

СОДЕРЖАНИЕ

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ
НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА**

Острейковский В. А., Лысенкова С. А.
КОНЦЕПЦИЯ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К УРОВНЯМ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССОВ
СТАРЕНИЯ СТРУКТУРНО И ФУНКЦИОНАЛЬНО СЛОЖНЫХ КРИТИЧЕСКИ
ВАЖНЫХ СИСТЕМ С ДЛИТЕЛЬНЫМИ СРОКАМИ АКТИВНОГО СУЩЕСТВОВАНИЯ 5

Poltavskiy A.V.
DEVELOPMENT OF A MODEL FOR ASSESSING THE TECHNICAL LEVEL
OF A CAR AS PART OF AN UNMANNED AIRCRAFT SYSTEM..... 13

Тулугулов А. Д., Ергалиев Д. С., Бейсембаева Б. С., Акишев К. М.
МЕТОДЫ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ И ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ
НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АГЕНТА 25

Мищенко В. И., Демин А. П., Корбут В. А.
ИССЛЕДОВАНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ,
ВЛИЯЮЩИХ НА ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ
СРЕДСТВ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ 32

Полтавский А. В., Тюгашев, А. А. Юрков Н. К.
ХАРАКТЕРИСТИКА СЛУЧАЙНОГО ПРОЦЕССА В ЗАДАЧАХ КОМПЬЮТЕРНОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЭНТРОПИЙНОГО АНАЛИЗА СИСТЕМ 41

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ
НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ**

Тулугулов А. Д., Ергалиев Д. С., Бейсембаева Б. С., Зуев Д. В.
МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЕТНЫХ НАГРУЗОК ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ..... 48

Самаров В. В.
ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ ФАЙЛОВОЙ ИЗБЫТОЧНОСТИ
И ПОДТВЕРЖДЕНИЯ ПОЛНОТЫ ИСХОДНЫХ ТЕКСТОВ НА УРОВНЕ ФАЙЛОВ 57

Годунов А. И., Балабян С. Т., Егоров П. С.
СЕГМЕНТАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ И РАСПОЗНАВАНИЕ ОБЪЕКТОВ
НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ 62

Цветков Э. И., Панкин А. М.
ВЗАИМОСВЯЗЬ ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ
И ТОЧНОСТИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ..... 74

Марчук В. И., Глебова Т. А., Кувшинова О. А., Есимова Н.
ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЙОНА ПОЛЕТОВ ДЛЯ АВИАЦИОННЫХ ТРЕНАЖЕРОВ
И ОПЕРАТОРОВ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ 80

Штыков Р. А., Юрков Н. К. ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТИРОВКОЙ ГАЗА ПО ТРУБОПРОВОДАМ ПУТЕМ АНАЛИЗА ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИМЕСЕЙ.....	87
Дивеев А. И., Полтавский А. В., Алхатем А. НЕЙРОНЕЧЕТКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ.....	93

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Masloboev A.V., Masloboev V.A. REGULATORY ENSURING OF THE ENVIRONMENTAL SAFETY IN THE ARCTIC REGION OF RUSSIA.....	98
---	----

CONTENT

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

Ostreykovskiy V.A., Lysenkova S.A.

THE CONCEPT OF MODERN APPROACHES TO THE LEVELS OF DESCRIBING
THE AGING PROCESSES OF STRUCTURALLY AND FUNCTIONALLY COMPLEX
CRITICAL SYSTEMS WITH LONG PERIODS OF ACTIVE EXISTENCE..... 5

Poltavskiy A.V.

DEVELOPMENT OF A MODEL FOR ASSESSING THE TECHNICAL LEVEL
OF A CAR AS PART OF AN UNMANNED AIRCRAFT SYSTEM.....13

Tulegulov A.D., Yergaliyev D.S., Beisembayeva B.S., Akishev K.M.

METHODS OF NEURAL NETWORKS AND DEEP LEARNING ON THE BASIS
OF AN INTELLIGENT AGENT25

Mishchenko V.I., Demin A.P., Korbut V.A.

RESEARCH AND CLASSIFICATION OF OPERATIONAL FACTORS AFFECTING TO RELIABILITY
OF RADIO-ELECTRONIC MEANS OF WEAPONS AND MILITARY EQUIPMENT32

Poltavskiy A.V., Tyugashev A.A., Yurkov N.K.

CHARACTERISTICS OF A RANDOM PROCESS IN PROBLEMS
OF COMPUTER MODELING AND ENTROPY ANALYSIS OF SYSTEMS.....41

**TECHNOLOGICAL BASIS FOR IMPROVING
RELIABILITY AND PRODUCT QUALITY**

Tulegulov A.D., Yergaliyev D.S., Beisembayeva B.S., Zhev D.V.

METHODS FOR THE STUDY OF FLIGHT LOADS OF AIRCRAFT48

Samarov V.V.

SOFTWARE IMPLEMENTATION OF FILE REDUNDANCY CONTROL AND CONFIRMATION
OF THE COMPLETENESS OF THE SOURCE TEXTS AT THE FILE LEVEL57

Godunov A.I., Balanyan S.T., Egorov P.S.

IMAGE SEGMENTATION AND OBJECT RECOGNITION
BASED ON CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK TECHNOLOGY62

Tsvetkov E.I., Pankin A.M.

INTERRELATION BETWEEN THE CERTAINTY OF TECHNICAL DIAGNOSTICS RESULTS
AND THE ACCURACY OF DIAGNOSTIC MEASUREMENTS74

Marchuk V.I., Glebova T.A., Kuvshinova O.A., Esimova N.

TASKS OF MODELING THE FIELD OF FLIGHTS FOR AVIATION SIMULATORS
AND UNMANNED AIRCRAFT OPERATOR.....80

Shtykov R.A., Yurkov N.K.
OPTIMIZATION OF GAS TRANSPORT MANAGEMENT BY PIPELINES BY ANALYSIS
OF DYNAMICS OF CHANGE OF CONCENTRATION OF IMPURITIES..... 87

Diveev A.I., Poltavskiy A.V., Alhatem A.
NEURO-FUZZY CONTROL OF THE LUMBER DRYING PROCESS 93

SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS

Masloboev A.V., Masloboev V.A.
REGULATORY ENSURING OF THE ENVIRONMENTAL SAFETY
IN THE ARCTIC REGION OF RUSSIA..... 98

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

УДК 517.98:519.2:621.039

doi:10.21685/2307-4205-2021-3-1

КОНЦЕПЦИЯ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К УРОВНЯМ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССОВ СТАРЕНИЯ СТРУКТУРНО И ФУНКЦИОНАЛЬНО СЛОЖНЫХ КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ СИСТЕМ С ДЛИТЕЛЬНЫМИ СРОКАМИ АКТИВНОГО СУЩЕСТВОВАНИЯ

В. А. Острейковский¹, С. А. Лысенкова²

^{1,2} Сургутский государственный университет, Сургут, Россия
¹ ova@surgu.ru, ² lsa1108@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Традиционные методы оценки и анализа показателей долговечности оборудования сложных систем основаны на описании систем во времени на уровне траекторий поведения и являются идеализациями, так как не учитывают изменения структуры фазового пространства. Следует признать, что эти методы и существующие методики, основанные на теории долговременной прочности, обеспечены соответствующими стандартами. В то же самое время за последние 40–50 лет появились новые теоретические разработки, учитывающие более тонкую структуру времени в динамике и термодинамике. В этих работах показано, что современные подходы динамики и термодинамики позволяют существенно повысить достоверность расчетов показателей долговечности оборудования структурно и функционально сложных систем на всех этапах их жизненного цикла. Поэтому целями данной статьи является анализ существующих подходов и методов описания процессов старения оборудования (блоков, подсистем) и их дальнейшее развитие в теории долговечности сложных систем, что особенно важно для критически важных систем с длительными сроками активного существования. *Материалы и методы.* Физическая и математическая сущность новых современных подходов к уровням описания процессов старения оборудования с учетом достижений классической механики и термодинамики состоит в следующем: 1) широкое применение языка теории операторов функционального анализа в классической механике, что означает замену описания систем на уровне изучения траектории исследованиями их функций распределения; 2) введение в описание систем более простых уравнений, учитывающих специфику необратимых процессов; 3) обязательное применение теории случайных процессов. *Результаты и выводы.* Доказано, что так как фундаментальной теоретической основой нового подхода в описании уровней старения оборудования в теории долговечности структурно и функционально сложных систем с учетом асимметрии времени являются неустойчивые и необратимые процессы, то для решения теоретических и прикладных задач оценки и анализа показателей долговечности необходимо использовать собственные функции и собственные значения операторов Леувилля, Гамильтона, энтропии преобразования и внутреннего времени. Предложены новая методика концепции комплексного подхода к уровням описания показателей долговечности и последовательность выполнения исследований.

Ключевые слова: операторы микроскопической энтропии, преобразования и внутреннего времени, «возраст» системы, показатели долговечности

Финансирование: работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 17-01-00244, 18-07-00391 и 18-47-86007).

Для цитирования: Острейковский В. А., Лысенкова С. А. Концепция современных подходов к уровням описания процессов старения структурно и функционально сложных критически важных систем с длительными сроками активного существования // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 3. С. 5–12. doi:10.21685/2307-4205-2021-3-1

THE CONCEPT OF MODERN APPROACHES TO THE LEVELS OF DESCRIBING THE AGING PROCESSES OF STRUCTURALLY AND FUNCTIONALLY COMPLEX CRITICAL SYSTEMS WITH LONG PERIODS OF ACTIVE EXISTENCE

V.A. Ostreykovskiy¹, S.A. Lysenkova²

^{1,2} Surgut State University, Surgut, Russia

¹ ova@surgu.ru, ² lsa1108@mail.ru

Abstract. Background. Traditional methods for assessing and analyzing the indicators of the durability of equipment of complex systems are based on the description of systems in time at the level of trajectories of behavior, and are idealizations, since they do not take into account changes in the structure of the phase space. It should be recognized that these methods and existing techniques based on the theory of long-term strength are provided with appropriate standards. At the same time, over the past 40-50 years, new theoretical developments have appeared that take into account the finer structure of time in dynamics and thermodynamics. These works show that modern approaches to dynamics and thermodynamics can significantly increase the reliability of calculations of equipment durability indicators for structurally and functionally complex systems at all stages of their life cycle. Therefore, the goals of this article are to analyze the existing approaches and methods for describing the aging processes of equipment (blocks, subsystems) and their further development in the theory of the durability of complex systems, which is especially important for critical systems with long periods of active existence. *Materials and methods.* The physical and mathematical essence of new modern approaches to the levels of describing the aging processes of equipment of structurally and functionally complex systems, taking into account the achievements of classical mechanics and thermodynamics, is as follows: 1. Wide application of the language of the theory of operators of functional analysis in classical mechanics, which means replacing the description of systems at the level of studying the trajectory by researching their distribution functions. 2. Introduction to the description of systems of simpler equations that take into account the specifics of irreversible processes. 3. Mandatory application of the theory of random processes. *Results and conclusions.* 1. It has been proved that, since the fundamental theoretical basis of the new approach in describing the aging levels of equipment in the theory of the durability of structurally and functionally complex systems, taking into account the asymmetry of time, are unstable and irreversible processes, then for solving theoretical and applied problems of assessing and analyzing durability indicators it is necessary to use eigenfunctions and eigenvalues of the Leeouville and Hamilton operators, transformation entropy and internal time. 2. A new methodology for the concept of an integrated approach to the levels of description of indicators of durability and the sequence of research is proposed.

Keywords: operators of microscopic entropy, transformation and internal time, "age" of the system, indicators of durability

Acknowledgments: the work was carried out with the support of the RFBR (projects No. 17-01-00244, 18-07-00391 and 18-47-86007).

For citation: Ostreykovskiy V.A., Lysenkova S.A. The concept of modern approaches to the levels of describing the aging processes of structurally and functionally complex critical systems with long periods of active existence. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(3):5–12. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-3-1

Введение

За три столетия существования современной классической науки (от 1685 г. доклада И. Ньютона «Математические начала...» до работ А. Эйнштейна – Дж. В. Гиббса и В. И. Вернадского – И. Р. Пригожина конца XIX – начала XX в.), заложившей основы квантовой механики и теории относительности описания уровней природы, необходим переход к новым подходам построения системы на основе современных взглядов и учета эффектов существования асимметрии времени и комплексного влияния внешних и внутренних факторов окружающей среды и человека, т.е. назрела проблема глубокого анализа имеющихся достижений науки «существующей сегодня» и переход к новому этапу «завтрашней» науки, и в частности, к построению на базе достижений динамики и термодинамики новой теории долговечности структурно и функционально сложных систем.

Постановка задачи

В задачах оценки показателей долговечности важную роль играют уровни описания состояния систем с длительными сроками активного существования. Поэтому необходимо, прежде всего, произвести оценку и сделать анализ различных теоретических подходов к описанию уровней с точки зрения их эффективности при использовании конкретных аналитических методов. При этом важной особенностью является не только оценка и применение существующих методов, но и применение нового аналитического аппарата для получения значений показателей долговечности СФСС.

Именно на эту цель и направлено содержание данной статьи.

Использование метода Л. Больцмана

В XIX в. появилась первая стройная концепция описания процессов старения Л. Больцмана, в основании которой был положен принцип: необратимость есть проявление в макроскопическом масштабе «стохастичности», существующей в микроскопическом масштабе. Если опустить многие подробности, то схему использования подхода Л. Больцмана для целей создания методики анализа и оценки показателей долговечности СФСС можно свести к следующей последовательности (рис. 1).



Рис. 1. Последовательность расчетов показателей долговечности при использовании кинетических уравнений Л. Больцмана

В последние годы XX в. этот подход получил распространение через применение уравнений для плотных сред. Необходимо отметить, что основанные на методе Л. Больцмана уравнения не допускают функцию Ляпунова, что приводит к утрате связи со вторым началом термодинамики.

Неунитарные преобразования Λ и их роль в описании динамики систем с нарушенной симметрией времени

Следующим шагом в получении искомой методики расчета показателей долговечности явилось использование неунитарных преобразований Λ . С этой целью рассмотрим «связь между существованием оператора микроскопической энтропии M и теорией преобразования с оператором Λ » [1, 2].

Пусть оператор M и функция Ляпунова Ω имеет следующее соотношение:

$$\Omega = \text{tr} \rho^+ M \rho \geq 0, \quad (1)$$

в котором (1) задает функцию Ляпунова, а оператор M зависит от «динамики». Кроме того, оператор M можно представить в виде произведения оператора T и эрмитово сопряженного оператора T^T

$$M = T^T T \text{ и } \Lambda^{-1} = T. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), получим

$$\Omega = \text{tr} \rho^+ \tilde{\rho}, \quad (3)$$

где $\tilde{\rho}$ – образ плотности при преобразовании

$$\tilde{\rho} = \Lambda^{-1} \rho. \quad (4)$$

Следовательно, можно сделать выводы:

1) если уравнение (3) – функция Ляпунова, то все выпуклые функционалы от $\tilde{\rho}$

$$\Omega = \text{tr} \tilde{\rho} \ln \tilde{\rho} \quad (5)$$

также функции Ляпунова;

- 2) функции Ляпунова вида (3) могут существовать только в новом представлении, получаемом из выражения (1) с помощью преобразования (4);
 3) состояние $\tilde{\rho}$, которое приводит к значению $\Omega = \min$, служит аттрактором для любых остальных состояний;
 4) существует тесная связь между операторами энтропии M и преобразования Λ .
 Далее рассмотрим свойства преобразования, задаваемого соотношениями (1)–(3).

Класс уравнений движения с унитарным законом преобразования

Уравнения движения в новом представлении (1)–(3) с учетом (4) имеют вид

$$i \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial t} = \Phi \tilde{\rho}, \quad (6)$$

где

$$\Phi = \Lambda^{-1} L \Lambda. \quad (7)$$

Из выражений (6), (7) следует: новое преобразование, позволяющее включить необратимость через функции Ляпунова, намного шире простой замены координат, выражаемой унитарным преобразованием. В работе [1] доказано, что разность между Φ и эрмитово сопряженным оператором Φ^T не равна тождественно нулю:

$$i(\Phi - \Phi^T) \geq 0, \quad (8)$$

т.е. оператор движения (6), входящий в преобразование (4), не должен быть эрмитовым, как оператор Лиувилля L , и возникает необходимость выхода за пределы обычного класса унитарных преобразований. Если опустить промежуточные рассуждения, можно получить следующее соотношение:

$$[\Lambda^{-1}(-L)]^T = \Lambda(L), \quad \Lambda^{-1}(L) = \Lambda^T(L). \quad (9)$$

Если оператор преобразования Λ не зависит от оператора Лиувилля, то он является унитарным преобразованием.

Класс уравнений движения с неунитарным законом преобразования

Известно [1], для того чтобы перейти от динамического описания поведения систем к термодинамическому, требуется прибегать к новому закону преобразования (9), которое называется унитарным *-преобразованием

$$\Lambda^*(L) = \Lambda^T(-L). \quad (10)$$

(* означает инверсию $L \rightarrow -L$). Используя эрмитовость оператора L и соотношения (9), (10), получаем

$$\Phi^* = \Phi^T(-L) = \Phi(L) \quad (11)$$

или

$$(i\Phi)^* = i\Phi. \quad (12)$$

Таким образом оператор движения Φ является *-эрмитовым и должен быть либо эрмитовым и четным относительно инверсии оператора L , либо антиэрмитовым и нечетным. Следовательно, в общем случае *-эрмитов оператор имеет вид

$$i\Phi = \overset{\text{четн.}}{(i\Phi)} + \overset{\text{нечетн.}}{(i\Phi)}. \quad (13)$$

Тогда условие диссипативности (9), выражающее существование функции Ляпунова Ω , принимает вид

$$\overset{\text{четн.}}{(i\Phi)} \geq 0. \quad (14)$$

Таким образом, получена новая форма микроскопического уравнения. Кроме того, так как уравнения (13), (14) содержат обратимую и необратимую части, то удалось включить в микроскопи-

ческое описание систем макроскопическое и термодинамическое различие между обратимыми и необратимыми процессами.

При этом необходимо акцентировать внимание на физическом смысле уравнений (13) и (14): четный член включает в себя такие процессы, как рассеяние, рождение, затухание и другие необратимые процессы, которые способствуют положительному приращению функции Ляпунова и сдвигают систему к состоянию равновесия, что объединяет динамику и термодинамику и в целом приводит к существованию систем с нарушенной « $L-t$ » симметрией.

Но на этом не нужно останавливаться, появляется возможность координации различных уравнений описания долговечности СФСС.

Уровни описания асимметрии времени в теории долговечности структурно и функционально сложных систем

При сегодняшнем состоянии теории необратимых процессов согласно И. Р. Пригожину [1] сложилась следующая последовательность шагов оценки и анализа результатов описания временной асимметрии в теории долговечности СФСС, представленная на рис. 2.



Рис. 2. Последовательность оценки и анализа состояния сложной системы с учетом уровней описания

К содержанию рис. 2 необходимо сделать дополнения:

1. В принципе для обратимых процессов в классической динамике возможны ситуации, обратимые во времени, $t \leftrightarrow -t$.

2. Однако это становится невозможным, если переходить к необратимым процессам (например, химическим реакциям, биологическим процессам и др.), где $t \neq -t$.

Следовательно, оба случая являются фундаментальным фактом и необходимым. Если будем считать первичным мир траекторий, тогда, введя дополнительные допущения, можно перейти ко второй формулировке.

3. Так как рассматриваются системы, эволюционирующие к равновесию в будущем ($t \rightarrow +\infty$), и выбор подгруппы обусловлен «правилами отбора», то выбирается подгруппа W_i .

4. В квантовой механике и теории относительности в конце XIX и начале XX в. при анализе асимметрии времени появились исследования, связанные с влиянием наблюдателя на процессы необратимости. В связи с этим при анализе уровней состояния систем необходимым условием является учет влияния фактора «наблюдатель», что показано на рис. 3.



Рис. 3. Самосогласованная схема учета различия между прошлым и будущим

Под наблюдателем события обычно понимается либо биологическое начало (т.е. живой организм), либо измерительный комплекс, имеющие прямое отношение к модусам времени «прошлое–настоящее–будущее» и содержанию диссипативных структур в виде «исторических измерений». Кроме того, под наблюдателем часто понимают высоко развитую диссипативную структуру, которая способна объективно оценивать различия между прошлым и будущим. И поэтому можно считать в качестве вывода: если в системе находится наблюдатель, то невозможно называть уровень ее описания фундаментальным [7–9].

Комплексный подход к выбору уровней описания показателей долговечности сложных систем с учетом асимметрии внутреннего времени

Так, причинами сложных деградационных процессов, приводящих к отказам, авариям и катастрофам структурно и функционально сложных систем являются коррозия, эрозия, износ, усталость, деформации и другие макроскопические процессы. Первопричиной таких макропроцессов служат необратимые процессы типа химических реакций, диффузии, распада твердых растворов, адсорбции и др. Причем необратимые процессы обычно развиваются и прогрессируют под действием комплекса внешних и внутренних факторов (температуры, влажности, давления, динамических и статических нагрузок, термогидравлических ударов, облучения, воздействия электрических, магнитных и других полей), а также влияния человеческого фактора. И, как следствие, это может приводить к глубоким изменениям состояния СФСС на уровне пространственно-временного континуума. Поэтому важно констатировать следующее: концептуальной научно-методической основой в проблеме обеспечения высоких показателей долговечности оборудования СФСС должен стать комплексный подход к уровням описания его состояния на всех этапах жизненного цикла системы.

На основании многолетних исследований авторы данной статьи при поддержке грантов РФФИ разработали ряд методических рекомендаций для прикладных работ по созданию конкретных инженерных методик расчета ресурса, срока службы и их остаточных значений для систем длительного пользования с учетом эффекта асимметрии времени.

Типовая методика по проведению работ в соответствии с материалами, изложенными в данной статье и работах [3–9], приведена в табл. 1.

Таблица 1

Самосогласованная схема последовательности выполнения исследований по прогнозированию показателей долговечности сложных систем на этапах их жизненного цикла

Наименование работ
Постановка задачи
Выбор вида необратимых процессов, протекающих в конструкционных материалах объекта
Характеристика изменения показателей необратимых процессов в элементах оборудования СФСС
Макроскопические уравнения связи параметров необратимых процессов и показателей долговечности

Наименование работ
Выбор вида и параметров функций Ляпунова
Статистические модели необратимых процессов элементов, блоков и подсистем СФСС
Определение собственных функций и собственных значений исследуемых операторов
Оценка влияния параметров собственных функций и собственных значений на эволюцию возраста конструкционных материалов элементов СФСС
Расчет срока службы, ресурса и их остаточных значений в модусах времени «прошлое–настоящее–будущее» для элементов, блоков и подсистем СФСС
Рекомендации по выработке ресурса и срока службы объектов СФСС в процессе жизненного цикла

Таким образом, предложена обобщенная методика в задачах описания уровней старения оборудования сложных систем.

Заключение

Рассмотрены концептуальные основы научно-методологического обоснования асимметрии времени в модусах «прошлое–настоящее–будущее» для полной оценки и анализа показателей долговечности СФСС. Приведенный концептуальный анализ позволил сделать следующие выводы:

1. Последовательность расчетов показателей долговечности систем при использовании кинетических уравнений Больцмана выглядит следующим образом: динамика \rightarrow Марковские процессы \rightarrow энтропия через H -функцию. Однако оказалось, что полученные таким образом уравнения не допускают функции Ляпунова, что приводит к утере связи со вторым началом термодинамики. Поэтому следующим шагом в получении искомой методологии расчета показателей долговечности явился подход с использованием преобразований оператора Λ .

2. В конце XX в. сложился принципиально новый подход к оценке и анализу показателей долговечности сложных систем с учетом асимметрии времени и неунитарных преобразований оператора Λ .

В целом данный подход объединяет динамику и термодинамику и приводит к существованию динамики с характерной, нарушенной « $L-t$ » симметрией. И тогда результат этого фундаментального факта позволяет скоординировать различные виды уравнений описания состояния и показателей долговечности структурно и функционально сложных систем.

3. Для решения задач оценки асимметрии времени в модусах «прошлое–настоящее–будущее» в теории долговечности СФСС необходим комплексный подход с учетом операторов эволюции микроскопической энтропии M , преобразования Λ , внутреннего времени T , функций Ляпунова, методов и моделей современного функционального анализа и теории случайных процессов.

4. Предложена концепция нового комплексного учета математических и физических методов для расчета показателей долговечности, которая приведена в виде таблицы.

Список литературы

1. Prigogine I. From Being to Becoming: Time and Complexity in the Physical Sciences. San Francisco : W.H. Freeman&Co, 1980. 278 p.
2. Пригожин И. Р. Конец определенности. Время, хаос и новые законы природы. Ижевск : Ижевская республиканская типография, 1999. 216 с.
3. Антонов А. В., Острейковский В. А. Ресурс и срок службы оборудования энергоблоков атомных станций (на примере энергоблоков Смоленской АЭС). М. : Инновационное машиностроение, 2017. 535 с.
4. Острейковский В. А., Шевченко Е. Н. Математическое моделирование эффекта асимметрии внутреннего времени в теории долговечности структурно и функционально сложных критически важных систем // Итоги науки : избр. тр. Междунар. симп. по фундамент. и приклад. проблемам науки. М. : РАН, 2018. Вып. 37. С. 69–111.
5. Денисова Т. Ю., Острейковский В. А. Онтология феномена времени в теории прогнозирования техногенного риска сложных динамических систем. Сургут : Печатный мир, 2017. 253 с.
6. Острейковский В. А., Денисова Т. Ю., Шевченко Е. Н. Асимметрия времени в теории прогнозирования состояния сложных динамических систем : монография. Сургут : Печатный мир, 2018. 574 с.
7. Острейковский В. А., Лысенкова С. А., Шевченко Е. Н. О возможности использования эффекта асимметрии времени в задачах оценки долговечности сложных систем // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 1. С. 21–34.
8. Острейковский В. А., Шевченко Е. Н., Волков А. В. Необратимость, хаос и время Ляпунова в теории долгосрочного прогнозирования состояния сложных систем // Региональная информатика (РИ-2020) :

XVII Санкт-Петербургская Междунар. конф. (г. Санкт-Петербург, 28–30 октября 2020 г.). СПб. : СПОИСУ, 2020. С. 309–310.

9. Острейковский В. А., Шевченко Е. Н., Сорочкин А. В. Онтология необратимости и корней времени в задачах долговечности сложных систем // Региональная информатика (РИ-2020) : XVII Санкт-Петербургская Междунар. конф. (г. Санкт-Петербург, 28–30 октября 2020 г.). СПб. : СПОИСУ, 2020. С. 311–312.

References

1. Prigogine I. *From Being to Becoming: Time and Complexity in the Physical Sciences*. San Francisco: W.H. Freeman&Co, 1980:278.
2. Prigozhin I.R. *Konets opredelennosti. Vremya, khaos i novye zakony prirody = The end of certainty. Time, chaos and new laws of nature*. Izhevsk: Izhevskaya respublikanskaya tipografiya, 1999:216. (In Russ.)
3. Antonov A.V., Ostreykovskiy V.A. *Resurs i srok sluzhby oborudovaniya energoblokov atomnykh stantsiy (na primere energoblokov Smolenskoj AES) = Resource and service life of nuclear power plant power units equipment (on the example of Smolensk NPP power units)*. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie, 2017:535. (In Russ.)
4. Ostreykovskiy V.A., Shevchenko E.N. Mathematical modeling of the effect of internal time asymmetry in the theory of durability of structurally and functionally complex critical systems. *Itogi nauki: izbr. tr. Mezhdunar. simp. po fundamental. i priklad. problemam nauki = Results of Science : selected works of the International Symposium on Fundamental and Applied Problems of Science*. Moscow: RAN, 2018;(37):69–111. (In Russ.)
5. Denisova T.Yu., Ostreykovskiy V.A. *Ontologiya fenomena vremeni v teorii prognozirovaniya tekhnogenogo riska slozhnykh dinamicheskikh system = Ontology of the phenomenon of time in the theory of forecasting technogenic risk of complex dynamic systems*. Surgut: Pechatnyy mir, 2017:253. (In Russ.)
6. Ostreykovskiy V.A., Denisova T.Yu., Shevchenko E.N. *Asimetriya vremeni v teorii prognozirovaniya sostoyaniya slozhnykh dinamicheskikh sistem: monografiya = Time asymmetry in the theory of predicting the state of complex dynamic systems : monograph*. Surgut: Pechatnyy mir, 2018:574. (In Russ.)
7. Ostreykovskiy V.A., Lysenkova S.A., Shevchenko E.N. On the possibility of using the effect of time asymmetry in the problems of assessing the durability of complex systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2019;(1):21–34. (In Russ.)
8. Ostreykovskiy V.A., Shevchenko E.N., Volkov A.V. Irreversibility, chaos and Lyapunov's time in the theory of long-term forecasting of the state of complex systems. *Regional'naya informatika (RI-2020): XVII Sankt-Peterburgskaya Mezhdunar. konf. (g. Sankt-Peterburg, 28–30 oktyabrya 2020 g.) = Regional Informatics (RI-2020) : XVII St. Petersburg International Conference (St. Petersburg, October 28-30, 2020)*. Saint Petersburg: SPOISU, 2020:309–310. (In Russ.)
9. Ostreykovskiy V.A., Shevchenko E.N., Sorochkin A.V. The ontology of irreversibility and time roots in the problems of durability of complex systems. *Regional'naya informatika (RI-2020): XVII Sankt-Peterburgskaya Mezhdunar. konf. (g. Sankt-Peterburg, 28–30 oktyabrya 2020 g.) = Regional Informatics (RI-2020) : XVII St. Petersburg International Conference (St. Petersburg, October 28-30, 2020)*. Saint Petersburg: SPOISU, 2020:311–312. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Владислав Алексеевич Острейковский

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры информатики
и вычислительной техники,
Сургутский государственный университет
(Россия, г. Сургут, проспект Ленина, 1)
E-mail: ova@ivi.surgu.ru

Vladislav A. Ostreykovskiy

Doctor of technical sciences, professor,
professor of sub-department of information theory
and computer technology,
Surgut State University
(1 Lenin avenue, Surgut, Russia)

Светлана Александровна Лысенкова

кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры информатики
и вычислительной техники,
Сургутский государственный университет
(Россия, г. Сургут, проспект Ленина, 1)
E-mail: lsa1108@mail.ru

Svetlana A. Lysenkova

Candidate of physical and mathematical sciences,
associate professor of sub-department
of computer science,
Surgut State University
(1 Lenin avenue, Surgut, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 02.09.2021

Поступила после рецензирования/Revised 01.10.2021

Принята к публикации/Accepted 14.10.2021

DEVELOPMENT OF A MODEL FOR ASSESSING THE TECHNICAL LEVEL OF A CAR AS PART OF AN UNMANNED AIRCRAFT SYSTEM

A.V. Poltavskiy

V. A. Trapeznikov Institute of Management Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
avp57avp@yandex.ru

Abstract. *Background.* In conditions of keen competition in the markets for goods and services, a huge emphasis is put on the stages of subject-wise planning, issuing design specification, and front-end engineering design when manufacturing new products. These stages are primarily responsible for the key technical and economic products' characteristics that directly identify the product conceptual design and marketability. Current information and analytical systems (IAS) that dictate a choice of perspective directions to develop newly created products and their most preferred specimens basically use knowledge of experts about the value of estimation indicators. The latter usually serve as a basis for opting the best specimens of the newly designed technical systems. Evaluation of quality and technical level (TL) of complex technical systems using the created IAS often involves value functions (for instance, Fishburn function), which imply that a dialogue with a decision-maker (DM) produces information about his views of "value systems" or "preference systems", used to construct value functions. Developers of new products experience considerable difficulties in choosing a value function of estimation indicators when working with IAS. *Materials and methods.* The paper proposes to determine a value function for numerical indicators using the newly designed information model, based on expert estimations consistent with estimation of truck TL. A technical device and algorithm to determine value functions of unit estimation CTS indicators were developed according to the method. An invention was registered, and a patent was issued. The method also implies taking random factors into account when evaluating CTS TL for, as an example, "reliability" as the key estimation indicator. *Results and conclusions.* Two patents of the Russian Federation were obtained for invention of a time digitizer and a device for estimating effectiveness of various systems through sampling random values. The suggested method of generating a value function enables a scientist to choose the type and nature of a value function that will allow to increase the degree of CTS TL evaluation reliability, and optimize the cost of obtaining initial information when predicting CTS reliability due to evaluation of adaptive digitalization of random processes initiated in IAS. The paper materials may be of service to designers of complex systems at the initial stages of developing thereof in evaluating possible alternatives of CTS implementation, and determining TL at all stages of CTS life cycle.

Keywords: complex technical systems, information and analytical system, value functions, unit estimation indicators, technical level, concordance coefficient, random process, digitalization, reliability

For citation: Poltavskiy A.V. Development of a model for assessing the technical level of a car as part of an unmanned aircraft system. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;(3):13–24. doi:10.21685/2307-4205-2021-3-2

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ АВТОМОБИЛЯ В СОСТАВЕ БЕСПИЛОТНОГО АВИАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА

А. В. Полтавский

Институт проблем управления имени В. А. Трапезникова РАН, Москва, Россия
avp57avp@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В условиях острой конкуренции на рынках товаров и услуг большое внимание уделяется этапам предметного планирования, выдаче проектных спецификаций, а также предварительному инженерному проектированию при производстве новой продукции. Эти этапы в первую очередь отвечают за ключевые технические и экономические характеристики продуктов, которые напрямую определяют концептуальный дизайн и конкурентоспособность продукта. Существующие информационно-аналитические системы, которые диктуют выбор перспективных направлений развития вновь созданных продуктов и их

наиболее предпочтительных образцов в основном используют знания экспертов о значении показателей оценки. Последние обычно служат основанием для выбора лучших образцов вновь создаваемых технических систем. Оценка качества и технического уровня (ТЛ) сложных технических систем с использованием созданных систем часто включает функции ценности (например, функцию Фишберна), которые подразумевают, что диалог с лицом, принимающим решения, дает информацию о его взглядах на «ценность» системы» или «системы предпочтений», используемые для построения функций ценности. Разработчики новых продуктов испытывают значительные трудности с выбором функции ценности оценочных показателей при работе с ИАС. *Материалы и методы.* В статье предлагается определить функцию ценности для числовых показателей с использованием недавно разработанной информационной модели, основанной на экспертных оценках, согласующихся с оценкой ТЛ грузовика. По методике разработаны техническое устройство и алгоритм определения стоимостных функций единичных оценочных показателей сложных технических систем. Было зарегистрировано изобретение и выдан патент. Метод также предполагает учет случайных факторов при оценке СТС ТЛ, например, для «надежности» в качестве ключевого показателя оценки. *Результаты и выводы.* Получены два патента Российской Федерации на изобретение оцифровщика времени и устройства для оценки эффективности различных систем путем выборки случайных величин. Предлагаемый метод построения функции ценности позволяет ученому выбрать тип и характер функции ценности, что позволит повысить степень надежности оценки СТС ТЛ и оптимизировать затраты на получение исходной информации при прогнозировании надежности СТС за счет оценки адаптивной цифровизации случайных процессов, инициированных в информационно-аналитических системах. Бумажные материалы могут быть полезны разработчикам сложных систем на начальных этапах их разработки при оценке возможных альтернатив реализации СТС и определении ТЛ на всех этапах жизненного цикла СТС.

Ключевые слова: сложные технические системы, информационно-аналитическая система, функции стоимости, показатели единичной оценки, технический уровень, коэффициент согласованности, случайный процесс, цифровизация, надежность

Для цитирования: Полтавский А. В. Разработка модели оценки технического уровня автомобиля в составе беспилотного авиационного комплекса // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 3. С. 13–24. doi:10.21685/2307-4205-2021-3-2

Introduction

The existing information technologies for examining operations and algorithms from optimum systems theory allow to assess indicators of complex technical systems (CTS) and identify the following processes:

- compare existent CTS with optimum and assumed to be ideal (theoretical) ones;
- determine maximum possible values of CTS effectiveness criterion;
- use optimum systems theory when designing new CTS.

Definition of concepts “value function” and “unit estimation indicators”. When evaluating quality and technical level (TL) of complex technical systems (CTS), value and utility functions (for instance, Fishburn function [1]) are often used. The principle of these methods is that a dialogue with a decision-maker (DM) produces information about his “value system” or “preference system”, used to construct value functions.

Value function (utility function) is a function that establishes correspondence between TL indicator values and its estimations scaled from 0 to 1.

Unit estimation indicator shall be a parameter or characteristic that identify one of the basic CTS features and have a substantial effect on its performance and development. Value (utility) functions for unit estimation indicators are generated (chosen or determined). They are involved in identifying CTS technical level in information and analytical system (IAS).

Basically, a particular value function may be assigned to each type of estimation indicators. Value (utility) function for quality logical indicators is binary. It takes 0 or 1 value depending on whether this feature is important and preferable or not. DM shall understand that if there are no true objective preferences, only those preferences are of importance that demonstrate a subjective DM opinion about utility of values of the evaluated indicator. Fig.1 presents a utility function of “design engineering” course students’ grades as an example [2].

The presented value function slightly varies when grades are very high and very low, and sharply increases when grades are average and good. It indicates that there is good reason to increase evaluation of students’ knowledge from average and high grades.

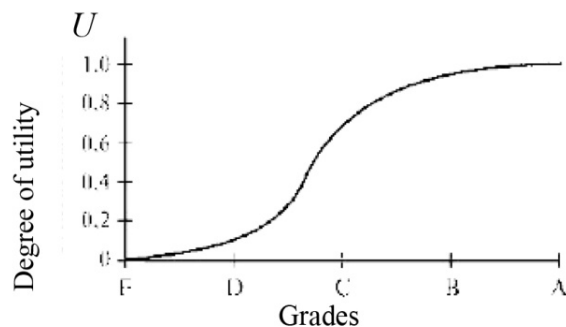


Fig. 1. Utility function of “design engineering” course students’ (F,D,C,B,A) grades

The literature may name value function as a utility function, preference function, function of estimations¹ [3–5]. Experts need to evaluate “number by number”, i.e. transform the value of indicator into its estimation. For ease in addressing this problem, a method of “principal points” is recommended, which implies that experts identify the type of relationship between values of indicators and their estimations. This relationship may be presented in the form of graphs, tables, and formulas. Graphs are constructed with the coordinate axes: values of indicators shall be on the abscissa; estimations shall be on the ordinate. A mean curve shall be constructed using curves constructed by individual experts. It can be analytically described in the form of the function formula.

1. Selecting and defining value functions of unit estimation indicators when solving multi-criteria problems in evaluating technical level of complex technical systems in information and analytical systems

1.1. Principles of generating value function of unit estimation indicators of complex technical systems

Generation of value function constitutes an integral part of a method for solving multi-criteria problems [6] and a method for evaluating technical level of CTS [7]. Information about DM preferences may be used in a variety of ways.

There is the most simple and popular method of simple weighting in order of importance. It implies that alternatives are ranked according to sums s_i of estimations r_{ij} of the alternatives, weighted by coefficients w_j of relative importance of these alternatives [3]

$$s_i = \sum_{j=1}^n w_j r_{ij}.$$

Selection of the value function type has a significant effect on the result of ranking the values of each unit estimation indicator.

The principles of constructing value functions are quite well-known [1, 2, 8]. However, as monography [9] states, construction of value functions is as much an art as a science. Hence, no unified guidelines to construct utility functions can be formulated. There are not only various methods for constructing utility functions, but also many varieties of any one of them.

Paper [10] suggests to determine utility function using qualitative data and estimations. CTS is arranged in order based on expert evaluations applying geometrical approach. An expert can either arrange objects in order, or make pair-wise comparisons. It is proposed to divide multiple data and evaluations into equivalence classes. A relationship between evaluations and parameters’ values, which can further be used for all multiple data and evaluations, is found through analyzing the expert’s preferences.

As mentioned in monography [9], it is very difficult to predict what method will be the best in a certain situation, since it depends on a specific decision-making person, nature of a problem, and many other factors. However, the basic ideas, used in selecting and constructing value function, remain identical for all possible procedures.

¹ ГОСТ 23554.0-79. Экспертные методы оценки качества промышленной продукции. Основные положения.

Therefore, without regard to what method would be utilized to construct a value function, relevant questions or problems that need to be considered and solved are basically the same and involve five stages:

1. Preparation to construct a value (or utility) function;
2. Identification of proper quality parameters of the evaluated object;
3. Setting quantity limits;
4. Selection of necessary value (utility) function;
5. Verification of concordance between the selected value (utility) function and experts' opinions.

In actual practice, steadily increasing (decreasing) value functions are most commonly in use. Here, it is considered that DMs tend to be risk-averse or risk-neutral. And it is the case if and only if a monotonic utility function is concave, convex, or linear [9].

Work [11] suggests a method for evaluating CTS technical level for IAS, which uses value function when defining ranking of alternatives

$$R_j(i) = \sum_1^k W_{kj} \cdot U_{kj}(i),$$

where $R_j(i)$ – ranking of the i^{th} alternative by the j^{th} integral indicator; W_{kj} – weight of the k^{th} unit indicator in the j^{th} integral indicator; $U_{kj}(i)$ – value of a value function of the k^{th} unit indicator of the i^{th} alternative of the j^{th} integral indicator.

Value function for numerical indicators implies that from two to five points of the value function curve shall be applied depending on the type of this curve. Value or utility function $U_{j-i}(g_{j-i})$ may be of several types (Fig. 2) or may be decreasing or increasing [7]. Type 1 is linear when there is no preference for an indicator, types 2 and 3 are concave and convex and shall be utilized when it is desirable to have greater or lesser effect depending on the value of an indicator; type 4 is S-shaped and shall be used, when it is desirable to have the required effect for greater values of an indicator.

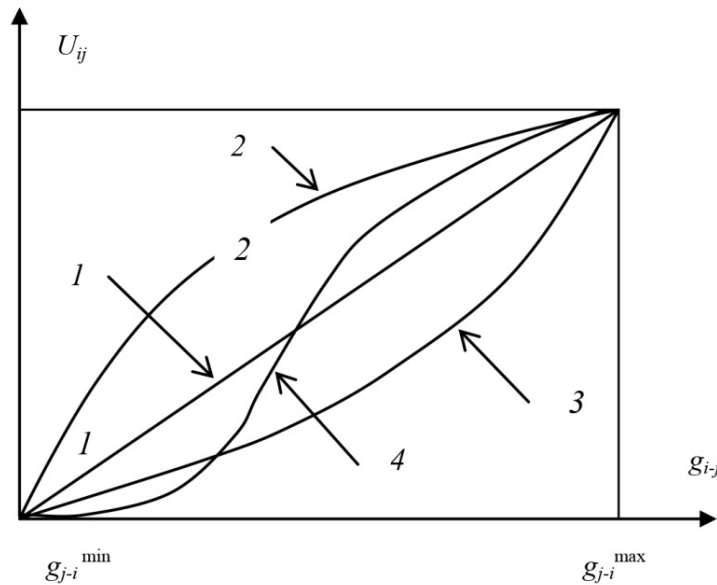


Fig. 2. Scheme of the inherent utility function types in IAS:
 1 – linear (risk-neutral); 2 – concave (risk-prone);
 3 – convex (risk-averse); 4 – S-shaped function

It is assumed that a value function is defined by five points. 0.90 value of the value function for each unit indicator corresponds to potentially attainable values of parameters or characteristics; 0.50 corresponds to those assigned in CTS design specification (DS) or common values; 0.1 corresponds to the minimum acceptable values; 0.20 and 0.70 correspond to intermediate values between the extreme and assumed as per DS values, and characterize the type of the selected value function.

Value function for synthesized indicators is often defined using only two points: 0.5 as a mean value of the parameter; 0.1 as the minimum acceptable values of the parameter. In what follows, the authors suggest a method for selecting value functions for CTS.

1.2. Method for selecting value functions and determining unit estimation indicators of complex technical systems

The principal result of the suggested method for selecting value function is in identifying preference of the unit numerical estimation indicator scaled from zero to one to increase authenticity of evaluating CTS technical level. It enables to assess a degree of effect, which this and other unit estimation indicators have on performance of basic CTS functions in a standardized form (i.e. irrespective of the estimation indicator dimension) when defining a standard CTS technical level.

Furthermore, a possibility emerges to determine threshold values of unit estimation indicators, i.e. the ranges of allowable variations in values using value functions. Its own type of value function shall be assigned to each type of indicator.

Within the suggested method:

- a division of all unit estimation indicators is made into quality (logical) and quantity (numerical) ones;
- each value function for numerical indicators is presented as a curve of two-five points; for each point a value of indicator shall be specified using an expert-based method, and a value of value function shall be selected from the list.

It is recommended to determine value functions of CTS unit estimation indicators as follows:

1. Compiling a list of unit estimation indicators
2. Determination of the value function type for each unit estimation indicator
3. Establishing threshold values of unit estimation indicators
4. Selection of value functions by each expert
5. Verification of a concordance degree between expert estimations.

Matrix of κ^{th} expert inquiry presented in Table 1 (1–4 stages) constitutes an initial information for these procedures.

