Russ.)
6. Masloboev A.V. A unified system for ensuring the regional security. *Reliability and quality of complex systems*. 2022;(1):115–125.
7. Burkov V.N., Novikov D.A., Shchepkin A.V. Control Mechanisms for Ecological-Economic Systems. *Studies in Systems, Decision and Control*. 2015;10:166.
8. Meadows D.H., Meadows D.L., Randers J., Behrens W.W.III. *The Limits to Growth*. Universe Books, 1972:205.
9. Yamalov I.U. *Modelirovanie protsessov upravleniya i prinyatiya resheniy v usloviyakh chrezvychaynykh situatsiy = Modeling of management processes and decision-making in emergency situations*. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2007:288. (In Russ.)
10. Solow R.M. A Contribution to the theory of economic growth. *The Quarterly Journal of Economics*. 1956;70(1):65–94.
11. *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future*. United Nations, 1987:303.
12. *United Nations Conference on Environment & Development "AGENDA 21"*. (Rio de Janeiro, Brazil, June 3–14, 1992). Rio de Janeiro, Brazil, 1992:351.
13. Vygotsky L.S. *Mind in Society: The Development of Higher Psychological Processes*. Harvard University, Cambridge, 1978:159.
14. Leontiev A.N. *Activity, Consciousness, and Personality*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs. 1978:196.
15. Turkov S. The concept of "scientific revolutions" in the Geoecology knowledge system. *E3S Web of Conferences*. 2020;(192):03008.
16. Naess A. The shallow and the deep, long-range ecology movement. A summary. *Inquiry*. 1973;(16):95–100.
17. Masloboev A.V., Masloboev V.A. Regulatory ensuring of the environmental safety in the Arctic region of Russia. *Reliability and quality of complex systems*. 2021;(3):98–108.
18. *Morskaya doktrina Rossiyskoy Federatsii na period do 2020 goda = Maritime doctrine of the Russian Federation for the period up to 2020*. (In Russ.). Available at: <http://kremlin.ru/supplement/1800>.
19. *Ekologicheskaya doktrina Rossiyskoy Federatsii = Environmental doctrine of the Russian Federation*. (In Russ.). Available at: https://www.mid.ru/foreign_policy/official_documents/-/asset_publisher/CptlCk6BZ29/content/id/548754
20. *Strategiya natsional'noy bezopasnosti Rossiyskoy Federatsii = The National Security Strategy of the Russian Federation*. (In Russ.). Available at: <http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/QZw6hSk5z9gWq0pID1-ZzmR5cER0g5tZC.pdf> (accessed 08.02.2023).
21. *Osnovy gosudarstvennoy politiki Rossiyskoy Federatsii v Arktike na period do 2035 goda = Fundamentals of the state policy of the Russian Federation in the Arctic for the period up to 2035*. (In Russ.). Available at: <http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/f8ZpjhpAaQ0WB1zjywN04OgKiI1mAvaM.pdf> (accessed 08.02.2023).
22. *O Strategii razvitiya Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii i obespecheniya natsional'noy bezopasnosti na period do 2035 goda = On the Strategy for the development of the Arctic Zone of the Russian Federation and ensuring national security for the period up to 2035*. (In Russ.). Available at: <http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/J8FhckYOPAQQfxN6Xlt6ti6XzpTVAvQy.pdf> (accessed 08.02.2023).
23. Yurkov N.K., Mikhaylov V.S. *Integral'nye otsenki v teorii nadezhnosti. vvedenie i osnovnye rezul'taty = Integral estimates in reliability theory. introduction and main results*. Moscow: Tekhnosfera, 2020:152. (In Russ.)
24. Kachalov P.M. *Upravlenie khozyaystvennym riskom = Management of economic risk*. Moscow: Nauka, 2002:192. (In Russ.)
25. Gracheva M.V., Sekerin A.B. *Risk-menedzhment investitsionnogo proekta = Risk management of an investment project*. Moscow: YuNITI-DANA, 2009:544. (In Russ.)
26. Baryshev P.F. Complex security in Russia: methodological approach. *Vlast' = Power*. 2014;(12):9–15. (In Russ.)
27. Masloboev A.V. An overview of the regional security theory and methodological foundations. *Reliability and quality of complex systems*. 2022;(2):102–118.

28. Masloboev A.V., Putilov V.A. *Informatsionnoe izmerenie regional'noy bezopasnosti v Arktike = Information dimension of regional security in the Arctic*. Apatity: KNTs RAN, 2016:222. (In Russ.)
29. Masloboev A.V. Formal models of viability of regional critical infrastructures. *Trudy Instituta sistemnogo analiza RAN = Proceedings of the Institute of System Analysis of the Russian Academy of Sciences*. 2022;72(3):59–80. (In Russ.)