Table 1

Matrix of κ^{th} expert inquiry by values of indicators

Unit indicators	Values of indicators for 5 points of value function				
	$U_{ik1}(g_i) = 0.10$	$U_{ik2}(g_i) = 0.20$	$U_{ik3}(g_i) = 0.50$	$U_{ik4}(g_i) = 0.70$	$U_{ik5}(g_i) = 0.90$
g_1	g_{1k1}^{\min}	g_{1k2}^{R1}	g_{1k3}^{R2}	g_{1k4}^{R3}	g_{1k5}^{\max}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
g_i	g_{ik1}^{\min}	g_{ik2}^{R1}	g_{ik3}^{R2}	g_{ik4}^{R3}	g_{ik5}^{\max}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
g_n	g_{nk1}^{\min}	g_{nk2}^{R1}	g_{nk3}^{R2}	g_{nk4}^{R3}	g_{nk5}^{\max}

The total number of matrices-inquiries shall be defined by the number of experts involved in the inquiry process. The following designations are assumed in Table 1: $U_{ikj}(g_i)$ is a value function that sets up a correspondence between the values of estimation indicator and scale from 0 to 1; g_i is a unit estimation indicator for evaluation of CTS TL.

Value function explicitly sets priorities on various values of a unit indicator. Basically, its own value function may be assigned to each type of indicator. Value function for logical indicators is binary. It takes 0 or 1 values, depending on whether this property is desirable or not. Numerical indicators that imply use of five points of value function (as in Table 1) will be further considered.

Numerical values in each line of Table 2 define the pattern of value function variation: it can be steadily decreasing or increasing, linear, convex, or concave, S-shaped, triangular, or trapezoidal, etc.

It would make sense to obtain mean (as per the data of all experts) indicators g_{ij} for each j^{th} point (out of 5 points) of value function using the following formula:

$$\bar{g}_{ij} = \frac{\sum_{\kappa=1}^m g_{ikj}}{m}, \tag{1}$$

where g_{ij} – value of indicator from Table 2; $j = 1, \dots, 5$ – points of value function; $\kappa = 1, \dots, m$; $i = 1, \dots, n$; m – number of experts involved in the inquiry process; n – number of unit estimation indicators.

Mean (as per the data of all experts) values of indicators may be presented in the form of Table 2.

Table 2

Matrix of indicators values

Unit indicators	Mean values of indicators for 5 points of value function				
	$U_{i1}(g_i) = 0.10$	$U_{i2}(g_i) = 0.20$	$U_{i3}(g_i) = 0.50$	$U_{i4}(g_i) = 0.70$	$U_{i5}(g_i) = 0.90$
g_1	\bar{g}_{11}^{\min}	\bar{g}_{12}^{R1}	\bar{g}_{13}^{R2}	\bar{g}_{14}^{R3}	\bar{g}_{15}^{\max}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
g_i	\bar{g}_{i1}^{\min}	\bar{g}_{i2}^{R1}	\bar{g}_{i3}^{R2}	\bar{g}_{i4}^{R3}	\bar{g}_{i5}^{\max}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
g_n	\bar{g}_{n1}^{\min}	\bar{g}_{n2}^{R1}	\bar{g}_{n3}^{R2}	\bar{g}_{n4}^{R3}	\bar{g}_{n5}^{\max}

Numerical values in each line of Table 2 define the form of the required value function.

However, there is a need for verifying a degree of concordance between expert estimations for all experts (5th stage). This concordance may be determined using concordance coefficient W_j , evaluated for each of five value function points by the following formula [12]:

$$W_j = 1 - \frac{12 \sum_{i=1}^n \sum_{\kappa=1}^m d_{ij\kappa}^2}{m^2(n^3 - n)}, \tag{2}$$

$i = 1, \dots, n$ – indicators; $\kappa = 1, \dots, m$ – experts; $j = 1, \dots, 5$ – points of value function; where $d_{ij\kappa}$ is a standard deviation of the current value of indicator g_{ijk} from its mean value defined by formula (1).

Value $d_{ij\kappa}$ shall be evaluated by the following formula:

$$d_{ij\kappa} = \frac{\bar{g}_{ij} - g_{ijk}}{\bar{g}_{ij}} \tag{3}$$

If inequality

$$W_j \geq W_0 \tag{4}$$

holds true (where W_0 is an allowable value of concordance coefficient), the results of experts' inquiry may be considered agreed, otherwise, they need to be corrected through repeating this inquiry.

2. Example. Determination of value functions of self-driving truck TL evaluation

A specific example shall be considered to illustrate the suggested method. Value functions shall be identified for TL unit indicators of truck in IAS environment.

Six functional unit estimation indicators of truck [13] shall be specified:

- 1) velocity (U , km/h);
- 2) capacity (V , m³);
- 3) weight of load carried (m_G , t);
- 4) weight of loaded automobile (m_a , t);
- 5) angle of turn (α , degrees);
- 6) motor power (P , HP).

Fig. 3 shows value functions for unit estimation indicators of truck, suggested by each of seven experts. Numbers of value functions' curves in each figure correspond to the numbers of the appropriate ex-

perts. Numerical values of estimation indicators taken from these curves are presented in the table for each expert¹.

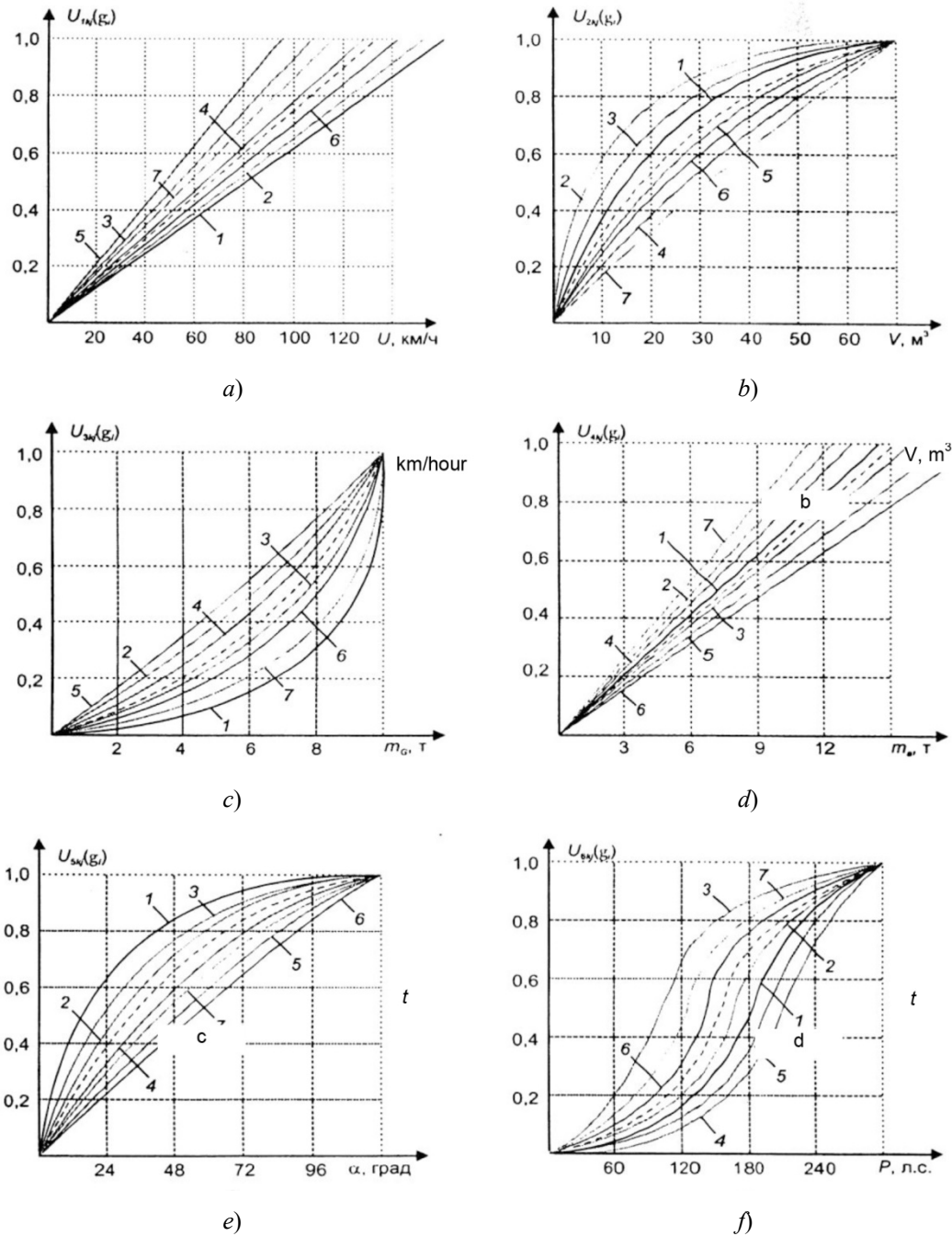


Fig. 3. Value functions for unit estimation indicators in evaluating technical level of truck in IAS:
 a – velocity U , km/h; b – capacity V , m^3 ; c – weight of load carried m_G , t;
 d – weight of loaded automobile m_a , t; e – angle of turn α , degrees; f – motor power, P – horsepower

Table 3 comprises data on numerical values of indicators for expert No.1. Table 4 contains information about mean values of indicators based on data obtained from seven experts. Table 5 includes differences between mean values of a unit indicator and values of this indicator, in expert No.1 opinion. Since squaring operation will further be made, there is no any sense in a symbol preceding these differences, hence, these tables show modules of these differences.

¹ Due to the paper scope limitations, further data are given pursuant to the algorithm of processing data only for expert No.1.

Table 3

Numerical values of indicators for expert No. 1

Indicator No.	Values of indicators				
	$U_{i11}(g_i) = 0.10$	$U_{i12}(g_i) = 0.20$	$U_{i13}(g_i) = 0.50$	$U_{i14}(g_i) = 0.70$	$U_{i15}(g_i) = 0.90$
1	17.34	32.00	80.00	111.00	142.66
2	1.96	4.65	12.80	24.30	45.00
3	5.00	7.00	9.00	9.60	9.94
4	1.20	2.90	7.25	10.20	13.15
5	2.40	3.60	14.40	28.80	67.20
6	96.00	132.00	174.00	198.00	246.00

Table 4

Mean values of indicators according to information obtained from seven experts

Indicator No.	Mean values of indicators				
	$U_{i1}(g_i) = 0.10$	$U_{i2}(g_i) = 0.20$	$U_{i3}(g_i) = 0.50$	$U_{i4}(g_i) = 0.70$	$U_{i5}(g_i) = 0.90$
1	12.72	23.72	62.69	92.26	118.29
2	2.80	6.32	17.47	30.15	49.67
3	2.71	4.36	7.41	8.68	9.38
4	1.20	2.90	7.50	10.46	13.66
5	7.20	12.59	34.69	55.21	90.17
6	91.00	115.72	156.00	182.14	238.29

Table 5

Differences between mean values of each (of 6) unit indicator and values of the indicator in expert No.1 opinion

Indicator No.	Values of difference between values of indicators				
	$U_{i11}(g_i) = 0.10$	$U_{i12}(g_i) = 0.20$	$U_{i13}(g_i) = 0.50$	$U_{i14}(g_i) = 0.70$	$U_{i15}(g_i) = 0.90$
1	4.62	8.28	17.31	18.74	24.37
2	0.84	1.67	8.47	5.85	4.67
3	2.29	2.64	1.59	0.92	0.56
4	0.00	0.00	0.25	0.26	0.51
5	4.80	8.99	10.29	26.41	22.97
6	5.00	16.28	18.00	15.86	7.71

Table 6 contains standardized values of these differences obtained as per formula (3) for expert No. 1.

Table 6

Standardized values of difference for expert No. 1

Indicator No.	Standardized values of difference				
	$U_{i11}(g_i) = 0.10$	$U_{i12}(g_i) = 0.20$	$U_{i13}(g_i) = 0.50$	$U_{i14}(g_i) = 0.70$	$U_{i15}(g_i) = 0.90$
1	0.363	0.349	0.276	0.203	0.206
2	0.300	0.264	0.485	0.194	0.094
3	0.845	0.606	0.215	0.106	0.060
4	0.000	0.000	0.033	0.025	0.037
5	0.667	0.714	0.297	0.478	0.255
6	0.055	0.141	0.115	0.087	0.032

Table 7 contains squared standardized values for expert No. 1 for all points of value functions curves.

Table 7

Squared standardized values of difference for expert No. 1

Indicator No.	Squared standardized values of difference				
	$U_{i1}(g_i) = 0.10$	$U_{i2}(g_i) = 0.20$	$U_{i3}(g_i) = 0.50$	$U_{i4}(g_i) = 0.70$	$U_{i5}(g_i) = 0.90$
1	0.1318	0.1218	0.0762	0.0412	0.0424
2	0.0900	0.0697	0.2350	0.0376	0.0088
3	0.7141	0.3666	0.0460	0.0112	0.0036
4	0.0000	0.0000	0.0011	0.0006	0.0014
5	0.4444	0.5099	0.0880	0.2288	0.0649
6	0.0030	0.0198	0.0133	0.0076	0.0010

Table 8 shows total sums of squared standardized differences and evaluations of concordance coefficient W_j using formula (2). Table 8 shows that each value W_j is greater than 0.99.

Table 8

Total summation and evaluation of W_j

	Indicator No.	Sums of squared standardized values of difference				
		$U_{i1}(g_i) = 0.10$	$U_{i2}(g_i) = 0.20$	$U_{i3}(g_i) = 0.50$	$U_{i4}(g_i) = 0.70$	$U_{i5}(g_i) = 0.90$
Intermediate values	1	0.4361	0.3063	0.2332	0.1990	0.1757
	2	2.5264	1.9499	1.4752	0.8658	0.3247
	3	1.1679	0.9005	0.2050	0.0507	0.0079
	4	0.1882	0.2996	0.2753	0.2256	0.2459
	5	1.3826	1.5900	0.8081	0.8098	0.1755
	6	0.8787	0.6337	0.3205	0.2392	0.0591
	\sum	6.5799	5.6800	3.3173	2.3901	0.9888
	W_j	0.9923	0.9938	0.9961	0.9972	0.9988

It indicates that actions of experts are well-coordinated, and even with $W_0 = 0.80$ the obtained mean values of value function of truck unit indicators (Table 8) can be taken as a basis. The obtained mean (for 7 experts) value functions for 6 estimation indicators are presented in Fig. 3 as dotted lines.

”Evaluation and selection” IAS designed to evaluate technical level of various-purpose CTS [6, 14] may be qualified as a modern automated computer-software system that uses state-of-the-art mathematical methods of decision-making theory and information technologies. This system enables to take into account the relationship between the estimation indicator value and the value of an indicator using five nodal points of linear-broken approximation, i.e. DM’s preferences. These data shall be read out according to the results of processing data obtained from experts, using the above-mentioned procedure. A technical device and algorithm to determine value functions of unit estimation CTS indicators were developed according to the method. They were considered an invention, and the patent of the Russian Federation was issued [15].

3. Taking into account random factors in “reliability” indicator when evaluating technical level of complex technical systems

Indicators of reliability, and no-failure operation, in particular, constitute an important component characterizing technical level of almost any CTS. To forecast reliability using information model “load-resisting strength” [16], it is required to know the value of uncorrelated maximum values of random external effects (level of loading) that may result in CTS failure. Implementation of this random process may be considered as an initial information to forecast reliability. Here, one should seek to reduce the scope of this information. It saves time and reduces the cost of its acquisition. In so doing, an adaptive digitalization may be applied when constructing implementations of random process of loading [17]. If spectrum characteristics of random factors vary [18], it makes sense to present it through adaptive digitalization. An accuracy of approximation therewith may be increased using the following Lagrange polynomial $L(t)$ [20]:

$$L(t) = \sum_{i=0}^n x_i l_i(t), \quad i = 0, \dots, n, \tag{5}$$

where x_i – i^{th} value of approximation; n – number of points of random process approximation;

$$l_i(t) = \prod_{j=0}^m \frac{t-t_j}{t_i-t_j}, \quad j=0, \dots, m, \quad (6)$$

m – maximum value of argument t degree indicator.

Taking into account formulas (5) and (6) for three approximation points and $m = 2$

$$L(t) = x_0 \frac{(t-t_1)(t-t_2)}{(t_0-t_1)(t_0-t_2)} + x_1 \frac{(t-t_0)(t-t_2)}{(t_1-t_0)(t_1-t_2)} + x_2 \frac{(t-t_0)(t-t_1)}{(t_2-t_0)(t_2-t_1)}, \quad (7)$$

where x_0 and t_0 – values of function and argument of the first point of approximation; x_1 and t_1 – values of function and argument of the second point of approximation; x_2 and t_2 – values of function and argument of the third point of approximation.

Quantitative evaluation of approximation quality shall further be done through computing difference δ between forecasted value $L(t_{np})$ and its actual value $x(t_{np})$:

$$\delta = |L(t_{np}) - x(t_{np})|. \quad (8)$$

Value δ shall further be compared with its allowable value δ_n , if $\delta \leq \delta_n$, then the result of approximation is positive, and value $L(t_{np})$ may be fixed as a working value of digitalization of the random process in question. An invention was created for solving the problem, and the Russian Federation patent was obtained [19, 20].

Key results of performed studies

Thus, the results of the studies carried out using IAS are as follows:

1. A method for selecting value function for unit estimation indicators in IAS was suggested based on construction of fuzzy logic statements in evaluating CTS TL.
2. An algorithm for evaluating TL in IAS is developed taking into account multiple-factor information model of random search and selection of alternative to elaborate preliminary DM's solutions in assessing CTS TL.
3. Information model of IAS is amended by the blocks of receiving initial information to evaluate CTS TL considering random factors.
4. Creation of IAS enabled to certify the suggested method and algorithm to evaluate TL for truck. Modelling results have evidenced an acceptable degree of evaluating unit estimation indicators of computerized IAS in preparing suggestions for DM, taking experts' opinions into account.

Discussion

Appendix A from monography [6] presents a brief analytical review of a reasonably large body of literature (156 sources) on methods for decision-making, evaluation of products' quality and CTS TL, methods of assessing quality and CTS TL, involving those based on expert estimations, and systems of decision-making support using computer technologies. However, according to analysis, no consideration in the stated works was given to the problems posed in the paper concerning construction of IAS and information model of analyzing CTS value function to practically determine TL in the context of new information technologies in the area of identifying algorithms and results of modelling the systems through combined approaches. I.e., no suggestions on generating value function of CTS unit indicators using five points of analyzing value function were put forward, and the initial information bearing factors in mind was not considered in IAS at all.

Recommendations

The suggested information technology is designed to serve a wide range of developers of the new CTS in selecting the best technical solutions using IAS and conducting comparative CTS TL analysis related to domestic and foreign specimens, as well as evaluating competitiveness of the newly created products and identifying the quality of export products.

Conclusion

1. Selection and definition of value functions of unit estimation indicators constitute an integral part of a method for solving multi-criteria problems on evaluating technical level of CTS in IAS.

2. The paper suggests a research and practical method of generating value functions of unit estimation indicators in estimating CTS technical level using evaluation of experts' concordance that enables to make rather simple and reasonable choice, generating value function for each unit estimation indicator taken.

3. A potential reduction of the cost of acquiring initial information needed for forecasting CTS reliability is shown due to acquiring evaluation of adaptive digitalization of random factors implemented in IAS.

References

1. Fishbern P.K. *Teoriya poleznosti dlya prinyatiya resheniy: per. s angl. = The theory of utility for decision - making : trans. from English.* Moscow: Nauka, 1978:352. (In Russ.)
2. Dikson D. *Proektirovanie sistem: izobretatel'stvo, analiz, prinyatie resheniy: per. s angl. = System design: invention, analysis, decision-making : trans. from English.* Moscow: Mir, 1969:440. (In Russ.)
3. Totsenko V.G. *Metody i sistemy podderzhki prinyatiya resheniy. Algoritmicheskiy aspekt = Methods and decision support systems. Algorithmic aspect.* Kiev: Naukova dumka, 2002:382.
4. Samkov T.L. *Teoriya prinyatiya resheniy: konspekt lektsiy = Decision theory : lecture notes.* Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2010:107. (In Russ.)
5. Dudnikov S.V., Babishin V.D., Pokrovskiy P.E. *Teoriya prinyatiya resheniy. Matematicheskoe obespechenie protsedur prinyatiya resheniy na osnove funktsiy poleznosti = The theory of decision-making. Mathematical support of decision-making procedures based on utility functions.* Moscow: MARTIT, 2012:132. (In Russ.)
6. Semenov S.S., Voronov E.M., Poltavskiy A.V., Kryanev A.V. *Metody prinyatiya resheniy v zadachakh otsenki kachestva i tekhnicheskogo urovnya slozhnykh tekhnicheskikh sistem = Methods of decision-making in the tasks of assessing the quality and technical level of complex technical systems.* Moscow: LENAND, 2016:520. (In Russ.)
7. Bomas V.V., Sudakov V.A., Afonin K.A. *Podderzhka prinyatiya mnogokriterial'nykh resheniy po predpocheni-yam pol'zovatelya. SPPR DSB/UTES = Support for making multi-criteria decisions based on user preferences. DSS/UTES DSS.* Moscow: Izd-vo MAI, 2006:172. (In Russ.)
8. Poltavskiy A.V., Semenov S.S., Burba A.A. Models for choosing alternatives when creating complex technical systems. *Dvoynye tekhnologii = Dual technologies.* 2014;(4):40–48. (In Russ.)
9. Kini R.L., Rayfa Kh. *Prinyatie resheniy pri mnogikh kriteriyakh predpocheniya i zameshcheniya = Decision-making under many criteria of preference and substitution ;* transl. from Engl. by V.V. Podinovskiy, M.G. Gaft, V.S. Babintsev. Moscow: Radio i svyaz', 1981:560. (In Russ.)
10. Terekhina A.Yu. Determination of the utility function on qualitative data. *Protsedury otsenivaniya mnogokriterial'nykh ob"ektov: sb. tr. = Procedures for evaluating multi-criteria objects : a collection of works.* Moscow: VNIISI, 1984:28–34. (In Russ.)
11. Semenov S.S., Poltavskiy A.V., Kryanev A.V. Assessment of the technical level of complex systems (using the example of creating multifunctional complexes of unmanned aerial vehicles). *Fazotron = Phasotron.* 2013;(3):61–67. (In Russ.)
12. Litvak B.G. *Ekspertnaya informatsiya. Metody polucheniya i analiza: monografiya = Expert information. Methods of obtaining and analysis : monograph.* Moscow: Issledovatel'skiy tsentr problem kachestva podgotovki spetsialistov, 2009:225. (In Russ.)
13. Faskhiev Kh.A. Analysis of methods for assessing the quality and competitiveness of trucks. *Metody menedzhmenta kachestva = Quality management methods.* 2001;(3):24–28. (In Russ.)
14. Semenov S.S. *Otsenka kachestva i tekhnicheskogo urovnya slozhnykh sistem: praktika primeneniya metoda ekspertnykh otsenok = Assessment of the quality and technical level of complex systems: the practice of applying the method of expert assessments.* Moscow: Lenand, 2015:352. (In Russ.)
15. Patent 2445687, MPK G06F 17/90. Russian Federation. A device for determining the value function of single evaluation indicators of complex technical systems. A.A. Burba, S.S. Semenov, V.V. Shcherbinin. No. 2010149254/08; appl. 02.12.2010, publ. 20.03.2012, bull. No. 8. (In Russ.)
16. Dedkov V.K., Pronikov A.S., Terpulovskiy A.N. *Nadezhnost' slozhnykh tekhnicheskikh sistem. Metody opredeleniya i obespecheniya nadezhnosti promyshlennoy produktsii = Reliability of complex technical systems. Methods for determining and ensuring the reliability of industrial products.* Moscow: ANKh, 1983:20. (In Russ.)
17. Patent 2583707, MPK G06F 17/00 Russian Federation. Adaptive time sampler. A.A. Burba. No. 2015104707/08; appl. 12.02.2015; publ. 10.05.2016. (In Russ.)
18. Poltavskiy A.V. Model of the measuring system in the control of Unmanned aerial vehicles. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy = Information-measuring and control systems.* 2009;(10):73–77. (In Russ.)
19. Poltavskiy A.V., Burba A.A., Averkin A.E. [et al.]. *Mnogofunktsional'nye komplekсы bespilotnykh letatel'nykh apparatov = Многофункциональные комплексы беспилотных летательных аппаратов.* Moscow: IPU RAN, 2015:204. (In Russ.)
20. Patent 2178201, MPK G06F 17/18 Russian Federation. Performance evaluation device. A.A. Burba, A.V. Poltavskiy, S.P. Khripunov. No. 2001110032/09; appl. 16.04.2001; publ. 10.01.2002. (In Russ.)

Список литературы

1. Фишберн П. К. Теория полезности для принятия решений : пер. с англ. М. : Наука, 1978. 352 с.
2. Диксон Д. Проектирование систем: изобретательство, анализ, принятие решений : пер. с англ. М. : Мир, 1969. 440 с.
3. Тоценко В. Г. Методы и системы поддержки принятия решений. Алгоритмический аспект. Киев : Наукова думка, 2002. 382.
4. Самков Т. Л. Теория принятия решений : конспект лекций. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2010. 107 с.
5. Дудников С. В., Бабишин В. Д., Покровский П. Е. Теория принятия решений. Математическое обеспечение процедур принятия решений на основе функций полезности. М. : МАРТИТ, 2012. 132 с.
6. Семенов С. С., Воронов Е. М., Полтавский А. В., Крянев А. В. Методы принятия решений в задачах оценки качества и технического уровня сложных технических систем / под ред. д-ра техн. наук, проф. Е. Я. Рубиновича. М. : ЛЕНАНД, 2016. 520 с.
7. Бомас В. В., Судаков В. А., Афонин К. А. Поддержка принятия многокритериальных решений по предпочтениям пользователя. СППР DSB/UTES / под ред. В. В. Бомаса. М. : Изд-во МАИ, 2006. 172 с.
8. Полтавский А. В., Семенов С. С., Бурба А. А. Модели выбора альтернатив при создании сложных технических систем // Двойные технологии. 2014. № 4. С. 40–48.
9. Кини Р. Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях предпочтения и замещения / под ред. И. Ф. Шахнова ; пер. с англ. В. В. Подиновского, М. Г. Гафта, В. С. Бабинцева. М. : Радио и связь, 1981. 560 с.
10. Терехина А. Ю. Определение функции полезности на качественных данных // Процедуры оценивания многокритериальных объектов : сб. тр. М. : ВНИИСИ, 1984. С. 28–34.
11. Семенов С. С., Полтавский А. В., Крянев А. В. Оценка технического уровня сложных систем (на примере создания многофункциональных комплексов беспилотных летательных аппаратов) // Фазотрон. 2013. № 3. С. 61–67.
12. Литвак Б. Г. Экспертная информация. Методы получения и анализа : монография. М. : Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов, 2009. 225 с.
13. Фасхиев Х. А. Анализ методов оценки качества и конкурентоспособности грузовых автомобилей // Методы менеджмента качества. 2001. № 3. С. 24–28.
14. Семенов С. С. Оценка качества и технического уровня сложных систем: практика применения метода экспертных оценок. М. : Ленанд, 2015. 352 с.
15. Патент 2445687, МПК G06F 17/90. Российская Федерация. Устройство для определения функции ценности единичных оценочных показателей сложных технических систем / А. А. Бурба, С. С. Семенов, В. В. Щербинин. № 2010149254/08 ; заявл. 02.12.2010, опубл. 20.03.2012, Бюл. № 8.
16. Дедков В. К., Проников А. С., Терпуловский А. Н. Надежность сложных технических систем. Методы определения и обеспечения надежности промышленной продукции / под ред. Г. Н. Бобровникова. М. : АНХ, 1983. 20 с.
17. Патент № 2583707, МПК G06F 17/00 Российская Федерация. Адаптивный временной дискретизатор / А. А. Бурба. № 2015104707/08 ; заявл. 12.02.2015 ; опубл. 10.05.2016.
18. Полтавский А. В. Модель измерительной системы в управлении БЛА // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2009. № 10. С. 73–77.
19. Полтавский А. В., Бурба А. А., Аверкин А. Е. [и др.]. Многофункциональные комплексы беспилотных летательных аппаратов / под ред. Е. Я. Рубиновича. М. : ИПУ РАН, 2015. 204 с.
20. Патент 2178201, МПК G06F 17/18 Российская Федерация. Устройство для оценки эффективности / А. А. Бурба, А. В. Полтавский, С. П. Хрипунов. № 2001110032/09 ; заявл. 16.04.2001 ; опубл. 10.01.2002.

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Васильевич Полтавский

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

Aleksandr V. Poltavskiy

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

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

Поступила в редакцию/Received 07.05.2021

Поступила после рецензирования/Revised 25.06.2021

Принята к публикации/Accepted 02.10.2021

МЕТОДЫ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ И ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АГЕНТА

А. Д. Тулегулов¹, Д. С. Ергалиев², Б. С. Бейсембаева³, К. М. Акишев⁴

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

⁴ Казахский университет технологии и бизнеса, Нур-Султан, Казахстан

^{1,3,4}tad62@yandex.kz, ²DES-67@yandex.kz

Аннотация. *Актуальность и цели.* Новые задачи, возникающие практически ежедневно, приводят к появлению новых направлений машинного обучения. Приведены результаты исследования основных видов машинного обучения по признаку наличия и сложности данных. *Материалы и методы.* Основным методом исследования является метод подбора. Под каждую конкретную задачу подбирается свой алгоритм, так как от него зависит скорость и точность результата обработки исходных данных. Рассматриваются методы машинного обучения. В частности, анализируется вариант на основе обучения интеллектуального агента, который действует во внешней среде и называется обучением с подкреплением. Обучение с подкреплением (англ. *reinforcement learning*) – способ машинного обучения, при котором система обучается, взаимодействуя с некоторой средой. *Результаты.* Как результат проведенных исследований, можно отметить тот факт, что в обучении с подкреплением агент взаимодействует с окружающей средой, предпринимая действия и получая награду за эти действия. *Выводы.* Таким образом можно утверждать, что на данный момент классические методы машинного обучения для цифровых технологий охватывают широкий спектр приложений от различных потребителей. Новые задачи, возникающие практически ежедневно, приводят к появлению новых направлений машинного обучения.

Ключевые слова: алгоритм, искусственный интеллект, машинное обучение, data mining, методы

Для цитирования: Тулегулов А. Д., Ергалиев Д. С., Бейсембаева Б. С., Акишев К. М. Методы нейронных сетей и глубокого обучения на основе интеллектуального агента // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 3. С. 25–31. doi:10.21685/2307-4205-2021-3-3

METHODS OF NEURAL NETWORKS AND DEEP LEARNING ON THE BASIS OF AN INTELLIGENT AGENT

A.D. Tulegulov¹, D.S. Yergaliyev², B.S. Beisembayeva³, K.M. Akishev⁴

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

⁴ Kazakh University of Technology and Business, Nur-Sultan, Kazakhstan

^{1,3,4}tad62@yandex.kz, ²DES-67@yandex.kz

Abstract. *Background.* New tasks arising almost daily lead to the emergence of new directions of machine learning. The article presents the results of the study of the main types of machine learning on the basis of the availability and complexity of data. *Materials and methods.* The main research method is the selection method. For each specific task, its algorithm is selected, since the speed and accuracy of the result of processing the source data depends on it. We consider methods of machine learning. In particular, an option is analyzed based on the training of an intelligent agent, which acts in the external environment and is called training with reinforcement. Reinforcement training (Eng. Reinforcement Learning) is a method of machine learning, in which the system is learning, interacting with some medium. *Results.* As a result of research, it is possible to note the fact that in training with reinforcement an agent interacts with the environment, taking actions and receives a reward for these actions. *Conclusions.* In this way, it can be argued that at the moment the classic methods of machine learning for digital technologies cover a wide range of applications from different consumers. New tasks arising almost daily lead to the emergence of new directions of machine learning.

Keywords: algorithm, artificial intelligence, machine learning, data mining, methods

For citation: Tulegulov A.D., Yergaliyev D.S., Beisembayeva B.S., Akishev K. M. Methods of neural networks and deep learning on the basis of an intelligent agent. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;(3):25–31. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-3-3

Введение

В настоящее время цифровые образовательные технологии оказались очень востребованы и актуальны. Особую значимость при этом имеют цифровые навыки большей части населения планеты. Важную роль при этом отводят в первую очередь элементарным базовым знаниям, без которых невозможно поднять на должный уровень цифровую грамотность населения. В свете этого необходимо понимать, насколько важным и серьезным может стать вопрос изучения новых цифровых технологий. Одним из важных вопросов является понимание понятия «искусственный интеллект».

Алгоритм является системой последовательных операций для решения определенной задачи, по-другому, метод решения. Под каждую конкретную задачу подбирается свой алгоритм, так как от него зависят скорость и точность результата обработки исходных данных [1].

Иногда подготовленный алгоритм не помогает решить поставленную задачу. Для начала работы требуется определить реальную причину проблемы [2]. В таком случае на помощь могут прийти методы машинного обучения.

Методы исследования

На рис. 1 показаны основные виды машинного обучения по признаку наличия и сложности данных.



Рис. 1. Основные виды машинного обучения

По признаку наличия тьютора обучение делится на:

- обучение с тьютором (*Supervised Learning*) – применяют, когда нужно научить машину распознавать объекты или сигналы;
- без тьютора (*Unsupervised Learning*) – используется принцип «эта вещь такая же, как другие». Алгоритмы изучают свойства и находят необычные или несхожие с другими аномалии;
- с подкреплением (*Reinforcement Learning*) – используют там, где перед машиной ставится задача – верно выполнить поставленные задачи во внешней среде, имея множество возможных вариантов действия [3].

По типу применяемых алгоритмов можно выделить два вида:

- 1) классическое обучение – известные и хорошо изученные алгоритмы обучения, разработанные для статистических задач: классификация, кластеризация, регрессия и другие, которые применяются для решения задач прогнозирования, сегментации клиентов;
- 2) нейронные сети и глубокое обучение – современный подход к МО. Они применяются для распознавания или генерации изображений, управления или принятия решений, машинного перевода и схожих по сложности задач [3].

Несколько различных подходов можно объединить, и тогда получатся ансамбли моделей машинного обучения.

Предлагаемая общая классификация методов машинного обучения приведена на рис. 2.

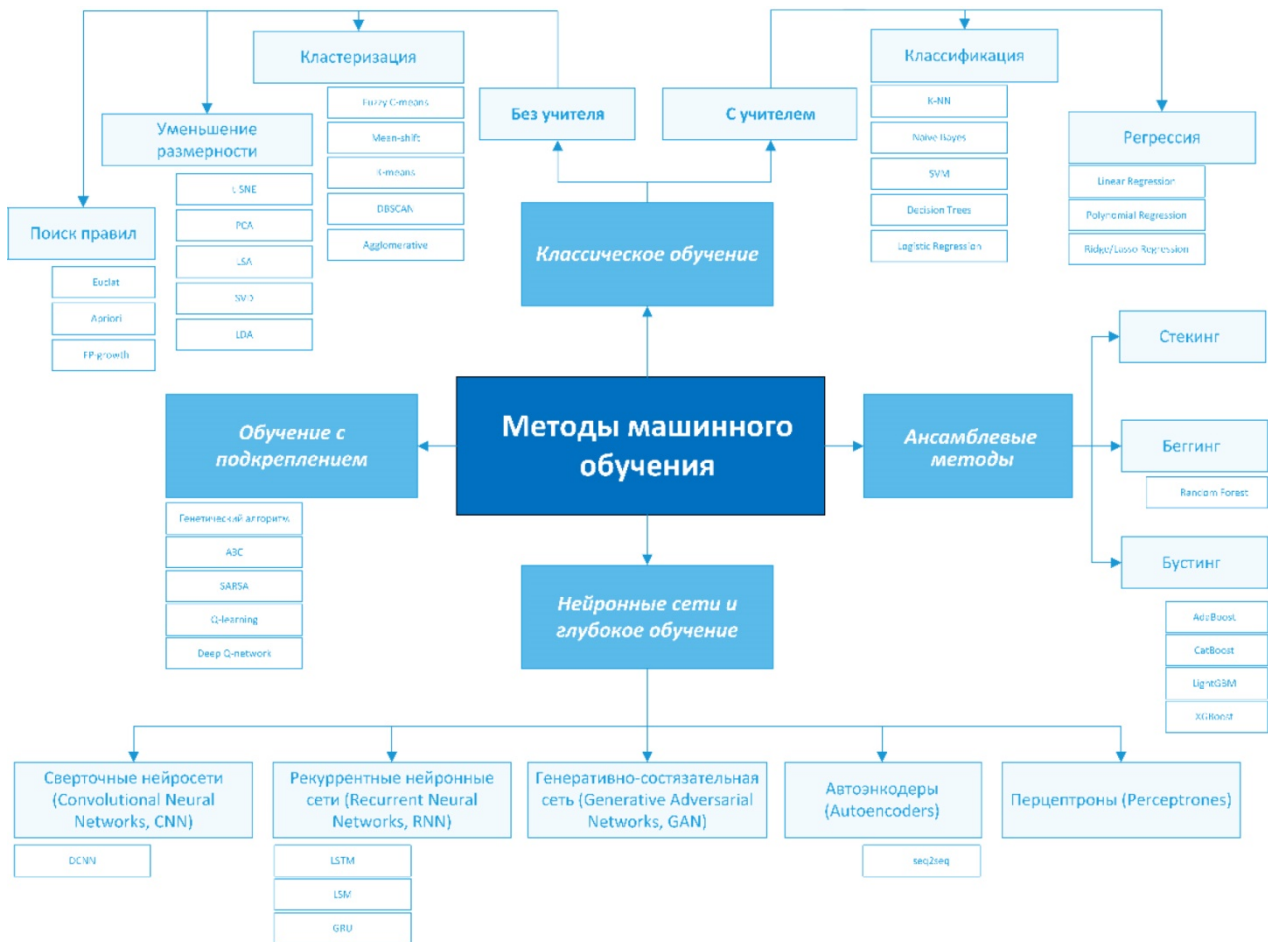


Рис. 2. Классификация методов интеллектуального анализа данных

Перечислим наиболее популярные классические методы машинного обучения:

- деревья решений;
- метод опорных векторов;
- метод «ближайшего соседа»;
- линейная регрессия;
- метод Байесовской классификации;
- алгоритм k -средних (k -means);
- методы поиска ассоциативных правил.

Методы обучения с подкреплением

Метод машинного обучения на основе обучения интеллектуального агента, который действует во внешней среде, называется обучением с подкреплением. Обучение с подкреплением (англ. *reinforcement learning*) – способ машинного обучения, при котором система обучается, взаимодействуя с некоторой средой [2].

Полагается, что в каждый момент времени заранее программируемый агент находится в предназначенном состоянии и в зависимости от нее у агента есть выбор нескольких возможных действий. После выбора агентом некоторого действия он оказывается в новом состоянии и получает определенное подкрепление (вознаграждение), которое зависит от предыдущего состояния и выбранного действия. Предполагается, что агенту нужно увеличивать сумму своих подкреплений.

Результаты

Как результат проведенных исследований можно отметить тот факт, что в обучении с подкреплением агент взаимодействует с окружающей средой, предпринимая действия, и получает награду за эти действия [4]. Это очень важный момент процесса обучения.

Методы с частичным обучением находятся в поиске стратегии, приписывающей состояниям окружающей среды действия, одно из которых может выбрать агент в этих состояниях.

Примеры методов: адаптивный эвристический критик (Adaptive Heuristic Critic, АНС), SARSA и Q -обучение (Q -learning).

Процесс Q -обучения:

- множество состояний;
- множество действий;
- функция награды;
- функция перехода;
- *learning rate* (обычно 0,1), чем он выше, тем сильнее агент доверяет новой информации;
- *discounting factor*, чем он меньше, тем меньше агент задумывается о выгоде от будущих своих действий [1].

Нейронные сети (*Neural network, NN*), или искусственные нейронные сети (*Artificial neural networks, ANN*) – один из видов машинного обучения. Нейронные сети используются в качестве алгоритма для машинного зрения и перевода, распознавания речи, музыки, обработки изображений.

Глубокое обучение (*Deep learning*) – это метод машинного обучения, основанный на нейронных сетях. В современной реальности практически во всем, что касается *Deep Learning*, используют нейронные сети.

Успех глубокого обучения напрямую зависит от мощности техники. На момент появления нейронных сетей мощности компьютеров были низкими, из-за чего и сами сети были довольно слабыми, поэтому невозможно было создать большое количество слоев.

С появлением мощных машин все изменилось и современное глубокое обучение способно справиться с большими размерами сетей с использованием фреймворки: *Keras, Detectron, TensorFlow* и *PyTorch*.

Обсуждение

Полученные результаты подтверждают то, что нейронные сети используют практически во всех задачах, где человек пытается применить ИИ. *CNN (Convolutional neural network)* используется в области компьютерного зрения, *GAN (Generative Adversarial Nets)* – в криминалистике, в дизайне и в кинопроизводстве [5].

Нейронные сети *DQN (Deep Q-Learning)* используются для принятия решений на основании анализа текущей ситуации, т.е. система сама собирает данные, сама их анализирует, прогнозирует наиболее вероятный исход в той или иной ситуации, принимает максимально выгодное решение на основании всех факторов.

Работу подобных нейронных сетей демонстрируют беспилотный транспорт, различные боты [6].

Машинное обучение – свод набора алгоритмов и методов в области ИИ, которые применяются для создания машины, которая учится на собственном опыте. В качестве обучения машина обрабатывает огромные массивы входных данных и находит в них закономерности [7].

Понятия *Data science* и *Machine learning* во многом пересекаются, но все же они разные и каждый со своими задачами.

В понятие ИИ входят технологические, научные решения и методы, которые помогают сделать программы по подобию интеллекта человека. ИИ включает в себя множество инструментов, алгоритмов и систем, среди которых также все составляющие *Data science* и *Machine learning* [8].

Data science – наука о методах анализа данных и извлечения из них ранее неизвестной информации, ценных знаний. Она пересекается с такими областями, как машинное обучение и наука о мышлении, большие данные. Результатом его работы являются разобранные данные и найденные верные подходы для их дальнейшей обработки, сортировки, выборки и поиска [9].

На рис. 3 приведен пример классификации метода нейронных сетей.

«Нейронные сети – это модели биологических нейронных сетей мозга, в которых нейроны имитируются относительно простыми, часто однотипными, элементами (искусственными нейронами)» [5].

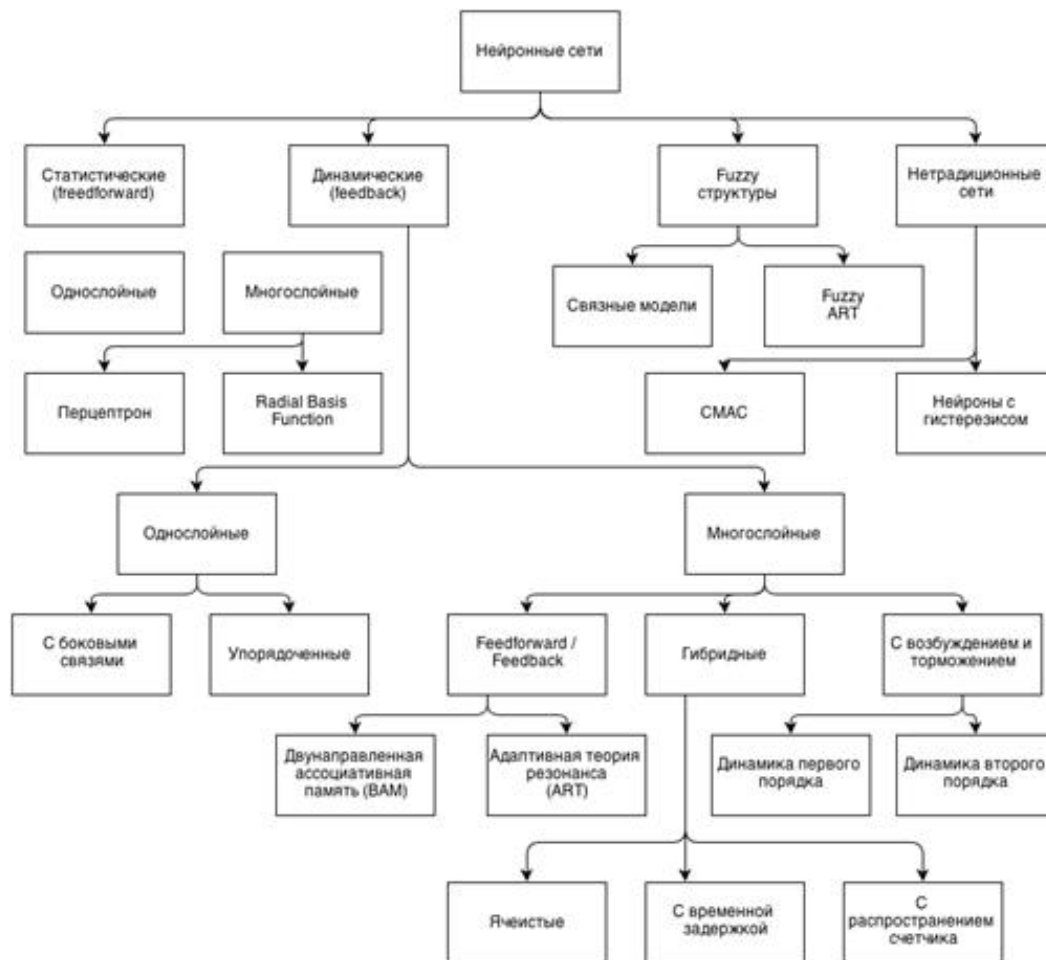


Рис. 3. Пример классификации нейронных сетей

Заключение

Таким образом, можно утверждать, что на данный момент классические методы машинного обучения для цифровых технологий охватывают широкий спектр приложений от различных потребителей. Новые задачи, возникающие практически ежедневно, приводят к появлению новых направлений машинного обучения.

Методы нейронных сетей и глубокого обучения

Идея метода нейронных сетей сформировалась в процессе изучения работы мозга живых существ. Но нужно помнить, что ИНС гораздо проще своих прототипов, биологических нейронных сетей, до конца не изученных до сих пор.

«Нейронная сеть (искусственная нейронная сеть, ИНС) – математическая модель, а также ее программное или аппаратное воплощение, построенная по принципу организации и функционирования биологических нейронных сетей – сетей нервных клеток живого организма. Она представляет собой систему соединенных и взаимодействующих между собой простых процессоров в виде искусственных нейронов, будучи соединенными в большую сеть с управляемым взаимодействием, такие по отдельности простые процессоры вместе способны выполнять довольно сложные задачи» [1].

Нейронные сети вошли в практику машинного обучения, где нужно решать задачи прогнозирования, классификации или управления. Успешность метода определяется следующими причинами:

- 1) богатые возможности нейронных сетей – этот метод моделирования позволяет воспроизводить чрезвычайно сложные зависимости;
- 2) простота в использовании – данный метод учится на примерах, предоставляемых пользователем, зависит от его знаний;
- 3) метод нейронных сетей основан на простейшей биологической модели нервных систем.

Список литературы

1. Вирт Н. Алгоритмы и структуры данных. Новая версия для Оберона + CD / пер. с англ. Ф. В. Ткачева. М. : ДМК Пресс, 2010. 272 с.
2. Ясницкий Л. Н. Искусственный интеллект. Элективный курс : учеб. пособие. М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. 197 с.
3. Люгер Д. Ф. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем : пер. с англ. 4-е изд. М. : Вильямс, 2003. 864 с.
4. Исмаилов А. Х., Буленов Б., Наурызбаева А. Н. [и др.]. Интеллектуальные программные комплексы анализа больших данных // Интеграция науки, образования и производства индустриального государства : сб. Междунар. науч.-практ. конф. Нур-Султан : Мастер По ЖШС, 2020. С. 79–81.
5. Чубукова И. А. Data Mining. Курс лекций INTUIT. 2006. 328 с. URL: <https://www.twirpx.com/file/116669/>
6. Новые возможности развития в условиях четвертой промышленной революции : послание Президента РК Н. Назарбаева народу Казахстана от 10 января 2018 г. URL: <https://www.akorda.kz/ru/addresses/>
7. Замятин А. В. Интеллектуальный анализ данных : учеб. пособие. Томск : Изд. Дом Томс. гос. ун-та, 2016. 120 с.
8. Масимов К. Следующий властелин мира. Искусственный интеллект. М. : ЛитРес, 2019. 177 с.
9. Силен Д., Мейсман А., Али М. Основы Data Science и Big Data. Python и наука о данных. СПб. : Питер, 2017. 336 с. (Сер. «Библиотека программиста»).
10. Ергалиев Д. С. Отбор информативных признаков распознавания // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2008. Т. 1. С. 290–291.
11. Коптев А. Н., Ергалиев Д. С., Саханов К. Ж. Интеллектуальные системы оценки состояния бортовых комплексов оборудования // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2008. Т. 1. С. 444–446.
12. Ергалиев Д. С. Сравнительный анализ методов распознавания образов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2011. Т. 2. С. 43–44.

References

1. Virt N. *Algoritmy i struktury dannykh. Novaya versiya dlya Oberona + CD = Algorithms and data structures. New version for Oberon + CD*; transl. from Engl. by F.V. Tkachev. Moscow: DMK Press, 2010:272. (In Russ.)
2. Yasnitskiy L.N. *Iskusstvennyy intellekt. Elektivnyy kurs: ucheb. posobie = Artificial intelligence. Elective course : study guide*. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2012:197. (In Russ.)
3. Lyuger D.F. *Iskusstvennyy intellekt: strategii i metody resheniya slozhnykh problem: per. s angl. = Artificial intelligence: strategies and methods for solving complex problems : trans. from English*. 4th ed. Moscow: Vil'yams, 2003:864. (In Russ.)
4. Ismailov A.Kh., Bulenov B., Nauryzbaeva A.N. [et al.]. Intelligent software systems for big data analysis. *Integratsiya nauki, obrazovaniya i proizvodstva industrial'nogo gosudarstva: sb. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Integration of science, education and production of an industrial state : collection of International scientific and practical conf.* Nur-Sultan: Master Po ZhShS, 2020:79–81. (In Russ.)
5. Chubukova I.A. *Data Mining. Kurs lektsiy INTUIT = Data Mining. INTUIT Lecture Course*. 2006:328. (In Russ.). Available at: <https://www.twirpx.com/file/116669/>
6. *Novye vozmozhnosti razvitiya v usloviyakh chetvertoy promyshlennoy revolyutsii: poslanie Prezidenta RK N. Nazarbaeva narodu Kazakhstana ot 10 yanvarya 2018 g. = New development opportunities in the conditions of the Fourth Industrial Revolution : Message of the President of the Republic of Kazakhstan N. Nazarbayev to the People of Kazakhstan on January 10, 2018*. (In Russ.). Available at: <https://www.akorda.kz/ru/addresses/>
7. Zamyatin A.V. *Intellektual'nyy analiz dannykh: ucheb. posobie = Data mining : a tutorial*. Tomsk: Izd. Dom Toms. gos. un-ta, 2016:120. (In Russ.)
8. Masimov K. *Sleduyushchiy vlastelin mira. Iskusstvennyy intellekt = The next ruler of the world. Artificial intelligence*. Moscow: LitRes, 2019:177. (In Russ.)
9. Silen D., Meysman A., Ali M. *Osnovy Data Science i Big Data. Python i nauka o dannykh = Fundamentals of Data Science and Big Data. Python and Data Science*. Saint Petersburg: Piter, 2017:336. (In Russ.)
10. Ergaliev D.S. Selection of informative recognition features. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International symposium Reliability and Quality*. 2008;1:290–291. (In Russ.)
11. Koptev A.N., Ergaliev D.S., Sakhanov K.Zh. Intelligent systems for assessing the condition of on-board equipment complexes. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International symposium Reliability and Quality*. 2008;1:444–446. (In Russ.)
12. Ergaliev D.S. Comparative analysis of image recognition methods. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International symposium Reliability and Quality*. 2011;2:43–44. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Амандос Дабысович Тулегулов

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

Дастан Сырымович Ергалиев

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

Бакытгуль Сагимжановна Бейсембаева

старший преподаватель
кафедры авиационной техники и технологий,
Академия гражданской авиации
(Казахстан, г. Алматы, ул. Ахметова, 44)
E-mail: tad62@yandex.kz

Каршыга Максутович Акишев

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

Amandos D. Tulegulov

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

Dastan S. Ergaliev

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

Bakytgul S. Beisembayeva

Senior lecturer of sub-department
of aviation engineering and technology,
Academy of Civil Aviation
(44 Akhmetova street, Almaty, Kazakhstan)

Karshyga M. Akishev

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

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

Поступила в редакцию/Received 27.08.2021

Поступила после рецензирования/Revised 07.09.2021

Принята к публикации/Accepted 04.10.2021

ИССЛЕДОВАНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ

В. И. Мищенко¹, А. П. Демин², В. А. Корбут³

^{1,2} Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

³ 129 военное представительство Министерства обороны Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия
¹ mishtchenko@mail.ru, ² demyon@mail.ru, ³ tubrok@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Обоснование требований к эксплуатационным характеристикам радиоэлектронных средств вооружения и военной техники неразрывно связано с анализом и исследованием факторов, воздействующих на них в ходе этой стадии жизненного цикла. При этом весьма востребованной является хотя бы примерная классификация этих факторов. Таким образом, целью данной работы является анализ и опытная классификация факторов, воздействующих на радиоэлектронные средства вооружения и военной техники в ходе эксплуатации. *Материалы и методы.* В основу представленного исследования и классификации эксплуатационных факторов положен личный опыт авторов, а также изучение опыта других авторов, которые опубликовали соответствующие работы по данной теме. *Результаты.* Представлена классификация эксплуатационных факторов, влияющих на обеспечение надежности радиоэлектронных средств вооружения и военной техники. *Выводы.* Предложенная классификация позволяет подготовить количественные значения исходных данных для разрабатываемых методик определения величин эксплуатационных характеристик радиоэлектронных средств вооружения и военной техники.

Ключевые слова: эксплуатационные факторы, надежность радиоэлектронных средств

Для цитирования: Мищенко В. И., Демин А. П., Корбут В. А. Исследование и классификация эксплуатационных факторов, влияющих на обеспечение надежности радиоэлектронных средств вооружения и военной техники // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 3. С. 32–40. doi:10.21685/2307-4205-2021-3-4

RESEARCH AND CLASSIFICATION OF OPERATIONAL FACTORS AFFECTING TO RELIABILITY OF RADIO-ELECTRONIC MEANS OF WEAPONS AND MILITARY EQUIPMENT

V.I. Mishchenko¹, A.P. Demin², V.A. Korbut³

^{1,2} Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky, St. Petersburg, Russia

³ 129 Military Representation of the Ministry of Defense of the Russian Federation, St. Petersburg, Russia
¹ mishtchenko@mail.ru, ² demyon@mail.ru, ³ tubrok@mail.ru

Abstract. *Background.* The justification of the requirements for the operational characteristics of radio-electronic means of weapons and military equipment is inextricably linked with the analysis and study of the factors affecting them during this stage of the life cycle. At the same time, at least an approximate classification of these factors is very popular. Thus, the purpose of this work is to analyze and experimentally classify the factors that affect radio-electronic means of weapons and military equipment during operation. *Materials and methods.* The presented study and classification of operational factors are based on the personal experience of the authors, as well as the experience of other authors who have published relevant works on this topic. *Results.* Classification of operational factors affecting to reliability of radio-electronic means of weapons and military equipment. *Conclusions.* Proposed classification allows to prepare quantitative values of initial data for developed methods of determining values of operational characteristics of radio-electronic means of weapons and military equipment.

Keywords: operational factors, reliability of radio-electronic means

For citation: Mishchenko V.I., Demin A.P., Korbut V.A. Research and classification of operational factors affecting to reliability of radio-electronic means of weapons and military equipment. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;(3):32–40. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-3-4

Основной стадией жизненного цикла образцов вооружения является стадия эксплуатации. На этой стадии на вооружение и технику воздействуют различные факторы, которые влияют на уровень ее надежности. Эти факторы включают две группы: объективные и субъективные. При чем, в свою очередь и те, и другие делятся на позитивные и негативные.

Объективные факторы определяются условиями эксплуатации и внешней средой. Субъективные возникают при ошибках в разработке, производстве и эксплуатации военной техники. Объективные факторы включают в себя эксплуатационные, климатические, биологические факторы, механические нагрузки (рис. 1).



Рис. 1. Объективные факторы

Уровень надежности вооружения и военной техники (ВВТ) во всех режимах эксплуатации (использование по назначению, хранение, транспортирование, обслуживание, ремонт) существенно зависит от того, на каком периоде эксплуатации они находятся. Как показывает опыт эксплуатации, эти периоды включают: начальный (или приработки), нормальной эксплуатации и износ (или старение) (рис. 2).

По статистике начальный период эксплуатации характеризуется повышенной интенсивностью отказов (рис. 2, участок I).

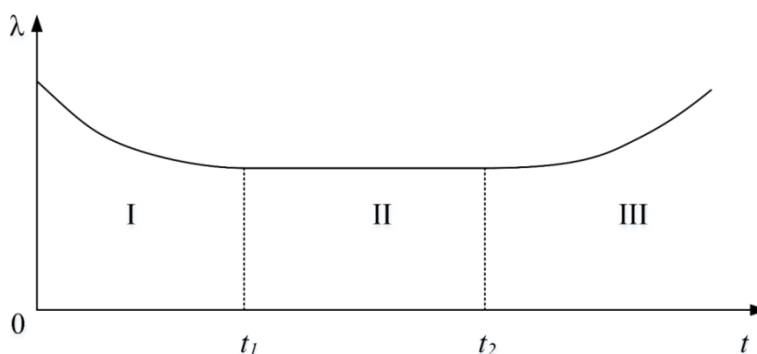


Рис. 2. Обобщенная зависимость интенсивности отказов от времени эксплуатации

Это обусловлено тем, что на этапе приработки чаще всего выявляются технологические и конструктивные отказы. Длительность этого периода для разных элементов составляет от несколь-

ких десятков до сотен часов (или от 1 до 15 % в зависимости от длительности периода нормальной эксплуатации) [1]. Например, в этот период происходит до 70 % отказов полупроводниковых приборов, микромодулей, микросхем и т.д. После продолжительного периода нормальной работы (участок II) наступает период физического старения, когда начинается постепенное увеличение интенсивности отказов (участок III). Это объясняется необратимыми процессами износа.

Старение материалов и элементов проявляется по-разному. Так, например, для полупроводниковых элементов характерны повышенные токи утечки (обратные токи) или падение напряжения во включенном состоянии, прямое падение напряжения, возникающие в основном за счет деградации контактных поверхностей внутри элемента.

Интенсивность износа прямо пропорциональна интенсивности эксплуатации ВВТ и обратно пропорциональна уровню качества профилактических работ. Для радиоэлектронных средств (РЭС) изменения электрических режимов работы оказывают существенное влияние на стабильность и долговечность их электрических характеристик и технических параметров. Все элементы РЭС характеризуются допустимыми нагрузками по мощности рассеяния, токам, напряжениям и т.п. Таким образом, работа элементов при предельно допустимых нагрузках сокращает их срок службы и не гарантирует надежной работы.

Кроме того, при эксплуатации РЭС ВВТ могут происходить недопустимые изменения электрических нагрузок или перегрузки. Причинами этого могут быть резкие перепады питающего напряжения сети, нестабильность нагрузки последующего каскада, неправильный выбор режима при проектировании и т.д. Это ведет к электрическим пробоям между элементами схемы, отказам при включении-выключении аппаратуры, ухудшению температурного режима. Поэтому каждый элемент схемы должен иметь некоторый запас прочности (избыточности), который рассчитывается по величине коэффициента нагрузки. Чем меньше этот коэффициент, тем выше уровень надежности соответствующего элемента.

Как правило, РЭС ВВТ эксплуатируются в различных температурных условиях. Чем больше скорость и частота изменения температуры, тем больше ее влияние на срок эксплуатации РЭС ВВТ и тем ниже уровень их надежности.

Отклонение температуры от нормальной приводит к изменению физических и механических свойств материалов, из которых изготовлены элементы систем. Эти изменения вызывают отклонения параметров элементов от нормальных значений и технических характеристик аппаратуры в целом. Например, при пониженной температуре:

- в полупроводниковых элементах повышается конденсация влаги, происходит растрескивание кристаллов, изменение электрических характеристик, что в свою очередь приводит к пробоям переходов, ухудшению электрических характеристик, потере герметичности, обрывам и короткому замыканию;

- сложные и волокнистые фенопластики, пластмассы на основе эфиров целлюлозы снижают свою прочность на удар, но увеличивается на 13 % их прочность на разрыв, изгиб и сжатие;

- смазки становятся густыми;

- снижается качество паек радиодеталей вследствие того, что входящее в состав припоя белое олово при температуре ниже минус 13 °С превращается в быстроразрушающееся серое.

При повышенной температуре:

- для полупроводниковых элементов характерно образование областей проплавления, происходит нарушение полупроводниковых переходов или полное разрушение полупроводникового элемента;

- изменяются основные электрические характеристики электроизолирующих материалов (диэлектрическая проницаемость, величина пробивного напряжения, приложенного к диэлектрику и т.д.);

- снижается износостойчивость изоляции (при повышении температуры изоляции из органического диэлектрика на 10–12 °С вдвое увеличивается степень теплового износа изоляции);

- увеличивается сопротивление металлов, изменяется величина магнитного потока магнита, изменяются размеры деталей, уменьшаются их прочность и упругость;

- ухудшается качество пропиточных материалов и влагонепроницаемых покрытий.

Влажность воздуха и атмосферные осадки в значительной степени влияют на срок эксплуатации РЭС ВВТ. Главным образом это сказывается на ускоренном разрушении защитных покрытий, ухудшении свойств диэлектриков, изменении свойств металлов. При повышенной влажности (более 65 %):

- ускоряется коррозия металлов и сплавов (при относительной влажности воздуха более 80 % срок службы деталей из алюминиевых сплавов снижается вдвое);
- снижаются электроизоляционные свойства некоторых пластмасс;
- нарушается герметизация;
- увеличиваются потери в контурных катушках дросселей и трансформаторов;
- увеличивается действительное значение сопротивления резисторов.

Пониженная влажность (менее 30 %) способствует усыханию изоляционных материалов (лент, пленок) и ухудшению их механических свойств.

Эффект воздействия влаги может увеличиваться за счет дефектов поверхности элементов.

Атмосферные осадки способствуют возрастанию влажности со всеми вытекающими отсюда последствиями.

Отклонения атмосферного давления от нормального на поверхности Земли нечасты и незначительны. Но РЭС ВВТ широко используются в различных условиях, в том числе и в горных районах на высотах свыше 1000 м. Известно, что с подъемом на высоту первые 1000 м давление убывает на 1 мм рт.ст. каждые 100 м. При дальнейшем увеличении высоты давление убывает в геометрической прогрессии.

Снижение давления влияет на срок службы непосредственно и косвенно. Непосредственное влияние выражается в изменении параметров комплектующих элементов. К примеру, изменяется емкость воздушных конденсаторов, вследствие чего изменяются выходные параметры аппаратуры в целом, уменьшается пробивное напряжение в изоляторах, волноводах, между проводниками и т.п.

На высотах свыше 2000 м могут появляться тихие и скользящие искровые разряды в негерметизированных высоковольтных выпрямителях, антенно-фидерных устройствах и т.п. На больших высотах имеется опасность возникновения газовых пробоев, образующихся вследствие плазменного состояния атмосферы от воздействия ионизации и высокочастотного поля. Это приводит к изменению диаграммы направленности антенны, уменьшению излучаемой мощности, искажениям формы импульсов передатчиков.

Косвенное воздействие состоит, прежде всего, в невозможности обеспечения хорошего воздушного охлаждения из-за недостаточной плотности воздуха. Это приводит к повышению температуры в блоках, системах.

Воздействие солнечной радиации на РЭС ВВТ определяется видимым светом, ультрафиолетовыми и инфракрасными волнами. Наибольшее действие видимого света проявляется в химическом разложении некоторых видов органических пластмасс, красителей, каучука, тканей.

Влияние ультрафиолетового излучения сводится в основном к количественным изменениям большинства органических материалов (каучук, пластики и т.д.), частичному разложению полимеров. Ультрафиолетовое излучение является катализатором реакции окисления полиэтилена, полистирола и других полярных диэлектриков.

Инфракрасное излучение вызывает увеличение температуры материалов со всеми вытекающими отсюда последствиями.

На надежность РЭС ВВТ заметное влияние оказывает загрязнение воздуха механическими и химическими примесями. Находящаяся в атмосфере пыль легко проникает в негерметизированную аппаратуру, снижая поверхностное сопротивление, ускоряя износ движущихся частей, контактов. Особенно сильно пыль ухудшает характеристики аппаратуры, выполненной на печатном монтаже, не защищенном специальным покрытием, так как она образует токопроводящие перемычки между проводниками. Увлажнение пыли усиливает ее воздействие.

Кроме пыли, в атмосфере находятся сильнодействующие химические примеси. Так, сернистый газ содержится в выхлопных газах машин, окислы азота и хлор – в выбросах предприятий. Эти вещества увеличивают коррозию металлов, ускоряют процесс старения пластмасс и органических диэлектриков.

Влияние биологической среды на РЭС ВВТ заключается в поражении ее плесенью, насекомыми и грызунами. Под действием плесени наиболее сильному разрушению подвергаются:

- деревянные изделия;
- изделия из натуральных волокнистых материалов (текстиль, хлопок, пряжа, шерсть и т.п.);
- лакокрасочные покрытия (за счет выделения уксусной, лимонной и других кислот);
- стеклянные призмы и линзы (помутнение поверхности, появление пятен и др.);
- изделия из кожи и каучука.

Появление плесени снижает сопротивление изоляции, нарушает контакты, приводит к замыканию, пробоям изоляции.

Немалый вред наносят и насекомые (моль, термиты, красные муравьи, некоторые типы жуков). Например, термиты съедают древесину, некоторые пластмассы, кожу, повреждают изоляцию. Выделения на токонесущих проводах вызывают утечку тока и замыкания.

Значительные повреждения наносят аппаратуре грызуны. В основном они повреждают кабели, изоляцию электропроводки, некоторые виды пластмасс, кожу, резину.

По некоторым данным число отказов при воздействии биологической среды составляет не более 0,5 % от общего числа отказов.

Существенное влияние на эксплуатацию РЭС ВВТ оказывают механические воздействия, к которым следует отнести удары, вибрации, ускорения, рабочие усилия, звуковые давления. Вибрации могут появиться из-за выхлопа газа в двигателях внутреннего сгорания, в результате работы двигателя самолета или ракеты. Воздействие вибрации приводит к преждевременному изнашиванию РЭС ВВТ, появлению в ней усталостных явлений, к частичному разрушению.

При ударах возможны случаи, когда возникающие нагрузки превысят допустимые безопасные уровни, что может привести к отказу. Ударные нагрузки возникают также при транспортировании различными видами транспорта.

На РЭС ВВТ, расположенные вблизи работающих силовых двигательных установок, воздействует энергия колебаний звуковой частоты. Это приводит к возникновению звукового давления. Действие давления на аппаратуру аналогично действию вибрации. Особенностью является то, что величина звукового давления зависит не только от его уровня, но и от площади изделия, на которое оно воздействует.

Позитивным фактором, существенно сказывающимся на надежности, является уровень избыточности систем. Это понятие характеризует свойство сложных систем, позволяющее им изменять свои характеристики или параметры для обеспечения их функционирования.

Согласно работе [2] под избыточностью понимается создание некоторых запасов в значении различных характеристик аппаратуры по сравнению с их значениями, минимально необходимыми для выполнения заданных функций. Это позволяет аппаратуре работать без отказов в условиях значительных воздействий внешних дестабилизирующих факторов естественного и искусственного происхождения.

Различают избыточности различного рода: структурную, параметрическую, функциональную, режимную, временную и т.п. Среди многочисленных видов избыточности на надежность аппаратуры влияют только некоторые – структурная, параметрическая и режимная.

Введение структурной избыточности сводится к использованию в РЭС избыточных (резервных) элементов, которые необходимы для работы только при отказе основных элементов аппаратуры. Структурная избыточность является эффективной лишь в том случае, если отказы элементов являются статистически независимыми.

Наличие параметрической избыточности проявляется практически в том, что наряду с допусками, характеризующими отказ элемента РЭС, устанавливаются эксплуатационные (профилактические по своей сути) допуски. Превышение в процессе эксплуатации допуска еще не приводит к отказу, но свидетельствует о наступлении предотказового состояния и классифицируется как неисправность, которая должна быть устранена путем проведения профилактических работ: регулировки, предупредительной замены и т.п.

Режимная избыточность заключается в использовании элементов аппаратуры при уровнях напряжения (тока, рассеиваемой мощности и т.п.), меньших номинальных, благодаря чему воздействие внешних и внутренних неблагоприятных факторов не вызывает недопустимых по условиям эксплуатации ухудшений режимов работы элементов.

Избыточность противоречиво влияет на надежность сложной технической системы [3]. Противоречие заключается в том, что с введением избыточности при разработке уменьшается надежность, но с другой стороны, благодаря этому система может находиться более долгое время в работоспособном состоянии при воздействии на нее различного рода факторов. Другими словами, введение избыточности объективно уменьшает, а субъективно увеличивает уровень надежности РЭС ВВТ.

Внедрение последних достижений науки и техники предполагает применение экстенсивного и интенсивного направлений их использования.

Повышение уровня безотказности по экстенсивному направлению осуществляется с помощью резервирования. К этому пути прибегают в тех случаях, когда отдельный элемент, подсистема или

полностью РЭС, подвергаемая резервированию, имеет важное значение для обеспечения жизнедеятельности людей или при его применении по назначению.

Безусловно, использование экстенсивного направления повышения надежности предполагает размеры финансирования, кратные числу резерва или дуближа.

Резервирование и дублирование обеспечивают повышение только безотказности РЭС.

Экстенсивное улучшение ремонтпригодности обеспечивается совершенствованием аппаратуры контроля и диагностирования, а именно, автоматизацией процесса контроля. При этом проверяется большее число параметров и выявляется большее число отказавших узлов. Кроме того, ремонтпригодность повышается за счет увеличения номенклатуры и состава запасных частей, инструментов и принадлежностей (ЗИП).

Увеличить долговечность РЭС позволяет разработка или использование материалов, обладающих этими свойствами, несмотря на их большую стоимость. Так, например, использование вместо стали и сплавов алюминия и титана, существенно увеличит долговечность и сохраняемость РЭС, но сколько будет стоить такая система?

Интенсивное направление повышения надежности предполагает совершенствование элементной базы, конструкции и схемотехнического решения как элементов на каждом уровне, так и всего РЭС в целом [4]. При этом разработчики РЭС безусловно ориентируются на внедрение тех физических принципов и способов действия, которые снижают или исключают влияние негативных факторов. В этом плане немаловажный интерес представляют:

- для повышения безотказности – разработка рекомендаций и проведение мероприятий, направленных на улучшение качества технологии изготовления комплектующих элементов; разработка и внедрение схемотехнических решений, реализующих новые принципы объединения элементов [5];

- для повышения ремонтпригодности – внедрение схемотехнических решений, сокращающих время замены отказавших РЭС; разработка и применение в составе РЭС более совершенных диагностических средств;

- для увеличения долговечности – использование новых материалов, как для комплектующих элементов, так и для конструкции всего РЭС; обоснование и внедрение новых схемотехнических решений, увеличивающих допустимый динамический диапазон внешних воздействий (т.е. введение избыточности) и тем самым снижающих зависимость РЭС от условий их эксплуатации.

Позитивным фактором, приведенным на рис. 1, является величина затрат. Именно эта характеристика комплексно учитывает влияние не только самих факторов, но и их взаимодействие [6].

Субъективные факторы влияния на надежность вооружения возникают при разработке, производстве и эксплуатации вооружения (рис. 3).

Разделение субъективных факторов на позитивные и негативные весьма условно. Как правило, они являются комплексными. Эта комплексность заключается в том, что, если эти факторы обеспечивают тактико-технические характеристики ВВТ, заданные в тактико-техническом задании на их разработку, они являются позитивными. В противном случае они становятся негативными.

Так, в работе [7] показано, что при разработке аппаратуры допускается наибольшее количество ошибок, приводящих к отказам (до 40 %). При этом основная доля причин отказов приходится на неправильную разработку схем (до 30 %). Кроме того, определенную роль играет и неправильный выбор элементов схем, режимов их работы и т.п. В то же время в 70 % случаев подтверждается позитивность указанных факторов.

Включение в схему новых элементов всегда связано с риском снижения надежности устройства в целом. Основная масса всех ошибок выявляется обычно только с приобретением опыта эксплуатации образца. Поэтому так велика доля отказов в начальный период эксплуатации.

Причинами возникновения производственных отказов являются, в первую очередь, несоблюдение технологии производства, низкий уровень автоматизации сборки изделий и т.д. Например, при монтажных ошибках возникает порядка 14–24 % всех отказов [8].

Основные причины возникновения эксплуатационных ошибок заключаются в низкой квалификации личного состава (операторов), в несоблюдении правил эксплуатации РЭС ВВТ, в низкой степени организации технического обслуживания и ремонта (ТО и Р).

Как видно из рис. 3, одним из комплексных факторов является квалификация личного состава, эксплуатирующего РЭС ВВТ. Незнание устройства и назначения вооружения, неумение поддерживать его в исправном состоянии, устранять отказы, проводить регламентные работы приводит к резкому снижению уровня его надежности и, соответственно, срока эксплуатации. Например, при слабо подготовленном обслуживающем персонале количество отказов в первые сутки после проведения технического обслуживания в 8–10 раз превышает число отказов за сутки до его прове-

дения. Особо остро этот вопрос встал в последнее время, когда на вооружение стали поступать комплексы с использованием микроэлектронной технологии, которая в значительной степени чувствительна к ошибкам обслуживающего персонала. В то же время опыт показывает, что отказы, связанные со старением микросхем, не наблюдаются, так как этот период наступает у них после нескольких десятков тысяч часов работы.

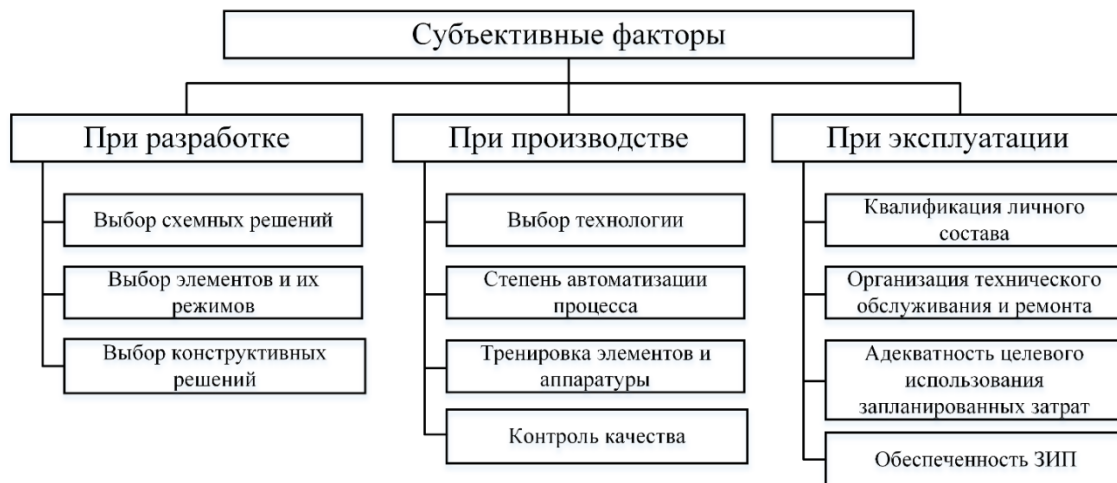


Рис. 3. Субъективные факторы

Существенным и комплексным фактором, влияющим на эффективность эксплуатации, является адекватность целевого использования запланированных затрат. Этот фактор оказывает свое влияние через оптимизацию комплектов ЗИП, обоснованность периодичности и объемов ТО и Р, выбор элементной базы, конструктивных и схемных решений, обеспечивающих требуемую готовность ВВТ к применению и качественное выполнение функциональных задач в соответствии с целевым предназначением.

В подавляющем большинстве работ, посвященных оптимизации периодичности обслуживания, расчету числа запасных элементов, методам и методикам технической диагностики ВВТ обязательно приводятся методики расчета стоимостных показателей, обеспечивающих то или иное мероприятие [9].

В настоящее время в РЭС ВВТ существуют два вида организации обеспечения ЗИП [10]. К первому виду относится следующая организация. После установления факта отказа элемента производится его локализация (техническое диагностирование). Затем в одиночном комплекте ЗИП, находящемся при объекте, отыскивается работоспособный (новый) элемент взамен отказавшего. Причем одиночный комплект ЗИП представляет собой совокупность типовых и, как правило, невосстанавливаемых элементов замены (ТЭЗ). В случае отсутствия ТЭЗа в одиночном комплекте ЗИП оформляется заявка на доставку необходимого элемента из состава группового комплекта ЗИП, предназначенного для обеспечения нескольких (группы) объектов. Вышеназванная ситуация соответствует отказу системы «изделие – одиночный комплект ЗИП». Если этот элемент отсутствует и в групповом комплекте ЗИП (отказ системы «изделие – одиночный комплект ЗИП – групповой комплект ЗИП»), оформляется заявка на экстренную поставку требуемого элемента либо из регионального склада, либо из предприятия-изготовителя и т.п. При поступлении нового элемента производится замена отказавшего и затем проводится проверка, подтверждающая отсутствие отказа. При этом отказавший элемент, если он восстанавливаемый, отправляется в ремонтный орган, имеющий свой (ремонтный) комплект ЗИП. После восстановления этим элементом пополняется комплект ЗИП, в котором был тот израсходован. Если элемент невосстанавливаемый, он утилизируется в установленном порядке, и по окончании установленного периода эксплуатации (обычно года) оформляется заявка на пополнение соответствующего комплекта ЗИП из вышестоящего соответствующего органа (регионального склада, предприятия-изготовителя и т.п.). Возможен также вариант, когда отказавший восстанавливаемый элемент отправляется в ремонтный орган, а объект простаивает в неработоспособном состоянии до возврата отремонтированного элемента и установки его на штатное место (такой вариант восстановления характерен для образцов РЭС на элементной базе первого поколения).

При организации обеспечения ЗИП по второму виду используется концепция «агрегатного» ремонта. При этом одиночный комплект ЗИП представляет собой уже не комплект ТЭЗов, а агрегат типа узел или блок, состоящий в свою очередь из панелей, субблоков и т.п. Устранение отказов в объекте контроля производится просто заменой отказавшего агрегата из одиночного комплекта ЗИП. Правда этот одиночный комплект ЗИП располагается в ремонтно-диагностической лаборатории ремонтно-производственной базы объекта. Но работоспособность современных РЭС ввиду их сложности и многофункциональности старыми методами, особенно при работе в автономном режиме, восстановить не представляется возможным. Отказавший агрегат отправляется в ремонтный орган, где имеется соответствующая оснастка и ремонтный комплект ЗИП. Отказавший агрегат диагностируется, восстанавливается, проверяется и настраивается, а затем пополняет тот же одиночный комплект, откуда был прислан [11]. Ремонтный ЗИП пополняется по ежегодным заявкам.

Параметры организации ТО и Р также являются комплексным фактором. Требуемая степень адекватности организации ТО и Р обеспечит наибольший уровень реализации боевых возможностей ВВТ.

Заключение

Сформированная классификация включает полный комплекс эксплуатационных факторов, которые необходимо учесть при расчете надежности в процессе моделирования при разработке новых радиоэлектронных средств вооружения и военной техники, а также при выполнении работ по поддержанию стоящих на вооружении средств в готовности к применению по назначению.

Список литературы

1. Лысенко А. В., Таньков Г. В., Калашников В. С. [и др.]. Алгоритм реализации адаптивной системы вибрационных испытаний бортовой радиоэлектронной аппаратуры // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 2. С. 60–69.
2. Сычев Е. И. Метрологическое обеспечение радиоэлектронной аппаратуры : монография. М. : Татьянин день, 1993. 277 с.
3. Мищенко В. И., Кравцов А. Н. Модель процесса эксплуатации дублируемой сложной радиоэлектронной системы при безошибочном контроле ее технического состояния // Вестник метролога. 2021. № 1. С. 21–26.
4. Ивановский В. С., Гусеница Я. Н., Ширямов О. А. Теоретические основы военной метрологии : монография. Анапа : ВИТ «ЭРА», 2021. 137 с.
5. Малахов А. В., Масалкин А. А., Швед А. С. Комплексная модель планирования применения сложных военно-технических систем // Инновационная деятельность в Вооруженных силах Российской Федерации : тр. всероссийской науч.-практ. конф. СПб., 2015. С. 292–298.
6. Гусеница Я. Н., Малахов А. В., Шерстобитов С. А., Ширямов О. А. Метод функционально-стоимостного анализа эксплуатации средств измерений, испытания и контроля // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2017. № 1. С. 67–72.
7. Ванцов С. В., Халявина А. А. Анализ методологий контроля и диагностирования сложных электронных устройств // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 3. С. 115–123.
8. Канащенков А. И., Новиков С. В. Основные методологические принципы проектирования радиолокационных систем летательных аппаратов нового поколения // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 3. С. 71–84.
9. Смагин В. А., Ширямов О. А. Способ оптимизации стоимостных затрат при построении измерительной системы // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях : тр. III межвуз. науч.-практ. конф. СПб., 2018. С. 195–199.
10. Мищенко В. И., Храмов М. Ю. Проблематика эксплуатации сложных технических систем: монография. СПб. : Политехника-сервис, 2016. 149 с.
11. Смагин В. А., Новиков А. Н. Модель готовности восстанавливаемой технической системы с учетом достоверности контроля состояния ее элементов при произвольных распределениях времени до их отказа и восстановления // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. 2016. Вып. 652. С. 198–203.

References

1. Lysenko A.V., Tan'kov G.V., Kalashnikov V.S. [et al.]. Algorithm for implementing an adaptive vibration testing system for on-board electronic equipment. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2019;(2):60–69. (In Russ.)
2. Sychev E.I. *Metrologicheskoe obespechenie radioelektronnoy apparatury: monografiya = Metrological support of electronic equipment : monograph*. Moscow: Tat'yanin den', 1993:277. (In Russ.)
3. Mishchenko V.I., Kravtsov A.N. Model of the operation process of a duplicated complex electronic system with error-free control of its technical condition. *Vestnik metrologa = Bulletin of the metrologist*. 2021;(1):21–26. (In Russ.)

4. Ivanovskiy V.S., Gusenitsa Ya.N., Shiryamov O.A. *Teoreticheskie osnovy voennoy metrologii: monografiya = Theoretical foundations of military metrology : monography*. Anapa: VIT «ERA», 2021:137. (In Russ.)
5. Malakhov A.V., Masalkin A.A., Shved A.S. Complex model of planning the application of complex military-technical systems. *Innovatsionnaya deyatelnost' v Vooruzhennykh silakh Rossiyskoy Federatsii: tr. vsearmeyskoy nauch.-prakt. konf. = Innovative activity in the Armed Forces of the Russian Federation : proceedings of the All-Army Scientific and Practical Conference*. Saint Petersburg, 2015:292–298. (In Russ.)
6. Gusenitsa Ya.N., Malakhov A.V., Sherstobitov S.A., Shiryamov O.A. Method of functional and cost analysis of the operation of measuring instruments, testing and control. *Izvestiya Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh nauk = Proceedings of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences*. 2017;(1):67–72. (In Russ.)
7. Vantsov S.V., Khalyavina A.A. Analysis of methodologies for monitoring and diagnosing complex electronic devices. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2018;(3):115–123. (In Russ.)
8. Kanashchenkov A.I., Novikov S.V. Basic methodological principles of designing radar systems of new generation aircraft. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2018;(3):71–84. (In Russ.)
9. Smagin V.A., Shiryamov O.A. The method of cost optimization in the construction of a measuring system. *Problemy tekhnicheskogo obespecheniya voysk v sovremennykh usloviyakh: tr. III mezhvuz. nauch.-prakt. konf. = Problems of technical support of troops in modern conditions : proceedings of the III inter-university scientific and practical conf*. Saint Petersburg, 2018:195–199. (In Russ.)
10. Mishchenko V.I., Khramov M.Yu. *Problematika ekspluatatsii slozhnykh tekhnicheskikh sistem: monografiya = Problems of operation of complex technical systems: monograph*. Saint Petersburg: Politehnika-servis, 2016:149. (In Russ.)
11. Smagin V.A., Novikov A.N. The model of readiness of the restored technical system taking into account the reliability of monitoring the state of its elements at arbitrary time distributions before their failure and recovery. *Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii imeni A.F. Mozhayskogo = Proceedings of the Military Space Academy named after A. F. Mozhaysky*. 2016;(652):198–203. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Ильич Мищенко

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

Алексей Павлович Демин

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

Валентин Анатольевич Корбут

начальник 129 военного представительства
 Министерства обороны Российской Федерации
 (Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ордзоникидзе, 42)
 E-mail: tubrok@mail.ru

Vladimir I. Mishchenko

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

Aleksey P. Demin

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

Valentin A. Korbut

Head of the 129 Military Representation
 of the Ministry of Defense of the Russian Federation
 (42 Ordzhonikidze street, St. Petersburg, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 08.02.2021

Поступила после рецензирования/Revised 30.09.2021

Принята к публикации/Accepted 04.10.2021

ХАРАКТЕРИСТИКА СЛУЧАЙНОГО ПРОЦЕССА В ЗАДАЧАХ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЭНТРОПИЙНОГО АНАЛИЗА СИСТЕМ

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

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

² Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

³ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
¹ avp57avp@yandex.ru, ² tau797@mail.ru, ³ yurkov_NK@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Настоящее время характеризуется интенсивным развитием средств информатизации общества, повсеместным внедрением цифровых систем и компьютерных технологий с поддержкой принятия управленческих решений. В этих основных направлениях разработка множества информационных моделей и программных средств связаны с исследованием, моделированием различных систем при учете случайных возмущений. Учет случайных факторов сегодня необходим и распространяется на многоуровневые, многосвязные и иерархические системы. *Материалы и методы.* В статье приводится подход к обучению информационному моделированию случайного процесса и один из аспектов в прикладных задачах выработки новых знаний (тезауруса), прежде всего, для многофункциональных информационно-измерительных управляющих систем и многоканальных систем позиционирования объектов. *Результаты и выводы.* Приведенные положения могут быть полезны в обучении студентов естественнонаучного и математического профиля основным положениям в теории вероятностей, для проектирования и построения информационно-аналитических систем информационного моделирования.

Ключевые слова: геоинформационная система, винеровский процесс, плотность вероятности, марковский процесс, информационная энтропия

Для цитирования: Полтавский А. В., Тюгашев А. А., Юрков Н. К. Характеристика случайного процесса в задачах компьютерного моделирования и энтропийного анализа систем // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 3. С. 41–47. doi:10.21685/2307-4205-2021-3-5

CHARACTERISTICS OF A RANDOM PROCESS IN PROBLEMS OF COMPUTER MODELING AND ENTROPY ANALYSIS OF SYSTEMS

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

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

² Samara State Technical University, Samara, Russia

³ Penza State University, Penza, Russia

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

Abstract. *Background.* The present time is characterized by the intensive development of the means of informatization of society, the widespread introduction of digital systems and computer technologies with support for managerial decision-making. In these main directions, the development of a variety of information models and software tools is associated with the study, modeling of various systems taking into account random disturbances. Accounting for random factors is necessary today and extends to multi-level, multi-connected and hierarchical systems. *Materials and methods.* The article presents an approach to teaching information modeling of a random process and one of the aspects in applied problems of developing new knowledge (thesaurus), primarily for multifunctional information and measurement control systems (IIUS) and multi-channel object positioning systems. *Results and conclusions.* The given provisions can be useful in teaching students of the natural science and mathematical profile the basic provisions in probability theory, for the design and construction of information and analytical systems (IAS) of information modeling.

Keywords: geoinformation system, Wiener process, probability density, Markov process, information entropy

For citation: Poltavskiy A.V., Tyugashev A.A., Yurkov N. K. Characteristics of a random process in problems of computer modeling and entropy analysis of systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;(3):41–47. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-3-5

Введение

Система образования в мире опирается, прежде всего, на знания и технологии, в том числе информационные. В России она также связана с определенными этапами своего развития и ведет свое начало еще от времен Петра I. В те времена стали появляться первые обоснования к описанию многих процессов в прикладных задачах с позиций теории вероятностей. Так, в 1821 г. профессор Харьковского университета А. Ф. Павловский в своем научном докладе вводит свое понятие к термину и слову «вероятность» [1]: «как отношение между числом первых случаев и числом всех возможных есть мера возможности». Немного позже в Харьковском университете исчисление по теории вероятностей начал читать профессор Е. И. фон Бейер, который был учеником М. В. Остроградского. Сам же М. В. Остроградский читал (1858 и 1859 гг.) лекции по теории вероятностей слушателям-артиллеристам. Также в начале 1843 г. в учебные программы для академии Генерального штаба России введен новый теоретический курс «Приложение теории вероятностей к вычислению астрономических наблюдений», который читал профессор А. Н. Савич, а в Московском государственном университете основные положения по теории вероятностей были изложены (в конце 1843 г.) профессором Н. Е. Зерновым. Вероятностные курсы в университете своими корнями уходят к деятельности заведующего кафедрой Андрея Николаевича Колмогорова. Многие годы студентам университета им читался курс теории вероятностей и основ математической статистики. Далее этот курс был расширен и дополнен еще одним вводным модулем в теорию случайных процессов, который назывался «Теория вероятностей, математическая статистика и введение в теорию случайных процессов». Немного позже, под руководством нашего отечественного ученого Б. В. Гнеденко, теоретический курс уточняется и уже содержит три основных блока: «Теория вероятностей», «Математическая статистика» и «Теория случайных процессов». Далее подобные курсы получили свое развитие в других научных и образовательных организациях, но именно эти этапы составляют базовую платформу «стохастических» и «вероятностных» подходов к оценкам многих процессов в деятельности человека. На основе решения этих задач анализа систем, прежде всего, сложных процессов, явлений и накопленного опыта мы можем в итоге определить основные направления дальнейшего развития данной теории и строить эффективные методики профессиональной подготовки обучающихся, при разработке содержательных основ для обучения информационному моделированию случайных процессов, а также «видеть» и понимать их значимость, практическую направленность в современных «вероятностных» условиях [1–5]. Разработка и исследование моделей реальных объектов (процессов и явлений) является одним из основных методов научного познания окружающего нас действительного мира. Например, задача обучения студентов информационному моделированию с учетом этих процессов, явлений и анализа систем может быть решена лишь в том случае, когда научно обоснованные информационные модели объектов займут свое соответствующее место непосредственно в самом содержании обучения и будут изучаться явно, с использованием соответствующей терминологии, с разъяснением сущности понятий информационной модели и информационного моделирования, прежде всего, как процесса. Покажем один из подходов и некоторые примеры выкладок для него.