Список литературы

1. Смирнова Е. В. Гринвошинг // Безопасность в техносфере. 2011. № 5. С. 31–35.
2. Hjort M., Skobelev D., Almgren R. [et al.]. Best Available Techniques and Sustainable Development Goals // *Proceedings of the 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference (SGEM GREEN 2019)*. 2019. Vol. 19, iss. 6.1. P. 185–192.
3. Национальный общественный стандарт «Экологическая безопасность Арктики» / под ред. Н. А. Кашулина, В. А. Маслобоева. М. : Либри Плюс, 2016. 88 с.
4. Rød B., Barabadi A., Gudmestad O. T. Characteristics of Arctic infrastructure resilience: Application of expert judgement // *Proceedings of the 26th International Ocean and Polar Engineering Conference (Rhodes, Greece, June 26 – July 1, 2016)*. Rhodes, Greece, 2016. P. 1226–1233.
5. Цыгичко В. Н., Черешкин Д. С., Смолян Г. Л. Безопасность критических инфраструктур. М. : УРСС, 2019. 200 с.
6. Masloboev A. V. A unified system for ensuring the regional security // *Reliability and quality of complex systems*. 2022. № 1. P. 115–125.
7. Burkov V. N., Novikov D. A., Shchepkin A. V. Control Mechanisms for Ecological-Economic Systems // *Studies in Systems, Decision and Control*. 2015. Vol. 10. 166 p.
8. Meadows D. H., Meadows D. L., Randers J., Behrens W. W. III. *The Limits to Growth*. Universe Books, 1972. 205 p.
9. Ямалов И. У. Моделирование процессов управления и принятия решений в условиях чрезвычайных ситуаций. М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. 288 с.
10. Solow R. M. A Contribution to the theory of economic growth // *The Quarterly Journal of Economics*. 1956. Vol. 70, № 1. P. 65–94.
11. Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. United Nations, 1987. 303 p.
12. United Nations Conference on Environment & Development "AGENDA 21". June, 3–14, 1992. Rio de Janeiro, Brazil, 1992. 351 p.
13. Vygotsky L. S. *Mind in Society: The Development of Higher Psychological Processes*. Harvard University, Cambridge, 1978. 159 p.
14. Leontiev A. N. *Activity, Consciousness, and Personality*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs. 1978. 196 p.
15. Turkov S. The concept of "scientific revolutions" in the Geoecology knowledge system // *E3S Web of Conferences*. 2020. № 192. P. 03008.
16. Naess A. The shallow and the deep, long-range ecology movement. A summary // *Inquiry*. 1973. № 16. P. 95–100.
17. Masloboev A. V., Masloboev V. A. Regulatory ensuring of the environmental safety in the Arctic region of Russia // *Reliability and quality of complex systems*. 2021. № 3. P. 98–108.
18. Морская доктрина Российской Федерации на период до 2020 года. URL: <http://kremlin.ru/supplement/1800>.
19. Экологическая доктрина Российской Федерации. URL: https://www.mid.ru/foreign_policy/official_documents/-/asset_publisher/CptICkV6BZ29/content/id/548754
20. Стратегия национальной безопасности Российской Федерации. URL: <http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/QZw6hSk5z9gWq0pID1ZzmR5cER0g5tZC.pdf> (дата обращения: 08.02.2023).
21. Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года. URL: <http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/f8ZpjhpAaQ0WB1zjywN04OgKiImAvaM.pdf> (дата обращения: 08.02.2023).
22. О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года. URL: <http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/J8FhckYOPAQQfxN6Xlt6ti6XzrTVAvQu.pdf> (дата обращения: 08.02.2023).
23. Юрков Н. К., Михайлов В. С. *Интегральные оценки в теории надежности. введение и основные результаты*. М. : Техносфера, 2020. 152 с.
24. Качалов Р. М. *Управление хозяйственным риском*. М. : Наука, 2002. 192 с.
25. Грачева М. В., Секерин А. Б. *Риск-менеджмент инвестиционного проекта*. М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2009. 544 с.
26. Барышев П. Ф. *Комплексная безопасность в России: методологический подход* // *Власть*. 2014. № 12. С. 9–15.
27. Masloboev A. V. An overview of the regional security theory and methodological foundations // *Reliability and quality of complex systems*. 2022. № 2. P. 102–118.

28. Маслобоев А. В., Путилов В. А. Информационное измерение региональной безопасности в Арктике. Апатиты : КНЦ РАН, 2016. 222 с.
29. Маслобоев А. В. Формальные модели жизнеспособности региональных критических инфраструктур // Труды Института системного анализа РАН. 2022. Т. 72, № 3. С. 59–80.

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Владимирович Маслобоев

доктор технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник,
заведующий лабораторией информационных
технологий управления региональным развитием,
Институт информатики и математического
моделирования имени В. А. Путилова,
Институт проблем промышленной экологии Севера
Федерального исследовательского центра
«Кольский научный центр Российской академии наук»
(Россия, г. Апатиты, ул. Ферсмана, 14);
E-mail: masloboev@iimm.ru

Andrey V. Masloboev

Doctor of technical sciences, associate professor,
leading researcher, head of the laboratory
of information technologies
for regional development management,
Putilov Institute for Informatics
and Mathematical Modeling,
Institute of North Industrial Ecology Problems
of the Federal Research Centre "Kola Science Centre
of the Russian Academy of Sciences"
(14 Fersmana street, Apatity, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 11.12.2022

Поступила после рецензирования/Revised 20.01.2023

Принята к публикации/Accepted 25.01.2023