Построение информационной модели случайного процесса

Известно [1, 2], что в теории случайных процессов важное место занимают, прежде всего, марковские случайные процессы, которые наиболее часто применяются в компьютерном (имитационном) моделировании систем. В настоящее время в практике научных исследований и информационного моделирования объектов, например в робототехнике, транспорте, «беспилотниках» для геоинформационных систем и другое, без учета случайной составляющей процесса уже обойтись нельзя. Особенно это обстоятельство следует учитывать в практике принимаемых зашумленных сигналов от глобальных информационных систем в целях позиционирования, контроля и управления различными объектами. Основные положения из теории для марковского случайного процесса обобщаются и на совокупность наблюдаемых сигналов $Y_1(t), \dots, Y_n(t)$ с приемников для современных навигационных глобальных спутниковых систем Глонасс/GPS в задачах определения передачи сообщений и координат местоположения объекта, которые рассматриваем как компоненты n -мерного векторного процесса $Y(t)$. Сам случайный векторный процесс таких сигналов с приемников навигационных спутников Глонасс/GPS $Y(t)$ условно здесь принимается таким, чтобы при непрерывном изменении аргумента t за любой малый промежуток времени Δt , а компоненты $Y_i(t)$

изменялись на величину порядка $\sqrt{\Delta t}$ и все траектории были непрерывны с вероятностью единица в обычном смысле для понятия о непрерывности самой функций. Покажем это. Считаем, что большие изменения компонент для рассматриваемого случайного процесса маловероятны, а конечные скачки имеют нулевую вероятность, а также в некоторые последовательные моменты времени $t_1 < t_2 < \dots < t_m$, взятые в некотором интервале для существования рассматриваемого процесса, будут известны значения в виде [1–3]

$$Y_1(t_1), \dots, Y_n(t_1); \dots; Y_1(t_m), \dots, Y_n(t_m).$$

Рассмотрим совокупность значений многомерного случайного процесса в моменты времени t_{h-1}, t_h при $t_{h-1} < t_h$: $Y_1(t_{h-1}), \dots, Y_n(t_{h-1}); Y_1(t_h), \dots, Y_n(t_h)$. Из теории вероятностей нам уже известно [1], что многомерный случайный процесс является марковским, если закон распределения системы случайных величин $Y_1(t_h), \dots, Y_n(t_h)$, вычисленный при условии, что известны значения $t = t_{h-1} Y_1(t_{h-1}), \dots, Y_n(t_{h-1})$, и не зависит от того, какие значения сами случайные функции $Y_1(t), \dots, Y_n(t)$ принимали их в моменты времени, предшествовавшие моменту времени для t_{h-1} . Сформулированное выше положение выражается формулой, которая принимает вполне определенный вид записи для скалярного аргумента [1–5]

$$\begin{aligned} f(y_1(t_h), \dots, y_n(t_h) | y_1(t_1), \dots, y_n(t_1); \dots; y_1(t_{h-1}), \dots, y_n(t_{h-1})) &\equiv \\ &\equiv f(y_1(t_h), \dots, y_n(t_h) | y_1(t_{h-1}), \dots, y_n(t_{h-1})). \end{aligned} \quad (1)$$

Вышеприведенную формулу представим для векторного аргумента в принятой форме

$$f(y(t_h) | y(t_1), \dots, y(t_{h-1})) = f(y(t_h) | y(t_{h-1})).$$

Из теории вероятностей также следует, что исчерпывающей характеристикой для многомерного (как векторного) случайного марковского процесса, подобно тому, как это имеет место и для одномерного процесса, является вторая функция к плотности вероятности, т.е.

$$f_2(y(t_1), y(t_2)) = f_2(y_1(t_1), \dots, y_n(t_1); y_1(t_2), \dots, y_n(t_2)), \quad (2)$$

первая функция плотности вероятности $f_1(y(t_1))$, а также и функция вероятности перехода $f(y(t_2) | y(t_1))$ определяются выражениями для общепринятого их вида

$$\begin{aligned} f_1(y(t_1)) &= f_1(y_1(t_1), \dots, y_n(t_1)), \\ f(y(t_2) | y(t_1)) &= f(y_1(t_2), \dots, y_n(t_2) | y_1(t_1), \dots, y_n(t_1)). \end{aligned} \quad (3)$$

Функции $f_1(y(t_1))$ и $f(y(t_2) | y(t_1))$ выражаются через $f_2(y(t_1), y(t_2))$ в следующем виде:

$$\begin{aligned} f_1(y(t_1)) &= \int_{-\infty}^{\infty} f_2(y(t_1), y^*(t_2)) dy^*, \\ f(y(t_2) | y(t_1)) &= \frac{f_2(y(t_2), y(t_1))}{f_1(y(t_1))}. \end{aligned} \quad (4)$$

Условная функция плотности вероятности $f(y(t_2) | y(t_1))$ в многомерном процессе неотрицательна и нормирована к единице, как и для одномерного, и обращается в дельта-функцию при совпадении моментов во времени, т.е. $t_1 = t_2 = t$:

$$f(y^*(t) | y(t)) = \delta(y^* - y) = \delta(y_1^* - y_1) \dots \delta(y_n^* - y_n). \quad (5)$$

Плотность вероятности перехода $f(y(t_2) | y(t_1))$ для многомерного марковского случайного процесса удовлетворяет интегральному уравнению Смолуховского – Колмогорова – Чепмена при наблюдении сообщения в моделируемом диапазоне времени $t_1 < t' < t_2$:

$$f(y(t_2) | y(t_1)) = \int_{-\infty}^{\infty} f(y(t_2) | y'(t')) f(y'(t') | y(t_1)) dy'. \quad (6)$$

Уравнение (6) получается путем простого обобщения на многомерный векторный процесс для уравнения Маркова и на основании общепринятого соотношения [1, 2, 6]

$$f_h(y(t_1), \dots, y(t_h)) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{h+1}(y(t_1), \dots, y(t_h), y'(t')) dy'.$$

Применив эту формулу непосредственно для $h = 2$ и полагая, что процесс $t_1 < t' < t_2$:

$$f_2(y(t_1), y(t_2)) = \int_{-\infty}^{\infty} f_3(y(t_1), y'(t'), y(t_2)) dy', \quad (7)$$

и подставляя в эту формулу выражения для плотностей вероятности случайного процесса

$$\begin{aligned} f_2(y(t_1), y(t_2)) &= f_1(y(t_1))f(y(t_2)|y(t_1)), \\ f_3(y(t_1), y'(t'), y(t_2)) &= f_1(y(t_1))f(y(t_2)|y'(t'))f(y'(t')|y(t_1)), \end{aligned} \quad (8)$$

получим

$$f_1(y(t_1))f(y(t_2)|y(t_1)) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(y(t_1))f(y(t_2)|y'(t'))f(y'(t')|y(t_1)) dy'. \quad (9)$$

Для многомерного марковского непрерывного процесса вводятся соответствующие две характеристические функции. Функции при n -мерном случайном марковском процессе $Y(t)$ для векторного аргумента $\lambda(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$ записываются в следующем общепринятом виде:

$$\begin{aligned} g_1(\lambda, t) &= \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\lambda^T y} f_1(y, t) dy, \\ g(\lambda, t | y', t') &= \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\lambda^T y} f(y, t | y', t') dy, \end{aligned} \quad (10)$$

где $\lambda^T y$ – скалярное произведение векторов λ и y . Так как многомерные плотности вероятности являются интегрируемыми в бесконечных пределах неотрицательными функциями, то существует преобразование Фурье, определяющее эти функции через соответствующие характеристические функции, они представляют

$$\begin{aligned} f_1(y, t) &= \frac{1}{(2\pi)^n} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\lambda^T y} g_1(\lambda, t) d\lambda, \\ f(y, t | y', t') &= \frac{1}{(2\pi)^n} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\lambda^T y} g(\lambda, t | y', t') d\lambda. \end{aligned} \quad (11)$$

Отметим, что характеристические функции векторных случайных функций обладают теми же свойствами, как и для одномерных случайных процессов. Если в n -мерном векторном аргументе часть компонент полагать равными нулю, то получим характеристическую функцию случайного векторного процесса уменьшенного порядка в виде [3, 4, 6, 7]

$$g_1(\lambda_1, \dots, \lambda_m, 0, \dots, 0, \lambda_n, t) = g_1(\lambda_1, \dots, \lambda_m, \lambda_n, t).$$

На векторные марковские процессы обобщаются формулы, которые выглядят так [9]:

$$\begin{aligned} g_1(\lambda, t) &= 1 + \sum_{k=1}^n i\lambda_k M[Y_k(t)] + \frac{1}{2!} \sum_{k, \ell=1}^n i^2 \lambda_k \lambda_\ell M[Y_k(t)Y_\ell(t)] + \frac{1}{3!} \sum_{k, \ell, r=1}^n i^3 \lambda_k \lambda_\ell \lambda_r M[Y_k(t)Y_\ell(t)Y_r(t)] + \dots, \\ g(\lambda, t | y', t') &= 1 + \sum_{k=1}^n i\lambda_k M[Y_k(t)|y'] + \frac{1}{2!} \sum_{k, \ell=1}^n i^2 \lambda_k \lambda_\ell M[Y_k(t)Y_\ell(t)|y'] + \\ &+ \frac{1}{3!} \sum_{k, \ell, r=1}^n i^3 \lambda_k \lambda_\ell \lambda_r M[Y_k(t)Y_\ell(t)Y_r(t)|y'] + \dots, \end{aligned} \quad (12)$$

где $M[Y_k(t)Y_l(t) \dots]$ – начальные моменты, а $M[Y_k(t)Y_l(t) \dots | y']$ – условные начальные моменты случайного векторного процесса $Y(t)$ [10].

Многомерный непрерывный марковский случайный процесс так же, как и одномерный, может быть полностью описан *локальными* характеристиками. Этими локальными характеристиками являются условные математические ожидания, а также условные корреляционные моменты приращений компонент $Y_k(t)$ марковского случайного процесса при изменении аргумента на малый диапазон моделируемого времени Δt :

$$\begin{aligned} \Delta m_k(y, t) &= M[Y_k(t + \Delta t) - Y_k(t) | y, t] = A_k(y, t)\Delta t + o(\Delta t), \\ \Delta m_{kl}(y, t) &= M[(Y_k(t + \Delta t) - Y_k(t))(Y_l(t + \Delta t) - Y_l(t)) | y, t] = B_{kl}(y, t)\Delta t + o(\Delta t), \end{aligned} \quad (k, l = 1, 2, \dots), \quad (13)$$

где $A_k(y, t)$ – компоненты вектора $A(y, t)$ и $B_{kl}(y, t)$ – компоненты матрицы $B(y, t)$ – являются непрерывными функциями, рассматриваемыми вместе со своими производными. Условные моменты $\Delta m_{kl}, \Delta m_{klrs}, \dots$ выше второго имеют порядок малости $o(\Delta t)$ более Δt в соответствии с определением для непрерывного марковского случайного процесса.

С помощью введенных локальных характеристик для многомерного марковского случайного процесса запишем условную характеристическую функцию приращений $\Delta Y(t)$ для процесса $Y(t)$ за время наблюдения Δt :

$$g_{\Delta Y}(\lambda, t + \Delta t | y, t) = 1 + \sum_{k=1}^n i\lambda_k \Delta m_k(y, t) + \frac{1}{2!} \sum_{k, l=1}^n i^2 \lambda_k \lambda_l \Delta m_{kl}(y, t) + \frac{1}{3!} \sum_{k, l, r=1}^n i^3 \lambda_k \lambda_l \lambda_r \Delta m_{klr}(y, t) + \dots, \quad (14)$$

где $\Delta m_k(y, t) = M[\Delta Y_k(t) | y]$ – условные моменты первого порядка приращений $\Delta Y_k(t)$ координат, $\Delta m_{kl}, \Delta m_{klr}$ и т.д. – условные моменты высших порядков приращений для координат.

Изложенный подход и алгоритм в информационном моделировании многомерного марковского (нормально распределенного) процесса может рассматриваться как характеризующий процесс блуждания векторов положения координат и скорости центра масс подвижного и неподвижного объекта, например робота в результате обработки сигналов с n -приемников спутниковой глобальной информационной системы Глонасс/GPS в составе из объектов транспортной геоинформационной системы (ГИС), которые расположены по его периметру. Для анализа информационного процесса уравнения следует рассматривать как векторные, а компоненты данного векторного и условно винеровского процесса принимаются условно независимыми. Для каждой из компонент можно повторить соответствующие выкладки из соответствующего диффузионного процесса. В результате предлагаемого подхода в информационном моделировании, например, первая плотность вероятности для двумерного векторного случайного и марковского процесса принимает следующий общепринятый вид [5, 9]:

$$f_1(y_1, y_2, t) = \frac{1}{2\pi G t} e^{-\frac{y_1^2 + y_2^2}{2Gt}}. \quad (15)$$

Моделируемая интенсивность G процесса в формуле (15) связана непосредственно с корреляционной функцией и спектральной плотностью сигнала, представляет связь по мощности сигнала и относится непосредственно к выбранному диапазону с полосой частот к анализу его характеристик в условиях помех. Отметим то, что теперь путем несложных преобразований можно перейти к расчету информационной энтропии и оценки процесса, т.е. найти количество информации $H(Y_1, Y_2)$. Как правило, информационную энтропию в практических задачах информационных конструкций удобно выражать через двоичные логарифмы, т.е. единицей измерения для информационной энтропии служит один двоичный знак (от англ. *binare digit*).

Заключение

Современные цифровые и информационные технологии, развитие средств информатизации и накопленный базис научно-практических исследований тесно связаны с основными положениями из теоретико-вероятностных и логико-содержательных методов исследования, прежде всего, вероят-

ностных систем различной природы. Среди множества компьютеризированных технологий, предварительного анализа, как правило, технических объектов особое место отводится разработкам информационных моделей [8–10] и действующих алгоритмов в составе компьютеризированных информационно-аналитических систем ИАС для подготовки принятия управленческих решений ЛПР. Разработка методик для обучения к построению информационной модели с учетом случайных факторов в исследованиях системы, например, системы, непосредственно связанной с позиционированием различных объектов с учетом случайных факторов, имеет своей целью сформировать определенный взгляд на обследуемый объект, дополнить его теоретико-вероятностное и практическое представление к формированию моделируемых сигналов, подготовить свои предложения о направлении исследований с пониманием сущности физического процесса и явлений при разработке, как правило, инновационной продукции. Как еще ранее отмечал наш известный отечественный ученый, академик В. С. Пугачев [2]: «Любое измерение всегда сопровождается случайной ошибкой (и случайной величиной), так как абсолютных точных измерений не существует в природе». Такой же позиции придерживались Е. С. Вентцель [7]: «Строго говоря...случайные возмущения присущи любому процессу» и другие ученые. Следует также отметить, что в теории информации, в теории связи и управлении, а также в информатике и практике построения различных информационных систем, моделей для объектов, часто сигнал (как и сообщение) представляют в виде двух слагаемых – детерминированная известная часть (полезный сигнал) и случайная составляющая (помеха). Эти базовые позиции являются фундаментальными и на сегодняшний день. Марковские процессы присущи практически всем разработкам и являются основой к информационным моделям в современном информационном обществе. Они, как правило, используются в современных информационных системах ИАС, в компьютеризированных системах подготовки принятия решений и других, представляют собой общепризнанный взгляд ученых на окружающий нас действительный мир и проявляются в системах различной природы.

Список литературы

1. Колмогоров А. Н. О статистических методах в теории вероятностей // Успехи математических наук. 1938. Вып. 5. С. 5–41.
2. Пугачев В. С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления. М. : Наука, 1962.
3. Пугачев В. С. Нормальные стохастические системы // ДАН СССР. 1973. Т. 208, № 3.
4. Стратанович Р. Л. Условные марковские процессы и их применение к теории оптимального управления. М. : МГУ, 1966.
5. Казаков И. Е., Гладков Д. И. Методы оптимизации стохастических систем. М. : Наука, 1987.
6. Казаков И. Е., Мальчиков С. В. Анализ стохастических систем в пространстве состояний. М. : Наука, 1983.
7. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория вероятностей. М. : Наука, 1969. 390 с.
8. Полтавский А. В. Управление безопасностью движения беспилотного ЛА // Датчики и системы. 2008. № 9. С. 4–8.
9. Полтавский А. В., Юрков Н. К. Модификация модели системы управления подвижным объектом // Надежность и качество сложных систем. 2014. № 1. С. 65–70.
10. Полтавский А. В. Модель измерительной системы в управлении БЛА // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2009. № 10. С. 73–77.

References

1. Kolmogorov A.N. About statistical methods in the theory of probabilities. *Uspekhi matematicheskikh nauk = Advances in mathematical Sciences*. 1938;(5):5–41. (In Russ.)
2. Pugachev V.S. *Teoriya sluchaynykh funktsiy i ee primeneniye k zadacham avtomaticheskogo upravleniya = Theory of random functions and its application to problems of automatic control*. Moscow: Nauka, 1962. (In Russ.)
3. Pugachev V.S. Normal stochastic system. *DAN SSSR = Reports of the Academy of Sciences of the USSR*. 1973;208(3). (In Russ.)
4. Stratanovich R.L. *Uslovnnye markovskie protsessy i ikh primeneniye k torii optimal'nogo upravleniya = Conditional Markov processes and their application to the theory of optimal control*. Moscow: MGU, 1966. (In Russ.)
5. Kazakov I.E., Gladkov D.I. *Metody optimizatsii stokhasticheskikh sistem = Methods of optimization of stochastic systems*. Moscow: Nauka, 1987. (In Russ.)
6. Kazakov I.E., Mal'chikov S.V. *Analiz stokhasticheskikh sistem v prostranstve sostoyaniy = Analysis of stochastic systems in the state space*. Moscow: Nauka, 1983. (In Russ.)

7. Venttsel' E.S., Ovcharov L.A. *Teoriya veroyatnostey = Probability theory*. Moscow: Nauka, 1969:390. (In Russ.)
8. Poltavskiy A.V. Traffic safety management of unmanned aircraft. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2008;(9):4–8. (In Russ.)
9. Poltavskiy A.V., Yurkov N.K. Modification of the model of the control system of a mobile object. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2014;(1):65–70. (In Russ.)
10. Poltavskiy A.V. Model of a measuring system in the control of a UAV. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy = Information-measuring and control systems*. 2009;(10):73–77. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Васильевич Полтавский

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

Андрей Александрович Тюгашев

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

Николай Кондратьевич Юрков

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

Aleksandr V. Poltavskiy

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

Andrey A. Tyugashev

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

Nikolay K. Yurkov

Doctor of technical sciences, professor,
the honoured worker of science
of the Russian Federation,
head of 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 29.05.2021

Поступила после рецензирования / Revised 30.06.2021

Принята к публикации / Accepted 14.09.2021

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

TECHNOLOGICAL BASIS FOR IMPROVING RELIABILITY AND PRODUCT QUALITY

УДК 629.7.01

doi:10.21685/2307-4205-2021-3-6

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЕТНЫХ НАГРУЗОК ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

А. Д. Тулегулов¹, Д. С. Ергалиев², Б. С. Бейсембаева³, Д. В. Зуев⁴

^{1,2,3,4} Академия гражданской авиации, Алматы, Казахстан
^{1,3,4} tad62@yandex.kz, ² DES-67@yandex.kz

Аннотация. *Актуальность и цели.* Как известно, ракета должна обладать достаточной прочностью и выдерживать все нагрузки во время работы. Испытание конструкции ракеты на прочность может проводиться двумя способами: по рабочим нагрузкам или по расчетным нагрузкам, превышающим рабочие. При изучении нагрузок, действующих на ракету, особое внимание следует уделять полетным нагрузкам. Нагрузка в полете зависит от характеристик ракетного двигателя, характера воздушного потока ракеты и динамики движения. *Материалы и методы.* Расчет производится при максимальном скоростном напоре в зоне выхода двухступенчатого жидкого топлива в корпус ракеты. Можно сказать, что голова ракеты выполнена в виде острого конуса. *Результаты.* Распределение веса по длине определяется конструктивной схемой и различается по продольным и поперечным нагрузкам. Корпус разделен на 20 зон одинаковой длины. *Выводы.* При любом расчете испытания на прочность будут ошибки при выборе расчетной схемы подбора нагрузки. Для проверки результатов расчета достаточно испытать конструкцию до ее разрушения, с равномерным увеличением нагрузки.

Ключевые слова: прочность, нагрузки, испытание, двигатель, конструкция

Для цитирования: Тулегулов А. Д., Ергалиев Д. С., Бейсембаева Б. С., Зуев Д. В. Методы исследования полетных нагрузок летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 3. С. 48–56. doi:10.21685/2307-4205-2021-3-6

METHODS FOR THE STUDY OF FLIGHT LOADS OF AIRCRAFT

A.D. Tulegulov¹, D.S. Yergaliyev², B.S. Beisembayeva³, D.V. Zuev⁴

^{1,2,3,4} Academy of Civil Aviation, Almaty, Kazakhstan
^{1,3,4} tad62@yandex.kz, ² DES-67@yandex.kz

Abstract. *Background.* As is known, the rocket must have sufficient strength and withstand all loads during operation. The test of the design of the rocket for strength can be carried out in two ways: on workloads or by calculated loads exceeding workers. When studying the loads acting on the rocket, special attention should be paid to flight loads. Load in flight depends on the characteristics of the rocket engine, the nature of the air flow rocket and the dynamics of the movement. *Materials and methods.* The calculation is made at maximum high-speed pressure in the exit zone of two-stage liquid fuels into the rocket housing. We can say that the head of the rocket is made in the form of a

sharp cone *Results*. As a result of research, it is possible to note the fact that in training with reinforcement an agent interacts with the environment, taking actions and receives a reward for these actions. *Conclusions*. With any calculation of testing tests, errors will be selected when choosing a design selection circuit. To test the results of the calculation, it is sufficient to test the structure before it is destruction, with a uniform increase in the load.

Keywords: strength, load, test, engine, design

For citation: Tulegulov A.D., Yergaliyev D.S., Beisembayeva B.S., Zuev D.V. Methods for the study of flight loads of aircraft. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(3):48–56. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-3-6

Введение

Как известно, ракета должна обладать достаточной прочностью и выдерживать все нагрузки во время работы. Испытание конструкции ракеты на прочность может проводиться двумя способами: по рабочим нагрузкам или по расчетным нагрузкам, превышающим рабочие [1].

При изучении нагрузок, действующих на ракету, особое внимание следует уделять полетным нагрузкам. Нагрузка в полете зависит от характеристик ракетного двигателя, характера воздушного потока ракеты и динамики движения.

Методы исследования

Определение поперечных сил и изгибающих моментов

Расчет производится при максимальном скоростном напоре в зоне выхода двухступенчатого жидкого топлива в корпус ракеты. Можно сказать, что голова ракеты выполнена в виде острого конуса [2].

Расчет выполнен в виде сплошной балочной схемы.

Исходные данные:

- 1) длина корпуса $l = 10$ м;
- 2) диаметр цилиндрической части $D = 1,0$ м;
- 3) площадь Миделя $S = \pi r^2_{\max} = 3,14$ м²;
- 4) угол полуразложения главного конуса $\theta = 15^\circ$;
- 5) дополнительная координата управляющей силы $X_R = 10$ м;
- 6) скоростное давление $q = 0,05$ МПа;
- 7) число Маха $M_\infty = 2$;
- 8) угол атаки $\alpha = 4^\circ$;
- 9) вес $G = 6 \cdot 10^4$ Н;
- 10) сила тяги двигательного агрегата $P = 105,84 \cdot 10^4$ Н;
- 11) площадь для диаметра 1,0 м = 1,0 м².

Это влияет на тяговое усилие P моторного блока вдоль вала корпуса. Набегающая воздушная волна создает аэродинамическое давление, которое основано на распределении продольной аэродинамической силы dX/dx по длине ракеты в балочной схеме [3].

Поверхностные силы P и X придают ракете ускорение в направлении силы тяжести ($P \geq X$).

Это продольная инерционная сила, направленная против ускорения $\frac{dG}{dX}n_x$, где dG/dX – вес ракеты; n_x – коэффициент продольной нагрузки.

Одинаково эффективные силы инерции отдельных точек выражаются интегралами [4]

$$\int_0^l \frac{dG}{dx} n_x dx = n_x \int_0^l \frac{dG}{dx}, \quad (1)$$

где G – вес ракеты в указанное время.

Не менее эффективно Gn_x поражает центр тяжести ракеты. Коэффициент продольной нагрузки находится из уравнения равновесия проекции силы на ось O_x , которое является основой принципа Даламбера:

$$X + Gn_x - P = 0; \quad (2)$$

$$n_x = \frac{P - X}{G} = \frac{P - X}{mg} = \frac{\ddot{x}}{g}. \quad (3)$$

Таким образом, коэффициент продольной нагрузки равен отношению ускорения вдоль оси к ускорению свободного падения [4] (рис. 1).

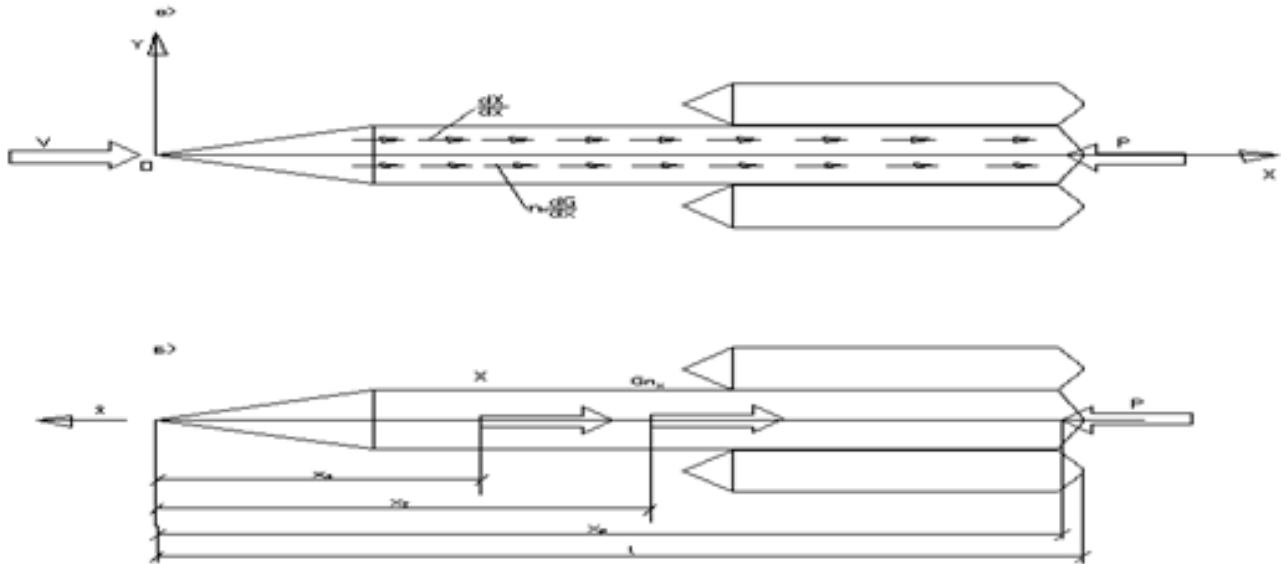


Рис. 1. Продольная нагрузка корпуса

Результаты

Расчет продольных сил

Распределение веса по длине определяется конструктивной схемой и различается по продольным и поперечным нагрузкам. Корпус разделен на 20 зон одинаковой длины [5].

По аналогичным формулам определяем аэродинамическую нагрузку и управляющие силы. Максимальное значение внешнего избыточного давления конической головки $p = p_0 = 2\sin^2(\theta + \alpha)$, $p_{изб} = p_q$ равно аэродинамическому давлению, определяемому по формуле с поправочным коэффициентом 1,5 (для исправления ошибки в применении теории Ньютона) [6, 7]:

$$p = 1,5 \cdot 2\sin^2(\alpha + \theta) \approx 3(\alpha + \theta)^2; \quad (4)$$

$$p = 3 \left(\frac{4+15}{57,3} \right)^2 = 0,33;$$

$$pq = 0,33 \cdot 0,5 \cdot 10^5 \text{ Па} \approx 0,165 \cdot 10^{-1} \text{ МПа}.$$

Максимальное аэродинамическое давление в цилиндре определяется теорией Ньютона без поправочного коэффициента [8]:

$$p = 2\alpha^2; \quad (5)$$

$$p = 2 \left(\frac{4}{57,3} \right)^2 = 0,0097;$$

$$pq = 0,0097 \cdot 0,5 \cdot 10^5 \text{ Па} = 0,0049 \cdot 10^{-1} \text{ МПа}.$$

Продольное распределение коэффициента C_x

$$c_{x\text{сеч}} = \frac{2}{S} \int_0^x r(x) \text{tg}\theta(x) \int_0^\pi p(x, \phi) d\phi dx + c_{x\text{мп}} \frac{x}{l}. \quad (6)$$

Для первых пяти зон $\text{tg}\theta_x$ и $\text{tg} 15^\circ$ независимы.

$\int_0^{\pi} p(x, \phi) d\phi$ не зависит от x в интеграле. Обозначение

$$1,5 \cdot 2\pi (\theta^2 + \alpha^2 / 2) = 1,5 \cdot 6,28 (0,2622 + 0,072 / 2) = 0,7.$$

Радиус основной части изменяется по закону прямых по длине:

$r(x) = \operatorname{tg} 15^\circ$, где для конуса

$$c_{\text{хсеч}} = \frac{2 \cdot 0,268^2 \cdot 0,7}{S} \int_0^x x dx + c_{\text{хмп}} \frac{x}{l} = \frac{0,1005x^2}{2S} + c_{\text{хмп}} \frac{x}{l}.$$

Первая сумма значений, полученных для цилиндра, постоянна и равна у основания конуса, т.е. в конце пятой зоны $x = 9,25$ м:

$$c_{\text{хсеч}} = \frac{0,1005 \cdot 9,25^2}{2 \cdot 1,0} = 4,22.$$

Для получившегося конуса

$$c_{\text{хсеч}} = \frac{0,1005x^2}{2S} + 0,216 \frac{x}{l};$$

здесь $c_{\text{хтр}} = 0,6 \cdot 0,36 = 0,216$.

$R = 1,0$ м для цилиндра

$$c_{\text{хсеч}} = 0,36 + 0,216 \frac{x}{l};$$

$P_{\text{пр}} = 1,0$ м

$$c_{\text{хсеч}} = 0,36 + 0,216 \frac{22,2}{37} = 0,488 + 0,29 \frac{x}{l};$$

здесь

$$c_{\text{хтр}} = 0,6 \cdot 0,488 = 0,29.$$

Для общего случая

$$c_x = 0,488 + 0,29 = 0,778.$$

Продольная аэродинамическая сила

$$X = c_x q S, \text{ Н}; \quad (7)$$

$$X = 0,7766 \cdot 0,5 \cdot 10^5 \cdot 3,14 = 121\,926 \text{ Н}.$$

Продольная нагрузка

$$n_x = \frac{P - X}{G}; \quad (8)$$

$$n_x = \frac{1058400 - 121926}{60000} = 1,488.$$

Расчет продольных сил по отношению

$$T(x_3) \approx -c_{\text{хсеч}} q S - n_x \sum_{j=1}^s G_j. \quad (9)$$

Данные отчета представлены в табл. 1.

Таблица 1

Расчет продольных сил

$x_j, \text{ м}$	$G_j, \text{ Н}$	$\sum_1^s G_j, \text{ Н}$	$n_x \sum_1^s G_j, \text{ Н}$	$c_{x \text{ sec}}$	$c_{x \text{ sech}} q S N$	$-T, \text{ Н}$
1,85	5000	5000	7440	0,0252	15 030	22 470
3,7	10 000	15 000	22 320	0,078	46 527	88 847
5,55	15000	30 000	44 640	0,1615	96 335	140 975
7,4	20 000	50 000	74 400	0,2729	162 785	237 185
9,25	25 000	75 000	111 600	0,413	246 355	357 955

Таблица 1 основана на реальных данных. Корпус ракеты подвергается нарастающему сжатию с головы до пят. В области $X = X_R$ продольная сила равна силе тяги двигательного агрегата [9] (рис. 2).

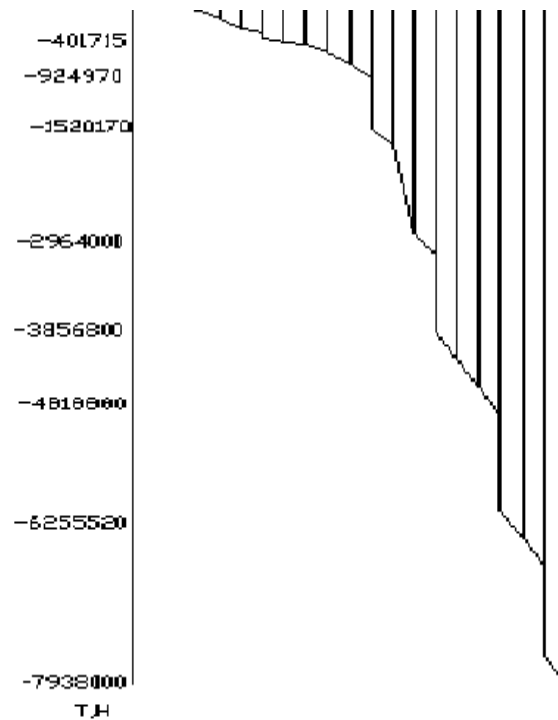


Рис. 2. Диаграмма продольной силы

Обсуждение

Расчет поперечных сил и изгибающих моментов

Поперечная нагрузка корпуса (рис. 3) вызывается косым ударом, когда скорость набегающей воздушной волны достигает вала ракеты под углом α . Этот угол называется углом наклона. Диагональный обдув вызывается порывами ветра, что приводит к образованию поперечных аэродинамических сил dY / dX . Его равное действие дается интегралом $Y = \int_0^l \frac{dY}{d_x} dx$ и находится под давлением до центра давления [9].

Направление силы находится в плоскости порыва ветра:

$$Y = c_y q S, \text{ Н}, \tag{10}$$

где C_y – коэффициент поперечной аэродинамической силы:

$$c_y = \int_0^l \frac{dc_y}{d_x} dx. \tag{11}$$

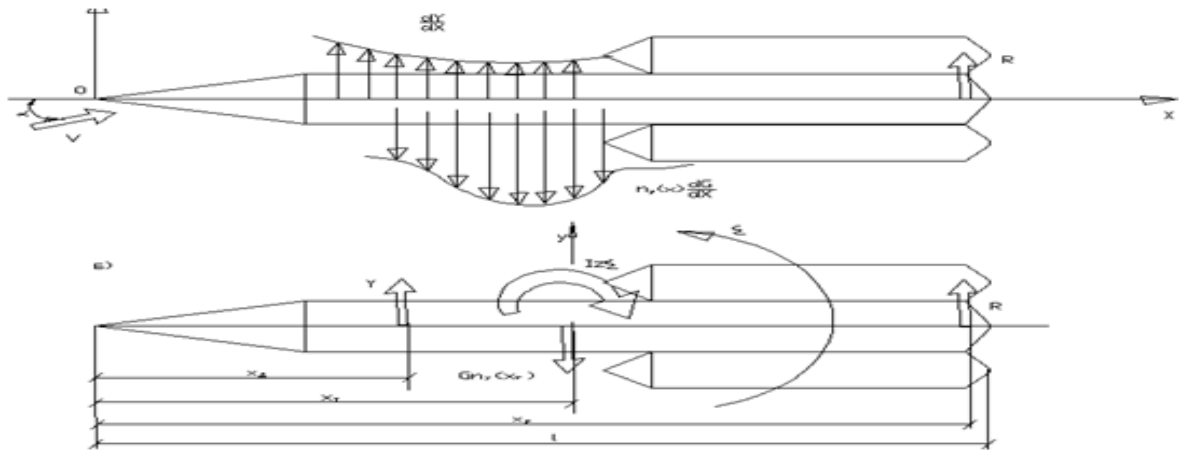


Рис. 3. Горизонтальная нагрузка на корпус

Сила Y пытается оттолкнуть ракету от центра масс. Однако на ракете установлена система управления и создается управляющая сила R [10]. Система управления работает с некоторыми настройками, поэтому контрольный момент, когда сумма $Y + R$ достигает максимума,

$$R(x_R - x_T) \geq Y(x_T - x_D). \quad (12)$$

Продольное распределение коэффициента поперечной аэродинамической силы определяем по формуле

$$c_{y\text{sech}} = \int_0^x \frac{dc_y}{dx} dx, \quad (13)$$

где $c_{y\text{sech}} - x$ – коэффициент поперечной аэродинамической силы части тела длиной

$$\frac{dY}{dx} = \frac{dc_y}{dx} qS; \quad (14)$$

$$\frac{dc_y}{dx} = 2 \frac{r(x)}{S} \int_0^\pi p(x, \phi) \cos \phi d\phi. \quad (15)$$

Учитывая поправочный коэффициент 1,5,

$$c_{y\text{sech}} = \frac{2}{S} \int_0^x r(x) \int_0^\pi p(x, \phi) \cos \phi d\phi dx. \quad (16)$$

В основную часть ($x \leq 9,25$ м)

$$r(x) = x \operatorname{tg} \theta; \quad (17)$$

$$r(x) = x \cdot 0,268;$$

$$\int_0^\pi p(x, \phi) \cos \phi d\phi = 1,5 \cdot \pi \theta \alpha; \quad (18)$$

$$\int_0^\pi p(x, \phi) \cos \phi d\phi = 1,5 \cdot \frac{15 \cdot 4}{(57,3)^2} = c_{y\text{sech}} x S. \quad (19)$$

Для цилиндра ($9,25 \leq x \leq 22,2$) $r = 1,95$ м:

$$\int_0^\pi p(x, \phi) \cos \phi d\phi = \frac{4}{3} \left(\frac{4}{57,3} \right)^2 = 0,0065;$$

$$c_{ysech} = \frac{0,092x_k^2}{2S} + \frac{2 \cdot 0,0065r}{S}(x - x_k);$$

$$c_{ysech} = 0,43 + 0,0021(x - 9,25),$$

x выражено в метрах.

Для всего здания ($x = 37$ м)

$$c_y = 0,43 + 0,027 + \frac{2 \cdot 0,0065 \cdot r_{np}}{S_{np}}(x - 22,2);$$

$$c_y = 0,457 + \frac{2 \cdot 0,0065 \cdot 3,2}{32}(37 - 22,2) = 0,457 + 0,019 = 0,4782;$$

$$\sum_{j=1}^N c_{ysech}(x_j) = 6,123.$$

x_D – координата центра давления определяется по формуле

$$x_D = 1 + \frac{\Delta x}{2} - \frac{\Delta x}{c_y} \sum_{j=1}^N c_{ysech}(x_j); \quad (20)$$

$$x_D = 37 + 0,925 - \frac{1,875}{0,4782} 6,123 = 7,57 \text{ м};$$

$$Y = c_y q S_{pr}, \text{ Н}; \quad (21)$$

$$Y = 0,4782 \cdot 0,5105 \cdot 32 = 605 \text{ 120 Н}$$
 подъемная сила.

Определите координаты центра тяжести x_t и момента инерции I_z .

Для этого складываем веса всех зон:

$$x_m = 1 + \frac{\Delta x}{2} - \frac{\Delta x}{G} \sum_{s=1}^N \sum_{j=1}^s G_j; \quad (22)$$

$$x_m = 37 + \frac{1,85}{2} - \frac{1,85}{45 \cdot 10^5} 238,05 \cdot 10^5 = 28,14 \text{ м}.$$

Управляющая мощность определяется по формуле

$$R = \frac{1,3Y(x_t - x_D)}{x_R - x_T}, \quad (23)$$

$$R = \frac{1,3 \cdot 605120(28,14 - 7,57)}{37 - 28,14} = 10 \text{ Н}.$$

Поперечная нагрузка на центр масс

$$n_y(x_m) = \frac{Y + R}{G}; \quad (24)$$

$$n_y(x_m) = \frac{605120 + 1643890}{4500000} = 0,5839.$$

Определите взаимосвязь между угловым ускорением и ускорением свободного падения [10]:

$$\frac{\varepsilon}{g} = \frac{0,3Y(x_t - x_D)}{I_z g}, \quad (25)$$

$$\frac{\varepsilon}{g} = \frac{0,3 \cdot 605120(28,14 - 7,57)}{23306420 \cdot 9,81} = 0,016332 \text{ м}^{-1}.$$

Поперечная нагрузка центра тяжести в зоне J :

$$n_y(x_j) = n_y(x_T) + \frac{\varepsilon}{g}(x_{Tj} - x_T); \quad (26)$$

$$n_y(x_j) = 0,5839 + 0,016332(x_{Tj} - 28,14).$$

Расчеты по зонам приведены в табл. 2.

Таблица 2

Расчеты по зонам

J	x_j , м	x_{Tj} , м	n_{yj}	G_j , Н	$G_j n_{yj}$, Н	$\sum_1^s G_j n_{yj}$, Н	$c_{усеч}$	$c_{усеч} q S$, Н	Q_j , Н	$\Delta x \sum_1^s Q_j$, Нм
1	1,85	0,925	0,1394	15 000	2090	2090	0,0133	21 280	19 190	35 500
2	3,7	2,775	0,1719	15 000	2580	4670	0,0534	85 440	80 770	184 926
3	5,55	4,625	0,1919	15 000	2880	7550	0,1201	192 160	184 610	526 454
4	7,4	6,475	0,2301	15 000	3450	11 000	0,3136	501 760	490 760	1 434 360
5	9,25	8,325	0,2603	15 000	3900	14 900	0,4319	691 040	676 140	2 685 219

Поскольку одним из режимов нагружения ракеты было равномерное изменение поверхностных сил во времени, расчет внешней нагрузки проводился без возбуждения конструкции, т.е. по твердотельной схеме [11].

Заключение

При любом расчете испытания на прочность будут ошибки при выборе расчетной схемы подбора нагрузки. Для проверки результатов расчета достаточно испытать конструкцию до ее разрушения, с равномерным увеличением нагрузки.

Отношение разрушающей нагрузки к номинальной называется коэффициентом запаса прочности. При проектировании конструкции старайтесь иметь коэффициент запаса прочности равный 1 [12].

Список литературы

1. Фахрутдинов И. Х. Ракетные двигатели твердого топлива. М. : Машиностроение, 2008. 223 с.
2. Павлюк Ю. С. Баллистическое проектирование ракет. Челябинск : Изд-во ЧГТУ, 2006.
3. Алифанов О. М., Андреев А. Н., Гушин В. Н. [и др.]. Баллистические ракеты и ракеты-носители : пособие для студентов вузов. М., 2004. 512 с.
4. Выбор и расчет основных параметров РДТТ : метод. рекомендации по курсовому и дипломному проектированию. М. : МО СССР, 1983. 231 с.
5. Паничкин Н. И., Слепушкин Ю. В. [и др.]. Конструкция и проектирование космических летательных аппаратов. М. : Машиностроение, 2004. 344 с.
6. Балк М. Б. Элементы динамики космического полета. М. : Наука, 1996.
7. Пенцак И. Н. Теория полета и конструкция баллистических ракет. М. : Машиностроение, 1989. 344 с.
8. Краснов Н. Ф. Аэродинамика. Основы теории. Аэродинамика профиля и крыла. М. : Высш. шк., 1976. Т. 1. 384 с.
9. Краснов Н. Ф. Аэродинамика. Методы аэродинамического расчета. М. : Высш. шк., 1980. Т. 2. 416 с.
10. Жолдиева Ш. Б., Тулегулов А. Д., Ергалиев Д. С. Анализ надежности работы системы терморегулирования космического аппарата // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2016. Т. 2. С. 233–234.
11. Мусаева М. Х., Калел М. Х., Ергалиев Д. С. Интеграция систем ДЗЗ и БПЛА для предотвращения и мониторинга чрезвычайных ситуаций в Республике Казахстан // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2018. Т. 2. С. 27–29.
12. Садуахас А. К., Калманова Д. М., Хамитова Д. Р. [и др.]. Методы обработки информации и контроля стабилизации космических аппаратов и систем управления ориентации // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2021. Т. 1. С. 202–204.

References

1. Fakhrutdinov I.Kh. *Raketnye dvigateli tverdogo topliva = Rocket engines of solid fuel*. Moscow: Mashinostroenie, 2008:223. (In Russ.)
2. Pavlyuk Yu.S. *Ballisticheskoe proektirovanie raket = Ballistic missile design*. Chelyabinsk: Izd-vo ChGTU, 2006. (In Russ.)
3. Alifanov O.M., Andreev A.N., Gushchin V.N. [et al.]. *Ballisticheskie rakety i rakety-nositeli: posobie dlya studentov vuzov = Ballistic missiles and launch vehicles: a manual for university students*. Moscow, 2004:512. (In Russ.)

4. *Vybor i raschet osnovnykh parametrov RDTT: metod. rekomendatsii po kursovomu i diplomnomu proektirovaniyu = Selection and calculation of the main parameters of the RTTT : method. recommendations for course and diploma design.* Moscow: MO SSSR, 1983:231. (In Russ.)
5. Panichkin N.I., Slepushkin Yu.V. [et al.]. *Konstruktsiya i proektirovanie kosmicheskikh letatel'nykh apparatov = Construction and design of space aircraft.* Moscow: Mashinostroenie, 2004:344. (In Russ.)
6. Balk M.B. *Elementy dinamiki kosmicheskogo poleta = Elements of space flight dynamics.* Moscow: Nauka, 1996. (In Russ.)
7. Pentsak I.N. *Teoriya poleta i konstruktsiya ballisticheskikh raket = Flight theory and design of ballistic missiles.* Moscow: Mashinostroenie, 1989:344. (In Russ.)
8. Krasnov N.F. *Aerodinamika. Osnovy teorii. Aerodinamika profilya i kryla = Aerodynamics. Fundamentals of theory. Aerodynamics of the profile and wing.* Moscow: Vyssh. shk., 1976;1:384. (In Russ.)
9. Krasnov N.F. *Aerodinamika. Metody aerodinamicheskogo rascheta = Aerodynamics. Methods of aerodynamic calculation.* Moscow: Vyssh. shk., 1980;2:416. (In Russ.)
10. Zholdieva Sh.B., Tulegulov A.D., Ergaliev D.S. Analysis of the reliability of the spacecraft thermal control system. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International symposium Reliability and Quality.* 2016;2:233–234. (In Russ.)
11. Musaeva M.Kh., Kalem M.Kh., Ergaliev D.S. Integration of remote sensing and UAV systems for prevention and monitoring of emergency situations in the Republic of Kazakhstan. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International symposium Reliability and Quality.* 2018;2:27–29. (In Russ.)
12. Saduakhas A.K., Kalmanova D.M., Khamitova D.R. [et al.]. Methods of information processing and control of the stabilization of spacecraft and orientation control systems. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International symposium Reliability and Quality.* 2021;1:202–204. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Амандос Дабысович Тулегүлов

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

Дастан Сырымович Ергалиев

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

Бакытгуль Сагимжановна Бейсембаева

старший преподаватель
кафедры авиационной техники и технологий,
Академия гражданской авиации
(Казахстан, г. Алматы, ул. Ахметова, 44)
E-mail: tad62@yandex.kz

Дмитрий Вячеславович Зуев

старший преподаватель
кафедры авиационной техники и технологий,
Академия гражданской авиации
(Казахстан, г. Алматы, ул. Ахметова, 44)
E-mail: tad62@yandex.kz

Amandos D. Tulegulov

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

Dastan S. Ergaliev

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

Bakytgul S. Beisembaeva

Senior lecturer of sub-department
of aviation engineering and technology,
Academy of Civil Aviation
(44 Akhmetova street, Almaty, Kazakhstan)

Dmitriy V. Zuev

Senior lecturer of sub-department
of aviation engineering and technology,
Academy of Civil Aviation
(44 Akhmetova street, Almaty, Kazakhstan)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 12.07.2021

Поступила после рецензирования/Revised 23.08.2021

Принята к публикации/Accepted 24.09.2021

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ ФАЙЛОВОЙ ИЗБЫТОЧНОСТИ И ПОДТВЕРЖДЕНИЯ ПОЛНОТЫ ИСХОДНЫХ ТЕКСТОВ НА УРОВНЕ ФАЙЛОВ

В. В. Самаров

ООО «16 НИИЦ», Мытищи, Россия
samarov_vladimir@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Описан пользовательский интерфейс и порядок работы с разработанным программным модулем, осуществляющим контроль полноты и отсутствия файловой избыточности в исследуемом, в рамках сертификационных испытаний, программном изделии. *Материалы и методы.* При проведении анализа сравниваются два множества: перечень файлов с исходными текстами; протокол сборки (компиляции) исследуемых исходных текстов в соответствующий дистрибутивный пакет (загрузочные модули), полученный при использовании системы аудита операционных систем семейства Linux (далее – ОС Linux). *Результаты и выводы.* Использование унифицированных протоколов аудита позволило реализовать программный алгоритм, при котором имеется возможность контроля файловой избыточности и установления полноты на уровне файлов, для исследуемых проектов любых объемов и структуры, а также вне зависимости от используемых для их сборки (компиляции) схем.

Ключевые слова: сертификационные испытания программных изделий, контроль полноты и отсутствия избыточности на уровне файлов, система аудита ОС Linux, автоматизация сертификационных испытаний

Для цитирования: Самаров В. В. Программная реализация контроля файловой избыточности и подтверждения полноты исходных текстов на уровне файлов // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 3. С. 57–61. doi:10.21685/2307-4205-2021-3-7

SOFTWARE IMPLEMENTATION OF FILE REDUNDANCY CONTROL AND CONFIRMATION OF THE COMPLETENESS OF THE SOURCE TEXTS AT THE FILE LEVEL

V.V. Samarov

LLC "16 NIITS", Mytishchi, Russia
samarov_vladimir@mail.ru

Abstract. *Background.* describes the user interface and the procedure for working with the developed software module that monitors the completeness and absence of file redundancy in the investigated software product within the framework of certification tests. *Materials and methods.* During the analysis, two sets are compared: a list of files with source texts; the protocol of assembly (compilation) of the source texts under investigation into the corresponding distribution package (load modules) obtained using the audit system of operating systems of the Linux family (hereinafter referred to as Linux OS). *Results and conclusions.* The use of unified audit protocols made it possible to implement a software algorithm in which it is possible to control file redundancy and establish completeness at the file level for the projects under study of any size and structure, as well as regardless of the schemes used for their assembly (compilation).

Keywords: certification testing of software products, control of completeness and absence of redundancy at the file level, audit system of Linux OS, automation of certification tests

For citation: Samarov V.V. Software implementation of file redundancy control and confirmation of the completeness of the source texts at the file level. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;(3):57–61. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-3-7

Использование механизмов, предоставляемых системой аудита ОС Linux, начиная с версии 2.6 [1], позволило разработать алгоритм [2] по формированию унифицированного протокола (рис.1) компи-

ляции (сборки), исследуемого в рамках сертификационных испытаний программного изделия, проводимых в системе сертификации Минобороны России.

```
File Report
=====
# date time file syscall success exe auid event
=====
1. 22.03.2021 18:38:38 /home/sam/test/ open yes /bin/bash sam 218
2. 22.03.2021 18:38:39 /home/sam/test/ open yes /bin/bash sam 219
3. 22.03.2021 18:38:39 /home/sam/test/ open yes /bin/bash sam 220
4. 22.03.2021 18:38:38 /home/sam/test/ open yes /bin/bash sam 217
5. 22.03.2021 18:38:42 /home/sam/test/ open yes /bin/bash sam 222
6. 22.03.2021 18:38:42 /home/sam/test/ open yes /bin/bash sam 221
7. 22.03.2021 18:38:54 makefile open yes /usr/bin/make sam 224
8. 22.03.2021 18:38:54 . open yes /usr/bin/make sam 223
9. 22.03.2021 18:38:54 hello.c open yes /usr/lib/gcc/x86_64-linux-gnu/6/cc1 sam 225
10. 22.03.2021 18:38:55 main.c open yes /usr/lib/gcc/x86_64-linux-gnu/6/cc1 sam 226
```

Рис. 1. Формат унифицированного протокола компиляции (сборки) на примере фрагмента соответствующего протокола для тестового проекта

В свою очередь, возможность получения протокола компиляции (сборки), имеющего унифицированную форму для любых (не зависящих от используемых схем и средств сборки) компилируемых (собираемых) из исходных текстов программных изделий, позволила коллективу испытательной лаборатории ООО «16 НИИЦ», под руководством и при непосредственном участии автора статьи, разработать программу, осуществляющую контроль файловой избыточности и устанавливающую факт полноты анализируемого пакета с исходными текстами.

Действительно, имея унифицированный формат протокола сборки (рис. 1), имеется возможность выполнять данный этап проверок с учетом следующих условий:

- наличия в анализируемом проекте файлов исходных текстов с одинаковыми именами, но находящихся в разных каталогах (актуально для больших проектов);
- исключения из анализа «ложных» срабатываний (событий, непосредственно не связанных со сборкой проекта, но формирующих в протоколе сборки семантический «след» того или иного файла с исходными текстами), т.е. анализ только успешных событий по сборке;
- регистра имен файлов и соответствующих к ним путей в соответствии с особенностью файловых систем семейства типа extfs¹ (ext2–ext4) [3].

В целях осуществления платформенной совместимости программа была разработана на языке Python, версии 3.4.3 [5], что позволяет без модификации использовать ее в ОС Windows (версий XP и выше), а также на большинстве операционных систем семейства Linux, имеющих соответствующие сертификаты (заключения) о соответствии безопасности информации, выданные Минобороны России.

Программа позволяет:

- успешно обрабатывать «смешанные» входные данные, т.е. на вход программы может быть подан файл, представляющий собой перечень файлов проекта (исходных текстов), сформированный любым удобным способом как в ОС семейства Windows, так в Linux системах;
- формировать информативные и удобочитаемые отчеты в текстовом формате, а также в формате html;
- успешно и быстро обрабатывать входные данные значительных объемов.

Алгоритм работы с программой:

1. Подготовить исходные данные, в том числе:
 - произвести построение списков с файлами исходных текстов (для чего воспользоваться любым удобным средством, например ПС «Total Commander» или любым другим). Файл с перечнем исходных текстов может быть в любой стандартной кодировке и должен представлять собой тексто-

¹ Ввиду того, что в ядро ОС Linux для файловой системы ext4 была включена поддержка работы без учета регистра символов [4], то для корректной работы программного модуля была предусмотрена возможность такого анализа.

вый файл. Формат входного файла с перечнем исходных текстов представляет собой массив со строками¹ (рис. 2);

- сформировать протокол компиляции анализируемого проекта, для чего воспользоваться алгоритмом [1] по его (протокола) созданию с помощью системы аудита ОС семейства Linux;
- при необходимости установить на сборочную систему соответствующую службу (auditd);
- осуществить постановку на контроль (аудит) всех обращений к объектам (файлам с анализируемыми исходными текстами), находящихся в соответствующем каталоге (команда: `$ sudo auditctl -w /Dest/for/src -p rwx`, где `/Dest/for/src` – абсолютный путь к каталогу с анализируемыми исходными текстами);
- произвести штатную сборку (в соответствии с действиями, описанными в соответствующей программной документации программного изделия) исследуемого проекта;
- с помощью утилиты `aureport` сформировать соответствующий (см. рис.1) протокол сборки (команда: `$ sudo aureport -f -i - success > log_file`, где `log_file` – имя файла, содержащего записи, протоколирующие процесс компиляции (сборки) тестового проекта).

```
J:\exmp\TEST\assembly_TEST\data\app\data\Application.cpp
J:\exmp\TEST\assembly_TEST\data\app\data\application.h
.....
J:\exmp\TEST\assembly_TEST\data\app\data\main.cpp
```

Рис. 2. Пример представления перечня анализируемых файлов исходных текстов

2. В зависимости от используемой ОС запустить соответствующий интерпретатор командной строки (например, `cmd` – для ОС Windows или `bash` терминал – для ОС Linux).

3. Перейти в каталог с файлами программы, после чего выполнить команду вида

```
C:\Test\files_cmpr\>python app.py --first=data/SRC_test.txt --
second=data/log_file --dest_path=assembly_TEST --reg=1 --exts="cpp|h" // -
для ОС семейства Windows;
```

```
user@deb:~$ python3 app.py --first=data/ SRC_test.txt --
second=data/log_file --dest_path=assembly_TEST --reg=1 --exts="cpp|h" // -
для ОС семейства Linux,
```

где *first* – путь² к файлу с перечнем файлов исходных текстов; *second* – путь³ к файлу с протоколом компиляции проекта; *dest_path*³ – имя каталога (верхнего каталога, включая подкаталоги) с анализируемыми исходными текстами; *reg* – параметр, отвечающий за правило сравнения (1 – учитывать регистр символов в названии файлов; 0 – не учитывать регистр символов в названии файлов); *exts* – маска поиска (через символ “|” перечисляются расширения файлов, по которым осуществляется анализ).

4. Перейти в каталог «results» программы и ознакомиться с сформированными отчетными материалами, в том числе:

- с файлами `Rep_equals.txt` (отчет по одинаковым файлам), `Rep_file1_only.txt` (отчет по избыточным файлам), `Rep_file2_only.txt` (отчет по файлам, не отвечающим требованиям по полноте исходных текстов) (рис. 3);
- со сводным html отчетом (рис. 4).

¹ Для корректной работы программы требуется указание абсолютных путей к соответствующим файлам исходных текстов.

² В приведенном примере указан относительный путь к сравниваемым файлам, находящимся в каталоге «data/» программы.

³ Для получения релевантных результатов анализа необходимо, чтобы имя каталога с анализируемыми исходными текстами из файла с исходными текстами коррелировало с именем каталога с исходными текстами, участвовавшего в сборке проекта.

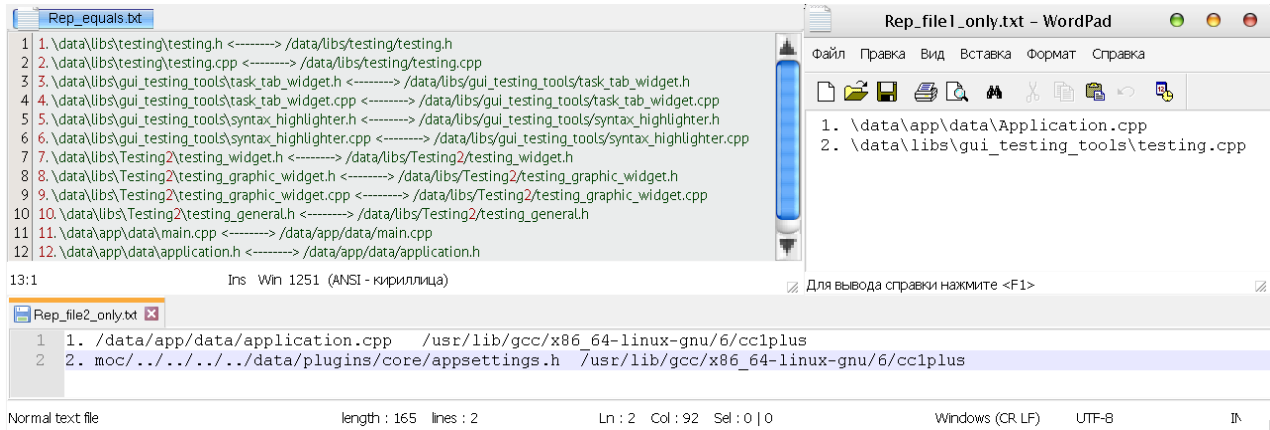


Рис. 3. Видеокадр сформированных по результатам анализа тестового примера файлов

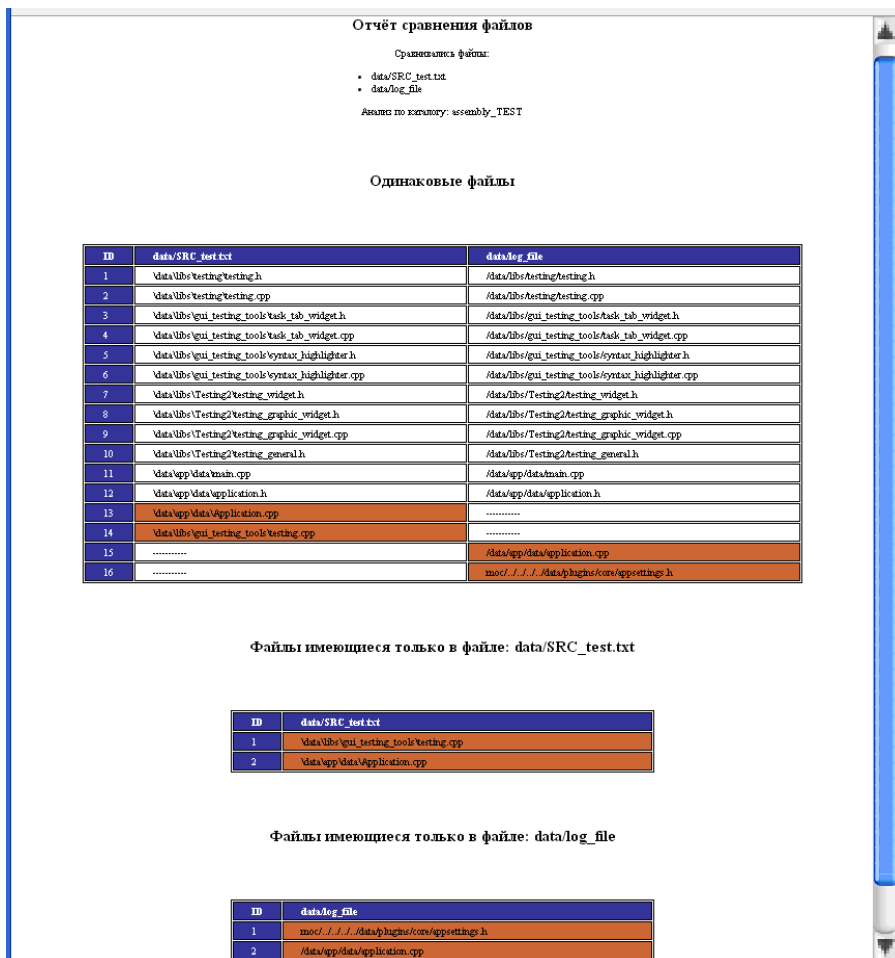


Рис. 4. Видеокадр сводного html отчета по файловой избыточности и полноте тестового примера

Заключение

В заключении хотелось бы отметить, что описанный в настоящей статье программный модуль по контролю полноты и отсутствия избыточности на уровне файлов успешно апробирован специалистами испытательной лабораторией ООО «16 НИИЦ» при проведении ими сертификационных испытаний программных изделий.

Вместе с тем интерпретация выходных данных программного модуля в части файлов, которые по результатам анализа помечены как не соответствующие требованиям по полноте исходных текстов (отчет – Rep_file2_only.txt (см. рис. 3) в третьей таблице в сводном html отчете (рис. 4)), требует от специалистов, проводящих испытания, достаточно серьезных знаний в современных методах и

способах компиляции исходных текстов (например, принципов работы метаобъектного компилятора на основе библиотеки qt [6] или метаобъектных протоколов (например, Google Protobuff [7]), а также зачастую значительных временных затрат. Таким образом, по мнению автора, целесообразно проработать вопрос о расширении функционала программного модуля в части добавления в него механизмов по предоставлению дополнительной информации, использование которой позволит упростить принятие решения по таким (генерируемым в процессе компиляции) файлам.

Список литературы

1. Пингвин под колпаком: Аудит ситемных событий в линукс // Хакер. URL: <https://xakep.ru/2011/03/30/54897> (дата обращения: 26.02.2021).
2. Самаров В. В. Использование системы аудита операционных систем семейства Linux при проведении сертификационных испытаний программных изделий // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 1. С. 144–150.
3. Типы файловых систем для Linux. URL: <https://losst.ru/typy-fajlovyh-sistem-dlya-linux> (дата обращения: 02.04.2021).
4. В ядро Linux для ФС Ext4 включена поддержка работы без учета регистра символов. URL: <https://www.opennet.ru/opennews/art.shtml?num=50581> (дата обращения: 02.04.2021).
5. Python Release 3.4.3. URL: <https://www.python.org/downloads/release/python-343> (дата обращения: 02.04.2021).
6. Использование метаобъектного компилятора (Meta-Object Compiler, moc). URL: <http://doc.crossplatform.ru/qt/4.6.x/moc.html> (дата обращения: 02.04.2021).
7. Language Guide – Protocol Buffers – Google Developers. URL: <https://developers.google.com/protocol-buffers/docs/overview> (дата обращения: 03.04.2021).

References

1. Pingvin pod kolpakom: Audit sitemnykh sobyitiy v linux. *Khaker* = "Penguin under the hood: Audit of system events in Linux" // *Hacker*. (In Russ.). Available at: <https://xakep.ru/2011/03/30/54897> (accessed 26.02.2021).
2. Samarov V.V. The use of an audit system for Linux operating systems during certification tests of software products. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* = *Reliability and quality of complex systems*. 2021;(1):144–150. (In Russ.).
3. *Tipy faylovykh sistem dlya Linux* = *Types of file systems for Linux*. (In Russ.). Available at: <https://losst.ru/typy-fajlovyh-sistem-dlya-linux> (accessed 02.04.2021).
4. *V yadro Linux dlya FS Ext4 vklyuchena podderzhka raboty bez ucheta registra simvolov* = *The Linux kernel for FS Ext4 includes support for case-insensitive operation*. (In Russ.). Available at: <https://www.opennet.ru/opennews/art.shtml?num=50581> (accessed 02.04.2021).
5. *Python Release 3.4.3*. Available at: <https://www.python.org/downloads/release/python-343> (accessed 02.04.2021).
6. *Ispol'zovanie metaob"ektnogo kompilyatora (Meta-Object Compiler, moc)* = *Using the Meta-Object compiler (Meta-Object Compiler, moc)*. (In Russ.). Available at: <http://doc.crossplatform.ru/qt/4.6.x/moc.html> (accessed 02.04.2021).
7. *Language Guide – Protocol Buffers – Google Developers*. Available at: <https://developers.google.com/protocol-buffers/docs/overview> (accessed 03.04.2021).

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Владимирович Самаров

заместитель начальника испытательной лаборатории,
ООО «16 НИИЦ»
(Россия, Московская обл., г. Мытищи,
Новомиытищинский просп., 19)
E-mail: samarov_vladimir@mail.ru

Vladimir V. Samarov

deputy head of test laboratory,
LLC "16 NIITS"
(19 Novomytischinskiy avenue, Mytischki,
Moscow region, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 19.06.2020

Поступила после рецензирования/Revised 21.07.2021

Принята к публикации/Accepted 13.09.2021

СЕГМЕНТАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ И РАСПОЗНАВАНИЕ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

А. И. Годунов¹, С. Т. Балаян², П. С. Егоров³

¹ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
^{2,3} Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, Воронеж, Россия
¹ Godunov@pnzgu.ru, ² bst76@yandex.ru, ³ ahtuba.egor@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматривается процесс сегментации изображений и дается сравнительная оценка существующих методов с разработанным на основе сверточной нейронной сети. *Материалы и методы.* Исследуются различные методы, такие как пороговые методы сегментации: Оцу, Ниблэка, Бернсена, Савола, и метод сегментации изображений с помощью сверточной нейронной сети (разработанный метод). Приведены примеры сегментации, их достоинства и недостатки. Представлены алгоритмические описания методов сегментации. Проведены эксперименты по исследованию сегментации кадров (изображений) из видеопоследовательности. *Результаты и выводы.* Представлены результаты проведенного эксперимента, показывающие работу того или иного метода сегментации.

Ключевые слова: адаптивные методы, пороговые методы, сегментация, метод Оцу, метод Ниблэка, метод Бернсена, метод Савола, сверточная нейронная сеть

Для цитирования: Годунов А. И., Балаян С. Т., Егоров П. С. Сегментация изображений и распознавание объектов на основе технологии сверточных нейронных сетей // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 3. С. 62–73. doi:10.21685/2307-4205-2021-3-8

IMAGE SEGMENTATION AND OBJECT RECOGNITION BASED ON CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK TECHNOLOGY

A.I. Godunov¹, S.T. Balanyan², P.S. Egorov³

¹ Penza State University, Penza, Russia
^{2,3} Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin, Voronezh, Russia
¹ Godunov@pnzgu.ru, ² bst76@yandex.ru, ³ ahtuba.egor@mail.ru

Abstract. *Background.* An analysis of the processes of image segmentation is being carried out. An original method of image segmentation using a convolutional neural network is proposed. *Materials and methods.* A comparative assessment of existing segmentation methods such as threshold segmentation methods: Otsu, Niblack, Bernsen, Savola, as well as the method of image segmentation using a convolutional neural network is carried out. Their advantages and disadvantages are evaluated. Examples of image segmentation by various methods are given. Algorithmic descriptions of segmentation methods are presented. Experiments were carried out to study the segmentation of frames (images) from a given video sequence. *Results and conclusions.* The results of the experiment, showing the operation of one or another segmentation method, are presented.

Keywords: adaptive methods, threshold methods, segmentation, Otsu's method, Niblack's method, Bernsen's method, Savol's method, convolutional neural network

For citation: Godunov A.I., Balanyan S.T., Egorov P.S. Image segmentation and object recognition based on convolutional neural network technology. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;(3):62–73. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-3-8

Введение

Сегментация цифровых изображений позволяет перейти от представления данных в виде набора точек с различной яркостью к описанию сцены, как композиции объектов, каждый из которых характеризуется формой, площадью, взаимным расположением, яркостными, текстурными и

другими признаками [1]. Сегментация изображения – это разделение изображения на области, однородные по некоторому критерию. Цель сегментации состоит в упрощении или изменении представления изображения, чтобы его было легче анализировать в дальнейшем. Сегментация основывается на измерениях, проведенных над изображением, и может быть уровнем серого, цветом, текстурой, глубиной или движением [2].

В области распознавания образов на изображении сформировался новый подход, называемый семантической сегментацией, который основывается на глубоких сверточных нейронных сетях (СНС) [3].

Семантическая сегментация изображений – это разделение изображения на отдельные группы пикселей, области, соответствующие одному классу объектов с одновременным определением типа объекта в каждой области. Задача семантической сегментации является высокоуровневой задачей обработки изображений, относящейся к группе задач так называемого слабого искусственного интеллекта. Она является более сложной, чем задача классификации изображений и детектирования объектов, так как необходимо не только определять классы объектов, но и правильно выделять их границы на изображении. В то же время задача семантической сегментации заметно отличается от обычной сегментации, когда области объединяются по принципу цветового или текстурного сходства. Объекты могут иметь существенно различающиеся по фотометрическим характеристикам элементы и иметь значительный разброс показателей объектов внутри одного класса [4].

Распознавание объектов – это задача нахождения данного объекта на изображении или видеопоследовательности. Любому объекту на изображении соответствуют различные характеристики, которые являются показательными особенностями объекта, описывающие свойства данного объекта. Эти характеристики получаются из обучающего множества для того, чтобы идентифицировать местоположение объекта, а из тестового множества – много других объектов [1]. Таким образом, цель обучения СНС – это определение характеристик объекта.

Методы сегментации изображения

Методы сегментации изображения делятся на методы разметки точек и выделения границ. Метод разметки точек делится, в свою очередь, на метод порогового ограничения по яркости и метод наращивания областей, причем в системах технического зрения наиболее распространен метод порогового ограничения. Алгоритмы сегментации также можно разделить исходя из их свойств на два типа [4]:

- основанные на базовом свойстве яркости: разрывности;
- основанные на базовом свойстве яркости: однородности.

В первом случае изображение разбивается на области на основании некоторого изменения яркости, такого как, например, перепады яркости на изображении. Во втором случае используется разбиение изображения по критериям однородности областей.

Примером первой категории может служить пороговая обработка или же пороговая классификация, а второй – выращивание областей, слияние и разбиение областей. Исследуется сегментация первого типа, а именно, пороговая обработка.

Методы пороговых ограничений (глобальные)

В глобальных методах сегментации происходит работа со всем изображением сразу. В ходе работы находится порог сегментации T , с помощью которого происходит деление на черное и белое, причем величина порога T остается неизменной в течение всего процесса сегментации. К пороговым методам сегментации относятся (рис. 1) [5]:

- сегментация с нижним порогом;
- сегментации с верхним порогом;
- сегментация с двойным ограничением;
- неполная пороговая обработка;
- многоуровневое пороговое преобразование.

Одним из наиболее простых методов преобразования изображения является сегментация с нижним порогом, в котором рассматривается лишь одно значение порога:

$$F'(m,n) = \begin{cases} 0, & F(m,n) \geq T, \\ 1, & F(m,n) < T, \end{cases} \quad (1)$$

где $F(m,n)$ – исходное изображение; m, n – размерность матрицы изображения; T – порог значений яркости изображения.

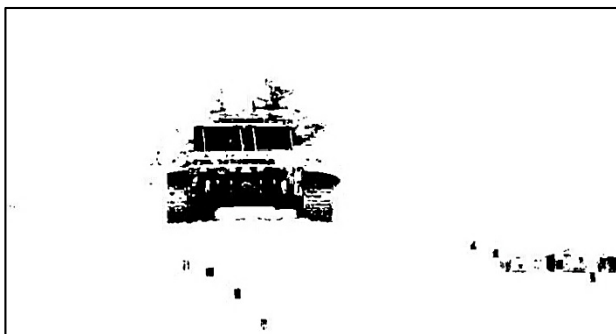
Если в приведенной выше формуле для точки изображения выполняется первое условие, то такая точка является точкой объекта, если же выполняется второе условие, то точка будет точкой фона (рис. 1).



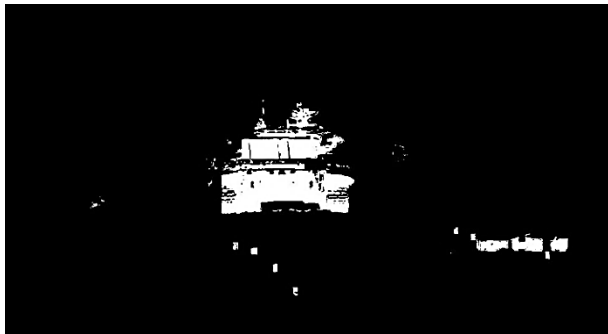
а)



б)



в)



г)



д)



е)

Рис. 1. Сегментация изображения на основе порогового метода:

- а – исходное изображение; б – сегментация изображения с нижним порогом ($T < 0,4$);
- в – сегментация изображения с верхним порогом ($T > 0,4$); г – сегментация изображения с двойным ограничением ($T \leq 0,4$ и $T > 0,2$); д – сегментация изображения неполной пороговой обработкой;
- е – сегментация изображения с многоуровневым пороговым преобразованием

В некоторых случаях можно использовать вариант метода сегментации с нижним порогом, в результате которого получается негатив исходного изображения. Такой метод называется сегментацией с верхним порогом и представляется формулой

$$F'(m,n) = \begin{cases} 0, F(m,n) < T, \\ 1, F(m,n) \geq T. \end{cases} \quad (2)$$

Если необходимо выделить определенные области, значения яркости пикселей в которых могут изменяться в определенном диапазоне, то применяется метод сегментации с двойным ограничением. Такой метод называется сегментацией с верхним порогом и представляется формулой

$$F'(m,n) = \begin{cases} 0, F(m,n) \leq T_1, \\ 1, T_1 < F(m,n) \leq T_2, \\ 0, F(m,n) > T_2, \end{cases} \quad (3)$$

где T_1, T_2 – первый и второй порог яркости изображения.

Если необходимо получить наиболее простое для дальнейшего анализа изображение, то стоит применить алгоритм неполной пороговой обработки, в ходе которого изображение лишается фона со всеми его деталями, которые были на исходном изображении. Формула неполной пороговой сегментации представлена ниже:

$$F'(m,n) = \begin{cases} F(m,n), F(m,n) > T, \\ 0, F(m,n) \leq T. \end{cases} \quad (4)$$

В случае, если необходимо получить изображение, которое содержит в себе сегменты, обладающие различной яркостью, можно применить метод многоуровневого порогового преобразования. Однако при этом полученное в ходе преобразования изображение уже не будет являться бинарным. Формула данного преобразования представлена ниже:

$$F'(m,n) = \begin{cases} 1, F(m,n) \in D_1, \\ 2, F(m,n) \in D_2, \\ \dots \\ n, F(m,n) \in D_n, \\ 0, \text{ в остальных случаях,} \end{cases} \quad (5)$$

где D_1, D_2 – некоторые области изображения.

Метод Оцу

С помощью данного метода вычисляется порог T , минимизирующий среднюю ошибку сегментации, т.е. среднюю ошибку от принятия решения о принадлежности пикселей изображения объекту или фону. Значения яркостей пикселей изображения можно рассматривать как случайные величины, а их гистограмму – как оценку плотности распределения вероятностей. Если плотности распределения вероятностей известны, то можно определить оптимальный (в смысле минимума ошибки) порог для сегментации изображения на два класса w_1 и w_2 (объекты и фон) [5].

Если допустить, что порог сегментации находится на уровне T , то относительные частоты для каждого из классов, на которые этот порог делит все точки изображения [7]:

$$w_1(T) = \sum_{i=1}^k p_i, \quad (6)$$

$$w_2(T) = \sum_{i=k+1}^L p_i, \quad (7)$$

$$\mu_1(T) = \sum_{i=1}^k \frac{i \times p_i}{w_1}, \quad (8)$$

$$\mu_2(T) = \sum_{i=k+1}^L \frac{i \times p_i}{w_2}, \quad (9)$$

где w_1 и w_2 – области объектов и фона соответственно; i – номер элемента матрицы изображения; p_i – значения гистограммы; k – количество элементов в первой или второй области (объект или фон); L – максимальное значение, которое может принять T ; μ_1 , μ_2 – средняя яркость всего изображения.

Дисперсия внутри каждого из классов равна

$$\sigma_1^2(T) = \sum_{i=1}^k [(i - \mu_1(T))^2] \frac{p_i}{w_1(T)}, \quad (10)$$

$$\sigma_2^2(T) = \sum_{i=k+1}^L [(i - \mu_2(T))^2] \frac{p_i}{w_2(T)}. \quad (11)$$

Дисперсия внутри классов может быть рассчитана как взвешенная сумма дисперсий каждого отдельного класса:

$$\sigma_w^2 = w_1(T)\sigma_1^2(T) + w_2(T)\sigma_2^2(T). \quad (12)$$

Дисперсия между двумя классами:

$$\sigma_b^2 = w_1(T)w_2(T)[\mu_1(T) - \mu_2(T)]^2. \quad (13)$$

Общая дисперсия всего изображения целиком:

$$\sigma_r^2 = \sigma_w^2 + \sigma_b^2. \quad (14)$$

Метод Оцу выбирает оптимальный порог T , с помощью вычисления максимизации между классом дисперсии:

$$T = \arg \left\{ \max_{0 \leq T \leq L-1} \{ \sigma_b^2(T) \} \right\} = \arg \left\{ \min_{0 \leq T \leq L-1} \{ \sigma_w^2(T) \} \right\}. \quad (15)$$

Достоинствами метода Оцу являются [6]:

- простота реализации;
- адаптация к различного рода изображениям, при помощи выбора оптимального порога;
- быстрое время выполнения.

На рис. 2 изображено преобразование исходного изображения (рис. 2,а) методом Оцу.



Рис. 2. Сегментация изображения методом Оцу:
а – исходное изображение; б – метод Оцу

Локальные (адаптивные) методы сегментации изображения

Одним из различных методов, основанных на анализе гистограмм, является локальная пороговая обработка, но он существенно отличается от глобального алгоритма, является более сложным и дает лучшие результаты [4]. Локальные (адаптивные) методы сегментации производят разбивку изображения на несколько областей, для каждой из которых необходимо вычислить порог, основываясь на информации об интенсивности пикселей [5].

Алгоритмы данного класса предполагают разбиение изображения на блоки определенного размера, при этом размер блока должен быть минимальным, но достаточным для сохранения исходных особенностей и деталей изображения. Однако при этом блоки должны быть настолько большими, чтобы шумы влияли на результат минимально. Функция сглаживания результирующего растра при адаптивной сегментации позволяет получить удовлетворительный результат без использования дополнительных фильтров [5].

Рассмотрим наиболее популярные адаптивные методы сегментации изображений:

- метод Ниблэка;
- метод Бернсена;
- метод Савола.

Метод Ниблэка принадлежит к семейству алгоритмов с адаптивным порогом и определяет пороговое значение T для каждого пикселя путем перемещения по всему изображению прямоугольного окна определенного размера.

Порог рассчитывается с помощью двух параметров – локального среднего значения m и стандартного отклонения S . Данные параметры в свою очередь рассчитываются индивидуально для каждого пикселя в пределах его окна. Для расчета локального порога используется следующая формула [8]:

$$T_i = m + k \cdot S, i = 1, 2, \dots, l,$$

где m – среднее значение яркости пикселей в пределах локального окна; k – заранее подобранный коэффициент, определяющий значимость стандартного отклонения (рис. 3); l – количество локальных порогов на изображении; S – стандартное отклонение, которое может быть выражено как

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - m)^2}, \quad (16)$$

где p_i – значение яркости i -го пикселя в локальном окне; N – количество пикселей внутри окна.

Среднее значение m в точке $I(x, y)$ может быть рассчитано по формуле

$$m(x, y) = \frac{1}{(2w_x + 1)(2w_y + 1)} \sum_{i=-w_x}^{w_x} \sum_{j=-w_y}^{w_y} I(x + i, y + j), \quad (17)$$

где w_x и w_y – расстояние от центрального пикселя в окне до его левого и верхнего краев соответственно; x, y – координаты пикселя на изображении; i, j – значения координат пикселя при движении окна по изображению.

Метод Ниблэка выбирает оптимальный порог $T_{\text{опт}}$ с помощью вычисления минимизации между T_i :

$$T_{\text{опт}} = \arg \left\{ \min_{i=1 \rightarrow l} \{T_i\} \right\}. \quad (18)$$

Огромным достоинством данного метода является его способность корректно обрабатывать изображения, на которых присутствует плавное изменение освещения, что достигается благодаря использованию адаптивного порога [8] (рис. 3).

Метод Бернсена предполагает деление всего изображения на квадраты размером $r \times r$, имеющие центр в точке (m, n) [5]. Для каждого пикселя изображения в пределах квадрата используется порог, имеющий значение по следующей формуле [8]:

$$T(m, n) = \frac{j_{\text{наим}} + j_{\text{наиб}}}{2}, \quad (19)$$

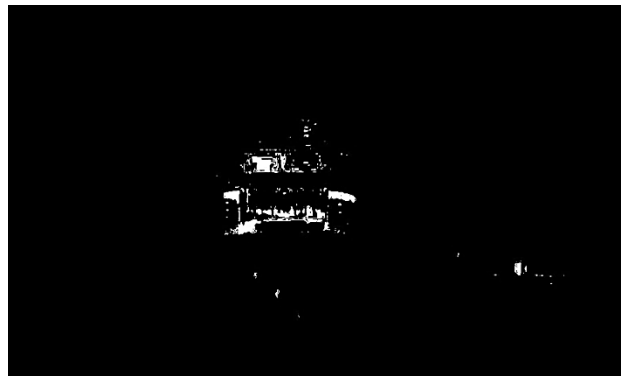
где $j_{\text{наим}}$, $j_{\text{наиб}}$ – являются наименьшим и наибольшим уровнем яркости в квадрате

$$G(m, n) = (j_{\text{наиб}} - j_{\text{наим}}) \leq \varepsilon, \quad (20)$$

где ε – заданная пороговая величина, то исследуемый квадрат содержит объекты только одного класса: объектов или фона.



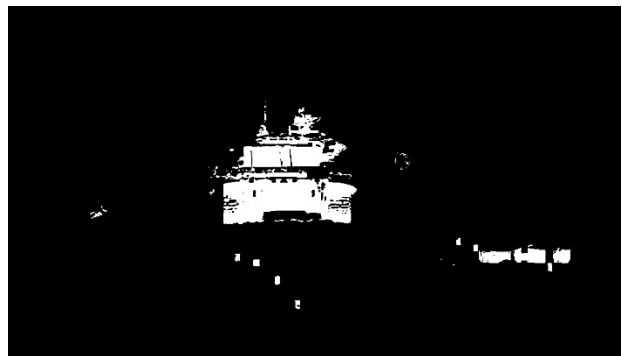
а)



б)



в)



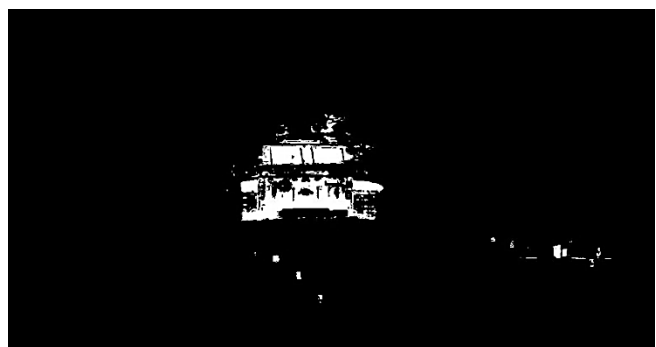
г)

Рис. 3 Сегментация изображения методом Ниблэка:
 а – исходное изображение; б – $k = -0,2$; в – $k = 3$; г – $k = 8$

К недостаткам данного метода можно отнести большую зашумленность фоновых участков, а также невозможность применения интегральных изображений, поскольку при расчете порогового значения T не используется среднее значение пикселей в пределах окна, что в свою очередь приводит к повышению вычислительной сложности. Пример работы метода Бернсена приведен на рис. 4.



а)



б)

Рис. 4. Сегментация изображения методом Бернсена:
 а – исходное изображение; б – $\epsilon = 0,1$

Метод Савола является модификацией метода Ниблэка. Как и метод Ниблэка, он использует локальное пороговое значение, которое вычисляется с использованием среднего значения $m(x, y)$ и стандартного отклонения $S(x, y)$ значений интенсивности каждого пикселя в пределах окна размером $w \times w$, центрированного вокруг пикселя (x, y) . Расчет порогового значения $T(x, y)$ выполняется по следующей формуле [8]:

$$T_i(x, y) = m(x, y) \left[1 + k \left(\frac{S(x, y)}{R} - 1 \right) \right], i = 1, 2 \dots l,$$

где R – максимально возможное значение стандартного отклонения ($R = 128$ для черно-белого изображения), а k – параметр, который принимает положительное значение из диапазона $[0; 0,5]$. Пример работы метода Савола приведен на рис. 5.



Рис. 5. Сегментация изображения методом Савола:
а – исходное изображение; б – $k = 0,15$

Сегментация изображений с помощью усовершенствованной сверточной нейронной сети

Алгоритмы автоматического анализа сигналов постепенно внедряются во всевозможные области человеческой деятельности. Большинство существующих алгоритмов используют машинное обучение. В приложениях для распознавания объектов данный метод находит применение для автоматизации процесса сегментации изображений, что особенно актуально при больших объемах данных и сложности ручной сегментации самих данных, как и с предыдущими методами [9]. Поэтому перечисленные методы используются все реже. Их вытесняют глобальное распространение нейросетевых технологий и машинное обучение, поддерживаемое вычислительными мощностями графических процессоров [9].

Архитектура сверточной нейронной сети

В области сегментации нейронная сеть состоит из двух частей – сверточной и разверточной. Сверточная часть преобразует входное изображение в многомерное представление признаков, т.е. она выполняет функцию извлечения признаков. Разверточная сеть играет роль генератора, который создает сегментированное изображение на основе признаков, полученных от сверточной сети.

Первая часть сети состоит из пяти сверточных слоев с наборами фильтров (28, 13, 7, 7, 7). Применяется инструмент «ПН – пакетная нормализация». В качестве активационных функций используется Relu, Softmax. Далее следуют слои субдискретизации (max pooling) с окном 2×2 и 3×3 . Проходя через этот слой, изображение уменьшается почти в два раза. Вторая часть сети является зеркальным отражением первой. Размер изображения необходимо восстановить до исходного и сформировать карту вероятностей, основываясь на признаках входного изображения. С этой целью применяются слои повышающей дискретизации (upsampling-слои) в комбинации со сверточными слоями. Усовершенствованная нейронная сеть имеет 10 сверточных слоев (рис. 6).

Обучение сверточной нейронной сети

Для обучения нейронной сети были использованы реальные изображения (jeep и tank). Данный набор состоит из 63 изображений в формате jpeg. Использовался один критерий качества сегментации, который вычисляется по размеченной тестовой выборке: точность. Точность – это доля корректно распознанных пикселей тестовой выборки. Данные об обучении представлены на рис. 7 и 8. На рис. 9 показан разработанный алгоритм обучения СНС.

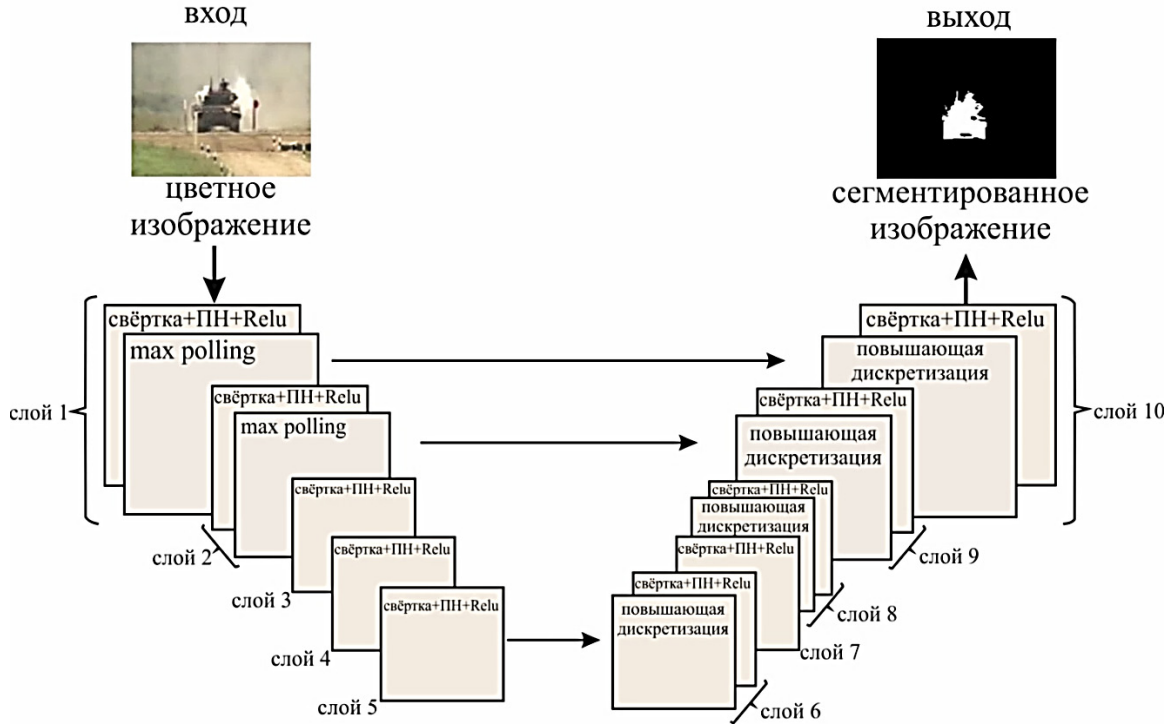


Рис. 6. Разработанная архитектура СНС для сегментации изображения

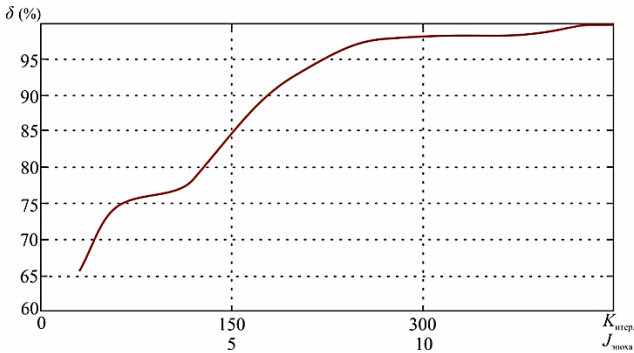


Рис. 7. Зависимость точности обучения СНС (δ) от итерации ($K_{итер.}$) и эпохи ($J_{эпоха}$)

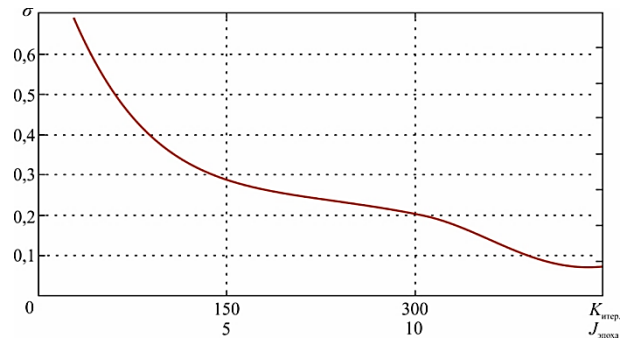


Рис. 8. Зависимость ошибки обучения СНС (σ) от итерации ($K_{итер.}$) и эпохи ($J_{эпоха}$)

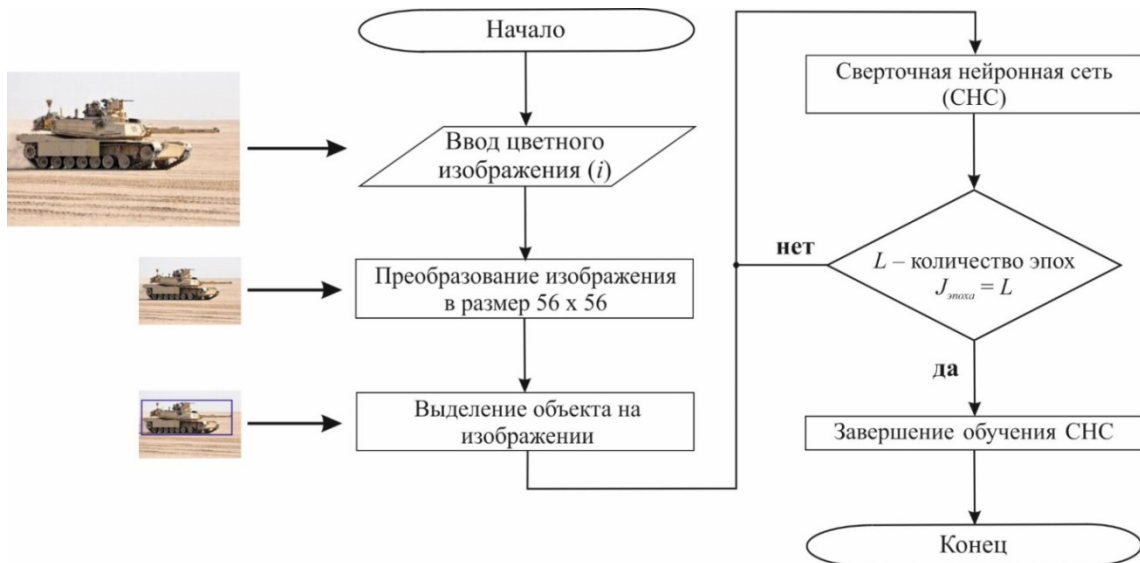


Рис. 9. Разработанный алгоритм обучения СНС

Результаты

Различные ручные методы (пороговые и адаптивные) сегментаций изображений имеют свои слабые места. Так, например, метод Оцу может приводить к утрате мелких деталей, а метод Ниблэка – появлением ложных объектов в случае неоднородностей фона с низкой контрастностью. Из этого можно сделать вывод, что каждый из рассмотренных методов должен быть применен в определенной области. Кроме того, эти методы требуют введения настроенных коэффициентов для каждого кадра пользователем таким образом, чтобы качество сегментации изображений из видеопоследовательности (когда кадры с изображением цели отличаются друг от друга яркостью, размером, ракурсом цели, масштабом, сдвигом и поворотом изображения) было низким (рис. 10).

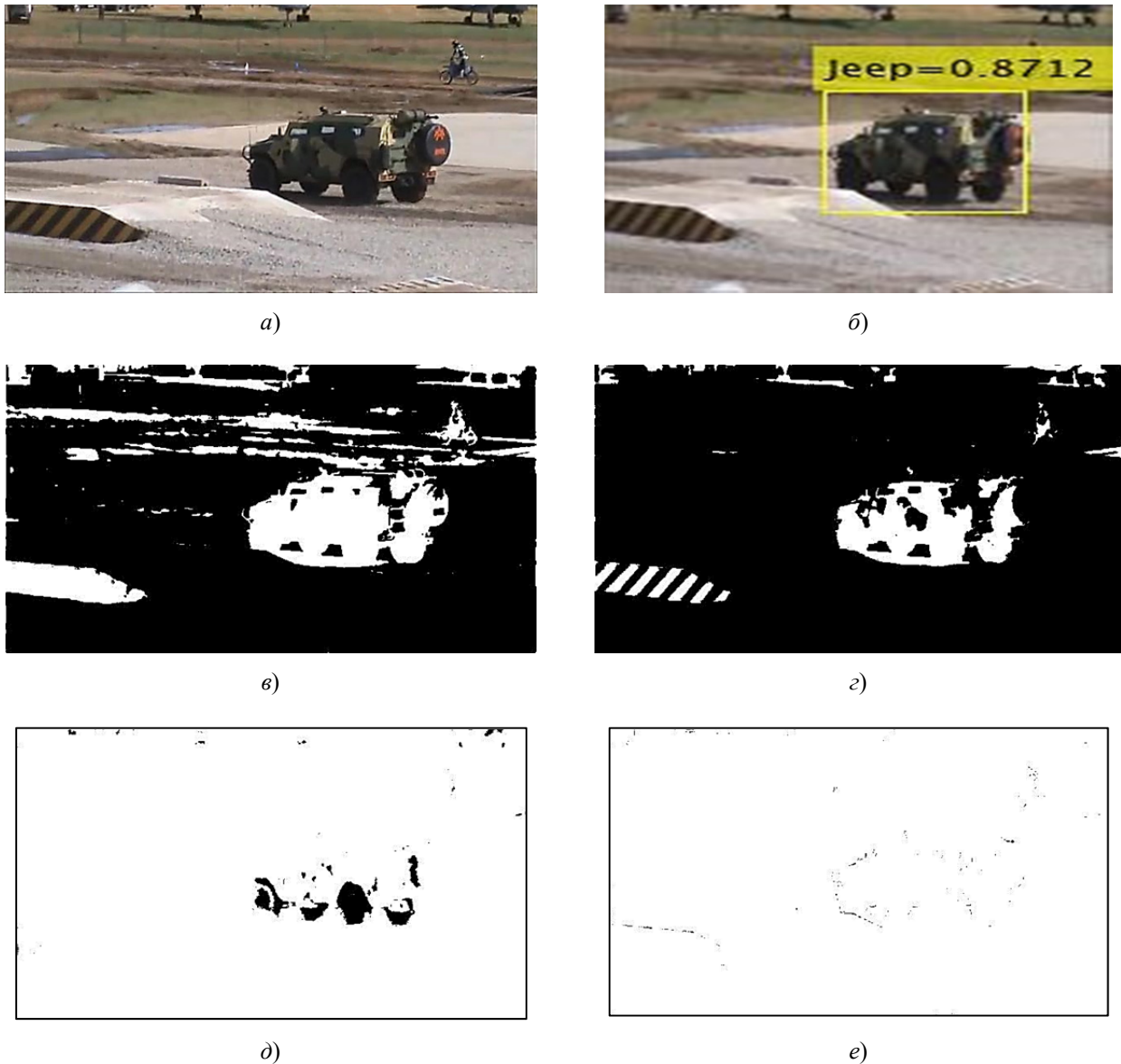


Рис. 10. Сравнительная оценка существующих методов с разработанным алгоритмом для сегментации изображений:

- a* – исходное изображение; *б* – сегментация изображения и распознавание объекта с помощью СНС;
- в* – сегментация изображения методом Бернсена; *г* – сегментация изображения методом Ниблэка;
- д* – сегментация изображения методом Оцу; *е* – сегментация изображения методом Савола

После завершения обучения СНС можно подойти к задачам сегментации кадров (изображений), принимающих из видеопоследовательности содержание цели (jeep или tank). Программное обеспечение, реализованное в Matlab с помощью СНС, выполняет действия сегментации и распознавания без запроса пользователя и полностью автоматически [10, 11].

Список литературы

1. Минченков М. В., Хельвас А. В., Юрин Д. В. Алгоритм автоматической сегментации изображений для систем технического зрения // *Обработка информации и моделирование* : сб. тр. М. : МФТИ, 2002.
2. Ramadevi Y., Sridevi T., Poornima B., Kalyani B. Сегментация изображения и распознавания объектов на основе технологии выделения контуров / пер. с англ. Е. В. Витковской // *Международный журнал компьютерных наук и информационных технологий*. 2010. Т. 2, № 6.
3. Каздорф С. Я., Першина Ж. С. Алгоритм семантической сегментации трехмерных сцен. Новосибирск : Новосибир. гос. техн. ун-т, 2019.
4. Горбачев В. А., Криворотов И. А., Маркелов А. О., Котлярова Е. В. Семантическая сегментация спутниковых снимков аэропортов с помощью сверточных нейронных сетей М. : Компьютерная оптика. 2020. Вып. 44 (4).
5. Патент RU 2349864 С2 Российская Федерация. Нашлемная разведывательная система пассивного дальнометрирования объектов / Пархоменко В. А., Устинов Е. М., Бестужев Л. В. [и др.]. № 2007103759/02 ; заявл. 31.01.2007 ; опубл. 20.03.2009.
6. Исрафилов Х. С. Исследование методов сегментации изображений // *Вестник науки и образования*. 2017. № 6. Т. 2.
7. Тужилкин А. С. Разработка и исследование алгоритма поиска положения особых точек в системах технического зрения летательных аппаратов // *Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей»*. 2018. № 1.
8. Канищев Д. С. Автоматическая сегментация речи методами кластеризации и с применением метода Оцу. Киров : Вятский государственный университет, 2019.
9. Приставка П. А. Рыбаков М. С. Исследование алгоритмов бинаризации в задачах машинного распознавания оптических меток : магистер. дис. Новосибирск : СибГУТИ, 2019.
10. Доррер Г. А., Корякин М. С. Семантическая сегментация изображений с применением сверточных нейронных сетей // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2017. Т. 2, № 13. С. 141–143.
11. Соболев Б. В., Соловьев А. Н., Васильев П. В., Подколзина Л. А. Модель глубокой сверточной нейронной сети в задаче сегментации трещин на изображениях асфальта // *Вестник Донского государственного технического университета*. 2019. Т. 19, № 1. С. 63–73.

References

1. Minchenkov M.V., Khel'vas A.V., Yurin D.V. Algorithm of automatic image segmentation for technical vision systems. *Obrabotka informatsii i modelirovaniye: sb. tr. = Information processing and modeling : proceedings collection*. Moscow: MFTI, 2002. (In Russ.)
2. Ramadevi Y., Sridevi T., Poornima B., Kalyani B. Image segmentation and object recognition based on contour selection technology; transl. from Engl. by E.V. Vitkovskaya. *Mezhdunarodnyy zhurnal komp'yuternykh nauk i informatsionnykh tekhnologiy = International Journal of Computer Science and Information Technology*. 2010;2(6). (In Russ.)
3. Kazdorf S.Ya., Pershina Zh.S. *Algoritm semanticheskoy segmentatsii trekhmernykh stsen = Algorithm of semantic segmentation of three-dimensional scenes*. Novosibirsk: Novosib. gos. tekhn. un-t, 2019. (In Russ.)
4. Gorbachev V.A., Krivorotov I.A., Markelov A.O., Kotlyarova E.V. *Semanticheskaya segmentatsiya sputnikovyykh snimkov aeroportov s pomoshch'yu svertochnykh neyronnykh setey = Semantic segmentation of satellite images of airports using convolutional neural networks*. Moscow: Komp'yuternaya optika. 2020;44(4). (In Russ.)
5. Patent RU 2349864 C2 Russian Federation. Helmet-mounted reconnaissance system of passive object ranging. Parkhomenko V.A., Ustinov E.M., Bestuzhev L.V. [et al.]. No. 2007103759/02; appl. 31.01.2007; publ. 20.03.2009. (In Russ.)
6. Israfilov Kh.S. Investigation of image segmentation methods. *Vestnik nauki i obrazovaniya = Bulletin of Science and Education*. 2017;2(6). (In Russ.)
7. Tuzhilkin A.S. Development and research of an algorithm for finding the position of singular points in aircraft vision systems. *Vestnik Koncerna VKO «Almaz-Antey» = Bulletin of the Concern of East Kazakhstan Region "Almaz-Antey"*. 2018;(1). (In Russ.)
8. Kanishchev D.S. *Avtomaticheskaya segmentatsiya rechi metodami klasterizatsii i s primeneniem metoda Otsu = Automatic segmentation of speech by clustering methods and using the Otsu method*. Kirov: Vyatskiy gosudarstvennyy universitet, 2019. (In Russ.)
9. Pristavka P.A. Rybakov M.S. *Issledovanie algoritmov binarizatsii v zadachakh mashinnogo raspoznavaniya opticheskikh metok: magister. dis. = Research of binarization algorithms in problems of machine recognition of optical labels : master's thesis*. Novosibirsk: SibGUTI, 2019. (In Russ.)
10. Dorrer G.A., Koryukin M.S. Semantic segmentation of images using convolutional neural networks. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики = Actual problems of aviation and cosmonautics*. 2017;2(13):141–143. (In Russ.)
11. Sobol' B.V., Solov'ev A.N., Vasil'ev P.V., Podkolzina L.A. Deep convolutional neural network model in the problem of crack segmentation on asphalt images. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Don State Technical University*. 2019;19(1):63–73. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Анатолий Иванович Годунов

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры автоматики и телемеханики,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: Godunov@pnzgu.ru

Сергей Товмасович Баламян

кандидат технических наук, доцент,
докторант кафедры авиационного вооружения
и эффективности боевого применения,
Военно-воздушная академия
имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина
(Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А)
E-mail: bst76@yandex.ru

Павел Сергеевич Егоров

адъюнкт кафедры авиационного вооружения
и эффективности боевого применения,
Военно-воздушная академия
имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина
(Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А)
E-mail: ahtuba.egor@mail.ru.

Anatoly I. Godunov

Doctor of technical sciences, professor,
professor of sub-department
of automatics and telemechanics,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Sergey T. Balanyan

Candidate of technical sciences, associate professor,
doctoral candidate of sub-department
of aviation armament and effectiveness of combat use,
Air Force Academy named after professor
N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin
(54A Starykh Bol'shevikov street, Voronezh, Russia)

Pavel S. Egorov

Adjunct of sub-department
of aviation armament and effectiveness of combat use,
Air Force Academy named after professor
N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin
(54A Starykh Bol'shevikov street, Voronezh, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 21.06.2021

Поступила после рецензирования/Revised 10.08.2021

Принята к публикации/Accepted 24.09.2021

ВЗАИМОСВЯЗЬ ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ И ТОЧНОСТИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Э. И. Цветков¹, А. М. Панкин²

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

¹ iit@eltech.ru, ² alpank@niti.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* При решении задач технической диагностики используется экспериментальная информация, которая получена с той или иной точностью, определяемой измерительной аппаратурой. Для оценки технического состояния контролируемого объекта необходимо по результатам измерений выполнить идентификацию тех структурных параметров объекта, которые определены как его диагностические признаки. *Материалы и методы.* Значения этих параметров будут найдены с некоторой неопределенностью, связанной с точностью результатов прямых измерений. В статье рассмотрена зависимость достоверности результатов технического диагностирования от точности результатов прямых измерений. Используемое уравнение диагностики представляет последовательность элементарных диагностических преобразований. *Результаты и выводы.* Приведены исходные соотношения для оценивания вероятности правильного диагностирования и вероятностей ошибок первого и второго рода.

Ключевые слова: технический объект, контроль, диагностирование, техническое состояние, диагностический признак, метрология, идентификация, точность

Для цитирования: Цветков Э. И., Панкин А. М. Взаимосвязь достоверности результатов технической диагностики и точности диагностических измерений // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 3. С. 74–79. doi:10.21685/2307-4205-2021-3-9

INTERRELATION BETWEEN THE CERTAINTY OF TECHNICAL DIAGNOSTICS RESULTS AND THE ACCURACY OF DIAGNOSTIC MEASUREMENTS

E.I. Tsvetkov¹, A.M. Pankin²

¹ Saint Petersburg State Electrotechnical University, St. Petersburg, Russia

² Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

¹ iit@eltech.ru, ² alpank@niti.ru

Abstract. *Background.* When solving problems of technical diagnostics, experimental information is used, which is obtained with one or another accuracy, determined by the measuring equipment. To assess the technical condition of the controlled object, it is necessary, based on the measurement results, to identify those structural parameters of the object that are defined as its diagnostic features. *Materials and methods.* The values of these parameters will be found with some uncertainty associated with the accuracy of the results of direct measurements. The article discusses the dependence of the reliability of the results of technical diagnostics on the accuracy of the results of direct measurements. The used diagnostic equation represents a sequence of elementary diagnostic transformations. *Results and conclusions.* The initial relations for estimating the probability of correct diagnosis and the probabilities of errors of the first and second kind are given.

Keywords: technical object, control, diagnostics, technical condition, diagnostic feature, metrology, identification, accuracy

For citation: Tsvetkov E.I., Pankin A.M. Interrelation between the certainty of technical diagnostics results and the accuracy of diagnostic measurements. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;(3):74–79. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-3-9

Одной из задач технической диагностики является контроль технического состояния диагностируемых объектов. По результатам решения этой задачи объект может быть признан технически

исправным (работоспособным) или неисправным. Во втором случае можно перейти к задаче поиска неисправности (дефекта).

Таким образом, техническое диагностирование – частный случай идентификации объекта. В работе [1] представлены теоретические основы идентификации объектов (отношений) в виде обобщения положений метрологии величин.

Идентификация объекта – установление его вида (имени), идентификация отношения – установление вида (имени) взаимосвязи между объектами. Идентификация объекта выполняется с использованием вспомогательных (диагностических) измерений величин, выступающих в роли идентификационных (диагностических) признаков.

Цель формирования обобщенной метрологии заключается в использовании методов метрологии величин по описанию точности получаемых результатов и процедур верификации алгоритмов и средств измерений (обеспечение единства измерений) применительно к идентификации. Как и в метрологии величин, основу описания, метрологического анализа (МА) и метрологического синтеза результатов идентификации объектов и отношений составляет множество возможных результатов (имен), которое формирует шкалу. При идентификации объекта шкала формируется в виде совокупности знаков (имен), а при идентификации отношения – в виде совокупности соответствующих характеристик. В первом случае формируется шкала наименований, а во втором – шкала отношений. Результат идентификации объекта – знак (имя) A , а результат идентификации отношения, в котором A_i находится в A_s , – характеристика $\varphi(A_i, A_s)$.

Из вышеизложенного следует, что при рассмотрении задач идентификации объектов и отношений приходится иметь дело со следующими множествами: \vec{M}_A – множество объектов (эмпирическая система), имена и отношения между которыми идентифицируются; $\{A_i\}_{i=1}^I$ – множество идентификаторов (знаков), представляющее множество \vec{M}_A (отображение множества \vec{M}_A), т.е. множество возможных результатов идентификации объектов; $\{\Delta A_{ijs}^*\}_{is=1}^I$ – множество элементов, представляющих погрешности результатов идентификации (ΔA_{ijs}^* – погрешность результата идентификации A_i объекта A_s); $\vec{\Phi}$ – множество отношений, возможных на $\{A_i\}_{i=1}^I$; $\{\varphi(A_i, A_s)\}_{i,s \in 1, \dots, I}$ – множество установленных отношений на $\vec{\Phi}$ (множество возможных результатов идентификации отношений); $\{\Delta \varphi^*(A_i, A_s)\}_{i,s \in 1, \dots, I}$ – множество погрешностей результатов идентификации отношения φ .

Развиваемый подход основан на гипотезе, что \vec{M}_A , $\{A_i\}_{i=1}^I$, $\vec{\Phi}$ и $\{\varphi(A_i, A_s)\}_{i,s \in 1, \dots, I}$ заданы в виде, обеспечивающем возможность выполнения идентификации объектов и отношений.

Уравнение идентификации

Процедура идентификации включает в себя несколько этапов: формирование массива $\{T_{pj}^*\}_{p=1}^P$ промежуточных результатов, несущих информацию о свойствах предмета (объекта, отношения) идентификации O_j , характеризующих его объектах и отношениях $\{O_{ij}^*\}$, и установление (выбор) знака, представляющего предмет идентификации в данном (j -м) идентификационном эксперименте – $R_{ид}(\cdot)$. Полагая, что $T_{pj}^* = L_p \gamma_{pj}$ (γ_{pj} – входное воздействие, используемое для формирования T_{pj}^* , а L_p – оператор, представляющий процедуру формирования промежуточного результата T_{pj}^*) и $O_{ij}^* = R_{ид}^1(l_{ij})$, приходим к следующему виду операторного уравнения идентификации:

$$O_j^* = R_{ид}(\{R_{ид}^1(l_{ij})\}_{r=1}^R, \{L_p \gamma_{pj}\}_{p=1}^P).$$

Особую роль при идентификации играют отношения эквивалентности и порядка.

Отношение эквивалентности для элементов множеств можно рассматривать как обобщение отношения равенства для чисел.

Отношение порядка для пары A_i, A_s будет представляться кортежем (A_i, A_s) , если A_i предшествует A_s , и кортежем (A_s, A_i) , если A_i следует за A_s . Отношение порядка – обобщение числового отношения «больше» или «меньше».

Результат идентификации (объекта, отношения) представляется именем предмета идентификации, определяемым по совокупности промежуточных результатов $\{T_{pj}^*\}_{p=1}^P$ и $\{O_{rj}^*\}_{r=1}^R$. В уравнении эта операция представляется оператором $R_{ид}(\cdot)$.

Вышеприведенное уравнение может быть представлено в следующем виде:

$$O_j^* \in O_i \rightarrow O_j^* \longleftrightarrow O_i,$$

где O_i – i -я область возможных значений промежуточных результатов; O_i – конечный результат, соответствующий $O_j^* \in O_i$.

Так, при диагностировании исправности (неисправности) объекта C по двум признакам – α и β с использованием условия $\alpha^* > \alpha_n \wedge \beta^* < \beta_n \rightarrow C^* \longleftrightarrow [C_u]$ (C_u – исправный объект) $[C_u]$ – область возможных значений α и β , удовлетворяющих данному условию.

Описание погрешностей идентификации

Определение погрешности результата идентификации представляется следующим соотношением:

$$O_{ijs}^* \longleftrightarrow O_j \rightarrow \Delta O_{ijs}^* = 0 \vee O_{ijs}^* \overset{\times}{\longleftrightarrow} O_j \rightarrow \Delta O_{ijs}^* \neq 0.$$

Соответственно, для оценок погрешностей справедливо:

$$O_{ijs}^* \longleftrightarrow O_{dj} \rightarrow \Delta O_{ijs}^* = 0 \vee O_{ijs}^* \overset{\times}{\longleftrightarrow} O_{dj} \rightarrow \Delta O_{ijs}^* \neq 0,$$

где O_{dj} – действительный предмет идентификации.

Принципиальное отличие свойств погрешностей результатов идентификации объектов и отношений от свойств погрешностей результатов измерений величин заключается в том, что в силу конечности числа элементов $\{O_i\}_{i=1}^I$ погрешности могут быть равны нулю. Этим определяется описание свойств погрешностей $\{\Delta O_{ijs}^*\}_{is}$ вероятностью их равенства нулю $p[\Delta O_{ijs}^* = 0]$. Соответственно, справедливо $p[\Delta O_{ijs}^* = 0] = 1 - p[\Delta O_{ijs}^* \neq 0]$. Это означает, что для элементов множества $\{\Delta O_{ijs}^*\}_{is}$ могут быть определены вероятности их появления, в свою очередь составляющие множество $\{p[\Delta O_{ijs}^*]\}_{is}$, элементы которого представляют эти вероятности. Вероятности $p[\Delta O_{ijs}^*]$ определяются свойствами входных воздействий, промежуточных результатов $\{T_{pj}^*\}_{p=1}^P$ и $\{O_{rj}^*\}_{r=1}^R$ и способом их использования (видом оператора $R_{ид}(\cdot)$).

Установление элементов множества $\{p[\Delta O_{ijs}^*]\}_{is}$ требует знания условных плотностей $\{w(\{O_{rj}^*\}_{r=1}^R, \{T_{pj}^*\}_{p=1}^P / O_i)\}_{i=1}^I$ и областей $\{O_i\}_{i=1}^I$.

Бинарный характер погрешностей не позволяет разделить их на систематические и случайные, а также стабильные и нестабильные.

Метрологический анализ результатов идентификации

При выполнении расчетного МА необходимо располагать априорными знаниями, включающими в себя характеристику связи идентифицируемого предмета с входными воздействиями $O_j = F(\{Y_{pj}\}_{p=1}^P)$, модели входных воздействий $\{MM_{\gamma p}\}_{p=1}^P$, модель условий идентификации MM_y , уравнение идентификации объекта $O_j^* = R_{ид}(\{O_{rj}^*\}_{r=1}^R, \{L_p Y_{pj}\}_{p=1}^P)$, модели модулей, реализующих составляющие процедуру идентификации элементарные преобразования $\{MM_{ид i}\}_{i=1}^I$.

Процедура МА с использованием расчетов предполагает вывод аналитически расчетных соотношений, обеспечивающих возможность получения количественных оценок вероятностей погрешностей $\{p[\Delta A_{ijs}^*]\}_{s=1}^l$.

Состав априорных знаний (АЗ), необходимых для выполнения МА на основе имитационного моделирования (ИМ), аналогичен составу АЗ, необходимому для выполнения МА на основе расчета.

Процедура МА на основе ИМ сводится к воспроизведению входных воздействий и идентификационных преобразований, а также сопоставлению полученных результатов с действительными объектами (при идентификации объектов) или с действительными отношениями (при идентификации отношений).

Эталонные средства, используемые при метрологическом анализе результатов и средств идентификации объектов и отношений, обеспечивают формирование результатов существенно более точных, чем результаты рабочей идентификации. Более точными при этом полагаются результаты, характеризующиеся меньшей вероятностью появления погрешностей.

При экспериментальном МА результатов состав АЗ представляется множеством идентифицируемых объектов $\{O_i\}_{i=1}^l$, моделей входных воздействий $\{MM_p\}_{p=1}^p$ и моделью условий идентификации MM_y .

Возможно использование эталонного средства в виде известного предмета идентификации или в виде прецизионного средства идентификации.

Поскольку техническая диагностика предполагает использование результатов диагностических измерений величин, выступающих в роли диагностических признаков объекта, то должна существовать взаимосвязь между точностью измерений и эффективностью диагностирования. Последняя величина определяется либо вероятностью правильного диагностирования ($P[O_{ijs}^* \longleftrightarrow O_j]$), либо вероятностью ошибки при диагностировании ($P[O_{ijs}^* \overset{\times}{\longleftrightarrow} O_j]$).

Для иллюстрации этого и последующих случаев на рис. 1 представлена эквивалентная схема замещения простой резистивной цепи с источником постоянного напряжения U [2].

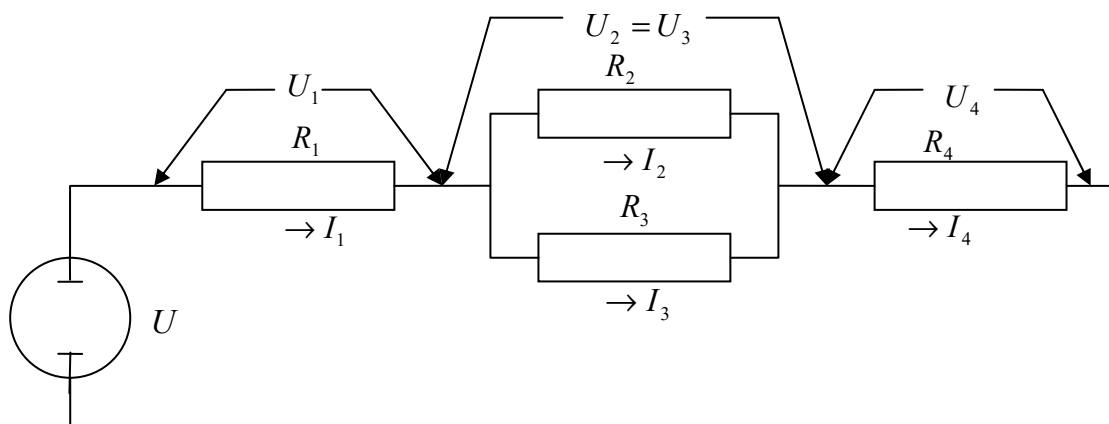


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения (СЗ) диагностируемой резистивной цепи

Предположим, что для объекта диагностирования в виде электрической цепи, представленной такой схемой замещения, диагностическим признаком является значение тока I_1 , текущего через резистор R_1 . Это значение не должно во всех случаях превышать значения I_1^{\max} , определяемого максимальной допустимой мощностью, выделяемой в этом резисторе. Нижняя граница тока I_1 с точки зрения его физической природы допускается равной 0. Однако если этот резистор несет некоторую функциональную нагрузку, то в нем должна выделяться определенная мощность, нижняя граница которой и определяет допустимые значения тока I_1^{\min} . Таким образом, для исправного элемента выполняется условие $I_1 \in [I_1^{\min}, I_1^{\max}]$, а для неисправного – $I_1 \notin [I_1^{\min}, I_1^{\max}]$. Следовательно, уравнение идентификации в данном случае может быть представлено следующим образом:

$$A3 = (C3, R_1, R_2, R_3, R_4, LI) \rightarrow I_1^* = LI \rightarrow (I_1^* \in [I_1^{\min}, I_1^{\max}] \rightarrow C3^* \longleftrightarrow C3и \vee I_1^* \notin [I_1^{\min}, I_1^{\max}] \rightarrow C3^* \longleftrightarrow C3ни,$$

где $C3^*$ – результат идентификации; $C3и$ – исправная схема замещения; $C3ни$ – неисправная схема замещения, $L(.)$ – оператор, представляющий процедуру измерения силы тока.

В данном случае множество идентифицируемых объектов составляется исправной и неисправной схемами замещения, а соответствующее множество идентификаторов – двумя символами $C3и$ и $C3ни$, которые и составляют шкалу идентификации.

Определение погрешностей производится с помощью соотношений

$$(I_1 \in [I_1^{\min}, I_1^{\max}] \wedge I_1^* \in [I_1^{\min}, I_1^{\max}] \rightarrow \Delta C3^* = 0) \vee (I_1 \in [I_1^{\min}, I_1^{\max}] \wedge I_1^* \notin [I_1^{\min}, I_1^{\max}] \rightarrow \Delta C3^* \neq 0) \vee \vee (I_1 \notin [I_1^{\min}, I_1^{\max}] \wedge I_1^* \notin [I_1^{\min}, I_1^{\max}] \rightarrow \Delta C3^* = 0) \vee (I_1 \notin [I_1^{\min}, I_1^{\max}] \wedge I_1^* \in [I_1^{\min}, I_1^{\max}] \rightarrow \Delta C3^* \neq 0).$$

Очевидно, что эффективность (качество) диагностирования определяется долей правильных решений, когда погрешность диагностирования равна нулю ($\Delta O_{ijs}^* = 0$). В общем случае оператор $R_{ид}(\cdot)$ можно представить следующим образом:

$$O_j^* = R_{ид}(\{O_{rj}^*\}_{r=1}^R, \{L_p \gamma_{pj}\}_{p=1}^P) \leftrightarrow R_{ид}(\{C_i\}_{i=1}^I) = (\{C_i\}_{i=1}^I \in C_m \rightarrow O_j^* \longleftrightarrow O_m).$$

Применение уравнения идентификации данного вида позволяет формировать количественные оценки правильных (неправильных) решений. Именно вероятность правильного диагностирования определяется соотношением

$$P[\Delta O_j^* = 0] = P[R_{ид}(\{C_i\}_{i=1}^I) \longleftrightarrow O_j].$$

Использование данного выражения предполагает наличие сведения о виде $w(\{C_i\}_{i=1}^I)$.

Применительно к рассматриваемому примеру соответствующая информация представляется в виде распределения плотности вероятности $w(\Delta I_{1j}^*)$. Соотношения $\Delta I_{1j}^* = I_{1j}^* - I_{1j}$ и $w(\Delta I_{1j}^*)$ позволяют установить условные распределения $w(I_{1j} / I_{1j}^*)$ и $w(I_{1j}^* / I_{1j})$, с помощью которых определяют такие характеристики эффективности диагностики, как условная вероятность принадлежности I_{1j} интервалу $[I_1^{\min}, I_1^{\max}]$

$$P[I_{1j} \in [I_1^{\min}, I_1^{\max}] / I_{1j}^*] = \int_{I_1^{\min}}^{I_1^{\max}} w(I_{1j} / I_{1j}^*) d(I_{1j}),$$

а также условную вероятность ошибки первого рода

$$P[I_{1j} \in [I_1^{\min}, I_1^{\max}] / I_{1j}^* \notin [I_1^{\min}, I_1^{\max}]] = 1 - \int_{I_1^{\min}}^{I_1^{\max}} w(I_{1j} / I_{1j}^* \notin [I_1^{\min}, I_1^{\max}]) d(I_{1j})$$

и условную вероятность ошибки второго рода

$$P[I_{1j}^* \in [I_1^{\min}, I_1^{\max}] / I_{1j} \notin [I_1^{\min}, I_1^{\max}]] = \int_{I_1^{\min}}^{I_1^{\max}} w(I_{1j}^* / I_{1j} \notin [I_1^{\min}, I_1^{\max}]) d(I_{1j}^*).$$

Заключение

Предложенный подход к установлению достоверности результатов диагностирования предполагает использование сведений о свойствах промежуточных результатов измерений и идентификацию характеристик, называемых в технической диагностике диагностическими признаками. Повышение точности определения этих величин повышает точность диагноза при контроле технического состояния объекта в момент проведения диагностических измерений и точность прогноза при оценке его остаточного ресурса.

Список литературы

1. Цветков Э. И. Метрология. Модели. Метрологический анализ. Метрологический синтез. СПб. : Изд-во СПб ГЭТУ, 2014.
2. Панкин А. М. Введение в теорию диагностирования электротехнических систем. СПб. : Изд-во Политехнического университета, 2012.

References

1. Tsvetkov E.I. *Metrologiya. Modeli. Metrologicheskii analiz. Metrologicheskii sintez = Models. Metrological analysis. Metrological synthesis.* Saint Petersburg: Izd-vo SPb GETU, 2014. (In Russ.)
2. Pankin A.M. *Vvedenie v teoriyu diagnostirovaniya elektrotekhnicheskikh system = Introduction to the theory of diagnostics of electrical systems.* Saint Petersburg: Izd-vo Politekhnikheskogo universiteta, 2012. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Эрик Иванович Цветков

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры информационно-измерительных систем и технологий,
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5)
E-mail: iit@eltech.ru

Erik I. Tsvetkov

Doctor of technical sciences, professor, professor of sub-department of information and measuring systems and technologies,
Saint Petersburg State Electrotechnical University
(5 Professor Popov street, St. Petersburg, Russia)

Александр Михайлович Панкин

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

Alexander M. Pankin

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

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

Поступила в редакцию/Received 18.07.2021

Поступила после рецензирования/Revised 12.08.2021

Принята к публикации/Accepted 07.09.2021

ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЙОНА ПОЛЕТОВ ДЛЯ АВИАЦИОННЫХ ТРЕНАЖЕРОВ И ОПЕРАТОРОВ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

В. И. Марчук¹, Т. А. Глебова², О. А. Кувшинова³, Н. Есимова⁴

¹ Донской государственный технический университет, Шахты, Россия
^{2,3} Пензенский государственный архитектурно-строительный университет, Пенза, Россия
⁴ Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия
¹ marchuk@sssu.ru, ² tan.1952@mail.ru, ³ oly791702@mail.ru, ⁴ nurzipa.esimova@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Цели и задачи моделирования района полетов для обучения пилотов с помощью авиационных тренажеров и операторов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) отличаются. Это приводит к необходимости по-разному разрабатывать требования к характеристикам сегментов разного уровня, на которые делится модель района полетов, предварительно оценивать не только производительность используемых компьютерных генераторов изображения, но и технические характеристики всех технических узлов, участвующих в формировании визуально наблюдаемой модели выбранного участка местности. Такой подход представляет собой задачу, строгое аналитическое решение которой затруднено в силу ее сложности. *Материалы и методы.* Перспективным направлением в исследовании такого рода является проведение системного анализа с учетом возможностей используемых узлов системы генерации изображения отображать визуально наблюдаемую модель выбранного участка местности с учетом задач, решаемых рассматриваемыми тренажерами. *Результаты.* Предложенная методика сравнения подходов к созданию модели местности для авиационных тренажеров и для тренажеров операторов БПЛА позволила предложить критерии оценки структуры баз данных компьютерных генераторов изображения для рассматриваемых тренажеров, что на практике сокращает время на подготовку исходных данных и разработку моделей заданных районов полетов. *Выводы.* Ввиду различий требований к моделям районов полетов для авиационных тренажеров и для тренажеров операторов БПЛА структура баз данных используемых компьютерных генераторов изображения отличается.

Ключевые слова: система синтеза визуально наблюдаемых 3D-объектов, авиационный тренажер, тренажер оператора беспилотного летательного аппарата, подстилающая поверхность

Для цитирования: Марчук В. И., Глебова Т. А., Кувшинова О. А., Есимова Н. Задачи моделирования района полетов для авиационных тренажеров и операторов БПЛА // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 3. С. 80–86. doi:10.21685/2307-4205-2021-3-10

TASKS OF MODELING THE FIELD OF FLIGHTS FOR AVIATION SIMULATORS AND UNMANNED AIRCRAFT OPERATOR

V.I. Marchuk¹, T.A. Glebova², O.A. Kuvshinova³, N. Esimova⁴

¹ Don State Technical University, Shakhty, Russia
^{2,3} Penza State University of Architecture and Civil Engineering, Penza, Russia
⁴ Penza State Technological University, Penza, Russia
¹ marchuk@sssu.ru, ² tan.1952@mail.ru, ³ oly791702@mail.ru, ⁴ nurzipa.esimova@mail.ru

Abstract. *Background.* The goals and objectives of modeling the flight area for training pilots using aviation simulators (AT) and operators of unmanned aerial vehicles (UAVs) are different. This leads to the need to develop differently requirements for the characteristics of segments of different levels into which the model of the flight area is divided, to preliminarily evaluate not only the performance of the used computer image generators (CGI), but also the technical characteristics of all technical units involved in the formation of the visually observed model of the selected area. terrain. This approach is a problem, the rigorous analytical solution of which is difficult due to its complexity. *Materials and methods.* A promising direction in this kind of research is system analysis, taking into account the capabilities of the used nodes of the image generation system, to display a visually observed model of the selected area of the terrain, taking into account the tasks solved by the simulators under consideration. *Results.* The proposed method-

ology for comparing approaches to creating a terrain model for AT and for simulators of UAV operators made it possible to propose criteria for evaluating the structure of the CGI databases for the simulators under consideration, which in practice reduces the time for preparing initial data and developing models of specified flight areas. *Conclusions.* In view of the differences in the requirements for the models of flight areas for aircraft and for simulators for UAV operators, the structure of the database used by the CGI is different.

Keywords: synthesis system for visually observed 3D objects, flight simulator, unmanned aerial vehicle operator simulator, underlying surface

For citation: Marchuk V. I., Glebova T. A., Kuvshinova O. A., Esimova N. Tasks of modeling the field of flights for aviation simulators and unmanned aircraft operator. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;(3):80–86. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-3-10

Введение

Одной из задач, решаемых при разработке авиационных тренажеров (АТ) и тренажеров операторов беспилотных летательных аппаратов, является моделирование M_S визуально узнаваемого участка местности S с качеством, достаточным для обучения летчиков летательных аппаратов (ЛА) и операторов БПЛА решению навигационных задач [1]. Для АТ это район размером $S^{(AT)} = 1500 \times 1500$ км [2], для тренажера операторов БПЛА $S^{(БПЛА)} \leq 100 \times 400$ км [3]. Качество визуально наблюдаемого изображения модели узнаваемого района местности, обеспечивающего решение навигационных задач [4], зависит от насыщенности модели района моделями реперных объектов $N^{(PM)} \geq N^{(K)}$, где $N^{(PM)}$ – число моделей реперных объектов в S , $N^{(K)}$ – минимальное число реперных объектов, встретившихся по маршруту полета [5]. Будем считать, что для решения навигационных задач [6] (определение места положения модели ЛА в модели пространства) необходимо визуально распознать 3D-модели реперных объектов [7], предварительно определив их место нахождения на карте [8] и по показаниям имитаторов проборов кабинного оборудования [9]. Тогда основная задача разработки $S^{(AT)}$ и $S^{(БПЛА)}$ – создать максимально насыщенную моделями реперных объектов модель выбранного участка местности.

Материалы и методы

В АТ и тренажерах операторов БПЛА для синтеза визуально наблюдаемых моделей местности $S^{(AT)}$ и $S^{(БПЛА)}$ в режиме реального времени (РРВ) используются специализированные программно-технические системы, называемые компьютерными генераторами изображения (КГИ) [10], которые по правилам машинной графики синтезируют на экране формирования промежуточного изображения 2D-проекции 3D-объектов [11]. В итоге синтезируются информационные модели $I^{(AT)}(S^{(AT)})$ или $I^{(БПЛА)}(S^{(БПЛА)})$ реальных трехмерных участков местности [12]. В указанных тренажерах это разные информационные модели, но имеющие общие особенности. В АТ $I^{(AT)}(S^{(AT)})$ это обязательно трехмерная модель, обеспечивающая возможность профессиональной тренировки глазомера летчика [13]. В тренажерах БПЛА $I^{(БПЛА)}(S^{(БПЛА)})$ двухмерная проекция наблюдаемого участка местности [14]. Общие особенности – это структура базы данных КГИ и общая часть технологического процесса синтеза моделей реперных объектов, включая этап отображения на экране формирования промежуточного изображения 2D-проекции 3D-объектов.

В АТ (рис. 1) изображение с экрана формирования промежуточного изображения, синтезированное с учетом особенностей оптической системы преобразования информации, с помощью оптики [15] доставляется в глаза человека [16] и при этом активизирует заданные составляющие зрительного аппарата человека [17]. В итоге подготовленный человек, рассматривая через оптику специально синтезированный видеоряд из 2D-проекций 3D-объектов, считает, что он видит 3D-объекты и может профессионально тренировать свой глазомер [18]. В тренажере оператора БПЛА (рис. 2) оператор наблюдает без оптической системы синтезированный на экране формирования промежуточного изображения видеоряд из 2D-проекции 3D-объектов, распознает модели реперных объектов и, используя карту модели местности, определяет место нахождения модели ЛА в пространстве [19].

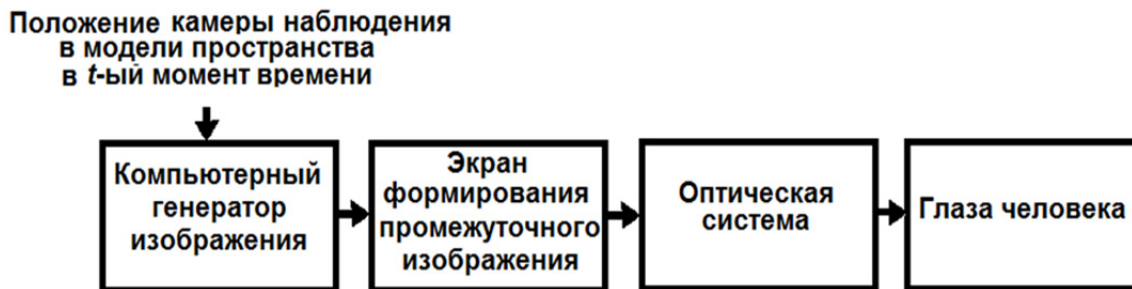


Рис. 1. Технологическая цепочка синтеза 3D-изображений 3D-объектов в АТ



Рис. 2. Технологическая цепочка синтеза 2D-проекций 3D-объектов в тренажерах подготовки операторов БПЛА

Использование разных подходов к синтезу визуально наблюдаемых изображений для обучения летчика на АТ и для обучения оператора БПЛА, как и для других тренажеров, находят свое отражение в методах синтеза заданного участка местности и технологических процессах обработки изображений [20]. Основным критерием качества синтеза узнаваемого участка местности является количество различных моделей реперных 3D-объектов и их частей. При этом требуется решить задачу маскирования некоторых реперных моделей 3D-объектов, создав условия для их поиска с целью решения навигационных задач [6], как и при реальных полетах [4]. Поставленная задача решается в несколько этапов.

На первом проводится анкетирование летчиков и операторов БПЛА с целью составления списка реперных объектов.

На втором решается задача распределений ресурсов КГИ с целью обеспечить максимально насыщенное моделями реперных объектов изображение видимого участка местности в каждый t_i момент полета.

В настоящее время в КГИ для синтеза на экране формирования промежуточного изображения 2D-проекций 3D-объектов используются управляющие и видимые примитивы [21]. Видимые 2D-проекции 3D-объектов на экране формирования промежуточного изображения синтезируются с помощью видимых примитивов [22], в то время как управляющие примитивы используются для управления процессом синтеза [12]. Одновременно при решении задачи разработки 3D-модели реперных объектов для занесения в базу данных КГИ разрабатывается структура базы данных, управляющая процессом синтеза изображения в реальном масштабе времени.

Управление процессом синтеза – это:

– решение задач взаимозакрываемости 3D-моделей при подвижном наблюдателе (используется примитив «разделяющая плоскость»), когда при ее пересечении «разделяющей плоскости» первоначальный порядок вызова 3D-моделей и их составляющих в одном сегменте базы данных КГИ меняется на противоположный;

– предварительное формирование структуры базы данных КГИ (используется один из двух возможных примитивов «охватывающая сфера по дальности» или «охватывающая сфера по направлению») с целью исключать в каждый t_i момент времени из дальнейшей обработке те сегменты базы данных КГИ со всеми содержащимися в них примитивами, которые в данный момент времени не должны обрабатываться («охватывающая сфера по дальности» исключает из дальнейшей обработки сегменты, центр которых расположен далее текущего места положения подвижного наблюдателя, а «охватывающая сфера по направлению» исключает из дальнейшей обработки все сегменты, площадь которых не пересекается со следом камеры наблюдения).

Модель района полетов описывается как сегмент или группа вложенных друг в друга сегментов. Это геометрическая фигура в виде квадрата (для АТ) или прямоугольника (для тренажера оператора БПЛА), над которой возможны полеты на модели ЛА с визуальным наблюдением 3D-моделей реперных объектов. Вся модель района полетов может быть одним сегментом нулевого уровня или сегментом, который может делиться на сегменты первого уровня. Каждый сегмент первого уровня может делиться на сегменты второго уровня, которые в свою очередь могут делиться на сегменты третьего уровня и т.д.

Один и тот же сегмент не нулевого уровня может быть описан как «охватывающая сфера по направлению» или «охватывающая сфера по дальности», или одновременно и как «охватывающая сфера по направлению» и как «охватывающая сфера по дальности».

Вложенность сегментов одного уровня в другой задает структуру базы данных КГИ.

Все визуальные примитивы должны принадлежать или сегменту нулевого уровня, или советующим сегментам.

Каждый j -й управляющий примитив имеет время обработки $t_j^{(U)} = \text{const} T_j^{(U)}$. Каждый i -й визуальный примитив также имеет свое время обработки $t_i^{(V)} = \text{const} T_i^{(V)}$. Такт режима реального времени (РВР), за которое синтезируются 2D-проекции 3D-объектов, определяемого сейчас как 80 мс. Время обработки модели района полетов T_c за один такт режима реального времени зависит от структуры базы данных КГИ, а эта структура определяется необходимостью делить весь район полетов на сегменты так, чтобы все примитивы в сегментах, которые в данный момент времени не активны, были исключены из обработки в РВР на как можно более раннем этапе:

$$T_c = \sum_{j=1}^{N_j^{(U_a)}} t_j^{(U)} + \sum_{i=1}^{N_i^{(V_{0a})}} t_i^{(V)}, \quad (1)$$

где $N_j^{(U_a)}$ – число активных управляющих примитивов в j -м сегменте; $N_i^{(V_{0a})}$ – число i -х визуальных примитивов в активных сегментах.

Так как районы полетов для АТ и для тренажера оператора БПЛА отличаются при одинаковых характеристиках КГИ и экранов формирования промежуточного изображения, то ключевым отличием баз данных для КГИ является их структура. Для тренажера оператора БПЛА вся модель района полетов разбивается только на сегменты первого уровня (так как цель синтеза визуального изображения – высветить на экране формирования промежуточного изображения достаточно грубые по точности 2D-проекции 3D-объектов, но этих объектов должно быть не менее заданного числа и к тому же они должны быть размещены на подстилающей поверхности, фиксирующей реальный рельеф выбранного района полетов). В АТ необходимо заставить пилота видеть 3D-объекты, что предполагает более высокую детализацию всех синтезированных 3D-объектов (но как правило за подстилающую поверхность берется абсолютно ровная поверхность нулевого сегмента, так как при полетах на АТ, как и на реальных ЛА, минимальная высота не более 400 м, а в тренажерах операторов БПЛА эта высота много меньше (за исключением моделирования горных районов, как например Кавказа)). Различие в подходах к моделированию районов полетов отражается в структурах БД КГИ.

При этом время синтеза $I^{(AT)}(S^{(AT)})$ и $I^{(БПЛА)}(S^{(БПЛА)})$, рассчитанное по формуле (1), для всех возможных положений моделей летательного аппарата не должно превышать заданного такта режима реального времени.

Учитывая, что качество модели района полетов зависит от числа обрабатываемых визуальных примитивов, при разработке структуры базы данных КГИ необходимо добиваться уменьшения числа управляющих примитивов, чтобы за счет освободившегося времени добавить визуальные примитивы, всегда улучшающие качество синтезированного изображения.

Результаты и обсуждение

Модели района полетов для АТ и для тренажера оператора БПЛА различны как по размерам, так и по особенностям рельефа, требования к характеристикам сегментов разного уровня, что предполагает разный подход к обучению летчиков и операторов БПЛА.

Заключение

1. Структура базы данных КГИ определяется управляющими примитивами как «охватывающая сфера по направлению» и «охватывающая сфера по дальности».
2. Модели реперных объектов для модели района полетов для АТ и для модели района полетов тренажера оператора БПЛА различны по степени их детализации, так как полеты советующих моделей ЛА проводятся на различных высотах.
3. Время обработки модели района полетов T_c за один такт режима реального времени зависит от числа управляющих примитивов, расположенных в активных сегментах и от числа обрабатываемых визуальных примитивов расположенных в этих активных сегментах.

Список литературы

1. Roganov V. R., Kuvshinova O. A., Grintsov D. M. To issue of semiotic component visible for pilot of space model beyond cabin of aircraft simulator // Book of Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). P. 420–428.
2. Roganov V. R., Sagyndyk A. B., Akhtarieva R. F. [et al.]. Integrated organization of the system for forming the information support of aeronautical simulator // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Vol. 12, № 15. P. 5207–5213.
3. Роганов В. Р., Роганова Э. В., Игонин О. О. Построение подстилающих поверхностей для размещения моделей реальных объектов в моделях реальной местности при фиксированных точках расположения наблюдателя // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. 2008. № 1-2. С. 119–126.
4. Роганов В. Р. Анализ теоретических аспектов формирования когнитивной модели ориентации в визуально наблюдаемой среде и их применение для совершенствования авиационных тренажеров // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2015. Т. 1, № 4. С. 88–93.
5. Роганов В. Р. By solving the problem of providing the necessary quality of the model of the surrounding space // Современные информационные технологии. 2015. № 22. С. 7–13.
6. Мамаев В. Я., Сняжков А. Н., Петров К. К., Горбунов Д. А. Воздушная навигация и элементы самолетовождения : учеб. пособие. СПб. : СПбГУАП, 2002. 256 с.
7. Шукшунув В. Е. Автоматизированные обучающие системы профессиональной подготовки операторов летательных аппаратов / под ред. В. Е. Шукшунува. М. : Машиностроение, 1986. 240 с.
8. Красовский А. А., Лопатин В. И. [и др.]. Авиационные тренажеры. М. : Изд-во ВВИА им. Жуковского, 1992. 320 с.
9. Меерович Г. Ш., Годунов А. И., Ермолин О. К. Авиационные тренажеры и безопасность полетов / под ред. Г. Ш. Мееровича. М. : Воздушный транспорт, 1990. 343 с.
10. Роганов В. Р., Михеев М. Ю., Асмолова Е. А., Жашкова Т. В. Имитаторы визуальной обстановки для тренажеров подготовки водителей транспортных средств // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2016. Т. 2. С. 326–328.
11. Роганов В. Р., Семочкина И. Ю., Жашкова Т. В. Системы моделирования трехмерных визуально наблюдаемых моделей // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2015. Т. 1. С. 192–196.
12. Вяткин С. И., Долговесов Б. С. Метод визуализации мультиобъемных данных и функционально заданных поверхностей с применением графических процессоров // Автометрия. 2021. Т. 57, № 2. С. 32–40.
13. Роганов В. Р., Семочкин А. В., Филиппенко В. О. [и др.]. К вопросу о расчетах основных параметров оптического-аппаратного устройства индикации, позволяющего реализовать безочковый 3d индикатор // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2015. Т. 1, № 4. С. 182–199.
14. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2020617619. Виртуальный учебный комплекс «тренажер оператора БПЛА различных типов» / Жбанков Г. О., Криушичев А. Г. № 2020616521 ; заявл. 28.06.2020 ; опублик. 08.07.2020.
15. Роганов В. Р. Концепция создания эргатического оптического-, программно-технического комплекса «Имитатор визуальной обстановки», позволяющего человеку тренировать глазомер // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2015. Т. 1, № 4. С. 81–87.
16. Roganov V., Mikheev M., Esimova N. [et al.]. On the assessment of the image model of 3d models synthesized by optical-software-technical systems // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT 2020) : proceedings. Moscow, 2020. P. 9067481.

17. Бабич А. М., Роганов В. Р., Разуваева В. О. Возможность использования монокулярной системы технического зрения при определении расстояний между объектами // Цифровизация агропромышленного комплекса : сб. науч. ст. II Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 т. Тамбов, 2020. Т. 1. С. 46–49.
18. Роганов В. Р., Кувшинова О. А., Есимова Н. С. [и др.]. Совершенствование эргатических программно-технических комплексов «Авиационный тренажер» за счет добавления учебных ситуаций, связанных с решением задач самолетовождения // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 2. С. 96–105.
19. Roganov V., Roganova E., Glebova T. Requirements for optical-hardware-software systems for modeling three-dimensional visually observable space for training simulators for locomotives // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon 2018). Vladivostok, 2018. P. 8602860.
20. Патент на изобретение RU 2622877 С. Устройство поиска средней линии границ объектов на размытых изображениях / Марчук В. И., Семенищев Е. А., Воронин В. В. [и др.]. № 2016101728 ; заявл. 20.01.2016 ; опубл. 20.06.2017.
21. Вяткин С. И., Долговесов Б. С. Метод реконструкции функционально заданных поверхностей по стерео-изображениям реальных объектов // Автометрия. 2020. Т. 56, № 6. С. 19–26.
22. Fisunov A. V., Gnezdilova V. B., Marchuk V. I. A technique for obtaining 3d coordinates of human body parts from RGB-D stream // MATEC Web of Conferences (Rostov-on-Don, Russian Federation, September 12–14, 2018). Rostov-on-Don, 2018. P. 05003.

References

1. Roganov V.R., Kuvshinova O.A., Grintsov D.M. To issue of semiotic component visible for pilot of space model beyond cabin of aircraft simulator. *Book of Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020)*. 2020:420–428.
2. Roganov V.R., Sagyndyk A.B., Akhtarieva R.F. [et al.]. Integrated organization of the system for forming the information support of aeronautical simulator. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017;12(15):5207–5213.
3. Roganov V.R., Roganova E.V., Igonin O.O. Construction of underlying surfaces for placing models of real objects in models of real terrain at fixed points of the observer's location. *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo = Issues of modern science and practice*. 2008;(1-2):119–126. (In Russ.)
4. Roganov V.R. Analysis of theoretical aspects of the formation of a cognitive model of orientation in a visually observable environment and their application for improving aviation simulators. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus = XXI century: results of the past and problems of the present plus*. 2015;1(4):88–93. (In Russ.)
5. Roganov V.R. By solving the problem of providing the necessary quality of the model of the surrounding space. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii = Modern information technologies*. 2015;(22):7–13.
6. Mamaev V.Ya., Sinyakov A.N., Petrov K.K., Gorbunov D.A. *Vozdushnaya navigatsiya i elementy samoletovozhdeniya: ucheb. posobie = Aerial navigation and elements of airplane driving : a textbook*. Saint Petersburg: SPbGUAP, 2002:256. (In Russ.)
7. Shukshunov V.E. *Avtomatizirovannye obuchayushchie sistemy professional'noy podgotovki operatorov letatel'nykh apparatov = Automated training systems for professional training of aircraft operators*. Moscow: Mashinostroenie, 1986:240. (In Russ.)
8. Krasovskiy A.A., Lopatin V.I. [et al.]. *Aviatsionnye trenazhery = Aviation simulators*. Moscow: Izd-vo VVIA im. Zhukovskogo, 1992:320. (In Russ.)
9. Meerovich G.Sh., Godunov A.I., Ermolin O.K. *Aviatsionnye trenazhery i bezopasnost' poletov = Aviation simulators and flight safety*. Moscow: Vozdushnyy transport, 1990:343. (In Russ.)
10. Roganov V.R., Mikheev M.Yu., Asmolova E.A., Zhashkova T.V. Imitators of visual environment for training drivers of vehicles. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International symposium Reliability and Quality*. 2016;2:326–328. (In Russ.)
11. Roganov V.R., Semochkina I.Yu., Zhashkova T.V. Modeling systems of three-dimensional visually observable models. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International symposium Reliability and Quality*. 2015;1:192–196. (In Russ.)
12. Vyatkin S.I., Dolgovesov B.S. Method of visualization of multi-volume data and functionally defined surfaces using graphics processors. *Aviometriya = Autometry*. 2021;57(2):32–40. (In Russ.)
13. Roganov V.R., Semochkin A.V., Filippenko V.O. [et al.]. Basic to the question of calculating the parameters of an optical-hardware display device that allows you to implement a point-less 3D on the indicator. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus = XXI century: results of the past and problems of the present plus*. 2015;1(4):182–199. (In Russ.)
14. Certificate of registration of the computer program 2020617619. Virtual training complex "trainer of the operator of UAVs of different types". Zhibankov G.O., Kriushichev A.G. No. 2020616521; appl. 28.06.2020; publ. 08.07.2020. (In Russ.)
15. Roganov V.R. The concept of creating the ergonomics optical, software and hardware complex "Imitator of the visual environment" that allows people to train the eye. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus = XXI century: results of the past and the present problem is a plus*. 2015;1(4):81–87. (In Russ.)

16. Roganov V., Mikheev M., Esimova N. [et al.]. On the assessment of the image model of 3d models synthesized by optical-software-technical systems. *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT 2020): proceedings*. Moscow, 2020:9067481.
17. Babich A.M., Roganov V.R., Razuvaeva V.O. The possibility of using monocular vision systems when determining distances between objects. *Tsifrovizatsiya agropromyshlennogo kompleksa: sb. nauch. st. II Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.: v 2 t. = The digitalization of the agro-industrial complex : collection of scientific works. article II mezhdunar. nauch.-pract. conf. in 2 vol.* Tambov, 2020;1:46–49. (In Russ.)
18. Roganov V.R., Kuvshinova O.A., Esimova N.S. [et al.]. Improvement of ergatic software and hardware complexes "Aviation simulator" by adding training situations related to solving problems of aircraft navigation. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(2):96–105. (In Russ.)
19. Roganov V., Roganova E., Glebova T. Requirements for optical-hardware-software systems for modeling three-dimensional visually observable space for training simulators for locomotives. *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon 2018)*. Vladivostok, 2018:8602860.
20. Patent RU 2622877 C. Russian Federation. Device for searching the middle line of the boundaries of objects on blurred images. Marchuk V.I., Semenishchev E.A., Voronin V.V. [et al.]. No. 2016101728; appl. 20.01.2016; publ. 20.06.2017. (In Russ.)
21. Vyatkin S.I., Dolgovosov B.S. Method of reconstruction of functionally defined surfaces based on stereo images of real objects. *Avtometriya = Autometry*. 2020;56(6):19–26. (In Russ.)
22. Fisunov A.V., Gnezdilova V.B., Marchuk V.I. A technique for obtaining 3d coordinates of human body parts from RGB-D stream. *MATEC Web of Conferences (Rostov-on-Don, Russian Federation, September 12–14, 2018)*. Rostov-on-Don, 2018:05003.

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Иванович Марчук

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры радиоэлектронных
и электротехнических систем и комплексов,
Донской государственной технической университет
(Россия, г. Шахты, ул. Шевченко, 147)
E-mail: marchuk@sssu.ru

Vladimir I. Marchuk

Doctor of technical sciences, professor,
professor of sub-department of radioelectronic
and electrotechnical systems and complexes,
Don State Technical University
(147 Shevchenko street, Shakhty, Russia)

Татьяна Александровна Глебова

доцент кафедры информационно-вычислительных систем,
Пензенский государственный архитектурно-
строительный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28)
E-mail: tan.1952@mail.ru

Tat'yana A. Glebova

Associate professor of sub-department
of information and computing systems,
Penza State University of Architecture
and Civil Engineering
(28 German Titov street, Penza, Russia)

Ольга Александровна Кувшинова

аспирант,
Пензенский государственный архитектурно-
строительный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28)
E-mail: oly791702@mail.ru

Ol'ga A. Kuvshinova

Postgraduate student,
Penza State University of Architecture
and Civil Engineering
(28 German Titov street, Penza, Russia)

Нурзипа Есимова

аспирант,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, пр. Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: nurzipa.esimova@mail.ru

Nurzipa Esimova

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

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

Поступила в редакцию/Received 09.10.2020

Поступила после рецензирования/Revised 12.04.2021

Принята к публикации/Accepted 13.09.2021

ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТИРОВКОЙ ГАЗА ПО ТРУБОПРОВОДАМ ПУТЕМ АНАЛИЗА ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИМЕСЕЙ

Р. А. Штыков¹, Н. К. Юрков²

¹ Муромский институт Владимирского государственного университета, Муром, Россия

² Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ ipmrroman@yandex.ru, ² yurkov_NK@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Для определения концентраций примесей в газе, который транспортируется по трубопроводу, используют специальные приборы, что вызывает удорожание транспортировки газа на приобретение этих приборов, их установку и затраты на их обслуживание. Цель – сократить расходы, используя более эффективный способ определения концентраций примесей с помощью специально разработанной математической модели, которая позволит получать данные в автоматизированном процессе вычисления. *Материалы и методы.* Исследование гидравлических закономерностей, которые способствуют установлению оптимальных и надежных характеристик системы газоснабжения. *Результаты.* Получены гидравлические закономерности, которые определяют осредненные изменения концентраций примесей в газе по рабочему сечению потока. Показана динамика изменений давления в трубе газа при учете изменения гидравлического сопротивления на трение. Разработаны балансовые уравнения и описаны гидравлические зависимости с целью нахождения концентраций примесей по всему объему трубопровода. Показаны изменения давления газа при начале и остановке работы насосных станций в системе газоснабжения. *Выводы.* Таким образом, определяя концентрации примесей в газе при его транспортировке, можно минимизировать нарушения гидравлического режима его работы, сократив потери всех мощностей более, чем в 12 раз от установленных проектных показателей.

Ключевые слова: газопровод, газ, управление, оптимизация, примеси, концентрация

Для цитирования: Штыков Р. А., Юрков Н. К. Оптимизация управления транспортировкой газа по трубопроводам путем анализа динамики изменения концентрации примесей // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 3. С. 87–92. doi:10.21685/2307-4205-2021-3-11

OPTIMIZATION OF GAS TRANSPORT MANAGEMENT BY PIPELINES BY ANALYSIS OF DYNAMICS OF CHANGE OF CONCENTRATION OF IMPURITIES

R.A. Shtykov¹, N.K. Yurkov²

¹ Murom Institute of Vladimir State University, Murom, Russia

² Penza State University, Penza, Russia

¹ ipmrroman@yandex.ru, ² yurkov_NK@mail.ru

Abstract. *Background.* To determine the concentration of impurities in the gas that is transported through the pipeline, special devices are used, which makes gas transportation for the purchase of these devices more expensive to install and their maintenance costs. The goal is to reduce costs by using a more efficient way to determine the concentration of impurities using a specially developed mathematical model that will allow you to obtain data in an automated calculation process. *Materials and methods.* The study of hydraulic patterns that contribute to the establishment of optimal and reliable characteristics of the gas supply system. *Results.* Hydraulic patterns are obtained that determine the averaged changes in the concentrations of impurities in a gas over the working cross section of the flow. The dynamics of changes in pressure in a gas pipe is shown taking into account changes in hydraulic resistance to friction. Balance equations are developed and hydraulic dependencies are described with the aim of finding impurity concentrations over the entire volume of the pipeline. The changes in gas pressure at the start and stop of the pumping stations in the gas supply system are shown. *Conclusions.* Thus, by determining the concentration of impurities in the gas during its transportation, it is possible to minimize violations of the hydraulic mode of its operation, reducing the loss of all capacities by more than 12 times from the established design indicators.

Keywords: gas pipeline, gas, control, optimization, impurities, concentration

For citation: Shtykov R.A., Yurkov N.K. Optimization of gas transport management by pipelines by analysis of dynamics of change of concentration of impurities. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(3):87–92. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-3-11

Для определения примесей в газе, транспортируемого по трубопроводу, используют экспресс-методы, которые заключаются в использовании специальных приборов, что вызывает удорожание транспортировки газа при установке этих приборов и затраты на их обслуживание. Наиболее эффективные способы – это косвенные методы, которые позволяют получать данные в автоматизированном процессе вычисления. Один из таких эффективных способов описывается в статье.

При гидравлическом моделировании движения газа по газопроводу, с учетом потери давления из-за шероховатости труб, необходимо использовать критерии, которые учитывают внешние воздействия [1]. Данные критерии вводятся, когда действуют силы гравитации и эти факторы имеют решающее значение при движении газа. В системе подачи газа процесс движения происходит под воздействием вынужденного гидродинамического давления, создаваемого насосной станцией, и очевидного сопротивления, вызванного засорением трубопровода. Продукты засора внутри трубопровода могут создать условия для резкого увеличения гидравлического сопротивления трубопровода, что приводит к противодействию давления, которое нагнетается насосной станцией, и оно будет зависеть от противоположного эффекта трения. Рассмотрим давление газа в трубопроводе. Газ с концентрацией примесей c_{np} и объемом W_0 транспортируется через трубу радиусом R_{np} , поступает в цилиндрическую трубу с определенным радиусом R_0 , смешивается уже с имеющимся газом в этом объеме трубы и возникает дополнительная концентрация примеси c_0 . Газ, находящийся в трубе имеет более высокую концентрацию примесей $c(t)$, чем вновь поступивший. В этот момент $t = t_1 c_0 > c(t)$ концентрация примесей достигает некоторого значения c^* .

Рассмотрим динамику изменения концентрации примесей при подаче газа в систему насосной станцией с переменным режимом работы, принимая обозначения: $Q_{np}(t)$ – подача насосной станцией газа с концентрацией примесей – c_{np} ; наличие примесей на единицы объема воды на выходе из насосной станции – c_{min} . Подача газа осуществляется в приемный трубопровод цилиндрической формы с конечным объемом и имеет радиус R и длину L . В момент остановки насосной станции $t_0, (t = t_0)$ на рассматриваемом участке газопровода находится газ с объемом $W_0(t_0) = \pi R^2 L$ с концентрацией примесей – c_0 и отсутствует приток нового газа, т.е. $Q_{np}(t \leq t_0) = 0$ (также при $t = t_0, Q_{np}(t_0) = 0$).

С началом работы насосной станции или при $t = t_0$ в газопровод начинает поступать газ с расходом $Q_{np}(t)$ и с концентрацией c_{np} , где $c_{np} < c_0$. В процессе механического перемешивания в газопроводе формируется газ с концентрацией $c(t)$, для которой имеет место неравенство $c_{np} < c(t) < c_0$.

Рассматриваем задачу, при которой в газопроводе с диаметром d и длиной L имеется газ с большими концентрациями примесей ($c_0 > c_n$). Объем газа до момента $t \leq t_0$ имеет концентрации примесей

$$W_n^{(b)} = W_0(1 - c_0) \text{ и } W_n^{(c)} = W_0 c_0, \quad (1)$$

где $W_0 = \frac{\pi}{4} d^2 L$.

С момента $t = t_0$ начинается поступление газа с расходом $Q_{np}(t)$ и концентрацией примесей c_{np} . Для достижения газа приемлемого качества должно выполняться условие $c_{np} < c_0$.

В газопровод при $t_0 \leq t$ поступает газ с концентрацией примесей c_{np} и секундным расходом $Q_{np}(t)$. Тогда за время dt в газопровод поступает газ с объемом $dW_{np} = Q_{np} dt$.

Уравнение баланса объема газа и концентрации примесей за время dt можно описать равенствами

$$dW_{\text{пр}}^{(e)} = Q_{\text{пр}}(1 - c_{\text{пр}})dt, dW_{\text{пр}}^s = Q_{\text{пр}}c_{\text{пр}}dt. \quad (2)$$

Откуда общий объем газа с примесями в газопроводе выражается уравнением [2]

$$W(t) = W_0 + \int_0^t Q_{\text{пр}} dt. \quad (3)$$

А объем газа, необходимого для подачи в газопровод до достижения газа приемлемого качества, можно определить

$$W^e(t^*) = W_0(1 - c_0) + \left[\int_{t_0}^{t^*} Q_{\text{пр}}(t) dt \right] (1 - c_{\text{пр}}), \quad (4)$$

$$W^s(t^*) = W_0c_0 + \left[\int_{t_0}^{t^*} Q_{\text{пр}}(t) dt \right] c_{\text{пр}}. \quad (5)$$

Из уравнений (3) и (5) зависимости можно определить динамику изменения концентрации примесей в газопроводе с учетом притока нового газа

$$c(t) = \frac{W^{(s)}(t)}{W(t)} = \frac{W_0c_0 + \int_{t_0}^t Q_{\text{пр}}(t)c_{\text{пр}} dt}{W_0 + \int_{t_0}^t Q_{\text{пр}} dt}. \quad (6)$$

Зависимость (6) дает основание для получения динамики изменения объема газа с концентрацией примесей, происходящие в процессе механического перемешивания. Из (6) следует, что в момент $t_0 < t$ концентрация примесей в газе уменьшается и в момент $t = t^*$ достигает концентрации c^* , где $c^* < c_{\text{пр}} < c_0$, с этого момента и начинается подача газа в сеть. При этом величина притока газа и величины его оттока равны

$$Q_{\text{вых}}(t) = Q_{\text{пр}}(t) = Q^*(t), \quad (7)$$

т.е. объем газа в газопроводе остается постоянным.

Рассмотрим задачу, в момент $t > t^*$ с учетом притока и оттока газа, когда в газопровод поступает газ с концентрацией $c_{\text{пр}}^*$ и расходом $Q_{\text{пр}}^*$, тогда количество поступающего нового газа будет равным

$$\left. \begin{aligned} W_{\text{пр}}^{*B}(t) &= Q_{\text{пр}}^*(1 - c_{\text{пр}}^*) \\ W_{\text{пр}}^{*3}(t) &= Q_{\text{пр}}^*c_{\text{пр}}^* \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

Тогда в газопроводе количество газа и концентрация примесей в момент t^* определяется равенствами

$$W^B(t^*) = W_0(1 - c_0) + \left[\int_{t_0}^{t^*} Q_{\text{пр}}(t) dt \right] (1 - c_{\text{пр}}), \quad (9)$$

$$W^{(s)}(t^*) = W_0c_0 + \left[\int_{t_0}^{t^*} Q_{\text{пр}} dt \right] c_{\text{пр}}. \quad (10)$$

Для случая данного газопровода соблюдается равенство: $Q_{\text{вых}}(t^*) = Q_{\text{пр}}^*(t)$.

Для условия баланса расходов газа принимаем и условие баланса концентрации примесей $c_{\text{вых}}(t^*) \equiv c^* = \text{const}$.

Тогда объем газа с концентрацией примесей на выходе из газопровода будет равен

$$W_{\text{вых}}^g = \int_{t^*}^t Q_{\text{пр}}^*(t)(1-c^*) dt, \quad (10)$$

$$W_{\text{вых}}^{(s)} = \int_{t^*}^t Q_{\text{пр}}^*(t)c^* dt. \quad (11)$$

Изменения концентрации примесей в газопроводе $c_2(t)$ определяются из следующих балансовых уравнений [3]:

$$W_{\text{водг}}^{(B)} = W^{(B)}(t^*) + W_{\text{пр}}^{(B)} - W_{\text{выг}}^{(B)} = W_0(1-c_0) + (1-c_{\text{пр}}) \int_{t_0}^t Q_{\text{пр}}(t) dt - (1-c^*) \int_{t_0}^t Q_{\text{от}}(t) dt; \quad (12)$$

$$W_{\text{водг}}^{(s)} = W^{(s)}(t^*) + W_{\text{пр}}^{(s)} - W_{\text{выг}}^{(s)} = W_0 c_0 + \int_{t_0}^t Q_{\text{пр}}(t)c_{\text{пр}} dt - c_{\text{пр}}^* \int_{t_0}^t Q_{\text{от}}^*(t) dt. \quad (13)$$

Откуда определяется концентрация примесей в газопроводе:

$$c_2 t = \frac{W^{(s)}}{W^{(s)} + W^{(g)}} = \frac{W^{(s)}}{W(t_1) + \int_{t^*}^t Q_{\text{пр}}^*(t) dt - \int_{t^*}^t Q_{\text{от}}^*(t) dt}. \quad (14)$$

Или изменение концентрации примесей в газопроводе можно переписать в виде

$$c_2(t) = \frac{W^{(s)}(t^*) + W_{\text{пр}}^{(s)} - W_{\text{выг}}^{(s)}}{W(t^*)} \quad (15)$$

или

$$dc(t) = c_2(t) - c_1(t) = \frac{W_2(t) - W_1}{W(t)} = 0, \quad (16)$$

откуда получаем, что при $t > t^*$ должна быть $c_2(t) = c_1(t) = c(t) = c^*$ [3] и обеспечивается регулярная подача газа. При подаче газа в газопровод с давлением P происходит изменение объема газа в нем.

Принимая $\frac{dW}{dp} = -\beta_w W$, теперь рассмотрим задачу об изменении давления газа в газопроводе,

где β_w – коэффициент сжимаемости газа, находим $dp = -\frac{dW}{W} \cdot \frac{1}{\beta_w}$ – изменение давления в газопро-

воде с учетом сжимаемости газа. Вводим модуль упругости E_0 , где $E_0 = \frac{1}{\beta_w}$, тогда имеем

$dp = -E_0 \frac{dW}{W}$, откуда находим

$$\frac{dW}{W} = -\frac{dP}{E_0}. \quad (17)$$

Тогда изменение концентрации примесей в газе с учетом модуля его упругости можно определить из зависимости [2]

$$dc(t) = -\frac{c_{\text{пр}}}{E_0} dP. \quad (18)$$

При $\frac{dc(t)}{dt} = -\frac{c_{\text{пр}}}{E_0} \frac{dP}{dt}$, интегрируя по времени (18) с учетом начальных условий $c(t_0) = c_0$ и $P(t_0) = P_0$, получим уравнение для описания динамики концентрации примесей в зависимости от изменения давления газа:

$$c(t) = c_0 - \frac{c_{\text{пр}}}{E_0} [P(t) - P_0] \text{ или } c(t) = 1 - \frac{c_{\text{пр}} P_0}{E_0} \left[\frac{P(t)}{P_0} - 1 \right]. \quad (19)$$

Для моделирования изменения давления, необходимого для получения заданной концентрации примесей в газопроводе, используем зависимость

$$P(t) - P_0 = [c_0 - c(t)] \frac{E_0}{c_{\text{пр}}} = \frac{E_0}{c_{\text{пр}}} \cdot \frac{\int_0^t Q_{\text{пр}}(t) dt}{W_0 + \int_0^t Q_{\text{пр}}(t) dt}. \quad (20)$$

Закономерность изменения давления газа в газопроводе для заданной концентрации примесей описывается уравнением

$$P(t) = P_0 + \frac{E_0}{c_{\text{пр}}} \cdot \frac{\int_0^t Q_{\text{пр}}(t) dt}{W_0 + \int_0^t Q_{\text{пр}}(t) dt}. \quad (21)$$

В уравнениях приняты обозначения: $Q_{\text{пр}}(t)$ – подача в газопроводную сеть, $\text{м}^3/\text{с}$; $Q_{\text{пр}}^*(t)$ – величина потребного расхода, $\text{м}^3/\text{с}$; $W_{\text{пр}}^{(b)}$ – объем газа в сети в период остановки подачи газа, м^3 ; $W^{(b)}(t^*)$ – объем газа в сети в момент времени t^* , м^3 ; $W_{\text{пр}}^{(b)}$ – объем притока газа в сеть; $W_{\text{от}}^{(b)}$ – объем оттока из сети; W_0 – объем смеси газа и примесей в сети в момент t_0 ; $c_{\text{пр}}$ – концентрация примесей на единицу объема газа на входе в сеть, $\text{число}/\text{м}^3$; c^* – величина ПДК, $\text{число}/\text{м}^3$; c_0 – концентрация примесей на единицу объема газа, $\text{число}/\text{м}^3$; $W_{\text{пр}}^{(s)}$ – объем смеси газа в сети с началом подачи газа в сеть; $W^{(s)}(t^*)$, $W_{\text{пр}}^{(s)}$, $W_{\text{от}}^{(s)}$ – объемы смеси газа, соответствующие в момент времени t , притока и оттока из сети с началом подачи газа к потребителям ($t^* < t$).

Заключение

Учитывая теорию диффузионного перемешивания газа с примесями в газопроводе, получили: 1) гидравлические закономерности, которые определяют осредненные изменения концентраций примесей в газе по рабочему сечению потока; 2) показывают динамику изменений давления в трубе газа при учете изменения гидравлического сопротивления на трение; 3) разработаны балансовые уравнения и описаны гидравлические зависимости с целью нахождения концентраций примесей по всему объему трубопровода; 4) показаны изменения давления газа при начале и остановке работы насосных станций в системе газоснабжения.

Таким образом, определяя концентрации примесей в газе при его транспортировке, можно минимизировать нарушения гидравлического режима его работы, сократив потери всех мощностей более, чем в 12 раз от установленных проектных показателей.

Список литературы

1. Чугаев Р. Р. Гидравлика. М. : Энергия, 1970. 672 с.
2. Штыков Р. А., Юрков Н. К. Построение стехиометрического уравнения для сложносоставного горючего газа // Надежность и качество сложных систем. 2016. № 4. С. 92–96.
3. Штыков Р. А., Юрков Н. К. Уточненный алгоритм расчета гидродинамических параметров инженерных газовых сетей // Промышленная энергетика. 2017. № 2. С. 44–47.

References

1. Chugaev R.R. *Gidravlika = Hydraulics*. Moscow: Energiya, 1970:672. (In Russ.)
2. Shtykov R.A., Yurkov N.K. Constructing a stoichiometric equation for a compound combustible gas. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2016;(4):92–96. (In Russ.)
3. Shtykov R.A., Yurkov N.K. Refined algorithm for calculating hydrodynamic parameters of engineering gas networks. *Promyshlennaya energetika = Industrial power engineering*. 2017;(2):44–47. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Роман Александрович Штыков

кандидат технических наук,
доцент кафедры физики и прикладной математики,
Муромский институт
Владимирского государственного университета
(Россия, г. Муром, ул. Орловская, 23)
E-mail: ipmrroman@yandex.ru

Roman A. Shtykov

Candidate of technical sciences, associate professor
of sub-department of physics and applied mathematics,
Murom Institute of Vladimir State University
(23 Orlovskaya street, Murom, Russia)

Николай Кондратьевич Юрков

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

Nikolay K. Yurkov

Doctor of technical sciences, professor,
the honoured worker of science
of the Russian Federation,
head of 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 22.05.2021

Поступила после рецензирования / Revised 18.06.2021

Принята к публикации / Accepted 21.09.2021

НЕЙРОНЕЧЕТКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ

А. И. Дивеев¹, А. В. Полтавский², А. Алхатем³

¹ Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, Москва, Россия

² Институт проблем управления имени В. А. Трапезникова РАН, Москва, Россия

^{1,3} Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

¹ aidiveev@mail.ru, ² avp57avp@yandex.ru, ³ alialhatem@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматривается задача управления процессом сушки пиломатериала. Качество сушки определяется режимами функционирования энергетических установок, обеспечивающих подачу тепла в сушильную камеру и параметрами влагосодержания высушиваемого пиломатериала. В последнее время во многих работах процесс сушки пиломатериала рассматривается как задача оптимального управления, в которой высушиваемый материал должен достичь по своим свойствам заданного параметрами состояния за минимальное время. *Материалы и методы.* Для определения режимов качественного оптимального управления и эффективного изменения этих режимов в процессе управления сушкой необходимо располагать в каждый момент времени точными значениями параметров модели объекта управления. Данные значения не могут быть точно определены с помощью измерительных приборов. *Результаты и выводы.* Таким образом, процесс оптимального управления сушкой пиломатериалов включает неопределенности. Для устранения проблемы неопределенностей в работе предлагается использовать для их описания математический аппарат нечетких множеств, который в процессе фаззификации переменных переведет неопределенные значения параметров модели в лингвистические термы с определенными функциями принадлежности. Для получения управляющих воздействий на основе анализа лингвистических переменных предлагается использовать нейронечеткую систему управления с логическим выводом Тагаки – Сугено – Канга на основе нейронной сети ANFIS, которая реализует оптимальное управление сушкой пиломатериалов на основе задаваемых разработчиками системы управления базы правил.

Ключевые слова: оптимальное управление, сушка пиломатериалов, нейронечеткое управление

Для цитирования: Дивеев А. И., Полтавский А. В., Алхатем А. Нейронечеткое управление процессом сушки пиломатериалов // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 3. С. 93–97. doi:10.21685/2307-4205-2021-3-12

NEURO-FUZZY CONTROL OF THE LUMBER DRYING PROCESS

A.I. Diveev¹, A.V. Poltavskiy², A. Alhatem³

¹ Federal Research Center "Informatics and Management" of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² V. A. Trapeznikov Institute of Management Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^{1,3} Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

¹ aidiveev@mail.ru, ² avp57avp@yandex.ru, ³ alialhatem@mail.ru

Abstract. *Background.* The problem of control over the process of lumber drying is considered. The quality of drying is determined by the modes of operation of power plants that provide heat supply to the drying chamber and the parameters of the moisture content of the dried sawn timber. Recently, in many works, the process of drying sawn timber is considered as an optimal control problem, in which the material to be dried must achieve the specified state by its properties in a minimum time. *Materials and methods.* To determine the modes of high-quality optimal control and effective change of these modes in the process of drying control, it is necessary to have at each moment of time the exact values of the parameters of the model of the controlled object. These values cannot be accurately determined using measuring instruments. *Results and conclusions.* Thus, the process of optimally managing the drying of lumber involves uncertainties. To eliminate the problem of uncertainties in the work, it is proposed to use the mathematical apparatus of fuzzy sets to describe them, which, in the process of fuzzification of variables, will translate the undefined values of the model parameters into linguistic terms with certain membership functions. To obtain control actions based on the analysis of linguistic variables, it is proposed to use a neuro-fuzzy control system with Tagaki–Sugeno–Kang logical inference based on the ANFIS neural network, which implements optimal control of sawn timber drying based on the rule base set by the developers of the control system.

Keywords: optimal control, lumber drying, neuro-fuzzy control

For citation: Diveev A.I., Poltavskiy A.V., Alhatem Ali Neuro-fuzzy control of the lumber drying process. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(3):93–97. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-3-12

Введение

Процесс сушки пиломатериалов – сложный физико-химический процесс [1], зависящий от многих параметров, характеризующих качество подвергаемого сушке материала, и процесса подачи тепла в сушильную камеру. В последнее время процесс сушки с целью повышения его эффективности рассматривается как задача оптимального управления [2] с применением методов принципа максимума Л. С. Понтрягина. Следует однако отметить, что полностью оптимальный процесс управления возможен только в системах с полной информацией, когда входящие в математическую модель переменные и параметры точно определены или рассчитаны в процессе всего времени управления. Объект управления, подвергающийся сушке пиломатериал, в общем случае описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных со сложным описанием температурного воздействия [3–5]. Для качественного управления процессом необходимо знать точно его количественные показатели, что в реальных условиях осуществить крайне сложно.

В работе предлагается для описания неопределенностей процесса сушки пиломатериалов использовать математический аппарат нечетких множеств. В этом случае неопределенные параметры заменяются их лингвистическими оценками. Далее по лингвистическим переменным выполняется логический вывод для определения лингвистических переменных управления. Для логического вывода предлагается использовать нейронечеткую систему управления с логическим выводом, которая обучается для конкретной сушильной установки. После дефаззификации управления получаем «четкие» параметры управляющих воздействий, которые должны обеспечить заданный критерий качества управления сушкой. Общая схема предлагаемого нейронечеткого управления соответствует схеме с логическим выводом Тагаки – Сугено – Канга [6–8].

Задача оптимальной сушки пиломатериала

Математическая модель процесса сушки пиломатериала включает уравнения процессов тепло- и массопереноса и описывается следующей системой дифференциальных уравнений [1]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial t}{\partial \tau} &= a_T \nabla^2 t + \frac{\varepsilon r_0}{c} \frac{\partial u}{\partial \tau} + \frac{Q_V}{c \rho_0}; \\ \frac{\partial u}{\partial \tau} &= a_m \nabla^2 u + a_m \delta \nabla^2 t + \varepsilon \frac{\partial u}{\partial \tau}; \\ \frac{\partial p}{\partial \tau} &= a_p \nabla^2 p + \frac{\varepsilon}{c_B} \frac{\partial u}{\partial \tau}, \end{aligned} \quad (1)$$

где a_T – коэффициент температуропроводности, ε – критерий фазового перехода, c – теплоемкость древесины, r_0 – скрытая теплота преобразования, Q_V – количество тепла, выделяемого в теле, ρ_0 – плотность абсолютно сухой древесины, a_m – коэффициент массопроводности тела, δ – термоградиентный коэффициент, a_p – коэффициент конвективной диффузии, t – температура материала, u – масса влаги в материале, p – плотность влажного воздуха в порах материала.

В процессе управления предполагается [2], что система (1) имеет в общем случае решение

$$U(u(\tau), \tau, x), \quad (2)$$

где x – линейный размер толщины древесины, и в данном решении можно найти такое изменение влажностного содержания $u(\tau)$, которое обеспечит за некоторое время $\tau = T$ выполнение условий равновесия

$$U(u(T), T, x) = f(x), \quad (3)$$

где $f(x)$ – функция, описывающая желаемое состояние материала. В качестве критерия оптимальности используется энергопотребление или быстроедействие

$$J = T \rightarrow \min_{u(\tau)} \quad (4)$$

Очевидно, что для синтеза оптимального управления необходимо располагать точными знаниями о переменных и параметрах, входящих в систему уравнений (1). Управление системой (1) с помощью параметра, описывающего влагосодержание, обеспечивает необходимые решения, но текущая величина влагосодержания не может быть точно определена в каждый момент времени. Скорее всего для ее определения необходимо использовать математический аппарат учета неопределенностей. В работе предлагается использовать аппарат нечетких множеств.

Нейронечеткий метод управления

Для неопределенных параметров системы вводим понятие лингвистических переменных. Это могут быть переменные, которые определяются некоторым диапазоном значений, например, значений температур, времени, стоимости и другое и определять вполне очевидными названиями, «очень мало», «мало», «не очень мало», «средне», «почти много», «много» и т.д. Множество этих значений называется множеством термов. Процесс получения лингвистических переменных из цифровых значений этих переменных называется фаззификацией. Для числовых значений устанавливаются диапазоны и определяются границы попадания в эти диапазоны. Описание границ термов выполняется с помощью функций принадлежности. Как правило, в области управления для перехода к термножеству используются синглетные функции принадлежности (рис. 1).

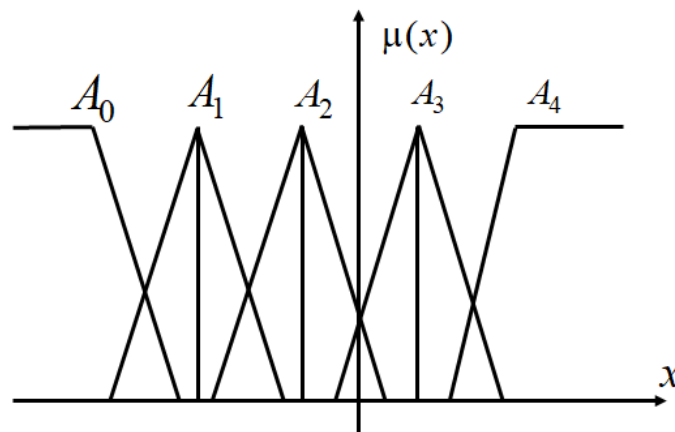


Рис. 1. Синглетные функции принадлежности: A_0, \dots, A_4 – термы

Таким образом, любая нечеткая переменная представляет собой терм и функцию принадлежности. При выполнении логических операций над термами функции принадлежности обрабатываются в соответствии с установленными правилами. Например, логическая операция «И» над двумя лингвистическими переменными $(A, \mu_A(x))$ и $(B, \mu_B(x))$ приводит к получению следующей, функции принадлежности

$$\mu_{A \wedge B}(x) = \min \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \} \quad (5)$$

Для обеспечения логического вывода используем набор правил Такаги – Сугено – Канга, которые описываются импликациями

$$P_i: \text{Если } x_i \text{ есть } A_{i,1} \text{ И...И } x_j \text{ есть } A_{i,j} \text{ И...И } x_{i,j} \text{ есть } A_{i,j}, \text{ ТО} \quad (6)$$

$$y = c_{i,0} + \sum_{j=1}^m c_{i,j} x_j, \quad j = 1, \dots, n \quad (7)$$

Выходные переменные являются четкими. Импликация логического вывода выполняется по правилу Ларсена с нечетким произведением:

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \mu_R(x, y) = \mu_A(x)\mu_B(y) \quad (8)$$

При дефаззификации используется метод центроида. Функциональная зависимость для получения выходной переменной величины после дефаззификации имеет вид

$$y' = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\left(c_{i,0} + \sum_{j=1}^m c_{i,j} x_j \right) \prod_{j=1}^m \mu_{A_{i,j}}(x'_j) \right)}{\sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^m \mu_{A_{i,j}}(x''_j)} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\left(c_{i,0} + \sum_{j=1}^m c_{i,j} x_j \right) \prod_{j=1}^m \exp \left(- \left(\frac{x'_j - a_{i,j}}{b_{i,j}} \right)^2 \right) \right)}{\sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^m \exp \left(- \left(\frac{x'_j - a_{i,j}}{b_{i,j}} \right)^2 \right)} \quad (9)$$

Для выполнения автоматического вывода по лингвистическим переменным используется нейронная сеть ANFIS (adaptive network-based fuzzy inference system). Структура сети представлена на рис. 2.

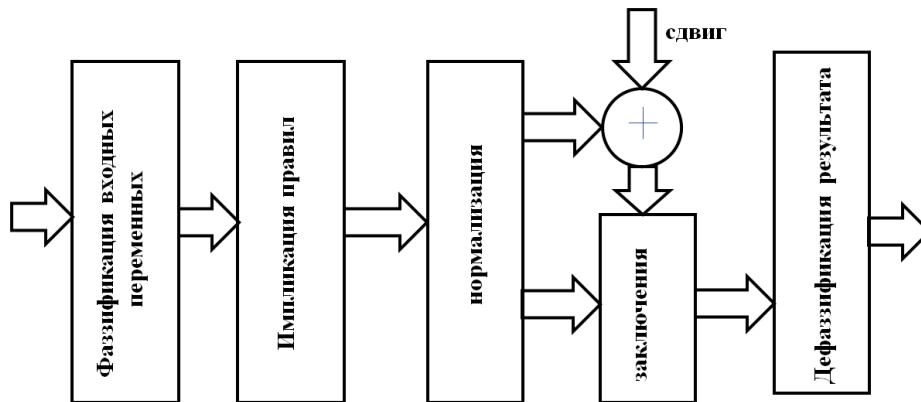


Рис. 2. Структура нейронной сети ANFIS

Нейронная сеть ANFIS содержит пять слоев, которые в итоге определяют по правилам (6) логический вывод относительно управления процессом сушки.

Слой 1 осуществляет фаззификацию входных числовых переменных, которые используются в процессе управления сушкой пиломатериалов.

В слое 2 число элементов равно количеству правил в базе. В слое выполняется нечеткая импликация степеней принадлежности соответствующих правил.

Слой 3 генерирует значения функций, которые умножаются на результаты вычислений элементами предыдущего слоя.

Слой 4 выполняет активизацию заключений правил в соответствии со значениями агрегированных, полученных на предыдущем слое со степенями принадлежности предпосылок правил. Затем проводятся вспомогательные вычисления для последующей дефаззификации результатов.

Слой 5 выполняет дефаззификацию результатов и их денормализацию.

Заключение

В работе рассмотрен нейронечеткий метод управления сушкой пиломатериалов. Метод состоит в том, что переменные модели и системы управления сушкой фаззифицируются и переводятся в лингвистические термы. Далее для термов разрабатывается база правил в соответствии с материалом и процессом сушки. Разработанная база правил реализуется нейронной сетью ANFIS, на выходе которой получаем числовые данные по управлению процессом сушки пиломатериалов.

Список литературы

1. Лыков А. В. Теория сушки. М. : Энергия, 1968. 472 с.
2. Гороховский А. Г., Шишкина Е. Е. Синтез оптимальной по быстродействию системы управления сушкой пиломатериалов // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 1. С. 97–103.
3. Галкин В. П., Курьшов Г. Н., Косарин А. А. [и др.]. Сушка крупномерных пило- и лесоматериалов // Лесной вестник. 2020. Т. 24, № 2. С. 51–56.
4. Галкин В. П., Мелехов В. И., Шульгин В. А., Санаев В. Г. Математическая модель системы контроля процесса сушки древесины в поле СВЧ // Лесной вестник. 2015. № 1. С. 59–65.

5. Шубин Г. Сушка и тепловая обработка древесины : учебник. М. : Лесная промышленность, 1990. 336 с.
6. Sugeno M., Tanaka K. Successive identification of a fuzzy model and its applications to prediction of a complex system // *Fuzzy Sets and Systems*. 2001. Vol. 42, № 3. P. 315–334.
7. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control // *IEEE Transaction Systems, Man and Cybernetics*. 2000. Vol. 15, № 1. P. 116–132.
8. Дивеев А. И., Алхатем Али. Нейро-нечеткое регулирование кондиционированием офисных зданий с учетом показателя временной комфортности // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*. 2021. Т. 1. С. 144–147.

References

1. Lykov A.V. *Teoriya sushki = Theory of drying*. Moscow: Energiya, 1968:472. (In Russ.)
2. Gorokhovskiy A.G., Shishkina E.E. Synthesis of the optimal speed control system for drying lumber. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies*. 2021;(1):97–103. (In Russ.)
3. Galkin V.P., Kuryshov G.N., Kosarin A.A. [et al.]. Drying of large-sized saw and timber. *Lesnoy vestnik = Forest Bulletin*. 2020;24(2):51–56. (In Russ.)
4. Galkin V.P., Melekhov V.I., Shul'gin V.A., Sanaev V.G. Mathematical model of the wood drying process control system in the microwave field. *Lesnoy vestnik = Forest Bulletin*. 2015;(1):59–65. (In Russ.)
5. Shubin G. *Sushka i teplovaya obrabotka drevesiny: uchebnik = Drying and heat treatment of wood : textbook*. Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1990:336. (In Russ.)
6. Sugeno M., Tanaka K. Successive identification of a fuzzy model and its applications to prediction of a complex system. *Fuzzy Sets and Systems*. 2001;42(3):315–334.
7. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control. *IEEE Transaction Systems, Man and Cybernetics*. 2000;15(1):116–132.
8. Diveev A.I., Alkhatem Ali. Neuro-fuzzy regulation of air conditioning of office buildings taking into account the indicator of temporary comfort. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International symposium Reliability and Quality*. 2021;1:144–147. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Асхат Ибрагимович Дивеев

доктор технических наук, профессор,
директор роботцентра
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление» РАН
(Вычислительный центр имени А. А. Дородницына РАН)
(Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 40);
профессор департамента механики и мехатроники
Инженерной академии,
Российский университет дружбы народов
(Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6)
E-mail: aidiveev@mail.ru

Александр Васильевич Полтавский

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

Али Алхатем

аспирант,
Российский университет дружбы народов
(Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6)
E-mail: alialhatem@mail.ru

Askhat I. Diveev

Doctor of technical science, professor,
director of the robot control center,
Federal research center «Computer science and control»
of RAS (computer center A. A. Dorodnitsyn
Russian academy of sciences)
(40 Vavilova street, Moscow, Russia);
professor of the department of mechanics
and mechatronics of the Engineering Academy,
Peoples' Friendship University of Russia
(6 Miklukho-Maklaya street, Moscow, Russia)

Aleksandr V. Poltavskiy

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

Ali Alkhatem

Postgraduate student,
Peoples' Friendship University of Russia
(6 Miklukho-Maklaya street, Moscow, Russia)

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

Поступила в редакцию / Received 08.02.2021

Поступила после рецензирования / Revised 30.09.2021

Принята к публикации / Accepted 04.10.2021

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS

УДК 004.9, 332.02

doi:10.21685/2307-4205-2021-3-13

REGULATORY ENSURING OF THE ENVIRONMENTAL SAFETY IN THE ARCTIC REGION OF RUSSIA

A.V. Masloboev¹, V.A. Masloboev²

¹Institute of Informatics and Mathematical Modelling of Technological Processes of Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

²Institute of North Industrial Ecology Problems of Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia
¹andrejmasloboev@mail.ru, ²v.masloboev@ksc.ru

Abstract. *Background.* The study summarizes and logically proceeds with the research aimed at development of normative and information-analytical support of the environmental safety in the regions of the Russian Arctic. *Materials and methods.* The national public standard «Environmental safety of the Arctic» corresponding a set of conduct rules of the accounting entities in the Arctic region has been developed. The basic ideological statements and design principles of the public standard of environmental safety ensuring in the Arctic region are considered. *Results and conclusions.* The analysis of concordance and relevance of the developed standard to international documents on sustainable development and well-known practices of the corporate social responsibility of business is carried out. The preliminary expert judgment of the standard application by business entities within the various types of economical activities in the Arctic region is given. The ways of standard implementation into practice are proposed.

Keywords: regulatory ensuring, national public standard, environmental safety, management, sustainable development, Arctic region of Russia

Acknowledgments: the research was carried out within the framework of the State Research Program of the INEP KSC RAS and IIMM KSC RAS as well as partially sponsored by the Russian Foundation for Basic Research under grant No. 18-05-60142 «Arctic».

For citation: Masloboev A.V., Masloboev V.A. Regulatory ensuring of the environmental safety in the Arctic region of Russia. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;(3):98–108. doi:10.21685/2307-4205-2021-3-13

НОРМАТИВНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИИ

А. В. Маслобоев¹, В. А. Маслобоев²

¹Институт информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия

²Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия

¹andrejmasloboev@mail.ru, ²v.masloboev@ksc.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Работа является логическим продолжением и обобщением исследований, направленных на развитие нормативного и информационно-аналитического обеспечения экологиче-

ской безопасности регионов Арктической зоны России. *Материалы и методы.* Разработан национальный общественный стандарт «Экологическая безопасность Арктики», представляющий собой свод правил поведения хозяйствующих субъектов в Арктической зоне. Рассматриваются основные идеологические положения общественного стандарта обеспечения экологической безопасности арктических регионов и принципы его построения. *Результаты и выводы.* Проведен анализ согласованности и релевантности разработанного стандарта международным документам по устойчивому развитию и известным практикам корпоративной социальной ответственности бизнеса. Дана предварительная экспертная оценка применимости стандарта предприятиями при различных видах хозяйственной деятельности в Арктической зоне. Предложены пути внедрения стандарта в практику.

Ключевые слова: нормативное обеспечение, национальный общественный стандарт, экологическая безопасность, управление, устойчивое развитие, Арктическая зона России

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания ИППЭС КНЦ РАН и ИИММ КНЦ РАН, а также при частичной поддержке РФФИ (проект № 18-05-60142 «Арктика»).

Для цитирования: Маслобоев А. В., Маслобоев В. А. Нормативное обеспечение экологической безопасности Арктической зоны России // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 3. С. 98–108. doi:10.21685/2307-4205-2021-3-13

Introduction

Nowadays the Arctic region seems not just a territory. It is an area of various activities and interests interweaving which are often in conflict with each other. Today, we perceive there is an objective need to efficient interaction organizing between population, government and business in order to enable the territory developing and preserving its natural values at the same time. Regulatory legal acts cannot provide for all aspects of interaction between the population and business in the territory acting. A social compact is required that defines the principles of conduct for any type of activities. In our case, one of the forms of such social compact can be the national public standard for ensuring environmental safety in the Arctic region (NPSESA).

A cooperative understanding of the urgent necessity of environmental-friendly regulations establishment for all economic entities in the Arctic region was reached in 2015. As a result, at the committee session of the Inter-regional Public Organization "Association of Polar Explorers" (ASPOL) a key decision to NPSESA developing startup was made. The structure and principal statements of NPSESA was approved on December 7, 2015. In the issue of NPSESA project work during 2016 the NPSESA submitting format and framework were changed. Initially, it was considered that NPSESA principles should be formulated for the each area of economic activity in Arctic region. Then, a NPSESA format was proposed and adopted which firstly formulates the principles for acting economic entities and within the framework of each principle the sectoral specificity is in detail considered and analyzed. The NPSESA project was finally reconciled and adopted on October 28, 2016. Such NPSESA formatting allows making the NPSESA itself to be more compact, since there is no need to replicate the formulations of each principle for several types of activity.

The NPSESA was developed at the initiative of Public Joint Stock Company "ROSSETI". The NPSESA is a social compact between society and enterprises which is not regulated by the state, does not conflict with the existing regulatory framework, but only supplements it. These are implicit rules of conduct that should be present in all activities of enterprises located in the Arctic region of Russia. The main real-world problem is to define clear organizational principles for the enterprises own activity upon the path of environmental safety ensuring.

Current study is a generic summary of the author's research work [1–4] in the field of information, analytical and regulatory support means development for the environmental safety management in the Arctic region of Russia. Our study is based on the obtained results of long-term research aimed at developing of favorable conditions, management structure and methods to support the safe and sustainable development of regional socio-economic systems in the Russian Arctic.

Framework of NPSESA

The logical structure of NPSESA has a conventional format and is designed as follows.

The introduction that provides understanding of necessity and timeliness of the NPSESA implementation. In addition, the introduction describes the issues that became the reason for a universal document development for all sectors of economic activity in the Arctic region.

The declaratory part of NPSESA reflects the refraction of sustainable development principles in management and economic activities to environmental safety ensuring in the Arctic region. The declaratory

part provides clear understanding that NPSESA is a logical continuation of the general and special principles of environmental safety ensuring under specific conditions in the Arctic region.

The methodological part of NPSESA provides a possibility for economic entities to assess how the enterprise activities comply with the postulates declared in NPSESA. The assessment procedure can be implemented independently by the economic entities themselves or via involving the experts. The methodological part is based on the logical scheme "Principle – criterion – indicator – index". The construction principle of this part is a universal unit for all the sectors of economic activity. In total, eight basic principles of organizing activities for an economic entity which provide environmental safety ensuring have been identified. The criteria reflect the variability of principles working and take into account the sectoral specificity of the principles implementation. The indicator provides a possibility to accounting the implementation of criterion in the enterprise reporting matrix. The index is a quantitative implementation of an indicator. The indicator can be either measurable, i.e. taken into consideration quantitatively, or binary, i.e. based on the principle of binary code "exist / absent". For these indicators and indices comprehensive estimation and analysis state-of-the-art models and techniques, e.g. discussed in [5–8], can be well used.

The final statements and contributions of NPSESA are generating the conception of the further directions and means of NPSESA development. Annexes to NPSESA contain special documents such as "Regulatory materials", "Sectoral codes of best practices for environmental safety ensuring in the Arctic region", "Methodical guidelines for NPSESA implementation at the enterprises", "The voluntary accession procedure to NPSESA", etc.

Methodological principles of NPSESA

Methodologically, NPSESA is based on the key principles of sustainable development theory. The main principle is "destruction of barriers" which recognizes the equivalence of social economic and environmental aspects of any activity when choosing a development strategy. Acting enterprises cannot profit earning at the expense of its economic or other activities that destroy viability of the local communities or cause the environmental harm. The embodiment of this principle pass through the entire document. Especially clearly it is shown by the example of the following sections of NPSESA [9]: section 4.4 "The principle of rights and interests accounting of native people – the legal and traditional rights of native people to own, use and manage their lands, territories and resources must be recognized and respected"; section 4.5 "The principle for reasonable nature management in the Arctic region – organization business 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" enclosing the NPSESA criterion 4.5.3 "Business activities of the certified organization 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"; section 4.6 "Minimization principle for negative impact on the environment – business activity maintained by the certified organization 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".

The composition and hierarchy of NPSESA principles is schematically shown in Fig.1.

Implementation of this principle in the organization plan of measures to ensure environmental safety should be reflected when planning any new 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 with the development of plans for improvement the ecological and social situation.

The NPSESA principles also correspond to the best existing practices in the field of corporate social responsibility (CSR). Social responsibility can be conditionally divided into five stages in accordance with model proposed by M. Porter and M. Kramer in [10]. Compliance with the NPSESA encourages functioning of enterprises according to the highest development stages of corporate social responsibility. This is both a strategic stage when the enterprise integrates CSR into its development strategy focusing on the long-term perspectives (principles 4.5, 4.7, 5 of NPSESA), and a civil stage when the enterprise makes efforts to promote the CSR principles (NPSESA) in the business community. That is carried out by supporting the awareness and demanding the enterprise suppliers to comply with the NPSESA.

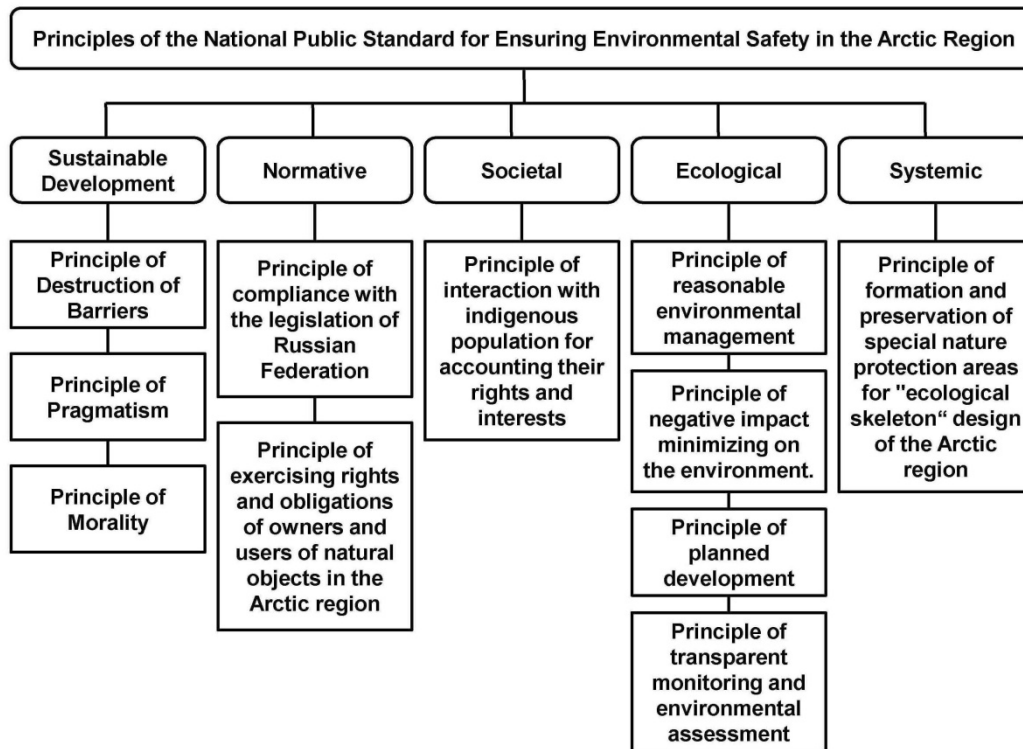


Fig. 1. General and special principles of NPSESA

The principle of transparent monitoring (section 4.8 of NPSESA) is relevant to the Global Reporting Initiative, GRI [11]. That requires more completely and regularly studying the impact of enterprise activities on the environment and local communities. The “Stakeholder Engagement Guide” introduced by the International Finance Corporation (IFC) has at large something in common with NPSESA certain criteria of which need consultations with local communities and accounting their opinions on a wide range of issues.

NPSESA regulates in detail the rules and principles for enterprises activity in the Arctic region. The systemic design principle of NPSESA does not differ up to much from existing international foreign standards (e.g. ISO 14001 “Environmental Management Systems”, ISO 18001 “Occupational Health and Safety Assessment Series”, etc.) which are voluntarily adopted by enterprises abroad. For the most part reporting is compiled on the data that are collected in accordance with the already existing requirements by acting and engaged organizations.

The most costly measures possible could be required for implementation of the “Transparent monitoring and environment impact assessment principle” (section 4.8 of NPSESA). However, since the NPSESA encloses the “Transparency principle” (section 5.3 of NPSESA) and involves updating procedure of the NPSESA statements, this obstacle can be removed. Thus, models and ways of interaction between various enterprises, public authorities and the population can be found which will provide reduction in value the fulfilling of this principle. Undoubtedly, the application will require additional organizational and educational arrangements.

Within NPSESA development, the scientific community should play the part of the key experts, all changes in the NPSESA should be scientifically grounded and built on the practice of regular monitoring of the NPSESA performance as a practical activity control. Scientific approach shall include the following processes:

- 1) ecological forecasting of environmental quality and its change under specific environmental policy impact;
- 2) scientifically grounded environmental planning, i.e. a strategy and detailed programs for environment protection and rational use of natural resources;
- 3) developing scientifically grounded methods for environmental economics control through law;
- 4) monitoring, development and standardization of environmental control approaches, keeping record of natural resources availability, quality and use;
- 5) expert services in environmental control in order to establish environment compliance and non-compliance with the applicable legal requirements;

6) providing environmental education, promoting environmental awareness and social in order to change the idea of consumption.

Ideological foundations of NPSESA

The key statements underlying foundations of the developed standard according to [9] are following:

- establishment and formalization of the clear and pliable environment-friendly rules of conduct for economic entities allocated and acting in the Arctic region;
- selection and composition of the metrics for environment-friendly rules of conduct analysis and assessment which assign guidelines to existing and incipient enterprises in the Arctic region;
- availability and application of the unified code of efficient practices and initiatives used by research, public and business entities and which are relevant to the current situation in the Arctic region;
- adherence and execution of the domestic and international norms and requirements in the Arctic region established in the field of environment protection and control;
- development of the novel institution to voluntary adoption of the environment-friendly rules of conduct for the all acting and incipient business entities in the Russian Arctic.

The NPSESA fundamentals composition is shown in Fig. 2.

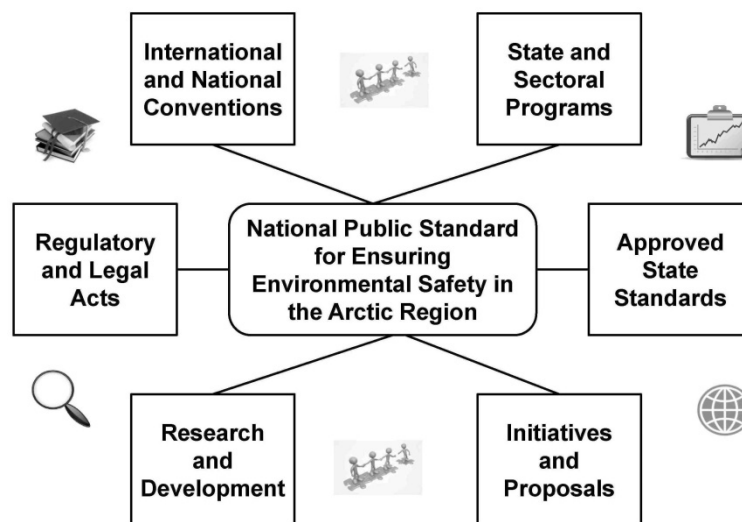


Fig. 2. Methodological and practical base of the NPSESA

The Arctic region of Russia with marine economic zone and continental shelf occupies 30% of the country's territory. Arctic region provides 12-15% of GDP of the Russia and about a quarter of export. 43% of Arctic region of the planet comes from Russian sector. This is nearly 9 million square kilometers. Over 2,5 million people are living here, which is 2% of the country's population and about 40% population of the Arctic.

Nowadays there are several groups of interests inherent to both governments and large companies operating in Arctic Region.

The group of economic interests is defined by:

- 1) High capacity hydrocarbon deposits that are technologically available now and capable of fulfilling the world's economy needs for a hundred years ahead on the proven reserves alone.
- 2) Potential hydrocarbon future deposits – methane hydrates not available at the moment due to the high cost of mining and processing, what makes the final product economically uncompetitive. However, in case of conventional reserves exhaustion and hydrocarbons cost growth, methane hydrates will be competitive even with modern technologies use.
- 3) Continental deposits of metallic and non-metallic fossils, which technological availability increases with the exhaustion of analogues in other climatic zones, changes in mining methods and climate change. Moreover, Arctic Region includes open mineral supplies that can now be considered as alternative raw material for nonferrous metals, alloys, new ceramic material.
- 4) Large stocks of freshwater.
- 5) Power generation from renewable sources – wind energy, tide energy, ocean biomass.

6) Traditional international zones of fishing recourses, as new marine bioresources, emerging on the market due to, first of all, decreasing of traditional recourses, and, secondly, development of the refining technologies of the nontraditional raw material which result in high quality protein products.

7) Possibility of the new safe transport schemes, such as “Northern Sea Route” which relevance is defined not only by reducing delivery distance from Asia to Europe, but also by safety in terms of piracy and terrorism, unlike Southern transport schemes, as well as by remoteness from dangerous areas in terms of military conflicts.

However, these economic advantages are partly leveled out by:

- climatic conditions;
- natural systems vulnerability;
- insufficient knowledge in functioning features of the Arctic natural resources in environment as well as global and regional climate change conditions;
- logistic risks, generally represented by the late delivery due to ice situation, low temperatures that prove dangerous for some goods;
- risks of the ice-related emergencies that demand special requirements to the constructions of ships, or to wiring;
- long distances between emergency and rescue centers, that results in extra costs for ship and cargo insurance.

Nevertheless, all these risks can be substantially reduced during the development of emergency and rescue infrastructure, ship wiring and storage technologies.

The group of military-strategic interests includes:

- 1) Protection of the social and economic interests during the mining of hydrocarbon resources and raw materials.
- 2) Protection of the national fishing vessels on the free territories for international fishing in Arctic region.
- 3) Protection of the territorial waters and marine territories from poaching and unauthorized access across 200 miles of Russian Arctic zone.
- 4) Deployment of strategic missiles as well as air defense and anti-submarine warfare components in Arctic region and on sea-based facilities as most desirable solution both in terms of approach time and secrecy.
- 5) Arranging logistically fast transfer of equipment and manpower through the country’s territory.
- 6) Deployment of non-nuclear defense equipment and rapid reaction force.

Ecological interests primarily arise from the fact that Arctic region is Northern hemisphere’s pollution collector. Global water and atmosphere transition of pollution from low latitudes in the context of climate change leads to the collection of polluting substances in different components of Arctic region environment and to reduce in its resilience to external shocks. Which, in turn, leads to exhaustion of biological resources, ecosystems sustainability on different levels, deterioration of the environment quality and to considerable constraints to ensuring the quality of life within Arctic native peoples, or the population engaged in natural resource extraction in Arctic region, and ultimately – reduce in the efficiency of economic activities. Moreover, development of knowledge in Arctic ecology gives extra possibilities for protection of national interests in international courts, during cases when both countries and companies are charged with inflection of environmental harm.

Ecological factors specific to Arctic region of Russia are:

- global climate changes decreasing Arctic ecosystems’ sustainability to external impacts;
- global and regional atmosphere pollution, resulting in global transition of major pollution “waves” to the Arctic;
- decrease in snow cover albedo;
- vulnerability of the Arctic environmental complexes and its dependence on global environmental changes;
- natural and technological transformation of geochemical background and a break in natural chemical elements biogeochemical cycles;
- damage caused and accumulated impact as a result of economic or another activity which can lead to climate destabilization, geochemical, cryolithological and environmental processes across large distances of Northern hemisphere;

- low potential and speed of self-cleaning and remediation of environmental compartments, including degradation of natural waters, soils, natural vegetation cover, biota in general;
- anthropogenic and natural infestation of new biological species, which can significantly violate biological diversity and ecosystems sustainability in general;
- specific environmental conditions requiring special, more energy-consuming technologies;
- industrial negative impact on flora and fauna of Arctic Region excluding possible ecological adaptation to new conditions;
- high value of biological resources and freshwater resources, which are key strategic reserves of freshwater on the planet;
- non-integrated use of natural resources and utilization of industrial waste;
- leakage of the extracted hydrocarbons and other emissions.

In the modern world there has been a continuous increase in international interest in the Arctic which is reflected in following:

- increase in the number of interdisciplinary studies, including explorational, geophysical, hydrological, oceanological, climatic, biological, ecological;
- increase in the number of inter-State disagreements and applications to international authorities concerning the question of owning the disputed territories of maritime shelf;
- increase in economic interest from the countries without direct access to the Arctic and arguments over ocean status and the Arctic territories;
- global collaborative research of 63 countries within the bounds of international program “International Polar Year” held from March 1, 2007 to March 1 2009 (IPY 2007/08).

The main reason for the need of this standard is that the current regulatory framework does not and fundamentally cannot reflect all aspects of the environmental management issues in the Arctic region. This is not due to regulatory framework’s flaws, but due to a great number of aspects that cannot be embedded in the law. There is not always a need to strictly control the activities, to reduce risks of environmental disasters – it is often enough to be guided by certain principles and regulatory framework’s consistency.

Furthermore, new principles and new risks will arise followed by an increase in the intensive use of Arctic region. Regulatory framework is unable to respond quickly to such changes, in this case, the standard, that includes the basic principles of environmental management and environmental security, may at least ensure socially acceptable activities in Arctic region, if not fully replace the law.

In order to establish a set of standards for Arctic region of Russia activities we need to finalize and formalize principles of the rational and efficient use of natural resources in the Arctic on the national level, excluding "Southern" technologies direct transfer without regional adaptation and approbation. In addition, the industrial approach to natural resources use in Arctic region should be replaced, as obsolete at this stage of development, since at the current division of labour it is impossible to solve all the problems of environmental safety within one single industry, let alone within one single enterprise. Primarily standardization should relate to the existing regulatory framework, which does not correspond to the document "Basic Principles of Russian State Policy in the Arctic until 2035" (approved by President of Russian Federation Decree no. 164, March 5, 2020) [12].

Thus, the following regulatory framework issues are to be resolved as a part of standardization process:

- multiplicity and narrowness of regulations, standards governing environmental issues of different trends, including ones that spread to Arctic region of the Russian Federation, but do not take into account its natural features;
- lack of accounting of international organizations’ environment protection initiatives in many industrial acts;
- lack of a mechanism for generating new knowledge about the structural and functional organization of the Arctic ecosystems, sustainability mechanisms and for integrating them into the existing legal acts, which have a regulatory nature for certain types of activities;
- lack of requirements on regional adaptation and extraction technologies testing and natural resources processing in Arctic region;
- lack of accounting mechanism for significant differences across Russian Arctic in all its extremely high diversity of landscapes and climatic conditions;

- lack of national basic documents as the basis for the formation of a highly specialized, sectoral regulations which have a territorial binding for the industries involved in the use of natural resources, and form their own regulatory framework;
- assessment approaches for allowable anthropogenic impact and Arctic ecosystems load are not developed;
- environmental impact expertise and assessment does not cover all proposed economic projects in Arctic region of Russia;
- special climatic conditions is not considered as a part of technical regulations for products that can be produced or consumed in Arctic region of Russia.

Based on the foregoing, the NPSESA shall exclude narrow or industrial approach, become the basic document for regional regulations as well as consider separate enterprise as an object of standardization.

National nature of the NPSESA is reflected in the fact that it is designed for independent territories of the Russian Arctic, taking into account the Russian legislation. In terms of functionality the NPSESA is a continuation of such documents as “Basic Principles of Russian State Policy the Arctic Region before 2020 and beyond” (approved by President of Russian Federation Order no. 1969, September 18, 2008) [13], “Russian Ecological Doctrine” (approved by President of Russian Federation Decree no. 1225, August 31, 2002) [14], “Russian Maritime Doctrine until 2020” (approved by President of Russian Federation Decree July 27, 2001) [15]. National nature of the NPSESA does not exclude adherence to standard of a foreign organizations working in the Russian Arctic.

The public nature of the NPSESA is expressed, first and foremost, in the idea of voluntariness, i.e., the NPSESA is not binding, however, organizations that accept the NPSESA, commit themselves to implement its criteria voluntarily, aware of the importance of preserving the integrity of the environment, compliance with safety standards and responsibility for the quality of life of future generations. Organization can independently check its conformity with the NPSESA and declare the acceptance of the NPSESA, using information in the Section 4 of NPSESA [9]. However, the functioning of the NPSESA as a system implies the creation of expert council, which will verify whether the activities of an organization comply with the NPSESA. Expert council shall be an elected body and consist of representatives of organizations that have already adopted the NPSESA, as well as academics and government officials. The expert council membership, size and authority are to be defined at the first meeting of its representatives willing to adopt the NPSESA.

Future challenges for development of natural resources of Arctic region and providing its environmental security are determined by the set of objectives specified in the document named “Basic Principles of Russian State Policy in the Arctic until 2035” [12]. The objectives include:

- implementation of competitive advantages of Russia in production and transportation of energy resources;
- structural adjustment of economy in the Arctic region of Russia on the basis of development of mineral and raw materials base and water biological resources in the region;
- upgrading of economic efficiency of using the mineral and raw material base and water biological resources of Arctic region through integrated approach and considering their natural characteristics;
- establishment and development of the North Sea Route infrastructure and communication administration system to meet any challenges of the Eurasian transit;
- completion of a unified information space of the Arctic region of Russian Federation;
- transformation of the Arctic region of Russia into the leading strategic resource base of the Russian Federation;
- adequate response to global environment and climate changes.

The basic approach to NPSESA implementation is its voluntary adoption. However, the incentive measures are possible that can be adopted at the regional level inclusive Arctic territories. Such measures could be participation terms for in contest to regional government procurement provision of goods and services. In addition, large-scale enterprises that have joined and adopted the NPSESA will involve their contractors and suppliers in similar actions. It is intended that during the five or seven years functioning under the NPSESA and applying it in day-to-day activity will become a strategic component of the enterprise corporate responsibility and culture.

One of the suitable means for NPSESA implementation in practice and its wide application would be the information system “An interactive map of environmental problems in the Barents Region” (<https://barentsmap.com/>) developed by Federal Research Center “Kola Science Center of the Russian

Academy of Sciences" under cooperation with the Project Office for Arctic Development, the metals and mining company "Nornickel" and the Faculty of Economics of Lomonosov Moscow State University. The system description and specific features are in detail discussed in studies [2, 4]. System functioning logic is based on the key principles and criteria of the NPSESA.

According to expert estimates, the system should provide situational awareness [3] enhancement in the field of environmental safety in the Arctic region and consistency of making managerial decisions in this area. That effect is obtained by general time reducing for relevant information acquisition, processing and analysis on the heterogeneous factors impact on the state of ecosystems in the Euro-Arctic region.

Conclusion

The Arctic region and its constituent territories are a strategically important area and object of the national economy and defensive power of Russia. Novel technological challenges and features for the development and exploration of traditional types of resources and new types of resources emergence as well as partially or completely depletion of resources at lower latitudes, especially biological resources, and the outlined accessibility for exploration of the previously unusable ocean area due to the constant ice cover in view of the global warming processes, in many respects caused a burst of activity among all the participants in development of the Arctic region. However, nowadays, there is no unified international document that would define any standards of activity ensuring environmental safety in the Arctic region. This significant fact plays not the last and may be key role of the growing global interest in the Russian Arctic.

Our country is an Arctic state with the largest area of the Arctic territories in the world. Therefore, according to many experts Russia should have a fundamental document of national nature that would define the standards for environmentally safe activities in the Arctic region. It is important, since there could not be any economic activity without environmental safety which is the basis for sustainable development of the country. At the same time, the existing regulatory framework does not reflect and, in principle, cannot reflect all aspects of nature management in the Arctic region. This is not due to regulatory framework is imperfect, but due to a great number of aspects that cannot be embedded in the law. There is not always a need to strictly control the activities. It is often enough to be guided by certain principles and regulatory framework's consistency to reduce risks of environmental disasters. The adoption of a unified environmental-friendly standard by the Arctic countries can become one of the most essential objectives of the Russian Federation activities in the upcoming period of its Chairmanship in the Arctic Council.

Primary standpoints and contributions of our study and generated guidelines to regional government and enterprise decision-makers on its basis are used under implementation of the «Strategy for Arctic region of Russian federation development and national security ensuring until 2035» (approved by President of Russian Federation Decree no. 645, October 26, 2020) [16] in Murmansk region within the development of information, analytical and normative support of the environmental safety in this region, which is strategically important for the Russian Arctic as a whole.

References

1. Masloboev V.A., Klyuchnikova E.M. On the development of the public standard "Environmental safety of the Arctic". *Arktika 2035: aktual'nye voprosy, problemy, resheniya = Arctic 2035: topical issues, problems, solutions*. 2020;(2):38–44. (In Russ.)
2. Ryabova L.A., Klyuchnikova E.M., Borovichev E.A., Masloboev V.A. Civil science as an information support tool for decision-making in the Russian Arctic under climate change. *Sever i rynek: formirovanie ekonomicheskogo poryadka = The North and the market: the formation of an economic order*. 2020;(3):40–55. (In Russ.)
3. Masloboev A.V., Putilov V.A. *Informatsionnoe izmerenie regional'noy bezopasnosti v Arktike* = . Apatity: KNTs RAN, 2016:222. (In Russ.)
4. Masloboev A.V., Masloboev V.A. Information system "Interactive map of ecological samples of the Barents region". *Informatsionnye resursy Rossii = Information resources of Russia*. 2020;(4):8–13. (In Russ.)
5. Burkov V.N., Novikov D.A., Shchepkin A.V. Control Mechanisms for Ecological-Economic Systems. *Studies in Systems, Decision and Control*. 2015;10:166.
6. Yurkov N.K., Mikhaylov V.S. *Integral'nye otsenki v teorii nadezhnosti, vvedenie i osnovnye rezul'taty*. Ser.: *Mir matematiki = Integral estimates in reliability theory, introduction and main results*. Ser.: *The World of Mathematics*. Moscow: Tekhnosfera, 2020:152. (In Russ.)
7. Rød B. [et al.]. Evaluation of resilience assessment methodologies. *Safety and Reliability, Theory and Applications*. Boca Raton: CRC Press, 2018:1039–1051.

8. Uitto J. I., Shaw R. [ed.]. *Sustainable Development and Disaster Risk Reduction*. Springer Japan, 2016:287.
9. Kashulin N. A., Masloboev V. A. [ed.]. *Natsional'nyy obshchestvennyy standart «Ekologicheskaya bezopasnost' Arktiki» = National public standard "Environmental safety of the Arctic"*. Moscow: Libri Plyus, 2016:88. (In Russ.)
10. Porter M.E., Kramer M.R. Strategy and society: the link between competitive advantage and corporate social responsibility. *Harvard Business Review*. 2006;84(12):78–92.
11. Senatorova E.A. Non-financial reporting: International context, Russian practice. *Korporativnye finansy = Corporate Finance*. 2018;12(3):80–92. (In Russ.)
12. *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>
13. *Osnovy gosudarstvennoy politiki Rossiyskoy Federatsii v Arktike na period do 2020 goda i dal'neyshuyu perspektivu = Fundamentals of the state policy of the Russian Federation in the Arctic for the period up to 2020 and the long term*. (In Russ.). Available at: <http://static.government.ru/media/files/A4qP6brLNI175140U0K46x4SsKRHGfUO.pdf>
14. *Ekologicheskaya doktrina Rossiyskoy Federatsii = Environmental Doctrine of the Russian Federation*. (In Russ.). Available at: https://www.mid.ru/foreign_policy/official_documents/-/asset_publisher/CptICk6BZ29/content/id/548754
15. *Morskaya doktrina Rossiyskoy Federatsii na period do 2020 goda = The Maritime Doctrine of the Russian Federation for the period up to 2020*. (In Russ.). Available at: <http://kremlin.ru/supplement/1800>
16. *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>

Список литературы

1. Маслобоев В. А., Ключникова Е. М. О разработке общественного стандарта «Экологическая безопасность Арктики» // *Арктика 2035: актуальные вопросы, проблемы, решения*. 2020. № 2. С. 38–44.
2. Рябова Л. А., Ключникова Е. М., Боровичев Е. А., Маслобоев В. А. Гражданская наука как инструмент информационного обеспечения принятия решений в российской Арктике в условиях изменения климата // *Север и рынок: формирование экономического порядка*. 2020. № 3. С. 40–55.
3. Маслобоев А. В., Путилов В. А. Информационное измерение региональной безопасности в Арктике. Апатиты : КНЦ РАН, 2016. 222 с.
4. Маслобоев А. В., Маслобоев В. А. Информационная система «Интерактивная карта экологических проблем Баренц-региона» // *Информационные ресурсы России*. 2020. № 4. С. 8–13.
5. 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.
6. Юрков Н. К., Михайлов В. С. Интегральные оценки в теории надежности, введение и основные результаты. Сер.: Мир математики. М. : Техносфера, 2020. 152 с.
7. Rød B. [et al.]. Evaluation of resilience assessment methodologies // *Safety and Reliability, Theory and Applications* / ed. by M. Cepin, R. Briš. Boca Raton : CRC Press, 2018. P. 1039–1051.
8. *Sustainable Development and Disaster Risk Reduction* / ed. by J. I. Uitto, R. Shaw. Springer Japan, 2016. 287 p.
9. Национальный общественный стандарт «Экологическая безопасность Арктики» / под ред. Н. А. Кашулина, В. А. Маслобоева. М. : Libri Плюс, 2016. 88 с.
10. Porter M. E., Kramer M. R. Strategy and society: the link between competitive advantage and corporate social responsibility // *Harvard Business Review*. 2006. Vol. 84, № 12. P. 78–92.
11. Сенаторова Е. А. Нефинансовая отчетность: международный контекст, российская практика // *Корпоративные финансы*. 2018. Т. 12, № 3. С. 80–92.
12. Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года. URL: <http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/f8ZpjhpAaQ0WB1zjywN04OgKiI1mAvaM.pdf>
13. Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 года и дальнейшую перспективу. URL: <http://static.government.ru/media/files/A4qP6brLNI175140U0K46x4SsKRHGfUO.pdf>
14. Экологическая доктрина Российской Федерации. URL: https://www.mid.ru/foreign_policy/official_documents/-/asset_publisher/CptICk6BZ29/content/id/548754
15. Морская доктрина Российской Федерации на период до 2020 года. URL: <http://kremlin.ru/supplement/1800>
16. 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/J8FhckYOPAQQfxN6Xlt6ti6XzpTVAvQy.pdf>

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Владимирович Маслобоев

доктор технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник,
Институт информатики и математического
моделирования технологических процессов
Кольского научного центра Российской академии наук
(Россия, Апатиты, ул. Ферсмана, 24А)
E-mail: andrejmasloboev@mail.ru

Andrey V. Masloboev

Doctor of technical sciences, associate professor,
leading researcher,
Institute of Informatics and Mathematical Modelling
of Technological Processes of Kola Science Centre
of the Russian Academy of Sciences
(24A Fersmana street, Apatity, Russia)

Владимир Алексеевич Маслобоев

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
Институт проблем промышленной экологии Севера
Кольского научного центра Российской академии наук
(Россия, г. Апатиты, ул. Ферсмана, 14)
E-mail: v.masloboev@ksc.ru

Vladimir A. Masloboev

Doctor of technical sciences, professor, chief researcher,
Institute of North Industrial Ecology Problems
of 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 15.06.2021

Поступила после рецензирования / Revised 11.08.2021

Принята к публикации / Accepted 04.10.2021